



**HAVA H ARP OKULU
HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ
ENSTİTÜSÜ**



**DİNAMİK SİSTEMLER İÇİN GERÇEK ZAMANDA BULANIK MANTIKLA
KONTROLÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan GÜL

Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanlığı

Kontrol Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hv .Müh. Alb. Aydemir ARISOY

TEMMUZ 2012

HAVA HARP OKULU
HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİNAMİK SİSTEMLER İÇİN GERÇEK ZAMANDA BULANIK MANTIKLA
KONTROLÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan GÜL
(210102)

Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanlığı

Kontrol Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hv .Müh. Alb. Aydemir ARISOY

TEMMUZ 2012

Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsünün 210102 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gökhan GÜL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DİNAMİK SİSTEMLER İÇİN GERÇEK ZAMANDA BULANIK MANTIKLA KONTROLÖR TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç.Dr. Hv. Müh.Alb. Aydemir ARISOY**
Hava Harp Okulu

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hv. Müh.Alb.Abdurrahman HACIOĞLU**
Hava Harp Okulu

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. S. Murat YEŞİOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **18 Haziran 2012**
Savunma Tarihi : **06 Temmuz 2012**

Bu tez çalışmasında belirtilen görüş ve yorumlar yazara aittir. Türk Silahlı Kuvvetleri'nin ya da diğer kamu kuruluşlarının görüşlerini yansıtmaz. Ayrıca bu tez çalışması bilimsel ahlak ve etik değerlere uygun olarak yazılmış olup, yararlanılan tüm eserler kaynaklarda gösterilmiştir.

Temmuz 2012

İmza
Gökhan GÜL

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın oluşması sırasında bilgi ve desteğini benden esirgemeyen, yönlendirmeleriyle bana yardımcı olan öncelikle tez danışmanım Yrd.Doç.Dr.Hv. Müh.Alb. Aydemir ARISOY'a, yüksek lisans eğitimim boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen Enstitü Müdürümüz Alb. Mustafa İLARSLAN'a tezin oluşması aşamasında benden yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen Yzb. Kemal BAYRAKÇEKEN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bugüne kadar desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, attığım her adımda yanımda olan eşim Fatma GÜL'e sonsuz teşekkürler.

Temmuz 2012

Gökhan GÜL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Kapsamı.....	1
1.2 Çalışmanın Katkıları	2
2. MATEMATİKSEL MODELLER.....	5
2.1 DC Motor Matematiksel Modeli	5
2.2 Dört Rotorlu Hava Aracı Matematiksel Modeli.....	7
3. BULANIK MANTIKLA KONTROLÖR TASARIMI.....	15
3.1 Bulanık Mantık Nedir?	17
3.2 Bulanık Mantığın Avantajları.....	17
3.3 Bulanık Kümeler	18
3.4 Tanım Uzayı.....	19
3.5 Üyelik İşlevi	19
3.5.1 Üçgen üyelik işlevi	20
3.5.2 Yamuk üyelik işlevi.....	20
3.5.3 Gauss üyelik işlevi.....	21
3.5.4 Çan üyelik işlevi	22
3.5.5 Sigmoid üyelik işlevi	22
3.6 Singleton.....	23
3.7 Dilsel Değişkenler	23
3.8 Bulanık Kümeler Üzerinde İşlemler	23
3.8.1 Kesişim ($A \cap B$).....	24
3.8.2 Birleşim ($A \cup B$)	25
3.8.3 Tümleme ($\bar{A}$)	26
3.9 Bulanık Kontrol.....	26
3.9.1 Bulanık kontrolün temelleri	26
3.9.1.1 Bulandırıcı	27
3.9.1.2 Çıkarım motoru	27
3.9.1.3 Bilgi tabanı	28
3.9.1.4 Kural tabanı	28
3.9.1.5 Durulandırıcı	28
3.9.2 Kural tabanının oluşturulması.....	28
3.9.3 Bulanık çıkarım	29
3.10 DC Motor İçin Önerilen Bulanık Kontrolör	30

3.10.1 Üyelik fonksiyonları	30
3.11 Dört Rotorlu Hava Aracı İçin Önerilen Bulanık Kontrolörler	32
3.11.1 Yalpalama ve yunuslama için üyelik fonksiyonları	32
3.11.2 Sapma için üyelik fonksiyonları	34
4. GERÇEK ZAMANLI DENEY ORTAMI	39
4.1 DC Motor Deney Düzenegi.....	39
4.2 Dört Rotorlu Hava Aracı Deney Düzenegi	40
5. DENEYSEL SONUÇLAR	43
5.1 DC Motor Kontrolü İçin Bulanık Kontrolör Deney Sonuçları.....	43
5.1.1 Üyelik fonksiyonu ve durulayıcı yönteminin belirlenmesi.....	43
5.1.2 DC Motor konum kontrolü	45
5.1.3 DC Motor yörünge kontrolü	47
5.2 Dört Rotorlu Hava Aracı Bulanık Kontrol DeneySEL Sonuçlar	48
5.2.1 Dört rotorlu hava aracı konum kontrolü	48
5.2.2 Dört rotorlu hava aracı yörünge kontrolü	54
5.2.3 Tasarlanan kontrolör için durum çalışması deney sonuçları	56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ	71

KISALTMALAR

PID	: Oransal-Integral-Türev
DSP	: D-Space
DC	: Doğru Akım
BMK	: Bulanık Mantık Kontrolör
NB	: Negatif Büyük
NM	: Negatif Orta
NS	: Negatif Küçük
Z	: Sıfır
PS	: Pozitif Küçük
PM	: Pozitif Orta
PB	: Pozitif Büyük

SEMBOL LİSTESİ

R_a	: Toplam Armatür Direnci [Ω]
L_a	: Armatür Endüktansı [Henry]
I_a	: Armatür Akımı [A]
V_b	: Ters Emk [V]
w(t)	: Rotorun Açısal Hızı [Rad/sn]
T_g	: Motorun Momenti [Nm]
K_t	: Moment Sabiti
J_t	: Toplam Atalet [kgm^{-2}]
B	: Rotor Viskoz Sürtünme Katsayısı
T_f	: Motor ve Yükün Ters Yönde Etki Eden Sürtünme Momenti [Nm]
T_{gr}	: Yerçekimine Bağlı Yük Momenti [Nm]
V_m	: Motor Giriş Voltajı [V]
z	: Hava Aracının Düşey Doğrultudaki Konumu [m]
x	: Hava Aracının Yatay Düzlemdeki Konum Bileşeni [m]
y	: Hava Aracının Yatay Düzlemdeki Konum Bileşeni [m]
ψ	: Hava Aracının Sapma Açısı [Rad]
θ	: Hava Aracının Yunuslama Açısı [Rad]
φ	: Hava Aracının Yalpalama Açısı [Rad]
m	: Hava Aracının Ağırlığı [kg]
l	: Rotorla Dört Rotorlu Hava Aracının Merkezi Arası Mesafe [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]
F_T	: Toplam Kaldırma Kuvveti [N]
R	: Rotasyon Matrisi
J	: Hava Aracına Etkiyen Cayroskopik Etki
b	: Motorlara Etkiyen Düşey Doğrultudaki İtme Kuvveti

d	: Sürükleme Faktörü
Ω	: Pervane Açısal Hızı [Rad/sn]
μ	: Bulanık Kontrolcü Üyelik Derecesi
σ	: Varyans

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1 : Kural Çizelgesi.....	32
Çizelge 2 : Yalpalama Ve Yunuslama İçin Kural Çizelgesi.....	34
Çizelge 3 : Sapma İçin Kural Çizelgesi.....	36

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : DC servo motorun elektriksel devresi	5
Şekil 2.2 : Dört Rotorlu Hava Aracı Modeli.....	7
Şekil 3.1 : Üçgen Üyelik İşlevi.....	20
Şekil 3.2 : Yamuk Üyelik İşlevi	21
Şekil 3.3 : Gauss Üyelik İşlevi	21
Şekil 3.4 : Çan Üyelik İşlevi.....	22
Şekil 3.5 : Sigmoid Üyelik İşlevi.....	23
Şekil 3.6 : A kümesinin üyelik işlevi.....	24
Şekil 3.7 : B kümesinin üyelik işlevi	24
Şekil 3.8 : Kesişim İşlemi.....	25
Şekil 3.9 : Birleşim İşlemi	25
Şekil 3.10 : Tümleme İşlemi.....	26
Şekil 3.11 : Bulanık Denetim Sistemi	27
Şekil 3.12 : Hata Üyelik Fonksiyonu.....	30
Şekil 3.13 : Hatanın Türevi Üyelik Fonksiyonu.....	30
Şekil 3.14 : Çıkış Üyelik Fonksiyonu.....	31
Şekil 3.15 : Kontrol Yüzeyi	31
Şekil 3.16 : DC Motor Bulanık Kontrol Deney Modeli	32
Şekil 3.17 : Yalpalama ve Yunuslama Hata Üyelik Fonksiyonu	33
Şekil 3.18 : Yalpalama ve Yunuslama Hatanın Türevi Üyelik Fonksiyonu	33
Şekil 3.20 : Yalpalama ve Yunuslama Kontrol Yüzeyi.....	34
Şekil 3.21 : Sapma Hata Üyelik Fonksiyonu.....	35
Şekil 3.22 : Sapma Hatanın Türevi Üyelik Fonksiyonu	35
Şekil 3.23 : Sapma Çıkış Üyelik Fonksiyonu.....	36
Şekil 3.24 : Sapma Kontrol Yüzeyi	36
Şekil 3.25 : Dört Rotorlu Hava Aracı Deney Modeli	37
Şekil 3.26 : Bulanık Kontrolör Yapısı	37
Şekil 4.1 : DC Motor İşleyiş Şeması	39
Şekil 4.2 : DC Motor Deney Düzenegi.....	40

Şekil 4.3 : DC Motor Gerçek Zamanlı Sistem Dizaynı	40
Şekil 4.4 : Dört Rotorlu Hava Aracı İşleyiş Şeması	41
Şekil 4.5 : Dört Rotorlu Hava Aracı Deney Düzeneği	41
Şekil 4.6 : Dört Rotorlu Hava Aracı Gerçek Zamanlı Sistem Dizaynı	42
Şekil 5.1 : Durulaştırıcı Bisector İken	44
Şekil 5.2 : Durulaştırıcı Centroid İken.....	44
Şekil 5.3 : Basamak Giriş Karşılaştırma	45
Şekil 5.4 : Bulanık Kontrolör Kontrol İşareti	46
Şekil 5.5 : PID Kontrol İşareti	46
Şekil 5.6 : Sinüs Karşılaştırma.....	47
Şekil 5.7 : Bulanık Kontrol İşareti	47
Şekil 5.8 : PID Kontrol İşareti	48
Şekil 5.9 : Birim Basamak Giriş Bulanık Kontrolör Cevabı	49
Şekil 5.10 : Birim Basamak Giriş PID Kontrolör Cevabı.....	49
Şekil 5.11 : Birim Basamak Giriş Yalpalama Ekseninde Karşılaştırma.....	49
Şekil 5.12 : Birim Basamak Giriş Yunuslama Ekseninde Karşılaştırma.....	50
Şekil 5.13 : Birim Basamak Giriş Sapma Ekseninde Karşılaştırma	50
Şekil 5.14 : Dayanıklılık Testi Bulanık Kontrolör Cevabı	51
Şekil 5.15 : Dayanıklılık Testi PID Kontrolör Cevabı.....	51
Şekil 5.16 : Dayanıklılık Testi Yalpa Ekseninde Karşılaştırma	52
Şekil 5.17 : Dayanıklılık Testi Yunuslama Ekseninde Karşılaştırma.....	52
Şekil 5.18 : Dayanıklılık Testi Sapma Ekseninde Karşılaştırma	53
Şekil 5.19 : Dayanıklılık Testi Kontrol İşaretleri Karşılaştırma	54
Şekil 5.20 : Yörünge Kontrolü İçin Bulanık Kontrolör Cevabı.....	54
Şekil 5.21 : Yörünge Kontrolü İçin PID Kontrolör Cevabı.....	55
Şekil 5.22 : Yörünge Kontrolü Yalpalama Ekseninde Karşılaştırma	55
Şekil 5.23 : Yörünge Kontrolü Yunuslama Ekseninde Karşılaştırma	55
Şekil 5.24 : Yörünge Kontrolü Sapma Ekseninde Karşılaştırma.....	56
Şekil 5.25 : Durum Çalışması Yalpalama Ekseninde Karşılaştırma	56
Şekil 5.26 : Durum Çalışması Sapma Ekseninde Karşılaştırma.....	57

DİNAMİK SİSTEMLER İÇİN GERÇEK ZAMANDA BULANIK MANTIKLA KONTROLÖR TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmanın amacı; matematiksel modelleri itibariyle doğrusal ve doğrusal olmayan yapıdaki dinamik sistemler için bulanık mantık ile kontrolör tasarlamak ve tasarlanan kontrolörleri gerçek zamanda deneysel olarak gerçekleyerek doğrulamaktır. Bu kapsamda tasarlanan bulanık kontrolörlerin performansları, aynı dinamik sistemler için tasarlanmış olan klasik PID kontrolörlerin performansları ile karşılaştırılmıştır. Gerçek zamanda parametre ayarlamaya olanak sağlayan deneysel ortamda kontrolörler gerçekleştirilmiş ve performansları değerlendirilmiştir.

Öncelikle bu çalışmada dinamik sistem olarak ele alınan bir DC motor ve dört rotorlu hava aracının matematiksel modelleri verilmiştir. Matematiksel modeli itibari ile daha basit yapıda olan ve dinamik sistem olarak ele alınan DC motor için yeni bir bulanık kontrolör tasarımı yapılmıştır. Dinamik modeli itibari ile daha karmaşık yapıda olan dört rotorlu hava aracı için de aynı şekilde iki adet birbirinden bağımsız bulanık kontrolör tasarlanmıştır. Ayrışamayan doğrusal olmayan dinamikleri itibariyle ilgi çekici bir yapıda olan dört rotorlu hava aracı konum ve yörünge kontrolü için gerçek zamanda sistem davranışı göz önüne alınarak özgün yapıda bulanık kontrolörler tasarlanmıştır. Bulanık mantık yönteminin özünde olan uzman bilgisi ve gerçek zamanda yapılan deneyler sonucunda yapılan çıkarımlarla özellikle üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi sağlanmıştır. Böylelikle farklı matematiksel yapılardaki dinamik sistemlerin kontrolü için gerçek zamanlı deneysel ortamlarla etkin bir bulanık kontrolör tasarımı yapılabileceği gösterilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında bulanık mantığın tarihçesine kısaca değinilmiş ve bulanık mantığın temelleri özetle anlatılmıştır. Temel bilgilerin verilmesinden sonra bulanık kontrol çalışma prensibi ayrıntılı bir şekilde anlatılıp ele alınan dinamik sistemler için tasarlanan kontrolörler açıklanmıştır.

Bu çalışmada özellikle gerçek zamanlı parametre değiştirmeye uygun, ele alınan dinamik sistemleri içinde bulunduran deney düzenekleri ve işleyişi ayrıntılı olarak tanıtılmıştır. Kullanılan deney düzenekleri MATLAB/SIMULINK programı ile eş zamanlı çalışabilmesi nedeniyle esnek bir şekilde kontrolör tasarımına ve tasarlanan kontrolörün hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Kullanılan arayüz programı gerçek zamanlı olarak parametre ayarlamaya olanak sağlanmakta, sonuçların yine gerçek zamanda grafiksel olarak gözlenebilmesine imkân vermektedir. Deney sonuçlarının MATLAB ortamına alınabilmesine ve daha sonra analizine imkân sağlamaktadır.

Çalışmanın deneysel sonuçlar bölümünde ise tasarlanan kontrolörlerin performans değerlendirmesi konum ve yörünge kontrolü için yapılmıştır. Aynı deneysel ortam kullanılarak tasarlanan klasik PID kontrolörü ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan kontrolörlerin dayanıklılık deneyleri üretilen darbe fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan bulanık kontrolörün performansının PID kontrolör yapısına göre hem yörünge takibi hem de sistem dayanıklılığı açısından performansı ele alındığında ele alınan dinamik sistemin matematiksel yapısı itibariyle doğrusal olmayan dinamikleri arttıkça daha başarılı olabileceği gözlenmiştir. Tasarım sürecinde yoğun matematiksel işlemler gerektirmeyen bulanık mantık kontrolörlerin doğrusal olmayan dinamik sistemlerin kontrolü için günümüz mikroişlemci teknolojisindeki gelişmelerde göz önüne alındığında tasarımı ve gerçeklenmelerinin hızlı ve basit olduğu değerlendirilmektedir.

FUZZY LOGIC CONTROLLER DESIGN FOR DYNAMIC SYSTEMS IN REAL TIME

SUMMARY

The purpose of this study is to design and verify a fuzzy logic controller for systems that are linear or nonlinear due to their mathematical models in real time experimental setup. In this sense performances of the fuzzy controllers were compared with the performances of PID controllers that were designed for the same dynamics. Controllers were verified and their performances were augmented in an experimental setup that facilitates to set parameters in real time.

In recent years multiple rotor mini VTOL (Vertical take-off and land) UAVs (Unmanned air vehicles) especially four rotor platforms named quadrotor have become very popular among researchers, academicians and hobbyists. This popularity is based on several advantages of the platform when compared to helicopters or winged aerial vehicles. Some of these advantages are; the mechanical complexity is reduced because there are no moving parts except for the rotors, the platform is easily maintained in a laboratory environment.

In a closer look at PD control architecture, system mass parameters are directly used in inverse kinematic equations to derive the control signals and related rotor speed inputs. Also there are high order derivatives in the equations of motions. These two factors make the system vulnerable to sensor noise, parameter errors due to mechanical imperfections and high levels of control error signals. It can easily be deducted that PD will only perform good in a region close to linear operating point where roll, pitch, yaw angles and their rates are close to zero. Here fuzzy control approach is supposed to surpass overall PD performance by means of robustness. Fuzzy control naturally covers up the above disadvantages of PD control.

The contribution of this study is to clearly demonstrate a comparison of PD and fuzzy control performances of a 3DOF quadrotor and DC motor with detailed graphical analysis. Step excitation is used to show the robustness while sinusoidal input is used to present the trajectory tracking performance. In fuzzy control approach steady state error was lower, settling time was shorter and the system reacted better to large reference errors as expected. Detailed analyses were given in 'Experimental Results' section.

In this study firstly a simple fuzzy controller was designed by using Fuzzy Toolbox for a DC motor. Then it was improved by using real-time experiment set. Membership Functions were fine-tuned and scaling constants were optimized by the help of real-time experimentation. After that with the help of the experience that were gained two other fuzzy controllers were designed and improved in real time.

Primarily in this study mathematical model of DC motor and quadrotor, which had been chosen as dynamic systems, were given. A new fuzzy controller was designed for DC motor which is simple due to mathematical model. In the same way two new controllers, that were independence in each other, were designed for quadrotor which

is more complex than DC motor due to its dynamic model. Unique controllers were designed by considering the system behavior in real time for position and trajectory control of a Quadrotor which is attractive due to the nonlinear dynamics that can't decompose. Especially membership functions were designated by the help of expert information which is in substance of fuzzy logic and inferences of real time experiments. Thus it was pointed out that an efficient fuzzy controller for the control of different types of dynamic systems can be designed by using real time experimental environment.

In this thesis the history of fuzzy logic was presented shortly and the principles of fuzzy logic was put in a nutshell. In section three advantages of fuzzy logic were given with basic information. After giving the basic information, the working principle of fuzzy logic was described in details and controllers that were designed for the dynamic systems were explained. Fuzzy controllers membership functions were explained in details. Also control surfaces and rule bases of fuzzy controllers were explained in details. Seven membership functions were proposed for all inputs and outputs. So that all fuzzy controllers were formed with forty-nine rules.

The mechanism and experimental setups which were especially facilitates to set parameters in real time and maintained the dynamic systems that were chosen were presented. Because of the experimental setups that were used and MATLAB/SIMULINK program were working synchronously, it facilitated to design and verify controller in a flexible way. The user interface program facilitates to set parameters and to observe results on graphics in real time. Also this user interface allowed to export experiment results to MATLAB and to analyze them.

In experimental results section of this study fuzzy controller's performance evaluation was done for position control and trajectory pursuit and compared with PID controller's performance which was designed by using the same experimental environment. For position control step signal was used as a reference signal. Sinus signal was also used in trajectory control of dynamic systems. In robustness tests of controllers, pulse signal was used as reference signal. All experiments were done with 100 Hz and 0.0075 was used as step time.

After experiments an oscillation appeared in the system response of fuzzy controller. That oscillation depended on dimension of definition space. It was seen that when the definition space dimensions became small the oscillation in the system response got lower. But it was limited by dynamics.

Fuzzy controller with nine rules could not control quadrotor while it could control DC motor. Because of this fuzzy controller with twenty-five rules was applied quadrotor. But it could not control quadrotor well. Finally fuzzy controller with forty-nine rules controlled quadrotor well.

Under the lights of the results that were presented in this thesis it can be said that fuzzy controller trajectory tracking performance is better than PID controller for all axes. Fuzzy controller omega outputs are smoother than PID controller omega outputs. PID will only perform well in a region close to linear operating point where roll, pitch, yaw angles and their rates are close to zero. Here fuzzy control approach is supposed to surpass overall PID performance by means of robustness.

When nonlinear dynamics of system due to mathematical model are increasing, designed fuzzy controller trajectory pursuit and robustness performance is getting better than PID controller's performance. When the improvement in microprocessor

technology is considered, fuzzy logic controller, which do not require dense mathematical operations in design process, design and verification for the control of nonlinear dynamic systems is very simple and fast.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmanın amacı; matematiksel modelleri itibariyle doğrusal ve doğrusal olmayan yapıdaki dinamik sistemler için bulanık mantık ile kontrolör tasarlamak ve tasarlanan kontrolörleri gerçek zamanda deneysel olarak gerçekleyerek doğrulamaktır.

Doğrusal olmayan ve yüksek dereceli doğrusal olmayan dinamik sistemler için kontrolcü tasarımı, son yıllarda oldukça ilgi çeken ve üzerinde ciddi çalışmalar yapılan bir araştırma sahası olmuştur. Literatüre bakıldığında doğrusal olmayan dinamik sistemler için tasarlanmış geleneksel PID, kendinden ayarlamalı PID, Adaptif PID ve bulanık kontrolörler bolca bulunmaktadır[1-7]. Bir DC motorun pozisyon kontrolü için tasarlanmış olan bulanık kontrolör ve PID kontrolör sistem benzetim yanıtları karşılaştırılmış ve PID 'nin bulanık kontrolöre nazaran daha zayıf kaldığı sonucuna varılmıştır[1,7]. Diğer bir benzetim çalışmasında da bulanık kontrolörün daha az aşım yaptığı ve daha erken yerleşme zamanına sahip olduğu sonucuna varılmıştır[2]. Diğer bir gerçek zamanlı çalışmada da PID kontrolör aşımında bulanık kontrolöre nazaran iyi sonuç verirken yerleşme zamanı ve sürekli hal hatası açısından bulanık kontrolör PID kontrolöre göre daha iyi sonuç vermiştir[3]. Bulanık kontrolör tasarımında daha iyi sistem yanıtı elde edebilmek için katsayıların çok iyi belirlenmesi gerekir. Bu katsayılar PID metodunda Ziegler Nichols Metodu ile bulunabilirken bulanık kontrolör için deney yaparak deneme yanılma yöntemi ile bulunabilir veya Taguchi Metodundan da faydalanmak mümkündür. En uygun değerler için bulanık kontrolör PID kontrolöre karşı daha iyi sistem cevabı vermiştir[4,8]. Diğer yandan bulanık kontrolördeki kural sayısının ve üyelik fonksiyonlarının sayısının artması sistemdeki salınımları azaltıp sistemin kararlılığı arttırmaktadır[5]. Bulanık kontrolcünde üyelik fonksiyonlarının tanım uzayı sistem cevabını doğrudan etkilemektedir. Eğer verilen giriş değerleri sistemdeki üyelik fonksiyonlarının aralığına girmezse kural ateşlemesi olmayacağından bu aralığın ayarlanması çok önem arz etmektedir[6]. Yüksek dereceli doğrusal olmayan sistemlerden dört pervaneli insansız hava aracının üç eksen de kontrolünün

yapılabilmesi için birçok geleneksel PID ve Bulanık kontrolör önerilmiştir[9-12]. Simülasyon ortamında gerçekleşen çalışmada bulanık kontrolörün PID kontrolöre nazaran daha iyi sonuçlar verdiği, PID kontrolöre giriş olarak zamanla değişen bir sinyal verildiğinde ve bu girişe gürültü eklendiğinde sistemin salınıma girmeye başladığı gözlenmiştir[12]. Diğer bir çalışmada ise dört rotorlu insansız hava araçları üzerindeki kontrole etki eden faktörler ve sistemin kontrolü gerçek zamanlı olarak kablosuz iletişimle gerçekleşmiştir[14].

1.2 Çalışmanın Katkıları

Dinamik modeli itibari karmaşık yapıda olan dört rotorlu hava aracı için iki adet birbirinden bağımsız bulanık kontrolör tasarlanmıştır. Ayrışamayan doğrusal olmayan dinamikleri itibariyle ilgi çekici bir yapıda olan dört rotorlu hava aracı konum ve yörünge kontrolü için gerçek zamanda sistem davranışı göz önüne alınarak özgün yapıda bulanık kontrolörler tasarlanmıştır.

Bulanık mantık yönteminin özünde olan uzman bilgisi, gerçek zamanda yapılan deneyler sonucunda yapılan çıkarımlarla özellikle üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi sağlanmıştır. Böylelikle farklı matematiksel yapılardaki dinamik sistemlerin kontrolü için gerçek zamanlı deneysel ortamlarla etkin bir bulanık kontrolör tasarımı yapılabileceği gösterilmiştir.

Sistemin kontrolü için tasarlanmış olan bulanık kontrolörün üyelik fonksiyonlarının birbirlerini simetrik olarak kestiği durumda sistemde bir titreşim meydana geldiği ortaya çıkmış, bu titreşimin engellenmesi için sıfır ve yakın değerlerindeki üyelik fonksiyonlarının daha sık diğer uç noktalardaki olanların ise biraz daha seyrek olması gerekliliği yapılan denemeler sonucunda anlaşılmıştır. Sistem cevabındaki sürekli hal hatasının ise sistem giriş değer uzayının büyüklüğü ile ilgili olduğu ve bu uzayın ne kadar küçük olursa sistemin o kadar hassas çalışacağı anlaşılmıştır. Fakat bu kısımda giriş uzayının çok küçük olması da aynı zamanda sistemin kararlılığını doğrudan etkilediği için kontrolörün girişinde bulunan ayarlama katsayılarının belirlenmesi sistemin hem kararlı hem de hatasız çalışması için oldukça fazla önem arz etmektedir. Deneysel olarak çalışmanın en büyük avantajı da bu çalışma için bu katsayıların rahatlıkla ve çok kısa sürede bulunması olmuştur.

Diğer bir önemli katkısı ise tasarlanan kontrolörün geliştirilmesi aşamasında olmuştur. Öncelikle denenen dokuz kurallı kontrolör DC motoru kontrol edilebilirken dört rotorlu hava aracı için yetersiz kalmıştır. Dört rotorlu hava aracı için yirmi beş kurallı yeni bir model denendiğinde ise sürekli hal hatasının tamamen kaybolmadığı ve dört rotorlu hava aracı gibi yüksek dereceli doğrusal olmayan bir sistem için minimum kırk dokuz adet kurala sahip bir kontrolör gerekli olduğu anlaşılmıştır. Bundan daha fazla kurala sahip bir kontrolör için ise işlem yükü çok arttığından sistem tepki süresi çok artmıştır. Dolayısıyla dört rotorlu hava aracı seviyesinde doğrusal olmayan bir sistem için uygun üyelik fonksiyon sayısı her giriş için yedi olarak belirlenmiş olup kural tabanı ise kırk dokuz kuraldan oluşmalıdır.

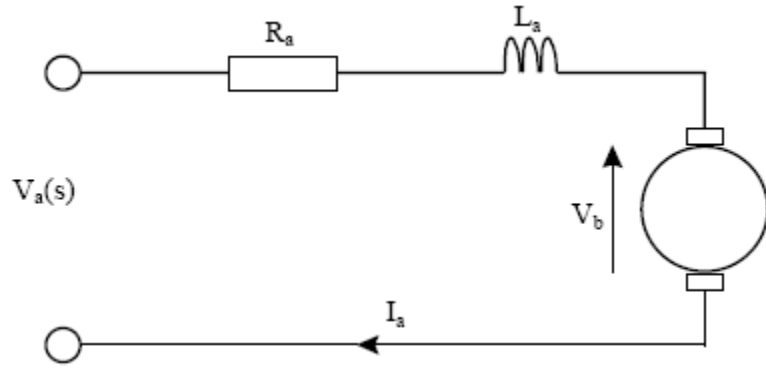
Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan en önemli farkı da gerçek zamanlı bir deney düzeneği ile bulanık kontrolörün tasarlanması ve gerçekleştirilmesi olduğu değerlendirilmektedir.

2. MATEMATİKSEL MODELLER

Bu çalışma kapsamında DC motor ve dört rotorlu hava aracı yapısı kontrol edilen dinamik sistem olarak ele alınmıştır. Matematiksel denklemleri itibariyle farklı iki yapıda olan bu sistemlerin matematiksel modelleri aşağıda anlatılmıştır.

2.1 DC Motor Matematiksel Modeli

Şekil 2.1’de DC servo motorun devre modeli verilmiştir.



Şekil 2.1 : DC servo motorun elektriksel devresi.

R_a toplam armatür direnci , L_a armatür endüktansıdır. Rotor manyetik bir DC alan içerisinde döndüğünde oluşan V_b ters elektro manyetik kuvvet rotorun açısal hızıyla doğru orantılıdır.

$$V_b = \omega(t)K_e \quad (2.1)$$

Şekildeki devreye çevre akımları yöntemi uygulanırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + \omega(t)K_e \quad (2.2)$$

Burada I_a ve $\dot{I}_a$ armatür akımını ve bu akımın zamana göre türevini temsil etmektedir.

Motorun momenti armatür akımıyla doğru orantılı olup denklemi ise aşağıdaki gibidir.

$$T_g = K_t I_a \quad (2.3)$$

Burada K_t moment sabitidir. Üretilen moment; ataleti, armatürün hareketinden doğan viskoz sürtünmeyi ve yük momentini karşılayabilmek için kullanılır.

$$T_g = J_t \frac{d\omega}{dt} + B\omega(t) + T_f + T_{gr} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte J_t toplam ataleti, B rotor viskoz sürtünme katsayısını, T_f motor ve yükün (şaft, dişli, vs.) ters yönde etki eden sürtünme momentini ve T_{gr} yerçekimine bağlı yük momentini temsil eder. Denklemleri yeniden düzenlersek;

$$L \frac{dI_a}{dt} + RI_a + K_\omega \omega = V_m \quad (2.5)$$

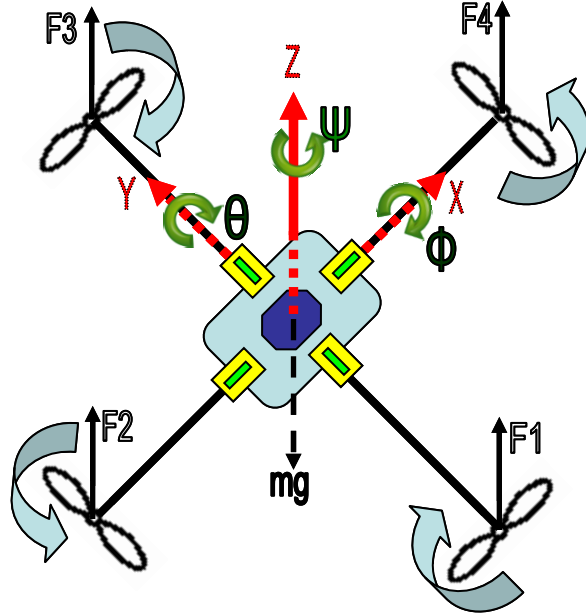
$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = K_a I_a \quad (2.6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.7)$$

Burada V_m motor giriş voltajı ω, θ, I_a sırasıyla motor açısal hız, pozisyon ve armatür akımıdır.

2.2 Dört Rotorlu Hava Aracı Matematiksel Modeli

Dört rotorlu hava aracı değişmez açıya sahip dört rotorlu bir hava aracıdır. Bir dört rotorlu hava aracının çapraz şeklindeki iskeletinin önde, arkada, sağda ve solda olmak üzere dört tane motoru vardır ve bu motorlar pervaneleri tahrik ederek dönme eksenleri doğrultusunda kaldırma kuvveti oluştururlar. Ön ve arka pervaneler saatin tersi yönünde dönerken, sol ve sağ pervaneler saat yönünde dönerler. Bu sayede bütün pervaneler eşit hızda döndüğünde merkeze uygulanan moment dengelenir ve dört rotorlu hava aracının kendi eksenini etrafındaki dönme açısı olan sapma açısı değişmez. Sol ve sağ pervanelerin hızları arasındaki fark kaldırma kuvvetleri arasında bir fark oluşturur ve dört rotorlu hava aracının yalpalama açısı değişir. Aynı mantıkla ön ve arka pervaneler arasındaki hız farkı yunuslama açısının değişimini doğurur. Bütün pervanelerin hızlarını aynı oranda artırıp azaltmak ise dört rotorlu hava aracını kendi z-ekseni doğrultusunda hareket ettirir. Eğer, aynı yönde hareket eden iki pervanenin hızları, diğer yönde dönen iki pervaneye göre değiştirilirse, dört rotorlu hava aracı kendi eksenini etrafında dönmeye başlar. Dört rotorlu hava aracının pervanelerinin dönme yönü ve bu dönmeden dolayı oluşan kaldırma kuvvetleri, dönme açıları ve hareket koordinatları Şekil 2.2’de görülebilir.



Şekil 2.2 : Dört Rotorlu Hava Aracı Modeli.

Şekil 2.2 ’de dört rotorlu hava aracının gövde sabit çerçevesi, atalet çerçevesi ile birlikte x, y ve z eksenleri etrafındaki sırasıyla yalpalama (Φ), yunuslama (θ) ve sapma (ψ)

açıları, dört rotorlu hava aracına etkiyen ana kuvvetler F_1, F_2, F_3, F_4 ve mg ve dört adet pervanenin dönme yönleri gözükme[13].

Gövde sabit çerçevenin, atalet çerçevesine göre 3 boyutlu uzaydaki konumu,

$$\zeta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

vektörüyle ifade edilir. Bu ifadenin türevi alınır;

$$v = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

gövde sabit çerçevenin, atalet çerçevesine göre hızı ve bu ifadenin de türevi alınır;

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

dört rotorlu hava aracının doğrusal hareketinin ivmesinin ifadesi bulunmuş olur[13].

Ω_i , pervanelerin açısal hızları ve ($i: 1, 2, 3, 4$) olmak üzere, pervanelerin dönüşlerinden dolayı ortaya çıkan kaldırma kuvvetleri F_i ,

$$F_i = b \Omega_i^2 \quad (2.11)$$

ifadesi ile tanımlanır, buradaki “b” itme faktörü sabit bir değerdir. dört rotorlu hava aracına pervanelerden uygulanan toplam kaldırma kuvveti,

$$F_T = \sum_{i=1}^4 b_i \Omega_i \quad (2.12)$$

ve bu kuvvetten dolayı oluşan ivme;

$$a_F = \frac{b}{m} \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \quad (2.13)$$

dir. a_F ivmesinin atalet çerçevesine göre ifadesi R olarak toplam ivme ifadesi, kuvvet dengesinden,

$$\dot{v} = -g e_z + R e_z a_F \quad (2.14)$$

şeklinde gösterilebilir. Buradaki $e_z = [0 \ 0 \ 1]^T$ şeklinde bir vektör olup z eksenindeki büyüklükleri ifade etmek için kullanılır. R, rotasyon matrisi; C, kosinüsü ve S de sinüsü ifade etmek üzere şu şekilde tanımlanmıştır,

$$R = \begin{bmatrix} C\psi C\theta & C\psi S\theta S\phi - S\psi C\phi & C\psi S\theta C\phi + S\psi S\phi \\ S\psi C\theta & S\psi S\theta S\phi + C\psi C\phi & S\psi S\theta C\phi - C\psi S\phi \\ -S\theta & C\theta S\phi & C\theta C\phi \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Katı cismin açısal hızıyla ilgili olarak, rotasyon matrisi ve gövde çerçevesinin açısal hızları arası ilişki şu şekilde tanımlanmıştır;

$$\dot{R} = R.S(\omega) \quad (2.16)$$

buradaki “ ω ”, gövde çerçevesinin açısal hız vektörü olup,

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

şeklindedir. $S(\omega)$ ise, ω ifadesinin 3x3 eksi bakışlı matrisidir ve şu şekilde ifade edilir,

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Kendi eksenini etrafında hızlı bir şekilde dönen katı cisimlerin dönme eksenini, yerçekimi doğrultusundaki düşey eksen etrafında döner ve bir dönme konisi oluşturur. Döner cisme etki eden dönme momentinin cismin dönme ekseninin doğrultusunu değiştirmesinden bir yalpalama hareketi ortaya çıkar. Helikopterin bütün dönme hareketlerinde oluşan bu etkiye cayroskopik etki denir[13].

Dört rotorlu hava aracı, eksenleri etrafında ω açısal hızlarıyla döndüğü için $L_{x,y,z}$ açısal momentumları oluşur ve şu şekilde ifade edilir.

$$L_{x,y,z} = I\omega \quad (2.19)$$

Burada 3x3 bir matris olan I, Dört rotorlu hava aracı gövdesinin x, y ve z eksenlerindeki ataletidir,

$$I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Moment, açısal momentumun zamana göre değişimi olduğundan, dört rotorlu hava aracının açısal hızlarından dolayı oluşan moment,

$$\tau_b = \dot{L} \quad (2.21)$$

$$\tau_b = \omega \times I \omega + I \dot{\omega} \quad (2.22)$$

Burada “x” vektörel çarpım işlemi olarak kullanılmıştır. Helikopterin gövdesinin ve pervanelerin kendi eksenleri etrafında dönmesinden dolayı ortaya çıkan cayroskopik moment şu şekilde ifade edilmiştir;

$$\tau_G = \sum_{i=1}^4 J(\omega \times e_z) \Omega_i (-1)^i \quad (2.23)$$

Burada “J”, bir adet rotorun ataletini simgelemektedir. Şekil 2.2’de görülen ve her bir pervanenin yaptığı dönme hareketinden dolayı oluşan kaldırma kuvvetleri, dört rotorlu hava aracına etkiyen momentleri oluşturur. Bir eksen boyunca uzanan moment, diğer eksenlerde bulunan pervanelerin oluşturduğu momentlerin farkına eşittir. x, y ve z eksenleri boyunca, pervanelerin sebep olduğu momentler şöyledir[13].

$$\tau_a = \begin{bmatrix} lb(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Burada “l”, rotorla dört rotorlu hava aracının merkezi arası mesafe, “d” de sürüklenme faktörüdür. Moment dengesi;

$$\tau_G + \tau_b = \tau_a \quad (2.25)$$

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\tau_G = J \left(\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) \quad (2.27)$$

olur[13]. Bu formüller moment dengesi formülünde yerine konulup çıkan yeni eşitlikteki

$\ddot{\phi}, \ddot{\theta}$ ve $\ddot{\psi}$ sol tarafa atıp denklem çözülürse açısal ivmeler şu şekilde çıkar;

$$\ddot{\phi} = \dot{\psi} \dot{\theta} \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{J}{I_x} \dot{\theta} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 - \Omega_4) + \frac{l}{I_x} b (\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \quad (2.28)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\psi} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_z}{I_y} \right) - \frac{J}{I_y} \dot{\phi} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 - \Omega_4) + \frac{l}{I_y} b (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \quad (2.29)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) - \frac{d}{I_y} (-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.30)$$

Buradan $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ hesaplanırsa

$$\ddot{x} = (C\psi S\theta S\phi + S\psi C\phi) \frac{b}{m} (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.31)$$

$$\ddot{y} = (S\psi S\theta C\phi - C\psi S\phi) \frac{b}{m} (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.32)$$

$$\ddot{z} = -g + (C\theta C\phi) \frac{b}{m} (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.33)$$

Kolaylık ve uygunluklarından dolayı sistemin girişleri şu şekilde seçildiğinde,

$$U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.34)$$

$$U_2 = b(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \quad (2.35)$$

$$U_3 = b(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \quad (2.36)$$

$$U_4 = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.37)$$

sistemin tam matematiksel modeli;

$$\ddot{\phi} = \dot{\psi} \dot{\theta} \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{J}{I_x} \dot{\theta} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \frac{l}{I_x} U_2 \quad (2.38)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\psi} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_z}{I_y} \right) - \frac{J}{I_y} \dot{\phi} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \frac{l}{I_y} U_3 \quad (2.39)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) - \frac{1}{I_y} U_4 \quad (2.40)$$

$$\ddot{x} = (C\psi S\theta S\phi + S\psi C\phi) \frac{1}{m} U_1 \quad (2.41)$$

$$\ddot{y} = (S\psi S\theta C\phi - C\psi S\phi) \frac{1}{m} U_1 \quad (2.42)$$

$$\ddot{z} = -g + (C\theta C\phi) \frac{1}{m} U_1 \quad (2.43)$$

olur[13].

3. BULANIK MANTIKLA KONTROLÖR TASARIMI

Bulanık Mantığı oluşturacak temel düşünceyi Plato, “Doğru” ve “Yanlış”ın iç içe girdiği üçüncü bir durumu belirterek oluşturmuştur. Hegel ve Marx gibi modern düşünürler bu düşünceyi desteklemiş ancak ilk kez Lukasiewicz Aristoteles’in iki-değerli mantığına sistematik bir alternatif getirmiştir. Lukasiewicz 1900’lerin başında üçüncü bir değer ortaya atmıştır: “olası”. Lukasiewicz daha sonra dördüncü, beşinci, altıncı...vs. gibi değerleri de oluşturmuş ve “Doğru” ile “Yanlış” arasında sonsuz farklı değerler atanabileceğini göstermiştir[15].

Bulanık ilkeleri ilk olarak oluşturan 1965 yılında Azerbaycanlı Lütü Askerzade’dir. Ancak bu ilkeler batı dünyasında şüpheyle karşılanmıştır. Çünkü batı kültürünün temeli Aristo mantığına dayanmaktaydı ve birçok batılıya göre mantık kelimesinin bulanık kelimesiyle ifade edilmesi başlı başına mantıksız bir şeydi. Karşı çıkanlar çoğunlukla ihtimaller hesabı üzerine çalışanlardı. Onlara göre bulanık mantığın açıkladığını ifade ettiği her şey zaten ihtimaller teorisiyle açıklanabilirdi.

Doğuda ise bulanık mantık benimsenmiş ve 1970 li yıllardan sonra teknolojik birçok aletin yapımında bu ilkeler kullanılmıştır. Çünkü doğuda belirsizlikte bile güzelliklerin bulunabileceği düşüncesi vardır. Bulanık kavram ve sistemler ilk defa 1975 yılında buhar makinesinin kontrol mekanizmasına uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Daha sonraki yıllarda bulanık sistem, bir çimento fabrikasının işletilmesi ve kontrolü için uygulanmıştır. Ayrıca bu sistemler elektronik cihazlara da uygulanarak 1980’ler den sonra dünya geneline yayılmaya başlamıştır. Günümüzde çamaşır, bulaşık makineleri, elektrikli süpürgeler, asansörler, metrolarda ve şirket işletimi gibi konularda bu ilkeler uygulanmaktadır[16].

Bulanık mantık denetleyiciler konusundaki kuramsal çalışmaların hala sürüyor olmasına rağmen artık bu konu endüstride kendisine önemli bir yer edinmiş durumdadır. Uygulama alanları arasında çeşitli beyaz eşya, tren, asansör, trafik kontrolü ve otomotiv

sanayisi sayılabilir. Bugün bulanık denetim kullanan beyaz eşyalar ve elektronik aletler, örneğin fotoğraf ve çamaşır makineleri günlük yaşamın bir parçasıdır. Bulanık mantığın uygulama alanları kontrol sistemleriyle sınırlı değildir. Geliştirilen son teoremler bulanık mantığın ilke olarak, ister mühendislik, ister biyoloji ve hatta isterse ekonomi olsun, her türlü alanda sürekli sistemleri modellemek için kullanılabileceğini göstermektedir. Çoğu alanda bulanık mantık temelli sağduyulu modellerin standart matematiksel modellerden daha yararlı ya da daha kesin sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bulanık mantığın uygulama alanı çok geniştir. Tecrübe ederek öğrenme temelini kullanan ve daha çok pratik olarak uygulanan bir yaklaşım olduğundan çok faydalıdır. Belirsiz kavramların bile kolayca modellenebilmesinden dolayı yüksek dereceden doğrusal olmayan sistemlere uygulanması çok kolaydır.

Günümüzde artık hemen her ülkede bulanık mantık konusunda araştırmalar yapılmakta olup bunlar arasında ABD, Japonya, Çin ve Batı Avrupa ülkeleri başta gelmektedir. Uygulama açısından ise Japonya belirgin bir şekilde önde görünmektedir. Özellikle “fuzzy process controller” olarak isimlendirilen özel amaçlı bulanık mantık mikroişlemci çipinin üretilmesine çalışılmaktadır. Bu teknoloji fotoğraf makineleri, çamaşır makineleri, klimalar ve otomatik iletim hatları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu durum belki de Uzak Doğu insanının düşünme şeklinin bulanık mantığa daha uygun oluşundan kaynaklanmaktadır. Üzerinde bulanık sözcüğünün yer aldığı bir fotoğraf makinesi bir batı ülkesi insanı tarafından şüphe ile karşılanabilir. Japonya’da ise ev kadınları bile bu sözcükle haşır neşir olmuşlar ve bulanık mantık kullanan her türlü ev aletini özellikle arar duruma gelmişlerdir. Bir başka neden de ABD’de yapılan çalışmaların genellikle askeri amaçlara ve uzay araştırmalarına yönelik olması ve bu nedenle projelerin ve sonuçlarının herkese açık literatürde yayımlanmaması olabilir. Bundan başka uzay araştırmaları ve havacılık endüstrisinde de kullanılmaktadır. TAI’de araştırma gelişme kısmında bulanık mantık konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Yine bir başka uygulama olarak otomatik cıvatalamaların değerlendirilmesinde bulanık mantık kullanılmaktadır. Bulanık mantık yardımıyla cıvatalama kalitesi belirlenmekte, cıvatalama tekniği alanında bilgili olmayan kişiler açısından konu şeffaf hale getirilmektedir. Burada bir uzmanın değerlendirme sınırlarına erişilmekte ve hatta geçilmektedir.

3.1 Bulanık Mantık Nedir?

İngilizce “fuzzy” kelimesinin sözlük anlamı “bulanık, hayal meyal ”dır. İlk defa Prof. Zadeh tarafından kullanılan bu terim temelde çok değerli mantık, üzerine oturtulmuş olup; olayların oluşum olasılığından çok oluşum derecesiyle ilgilenen bir kavramı tanımlar. Bulanık mantığın temeli bulanık küme ve alt kümelerle dayanır. Klasik yaklaşımda bir varlık ya kümenin elemanıdır ya da değildir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde varlık küme ile olan üyelik ilişkisi bakımından kümenin elemanı olduğunda “1” kümenin elemanı olmadığı zaman “0” değerini alır. Bulanık mantık klasik küme gösteriminin genişletilmesidir. Bulanık varlık kümesinde her bir varlığın üyelik derecesi vardır. Klasik kümelerin aksine bulanık kümelerde elemanların üyelik dereceleri sıfırdan bire kadar olan aralık da sonsuz sayıda değişebilir. Bunlar üyeliğin derecelerinin devamlı ve aralıksız bütünüyle bir kümedir. Keskin kümelerdeki soğuk-sıcak, hızlı-yavaş, aydınlık-karanlık gibi ikili değişkenler, bulanık mantıkta biraz soğuk, biraz sıcak, biraz karanlık gibi esnek niteleyicilerle yumuşatılarak gerçek dünyaya benzetilir. En önemli fark, böyle bir çatıda bilginin kaynağındaki küme üyeliğinin kesin tanımlanmış önkoşullarının olmayışı ve daha çok problemlerle rastgele değişkenlerin hazır bulunmasındadır. Bu haliyle bulanık mantık temelde insan düşünüş tarzını örnek alan bir yapıya sahiptir. Yani bulanık mantık ve bulanık küme işlemleri kullanılarak makinelerin insanlar gibi kararlar vermesi sağlanabilmektedir.

3.2 Bulanık Mantığın Avantajları

- Bulanık mantık anlaşılması kolay temellere sahiptir. Yaklaşımı karmaşıktan ziyade daha doğal ve arkasındaki matematiği ise oldukça basittir.
- Bulanık mantık esnek olmasından dolayı sisteme herhangi bir seviyeden entegre olabilir.
- Hassas/kesin olmayan veriyi kullanabildiğinden dolayı yeteri hassaslıktaki ölçümlerden elde edilen belirsizlikleri kullanabilir. Bu sayede çözüme kolaylıkla ulaşılabilir.
- Sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymadığından çok karmaşık, doğrusal olmayan sistemleri bile modelleyebilir.

- Doğrudan kullanıcı girişlerine ve kullanıcının deneyimlerinden yararlanabilmesine olanak sağlamasıdır.
- Hala hazırda kullanılan kontrol unsurları ile birlikte kullanılabilir. Çoğu uygulamada klasik kontrol sistemlerinin yerine geçmektense onları destekleyerek uygulanmalarını kolaylaştırır.
- Konuşma diline yakın olmasından dolayı anlaşılması kolay olan bir sistemdir.
- Günlük hayatta olduğu gibi belirsiz, zamanla değişen, karmaşık, iyi tanımlanmamış sistemlerin denetimine basit çözümler getirir.

3.3 Bulanık Kümeler

Her iki mantık arasındaki farkı net bir şekilde anlamak için bu iki mantığında temelde kullandığı küme teorilerine bakalım.

Klasik yaklaşımda bir varlık ya kümenin elemanıdır ya da değildir. Matematiksel olarak, küme ile olan üyelik ilişkisi bakımından kümenin üyesi olduğunda “1” kümenin üyesi olmadığında “0” değerini alır. Yani bu mantıkta bir önermenin doğruluk değeri $\{0,1\}$ kümesindedir. “0” yanlış ve “1” doğruyu temsil eder. Yani “kesin karar verme” söz konusudur. Örneğin bir şey “iyi” değilse “kötü”dür ya da “güzel” değilse “çirkin”dir. Ayrıca bu birbirinin tümleyeni olan iki kümeden hiç birine ait olmaması da söz konusu değildir. Bu ilke hem klasik mantığın yapısını korurken hem de bir şeyin hem o şey olup hem de olmama çelişkisini ortadan kaldırır.

Bulanık mantığın kullanıldığı “bulanık” kümelerde ise, nesneler bulanık bir kümeye ve bu kümenin tümleyeni olan kümeye aynı anda farklı derecelerde ait olabilir. Buradaki tek sınırlama bu iki üyelik derecesinin toplamının bir olması gerektiğidir. Bulanık kümeler nesnelerin tamamen üye olup-olmadığı özel durumlar için klasik kümenin özelliklerini taşır ve klasik küme teorisi işlemleri uygulanabilir. Önemli bir nokta da bulanık kümedeki üyelik derecelerinin olasılık yüzdeleriyle aynı şey olmadığıdır. Olasılığı gösteren sayılar bir şeyin olup olmayacağının ölçütüdür. Bulanık sayıların üyelik dereceleri ise bir olayın ne dereceye kadar olduğunu, bir koşulun ne dereceye kadar gerçekleştiğini gösterir. Üyelik derecesi, bir nesnenin herhangi bir kümeye ne derece üye olduğunu, ne derece benzediğini veya bir olayın bir şartın ne derece var

olduğunu gösterir ve aldığı değer sabittir. Buna karşılık olasılık ise bir olay gerçekleşmeden önce olup-olmayacağı veya ne derece olabileceği hakkında bilgi verir ve zamana bağlı olarak duruma göre değişebilir. Üyelik derecesi daha çok bir olayın benzerlik derecesini ifade ederken, olasılık olma sıklığını gösterir[Bezdek,1993].

Görülebileceği üzere bulanık mantık, klasik mantığının bir genişlemesidir. Klasik mantık, bulanık mantığa göre kısıtlı görünse de günümüz bilgisayarlarının çalışma temeli bu mantığa göre işler.

3.4 Tanım Uzayı

Bir bulanık kümenin tüm elemanları o kümenin tanım uzayında bulunurlar. Kümenin tanım uzayı ise ele alınan problem için olası tüm değerlerin bulunduğu yerdir. Sayısal olmayan bir özellik ile ilgilenirken sayısal değerlere sahip bir tanım uzayı kullanamayız, bu durumda elemanları fizyolojik bir devamlılıktan aldığımızı söyleriz.

Tanım uzayı o problemle ilgili olası tüm değerleri barındırmakla birlikte o problemle ilgili olmayan değerleri de barındırmamasından dolayı olası karmaşıklıkları ve yanlış değer atamalarının önüne de geçer. Her problem için kullanılan tanım uzayları farklı olduğundan bir nevi özel bir yaklaşım olarak da görülebilir.

3.5 Üyelik İşlevi

Tanım uzayının her elemanına belli bir sayı atayan işleve üyelik işlevi, bu sayıya da üyelik derecesi denir. Üyelik derecesi 0 ile 1 arasında bir değerdir. Bu tanımla keskin kümeler bu üyelik işlevlerinin kare şeklinde tanımlandığı özel durumlar olarak görülebilir.

En yaygın olarak kullanılan üyelik işlevleri şunlardır:

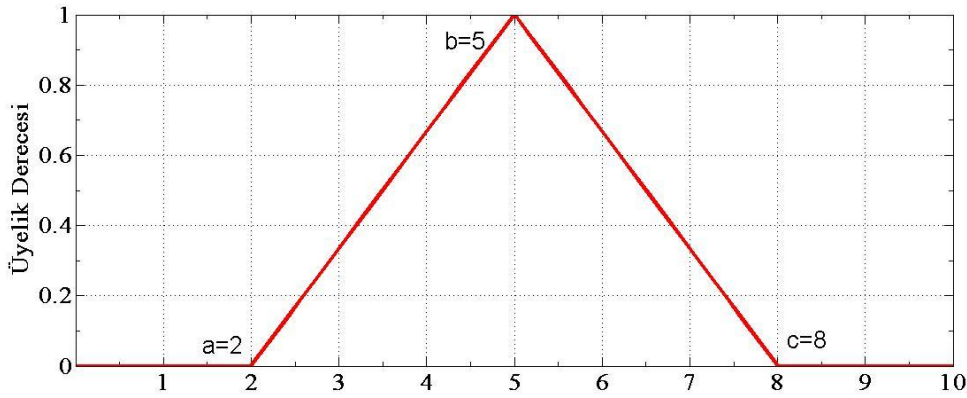
3.5.1 Üçgen üyelik işlevi

Üçgen üyelik işlevi Şekil 3.1’de görüldüğü gibi olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\text{üçgen}(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.1)$$

Bunu hesaplama için daha uygun hale getiren diğer bir temsil şekli ise aşağıdaki gibidir.

$$\text{üçgen}(x, a, b, c) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}), 0) \quad (3.2)$$



Şekil 3.1 : Üçgen Üyelik İşlevi.

3.5.2 Yamuk üyelik işlevi

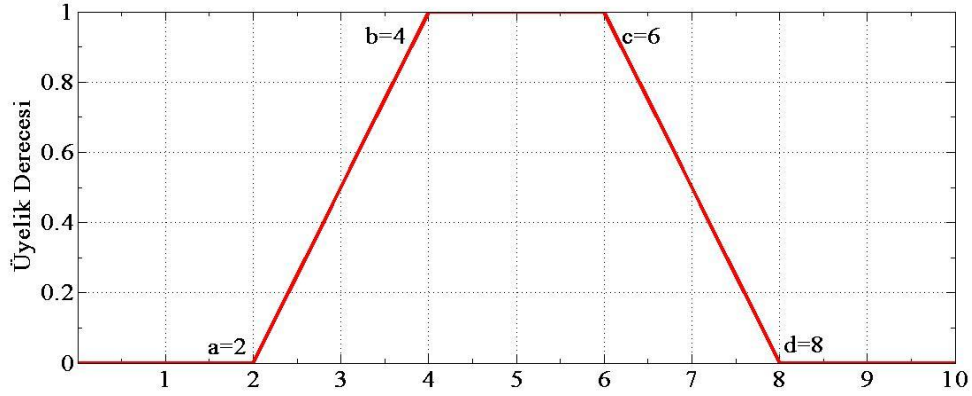
Yamuk üyelik işlevi Şekil 3.2’de gösterilmiş olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\text{yamuk}(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (3.3)$$

Önceki örnekle paralel bir şekilde, programlama için kullanılan formül:

$$yamuk(x, a, b, c, d) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}), 0) \quad (3.4)$$

“b” ile “c” eşit oldukları zaman yamuk üyelik işlevi üçgen üyelik işlevine dönüşür.



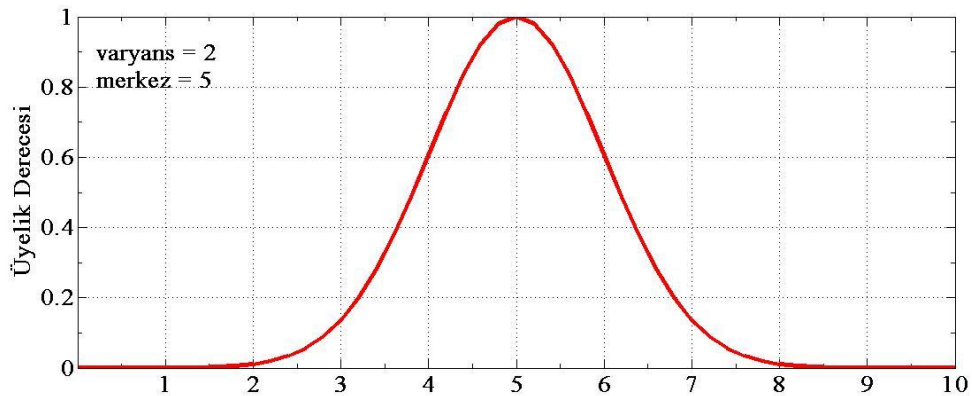
Şekil 3.2 : Yamuk Üyelik İşlevi.

3.5.3 Gauss üyelik işlevi

Bir Gauss üyelik işlevi Şekil 3.3’deki olup m (merkez) ve σ (varyans) gibi iki parametreyle tanımlanır:

$$gauss(x, m, \sigma) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (3.5)$$

Aşağıdaki şekilde varyans değeri 2 ve merkezi 5 olan üyelik fonksiyonu görülmektedir.

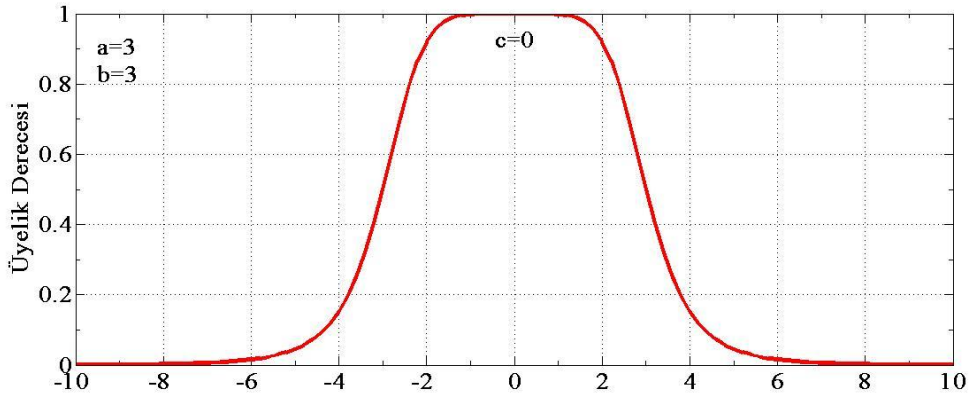


Şekil 3.3 : Gauss Üyelik İşlevi.

3.5.4 Çan üyelik işlevi

Çan üyelik fonksiyonu Şekil 3.4’’deki gibi üç tane parametre ile tanımlanır:

$$\text{çan}(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (3.6)$$

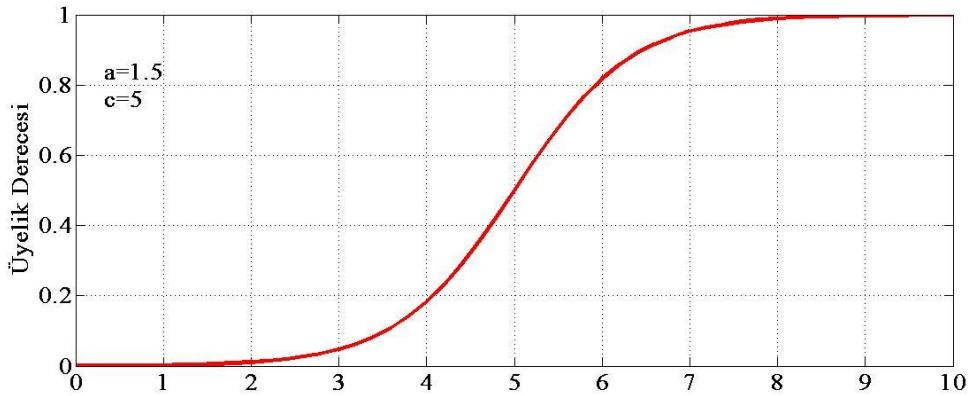


Şekil 3.4 : Çan Üyelik İşlevi.

3.5.5 Sigmoid üyelik işlevi

Sigmoid üyelik işlevi Şekil 3.5’deki gibi olup kırılma noktasını (üyelik derecesinin 0.5’e eşit olduğu yer) ve bu noktadaki eğimi belirleyen iki parametre ile tanımlanır:

$$\text{sigmoid}(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{(-a(x-c))}} \quad (3.7)$$



Şekil 3.5 : Sigmoid Üyelik İşlevi.

Bunların haricinde daha birçok üyelik işlevi var olmasına rağmen yukarıdakiler en fazla kullanılanlarıdır. Uyarılamanın önemli olduğu bulanık denetim uygulamalarında kullanılacak üyelik işlevinin türevinin sürekli olması gereklidir. Dolayısıyla, üçgen ve yamuk üyelik işlevleri bu gibi uygulamalar için pek kullanışlı değildir. Fakat gerçek zamanlı bulanık denetim uygulamalarında ise formül basitliği ve işlem azlığı nedeniyle üçgen üyelik işlevi en yaygın olarak kullanılanıdır. İşlem zamanı bu tür uygulamalarda önem arz ettiğinden üçgen üyelik fonksiyonu tercihen kullanılmaktadır. Ayrıca, yukarıdaki üyelik işlevlerini aritmetik işlemlerle değişikliklere uğratarak problem çok özel farklı üyelik işlevleri üretilebilir.

3.6 Singleton

Bütün bulanık kümeler, yukarıda da belirtildiği gibi $\{x, \mu(x)\}$ sıralı ikililerinden oluşurlar. Burada x tanım uzayının elemanı, $\mu(x)$ de onun üyelik derecesidir. Tek bir $\{x, \mu(x)\}$ ikilisine “singleton” adı verilir. Dolayısıyla, bir bulanık küme içerdiği bütün sıralı ikililerin birleşimi olarak görülebilir. Çoğu zaman bir bulanık kümeyi bir vektör gibi düşünmek daha uygundur: $a = \{\mu(x_1), \mu(x_2), \mu(x_3), \dots, \mu(x_n)\}$.

3.7 Dilsel Değişkenler

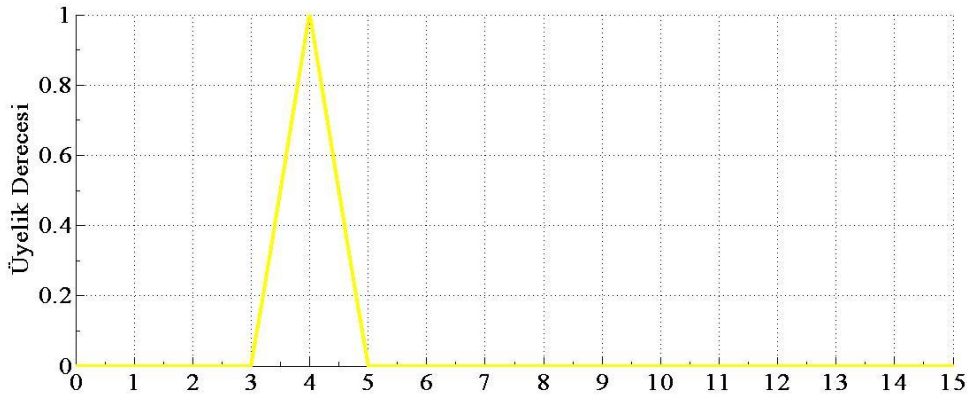
Cebirsel değişkenlerin değer olarak sayı almaları gibi, bir dilsel değişken de kelime veya cümleleri değer olarak alır. Örneğin yaşlı, çok yaşlı, çok yaşlı değil, az çok genç, oldukça genç, çok genç gibi. Bir dilsel niteleyicinin alabileceği değerlerin tümüne terim kümesi adı verilir. Terim kümesindeki her bir değer, bir taban değişken üzerine tanımlanmış bir bulanık değişkendir.

3.8 Bulanık Kümeler Üzerinde İşlemler

Klasik kümelerdeki temel işlemler bulanık kümeler için de geçerlidir. A ve B aynı tanım uzayında var olan ve üyelik işlevleri sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de ki gibi verilen iki bulanık küme olsun.



Şekil 3.6 : A kümesinin üyelik işlevi.



Şekil 3.7 : B kümesinin üyelik işlevi.

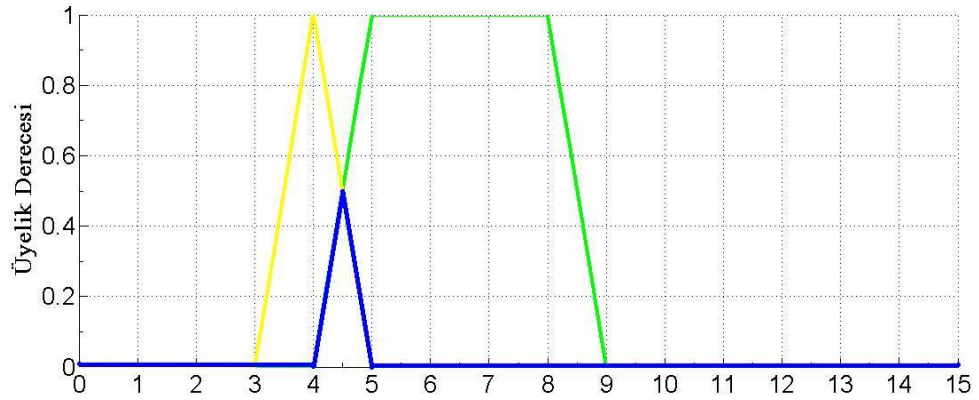
A ve B bulanık kümeleri için aşağıdaki işlemler tanımlanabilir:

3.8.1 Kesişim ($A \cap B$)

Verilen iki kümenin kesişimi hem A'da hem B'de var olan elemanların oluşturduğu kümedir. Kesişim işlemi Şekil 3.8'de mavi çizgiyle gösterilmiştir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \text{ VE } \mu_B(x) \quad (3.8)$$

Buradaki **min** işlemi A ve B kümelerindeki elemanların birebir karşılaştırılması ve üyelik işlevinin değeri en az olanın değerinin kesişim kümesine atanmasıdır.



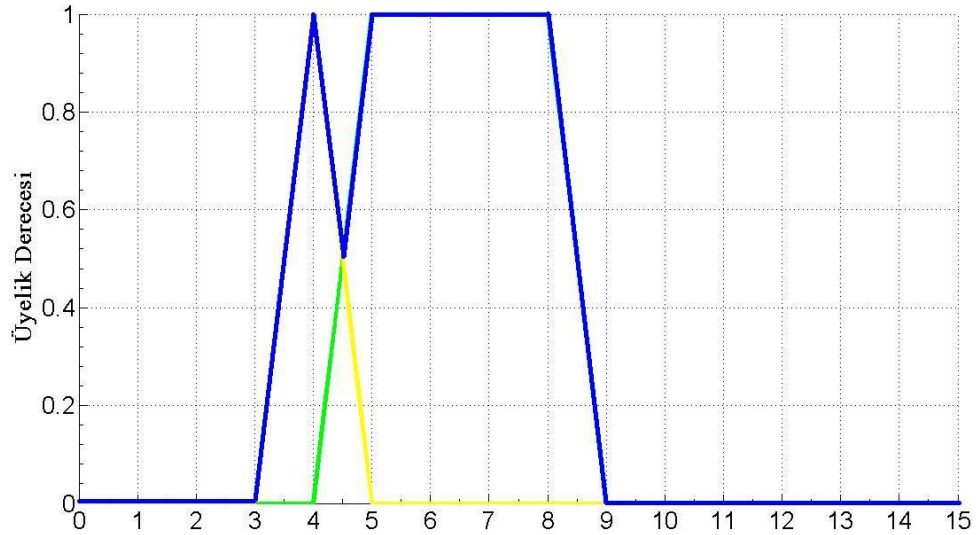
Şekil 3.8 : Kesişim İşlemi.

3.8.2 Birleşim ($A \cup B$)

Verilen iki kümenin birleşimi ikisindeki bütün elemanların oluşturacağı kümedir. A ve B kümelerinin birleşimi Şekil 3.9’da mavi çizgiyle gösterilmiştir.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \text{ VEYA } \mu_B(x) \quad (3.9)$$

Buradaki **max** işlemi A ve B kümelerindeki elemanların birebir karşılaştırılıp maksimum değere sahip olanın seçilmesidir.

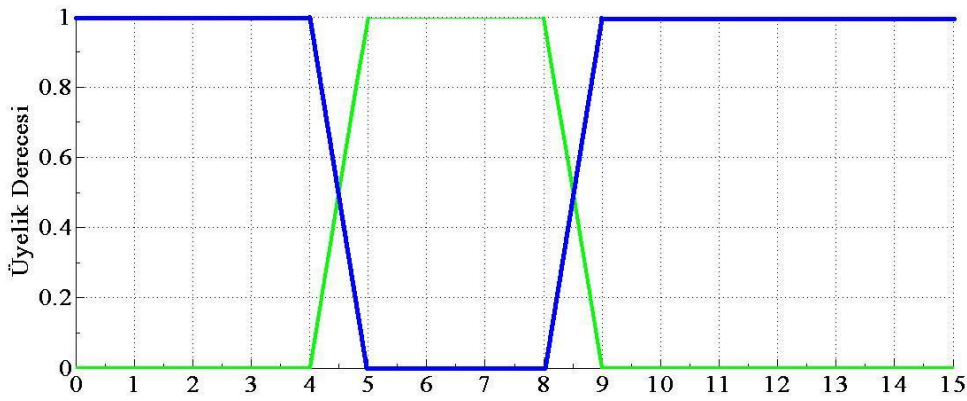


Şekil 3.9 : Birleşim İşlemi.

3.8.3 Tümleme ($\bar{A}$)

Verilen bir A bulanık kümesinin tümleniyi, o kümenin tüm elemanlarının sırayla 1'e tamamlanmasıyla oluşturulan yeni kümedir. Yeni kümenin üyelik fonksiyonu A kümesinin üyelik fonksiyonunun 1'den çıkarılmasıyla elde edilir. A kümesinin tümleniyi Şekil 3.10'da mavi renk ile gösterilmiştir.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.10)$$



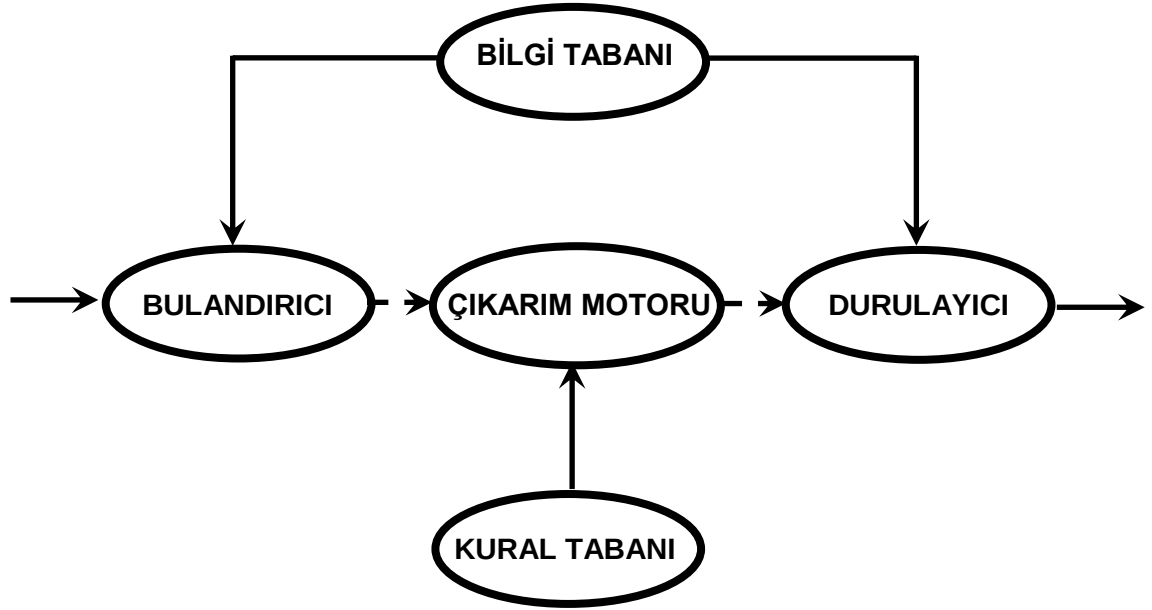
Şekil 3.10 : Tümleme İşlemi.

X kümesinin üyelik fonksiyonu tanım uzayı boyunca Y kümesinden küçükse, X kümesi Y kümesinin alt kümesidir denir ve $X \subseteq Y$ şeklinde gösterilir. Yukarıdaki A ve B kümeleri için $(A \cap B) \subseteq (A \cup B)$.

3.9 Bulanık Kontrol

3.9.1 Bulanık kontrolün temelleri

Bulanık Mantık Kontrolör (BMK) bilgi tabanlı kontrol metodudur ve genellikle sistemin veya sürecin deneysel bilgilerine veya uzman tecrübesine dayanır. Yeterli kesinlikte bilgiye ulaşılamayan karmaşık sistemlerin denetimi ve sistem hakkında kesin ölçüm bilgilerine ulaşmanın pratik olmaması durumlarında BMK tercih edilir. Bu ölçüm bilgileri BMK'nın temelini oluşturan dilsel ifadeler veya kural tabanına dönüştürülür. BMK sistemi karar verme mekanizmaları Şekil 3.11'de görüldüğü gibi bulandırıcı, çıkarım motoru, bilgi tabanı, kural tabanı ve durulayıcı olarak 5 ana bloktan meydana gelir.



Şekil 3.11 : Bulanık Denetim Sistemi.

3.9.1.1 Bulandırıcı

Bu bölüm giriş değişkenlerini ölçer, bulanık değişkenlere dönüştürülmesi işlemini yapar. Bu değişkenler bulanık denetleyicide bulanık kümeler tarafından tanımlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle bulanıklaştırma giriş değişkenlerinin ve çıkış değişkenlerinin ilgili evrensel kümelerinde bulanık kümelere yerleştirme işlemidir. Bulanık mantık da veri işleme işlemi bulanık kümeler üzerine kurulu olduğu için bulanıklaştırıcı kısmı BMK'da başlangıç safhasında zorunludur. Girişteki yapılan bulanıklaştırma işlemi evrensel kümenin birçok bulanık kümeyle nicelenmesi sonucunu doğurur. Nicelendirme seviyelerinin sayısı yeterli temsili sağlayacak kadar çok ve hafızadan da tasarruf edecek kadar az olmalıdır. Çok Sıcak, Sıcak, Az Sıcak, Normal, Serin, Soğuk gibi bir nicelendirme oranı yeterli bir oran olarak örnek verilebilir. Her bir bulanık alt küme için ayrı bir üyelik fonksiyonu atanmalıdır. Üyelik fonksiyonlarının türü yapılan uygulamaya göre değişiklik arz edebilir. Üyelik işlevleri çok iç içe girerse bulanıklık artacağından dolayı denetim işlerinde belirginleştirme zorlaşacak diğer taraftan da hiç bir birlerine geçmezler ise de bu sefer iki değerli bir denetim söz konusu olacaktır[17].

3.9.1.2 Çıkarım motoru

Bu blok girişlerin değerine göre kural tabanından uygun kuralları belirleyen bir mekanizma sağlar. Çıkarım tüm kural kümesine karşılık gelen bulanık ilişki ile

bulanıklaştırılmış keskin giriş arasındaki bileşim işlemi ile gerçekleştirilir. Birleşimin sonucu olarak, toplam kontrol çıktısının bulanık kümesi elde edilir. Bu motorda çıkarım yapmak için en çok kullanılan iki yöntem maksimum-minimum birleşimi ve maksimum- çarpım birleşimidir.

3.9.1.3 Bilgi tabanı

Sitemin bilgi tabanı veri tabanı ve kural tabanını içerisinde barındırır. Buradaki veri tabanının görevi bilgi tabanı haricindeki kalan kısımların doğru çalışması için gerekli bilgileri sağlamaktır. Bu bilgiler giriş ve çıkış değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarının sözel değerlerinin anlamları, ölçeklendirme, normalizasyon ve denormalizasyon faktörleri, bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının tipleri gibi bilgilerdir. Çıkarım motoru burada bulunan üyelik işlevlerini kullanarak sonuca ulaşır.

3.9.1.4 Kural tabanı

Kontrol amacını gerçekleştirmek üzere oluşturulmuş olan kuralların tümü buradadır. Sözel yaklaşımda, denetlenen sistemin dinamik özelliklerinin sözel tanımı sistemin bulanık modeli olarak görülebilir. Bulanık modele göre, dinamik bir sistemin optimum performansına ulaşmak için bir grup bulanık denetim kuralları oluşturabiliriz. Bulanık denetim kurallarından oluşan grup, bulanık mantık denetiminin Kural Tabanını oluşturur. Kural tabanının temel kullanım amacı uzman bilgilerini sebep-sonuç ilişkisi içerisinde gösterebilmektir.

3.9.1.5 Durulayıcı

Bulanıklaştırma sonucunda oluşturulan bulanık kümelerle çıkarım motorunda elde edilen kontrol bulanık kümelerinin kesin kümeye çevrilmesi işlemi burada yapılmaktadır. Diğer bir deyişle sistemin ürettiği en son bulanık kümeler burada kesin kümelere dönüştürülür. En çok kullanılan durulaştırma yöntemleri arasında maksimum üyelik yöntemi, ağırlık merkezi yöntemi, ağırlıklı ortalama yöntemi ve maksimumların ortalaması üyelik yöntemi sayılabilir.

3.9.2 Kural tabanının oluşturulması

Bulanık mantık denetleyici tasarlanması aşamasında sistemin matematiksel modelinden ziyade o sistemi kullanan operatörün sistem davranışı konusundaki bilgisi daha

önemlidir. Tasarım sırasında genellikle bu tür uzman bilgisinden yararlanılır. Böyle bir yaklaşım, uzun yıllar boyunca edinilmiş tecrübenin denetleyici içerisine kolayca yerleştirilmesine olanak sağlar. Bu yararın yanında getirdiği sakınca, denetleyici tasarımında kullanılacak belirli kıstasların olmayışı, tasarımın belirli bir otomasyona bağlanamayışıdır. Kural tabanının oluşturulması için yaygın olarak kullanılan yöntemler:

- Uzman tecrübesi ve kontrol mühendisliği bilgisinden yararlanmak
- Sürecin bir bulanık modelini oluşturmak
- Operatörün kontrol hareketlerinin modellemek
- Öğrenme

3.9.3 Bulanık çıkarım

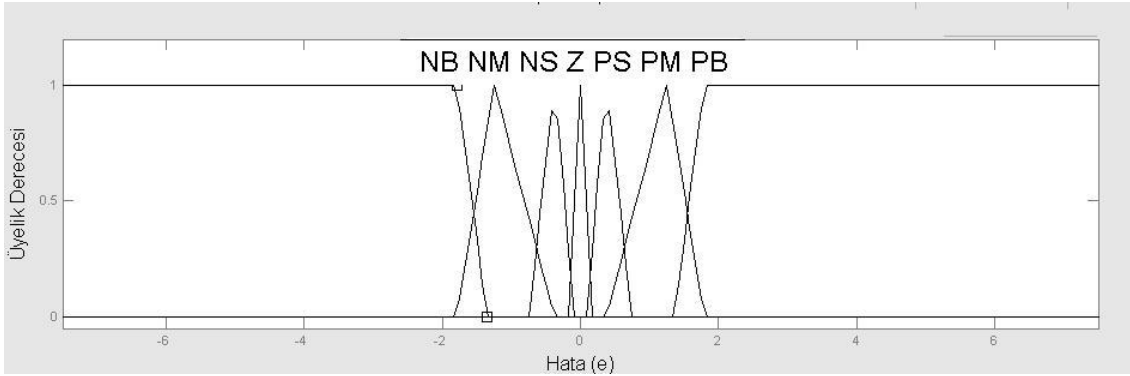
İkili mantık da savlar kesin ve birbirleriyle alakalı olduklarında bir çıkarım yapılabilir iken bulanık mantık da savlar bulanık ve savlar arası net bir alaka yokken bile çıkarım sağlanabilmektedir. İkili mantığa örnek olarak “Bebekler koşamaz.” ve “Gözde bir bebektir.” gibi iki tane kesin savdan elde edilecek çıkarım “Gözde koşamaz.” olacaktır. Bu örnekte çıkarım olması için savların birbirleri ile uyumlu olması gerekmektedir. Bulanık sistemlere gelince girişler dilsel değişkenlerden oluşur ve bu girişlerin değerlendirilip çıkarım yapılması işlemi eğer-ise kurallarının kullanımı ile gerçekleştirilir. Bulanık çıkarımda ise durum ikili mantığa göre biraz farklıdır. Burada çıkarımın olabilmesi için savların birbirleri ile uyuşması gerekmez. Örnek olarak “Mesafe çok arttıysa gaza çok bas.” gibi bir kural var ve ölçülen değer mesafe için “az” ise bu durumda çıkarım “Frene bas” olacaktır. Bu örnekte de görüldüğü gibi verilerin tam uyuşmaması durumunda bile bir çıkarım yapılabilir. Bulanık mantık kuramı, makinelere insanların deneyimlerinden yararlanabilme yeteneği verir, onların kullanıcıya daha yakın olmalarını sağlar. Sembolik bir süreç olmamasından ve kullandığı kural sayısının göreceli olarak az olmasından dolayı sistemin tasarlanma, deneme ve üretime geçme süresi kısa, ekonomik olmaktadır[17].

3.10 DC Motor İçin Önerilen Bulanık Kontrolör

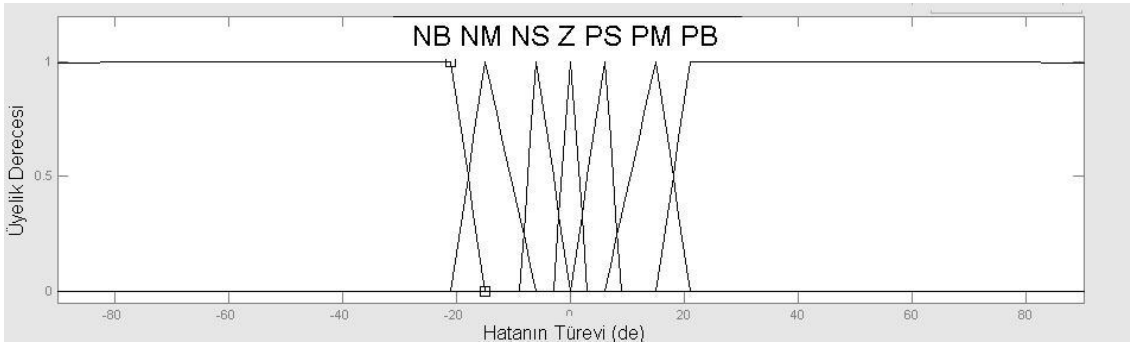
DC motor için önerilen bulanık kontrolör tasarım aşamasında MATLAB/FIS editörü kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonu seçim aşamasında sistemin deneysel sonuçları değerlendirilmiş olup DC motor kontrolü için en uygun üyelik fonksiyonunun üçgen ve durulama yönteminin ise ağırlık merkezi olduğuna karar verilmiştir.

3.10.1 Üyelik fonksiyonları

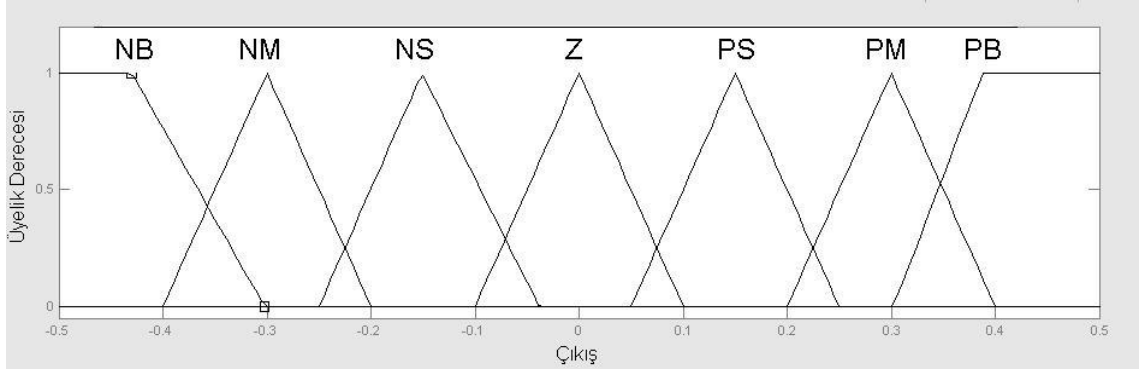
Tek bir DC motorun açı kontrolü için önerilmiş olan bulanık mantık kontrolörünün Şekil 3.12’de hata üyelik fonksiyonu $[-7.5 \ 7.5]$ aralığında, Şekil 3.13’de hatanın türevi üyelik fonksiyonu $[-90 \ 90]$ aralığında, Şekil 3.14’de çıkış üyelik fonksiyonu $[-0.5 \ 0.5]$ aralığında, Şekil 3.15’de ise kırk dokuz kuraldan oluşturulmuş kural tabanının kontrol yüzeyi görülmektedir.



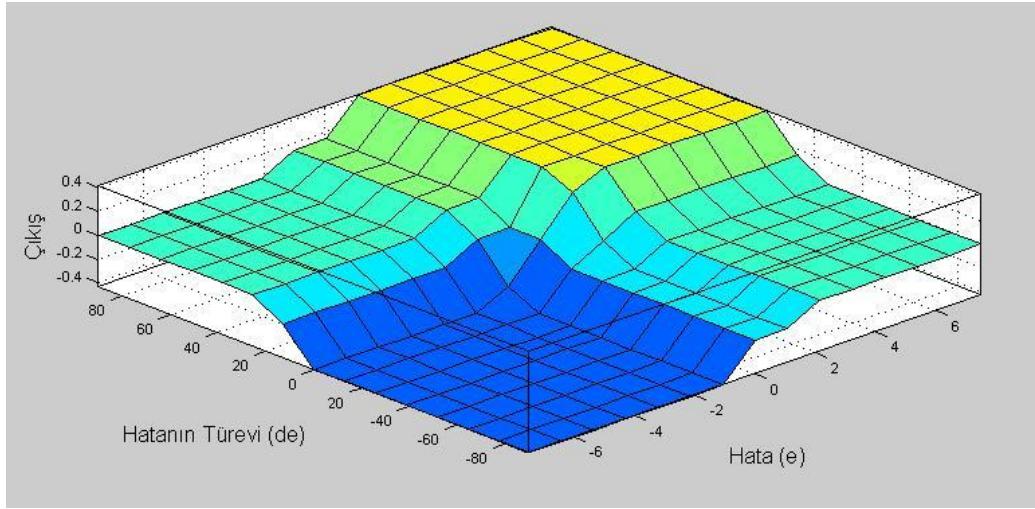
Şekil 3.12 : Hata Üyelik Fonksiyonu.



Şekil 3.13 : Hatanın Türevi Üyelik Fonksiyonu.

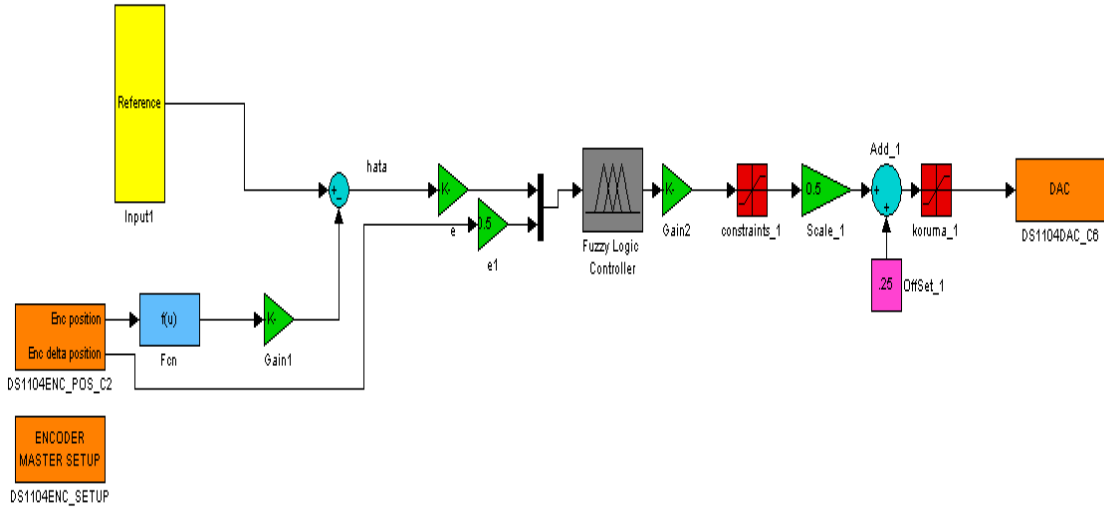


Şekil 3.14 : Çıkış Üyelik Fonksiyonu.



Şekil 3.15 : Kontrol Yüzeyi.

Önerilen bulanık kontrolöre ait kural çizelgesi ise Çizelge 1’de görülmektedir. Her giriş için yedişer üyelik fonksiyonu kullanılmış olup kural tabanı hiçbir sıralı ikili dışarıda kalmayacak şekilde kırk dokuz adet kuraldan oluşturulmuştur. Durulaştırma için ise ağırlık merkezi metodu kullanılmıştır. Sistem için kullanılan deney modeli Şekil 3.16’da görülmektedir. Sisteme PD-Bulanık kontrol uygulanmış olup ölçeklendirme katsayıları e , $e1$ ve $gain2$ için deney düzeneğinde gerçek zamanlı deneme yanılma yöntemi ile uygun değerler belirlenmiştir.



Şekil 3.16 : DC Motor Bulanık Kontrol Deney Modeli.

Çizelge 1 : Kural Çizelgesi.

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NS	NS	NM	Z	PS	Z	PS
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

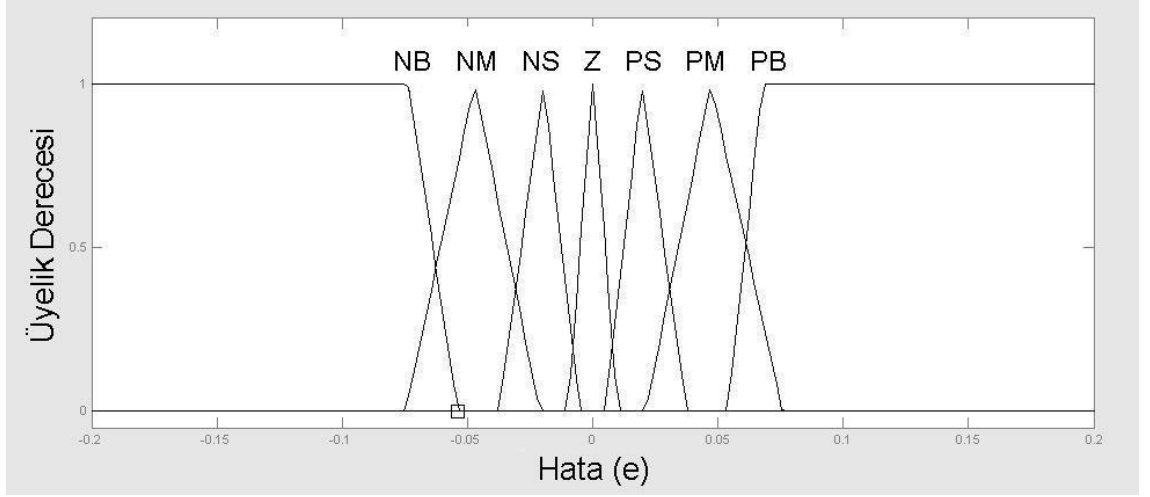
3.11 Dört Rotorlu Hava Aracı İçin Önerilen Bulanık Kontrolörler

Dört rotorlu hava aracında yalpa ve yunuslama için bir kontrolör sapma için ise başka bir kontrolör önerilmiştir. Sistem için kullanılan deney modeli Şekil 3.25’de ve bulanık kontrolör yapısı Şekil 3.26’da görülmektedir. Tasarlanan bulanık kontrolörde kullanılan ölçeklendirme katsayıları (groll, groll1, gpitch, gpitch1, gyaw ve gyawrate) için deney düzeneğinde gerçek zamanlı deneme yanılma ile uygun değerler belirlenmiştir

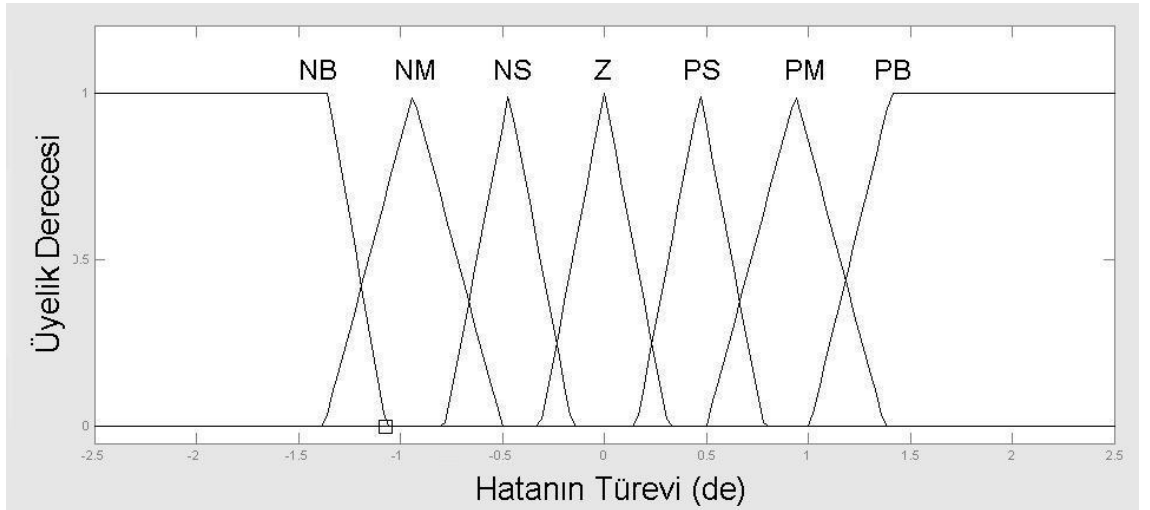
3.11.1 Yalpalama ve yunuslama için üyelik fonksiyonları

Bir dört rotorlu hava aracının yalpa ve yunuslama açısı kontrolü için önerilen kontrolör hata üyelik fonksiyonu Şekil 3.17’de [-0.2 0.2] aralığında, hatanın türevi üyelik fonksiyonu Şekil 3.18’de [-2.5 2.5] aralığında ve çıkış üyelik fonksiyonu ise Şekil

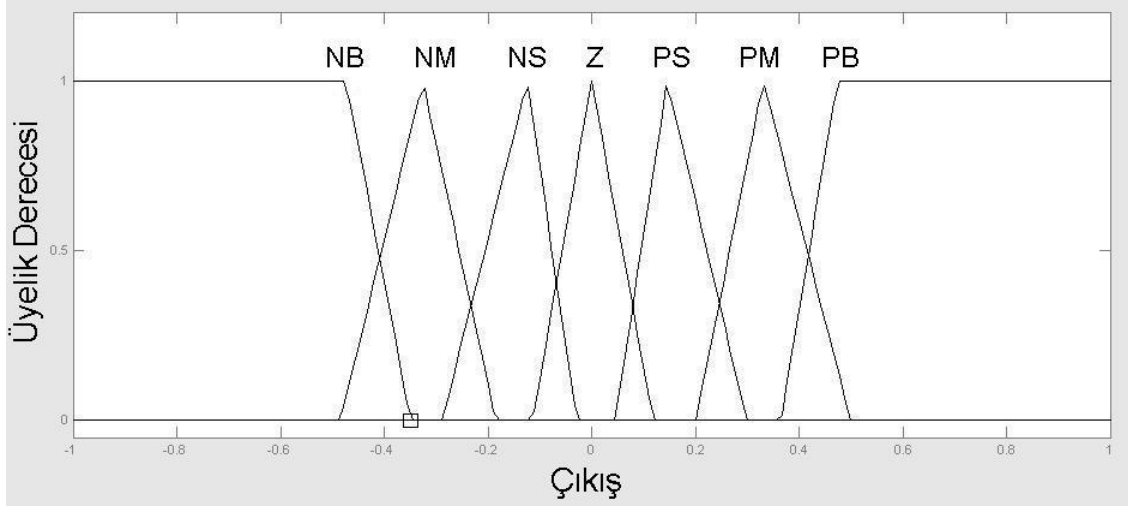
3.19’da $[-1 \ 1]$ aralığında görülmektedir. Yalpa ve yunuslama için önerilen kontrolörün kontrol yüzeyi ise Şekil 3.20’de görülmektedir. Yalpalama ve yunuslama için tasarlanmış olan kontrolörün kural tablosu Çizelge 2’de görüldüğü gibi olup her giriş için yedişer üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır. Tasarlanmış olan kontrolde toplam kırk dokuz adet kural mevcuttur. Ayrıca tasarlanan kontrolörün durulaştırma kısmında ise ağırlık merkezi metodu kullanılmıştır.



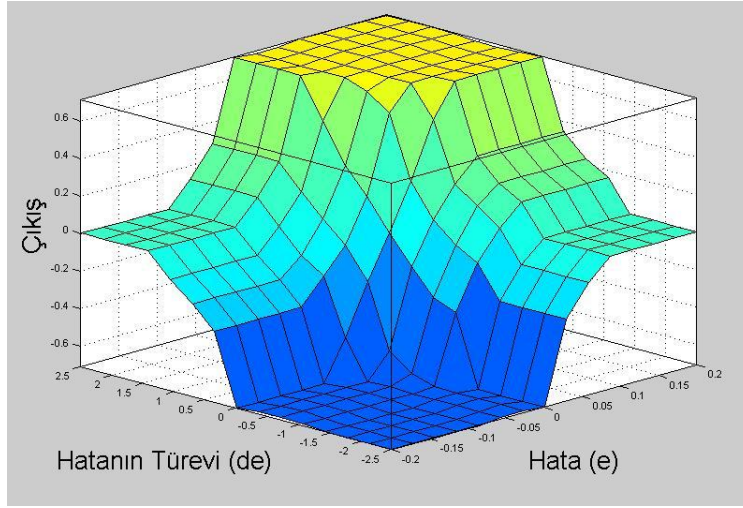
Şekil 3.17 : Yalpalama ve Yunuslama Hata Üyelik Fonksiyonu.



Şekil 3.18 : Yalpalama ve Yunuslama Hatanın Türevi Üyelik Fonksiyonu.



Şekil 3.19 : Yalpalama ve Yunuslama Çıkış Üyelik Fonksiyonu.



Şekil 3.20 : Yalpalama ve Yunuslama Kontrol Yüzeyi.

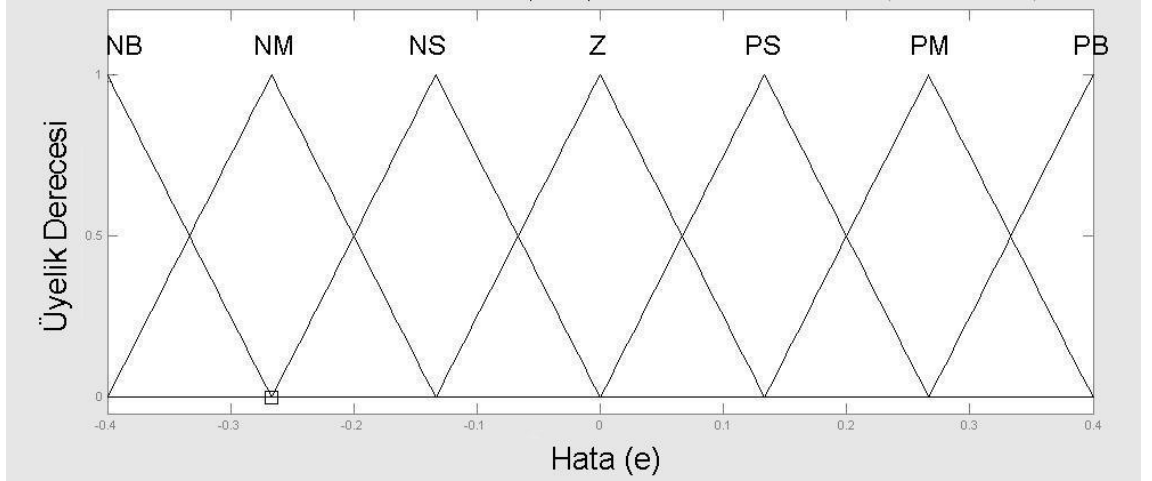
Çizelge 2 : Yalpalama Ve Yunuslama İçin Kural Çizelgesi.

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NS	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

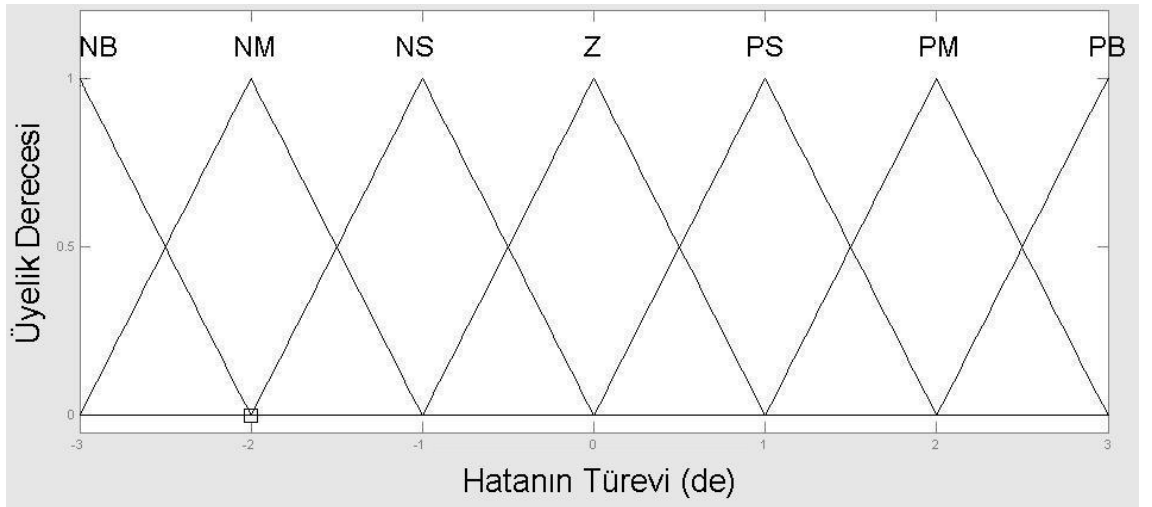
3.11.2 Sapma için üyelik fonksiyonları

Sapma açısı kontrolü için önerilen kontrolör hata üyelik fonksiyonu Şekil 3.21’de $[-0.4, 0.4]$ aralığında, hatanın türevi üyelik fonksiyonu Şekil 3.22’de $[-3, 3]$ aralığında ve çıkış üyelik fonksiyonu ise Şekil 3.23’de $[-1, 1]$ aralığında görülmektedir. Sapma için önerilen

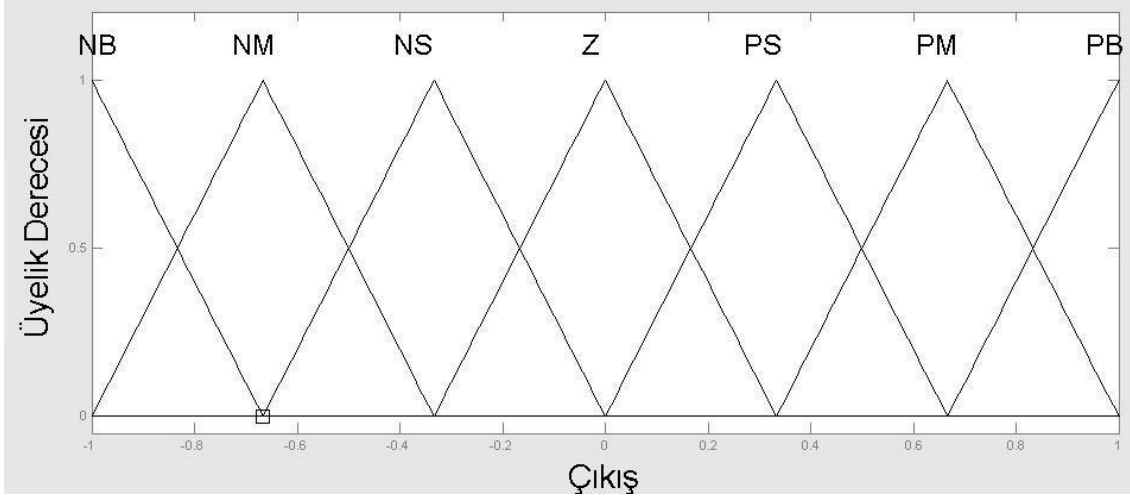
kontrolörün kontrol yüzeyi ise Şekil 3.24’de görülmektedir. Sapma için tasarlanmış olan kontrolörün kural tablosu Çizelge 3’de görüldüğü gibi olup her giriş için yedişer üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır. Tasarlanmış olan kontrolde toplam kırk dokuz adet kural mevcuttur. Ayrıca tasarlanan kontrolörün durulaştırma kısmında ise ağırlık merkezi metodu kullanılmıştır.



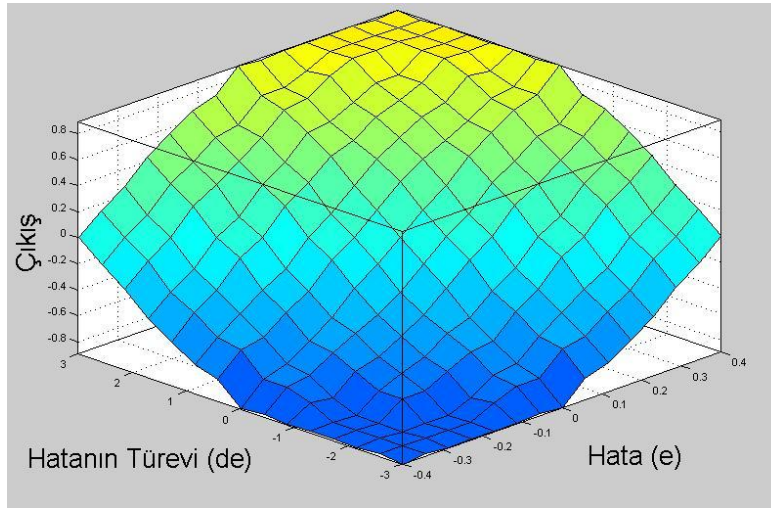
Şekil 3.21 : Sapma Hata Üyelik Fonksiyonu.



Şekil 3.22 : Sapma Hatanın Türevi Üyelik Fonksiyonu.



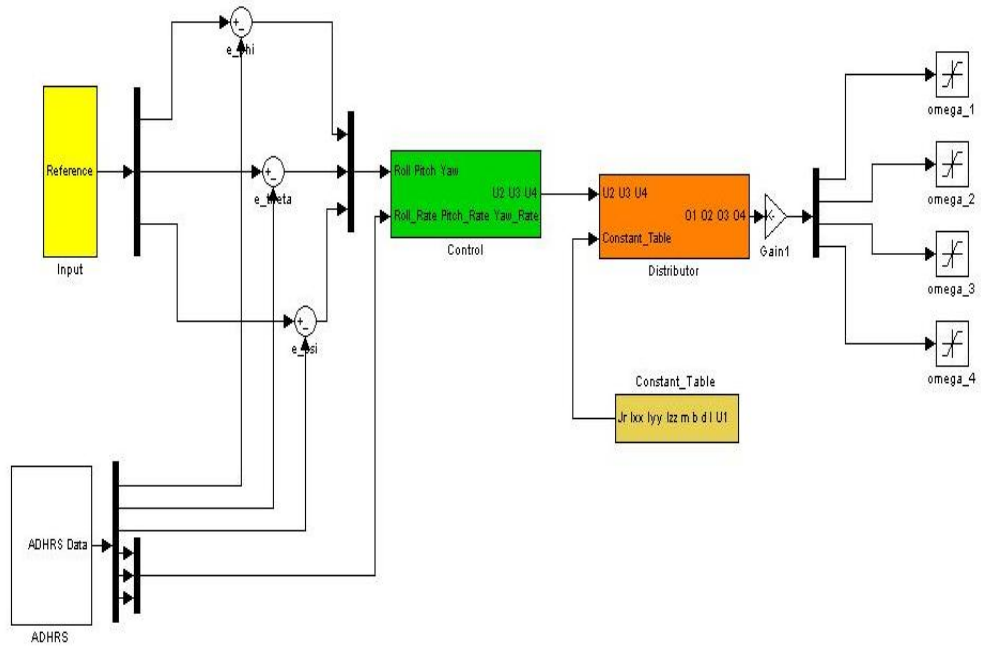
Şekil 3.23 : Sapma Çıkış Üyelik Fonksiyonu.



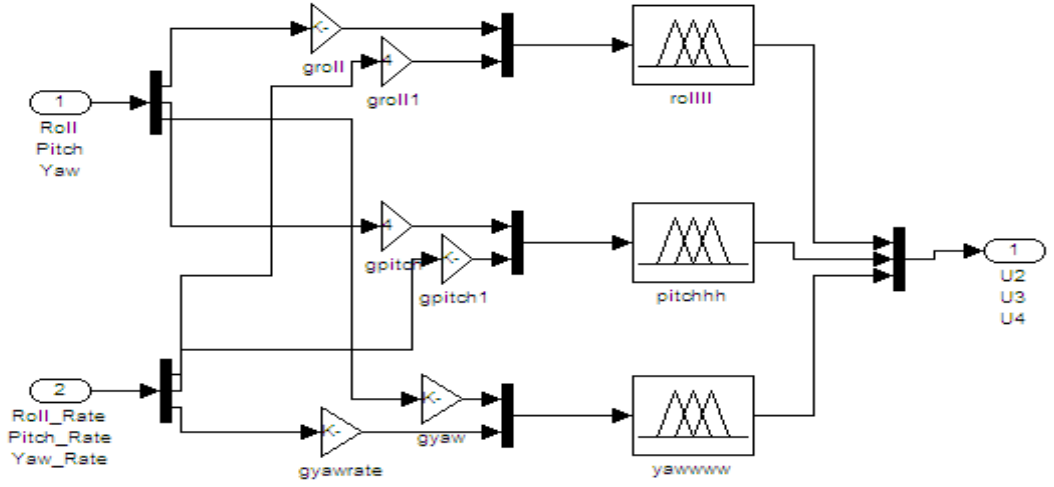
Şekil 3.24 : Sapma Kontrol Yüzeyi.

Çizelge 3 : Sapma İçin Kural Çizelgesi.

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB



Şekil 3.25 : Dört Rotorlu Hava Aracı Deney Modeli.



Şekil 3.26 : Bulanık Kontrolör Yapısı.

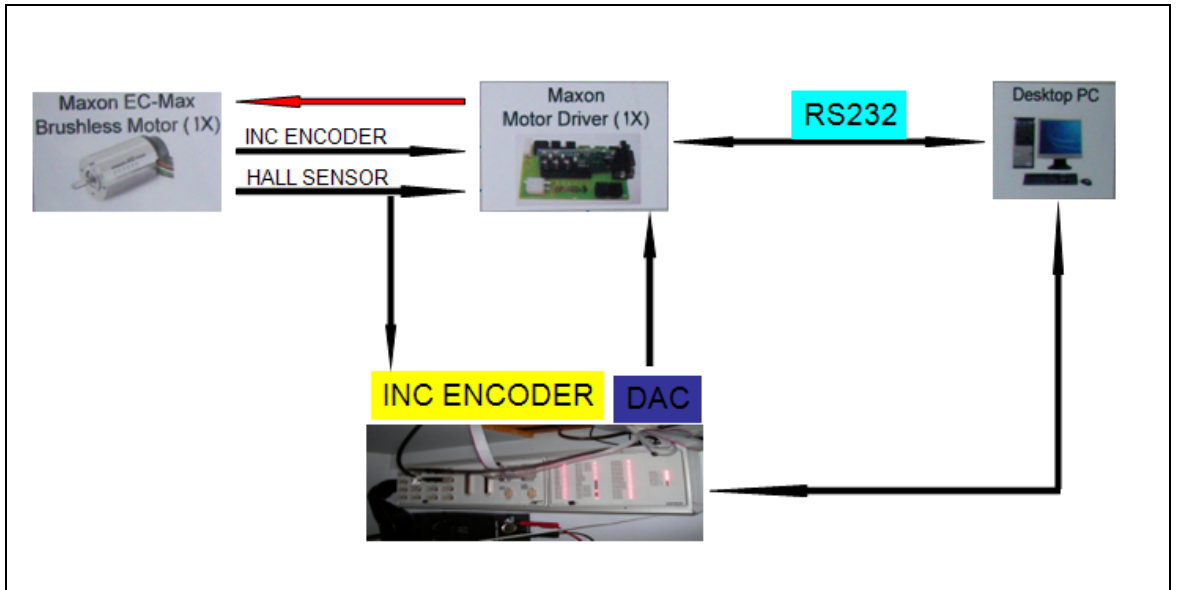
4. GERÇEK ZAMANLI DENEY ORTAMI

Bu kısımda bulanık kontrolörlerin tasarlama sürecinde kullanılan deney düzenekleri tanıtılmıştır. DC motor deney düzeneği için dSPACE DS1104, dört rotorlu hava aracı için dSPACE DS1103 kullanılmıştır.

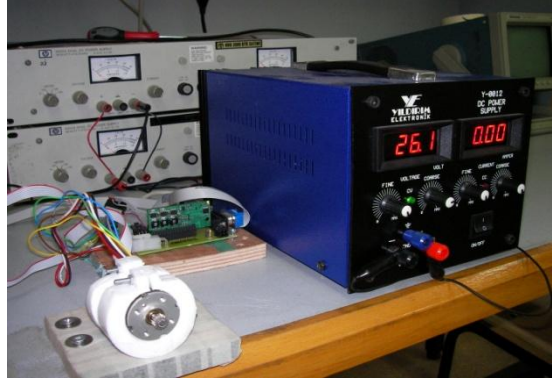
4.1 DC Motor Deney Düzeneği

Dinamik sistem olarak daha basit matematiksel modele sahip DC motor kullanılmıştır. Deney seti içerisinde DC motor olarak bir adet Maxon DC fırçasız motor ve sürücüsü kullanılmıştır(EK A). Gerçek zamanlı deneysel işlev kazandıran DS 1104(EK B) sistemi yer almaktadır. Gerçek zamanlı deney için kullanılan düzeneğin işleyiş şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. Deney düzeneği ise Şekil 4.2’de görüldüğü gibidir.

Deney düzeneği içerisinde üretilen kontrol işareti DS1104 aracılığı ile motor sürücüsüne aktarılmaktadır. Motor miline bağlı kodlayıcı vasıtasıyla da motor konum bilgisi gerçek zamanlı olarak alınabilmektedir.

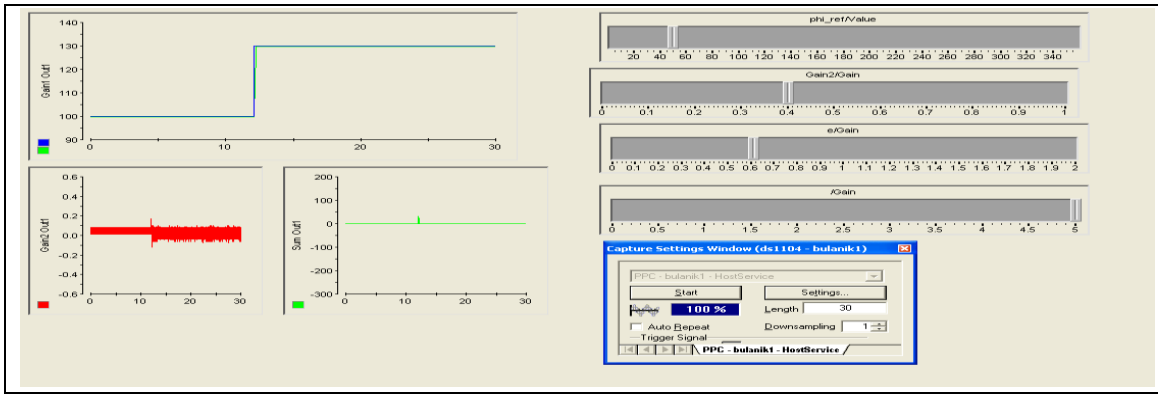


Şekil 4.1 : DC Motor İşleyiş Şeması



Şekil 4.2 : DC Motor Deney Düzenegi.

Şekil 4.3’de ise sistemin kontrolünde büyük önem arz eden dSPACE programının kullanıcı arayüzü görülmektedir. Bu ara yüz sayesinde sisteme istenilen referans girişler uygulanabilmekte aynı zamanda oluşturulmuş olan sistem modelindeki tüm katsayıların değerleri de değiştirilebilmektedir.

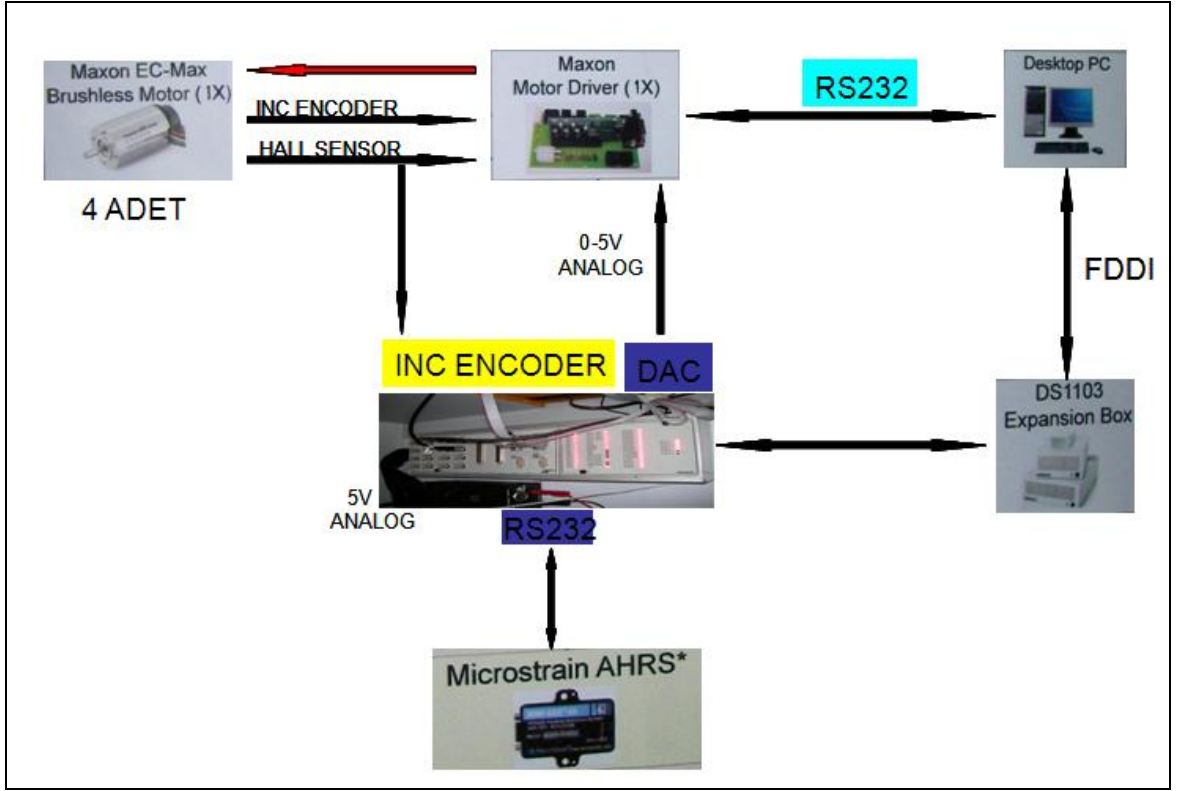


Şekil 4.3 : DC Motor Gerçek Zamanlı Sistem Dizaynı.

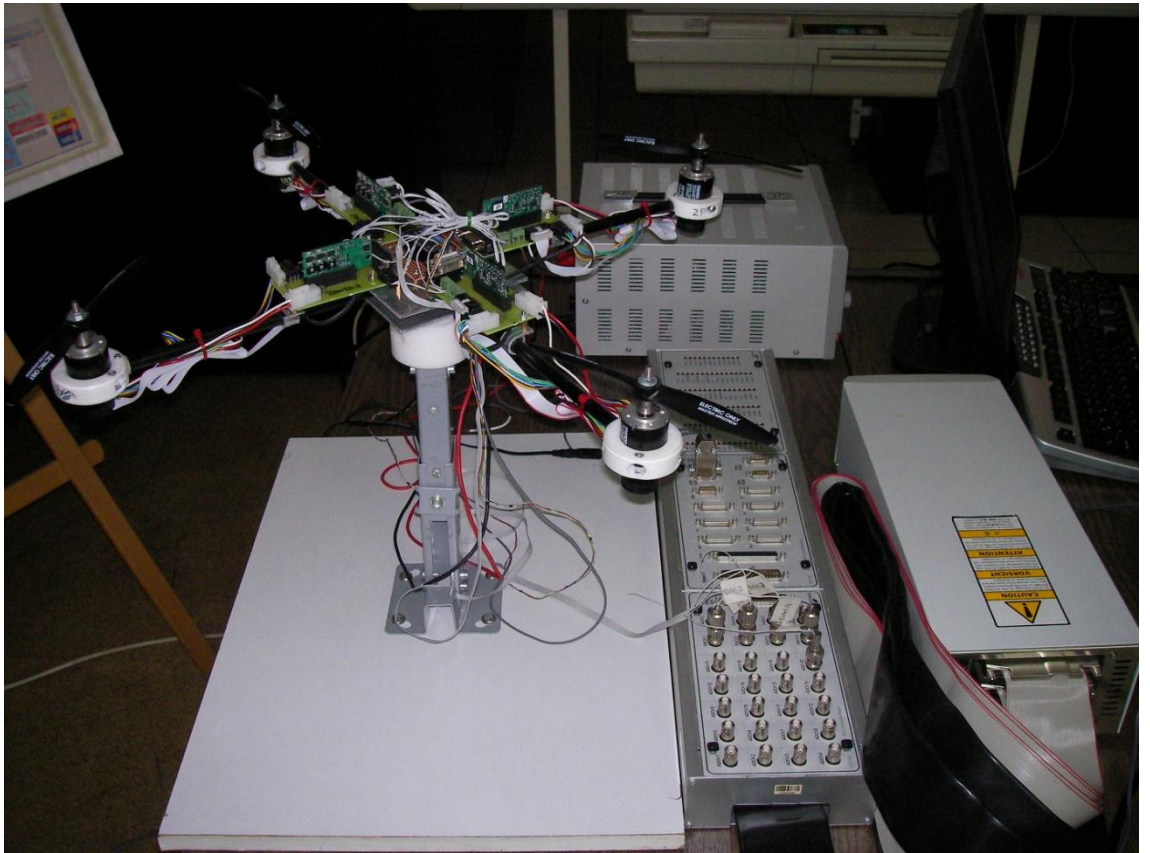
4.2 Dört Rotorlu Hava Aracı Deney Düzenegi

Dört rotorlu hava aracı deney düzenegi dört adet Maxon DC fırçasız motor, bir adet DS1103(EK C) ve bir adet ataletsel ölçüm ünitesinden(IMU)(EK D) oluşmaktadır. Deney için kullanılan düzenegin işleyiş şeması Şekil 4.4’de deney düzenegi ise Şekil 4.5’de görüldüğü gibidir.

Deney düzenegi içerisinde üretilen kontrol işaretleri DS1103 aracılığı ile motor sürücülerine aktarılmaktadır. Motorların millerine bağlı kodlayıcılar vasıtasıyla da motorların hız bilgileri gerçek zamanlı olarak alınabilmektedir.

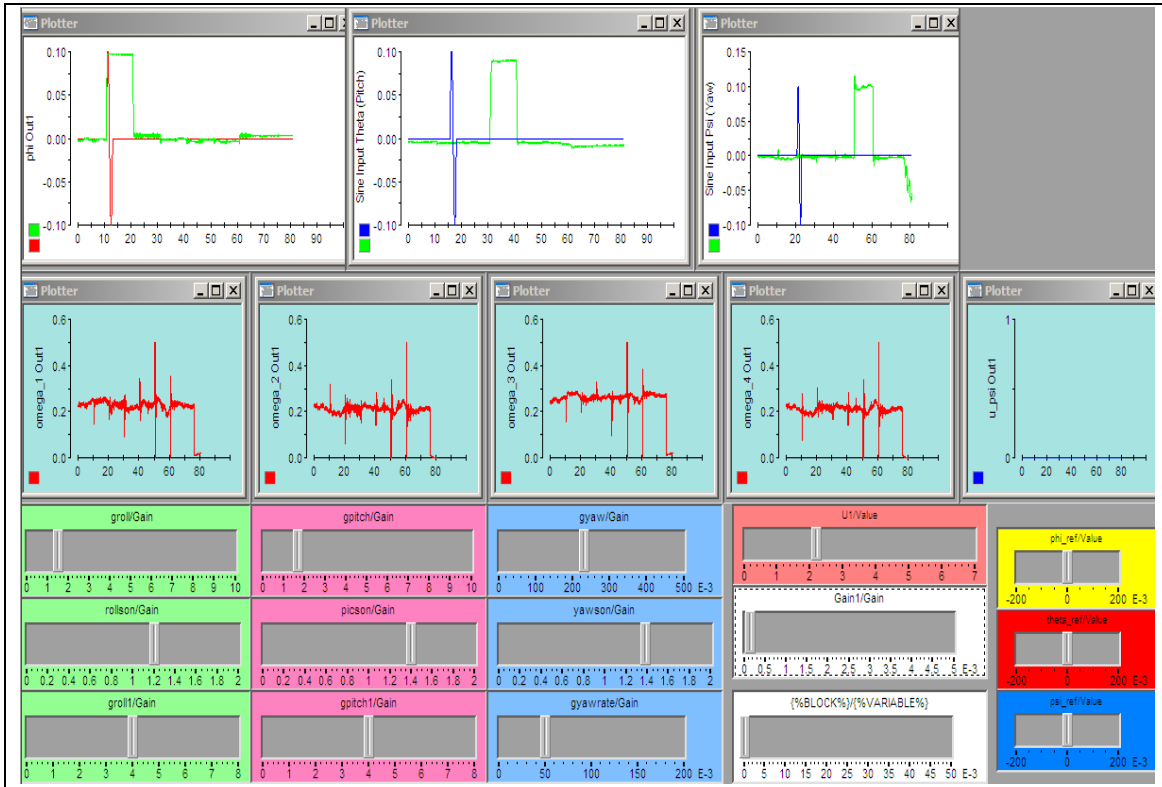


Şekil 4.4 : Dört Rotorlu Hava Aracı İşleyiş Şeması.



Şekil 4.5 : Dört Rotorlu Hava Aracı Deney Düzeneği.

Şekil 4.6’da ise sistem kontrolü için gerekli olan katsayıların belirlenmesi ve sisteme istenilen anda giriş sinyali uygulanabilmesi için kullanılmış olan dSPACE programının kullanıcı arayüzü görülmektedir. Bu arayüz sayesinde gerçek zamanlı olarak sistem değerleri ile oynanabilmektedir. Bu arayüzde üstteki grafikler yunus, yalpa ve sapma grafikleri onların altındaki grafikler ise her bir motora giden kontrol işaretleridir. Bu grafiklerinde altına bulunan bölümler ise sistem içerisinde bulunan katsayıların değerlerinin değiştirilebildiği barlardır. Hemen sağdaki kısımlar ise sisteme referans girişlerin verildiği barlardır.



Şekil 4.6 : Dört Rotorlu Hava Aracı Gerçek Zamanlı Sistem Dizaynı.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 DC Motor Kontrolü İçin Bulanık Kontrolör Deney Sonuçları

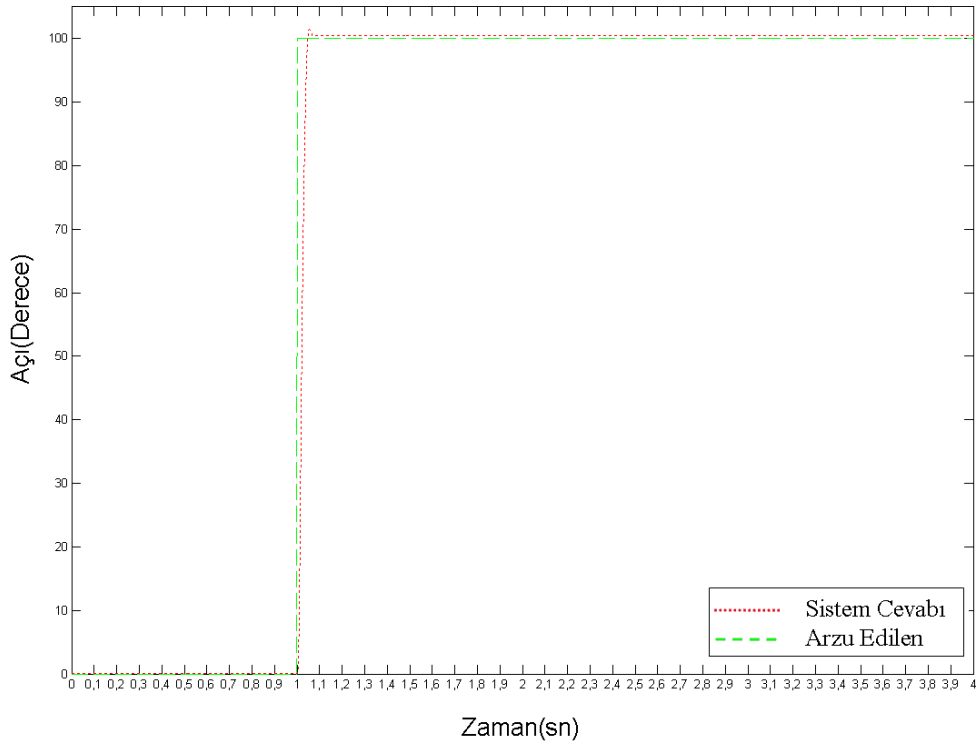
DC motorun konum ve yörünge kontrolü performans değerlendirmesi için sisteme basamak ve sinüs giriş fonksiyonları uygulanmıştır. Basamak giriş fonksiyonu sistem için tasarlanmış olan kontrolörün zaman tanım bölgesi yanıtında performansını geliştirmek için uygun üyelik fonksiyonlarının oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Bulanık kontrolörün verilen bu referans girişlere karşı sistem cevapları PID kontrolörün sistem cevaplarıyla karşılaştırılmıştır. Sistemden elde edilen veriler 100 Hz’de alınmış olup, karşılaştırmada kullanılan PID kontrolcünün değerleri ise deney seti ve Ziegler Nichols yöntemi kullanılarak P için 34.75, I için 6 ve D için 0.275 olarak bulunmuştur.

5.1.1 Üyelik fonksiyonu ve durulayıcı yönteminin belirlenmesi

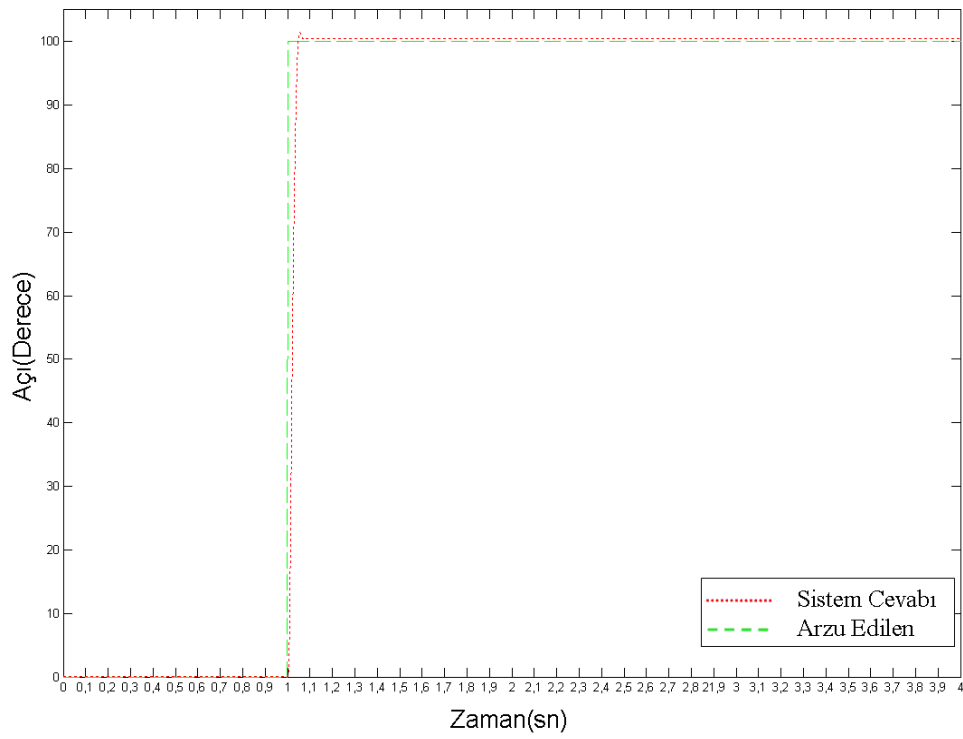
Bu bölümde bulanık kontrolcünün durulaştırma kısmındaki yöntemini değiştirip sistemin çıkışına bakılarak uygun durulayıcı yöntemine ve değişik üyelik fonksiyonlarının çıkışlarına bakılarak da uygun üyelik fonksiyonuna karar verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ise kullanılan sistem için en uygun durulaştırma yönteminin ağırlık merkezi olduğu görülmüştür. Aynı şekilde bulanık kontrolcüde üyelik fonksiyonları “üçgen” yerine “sigmoid” kullanıldığında sistemin salınıma girme eğilimi üçgen üyelik fonksiyonuna göre daha fazla artmaktadır. Bu sebepten dolayı sistemde üçgen üyelik fonksiyonu ve durulayıcı olarak ise ağırlık merkezi tercih edilmiştir.

Şekil 5.1’de durulaştırıcı Bisector iken motora 100 derecelik basamak giriş uygulandığında aşım %1,5425 olurken sürekli hal hatası %0,44 olduğu görülmektedir.

Şekil 5.2’de durulaştırıcı Bisector iken motora 100 derecelik basamak giriş uygulandığında aşım %1,4975 olurken sürekli hal hatası %0,44 olduğu görülmektedir.



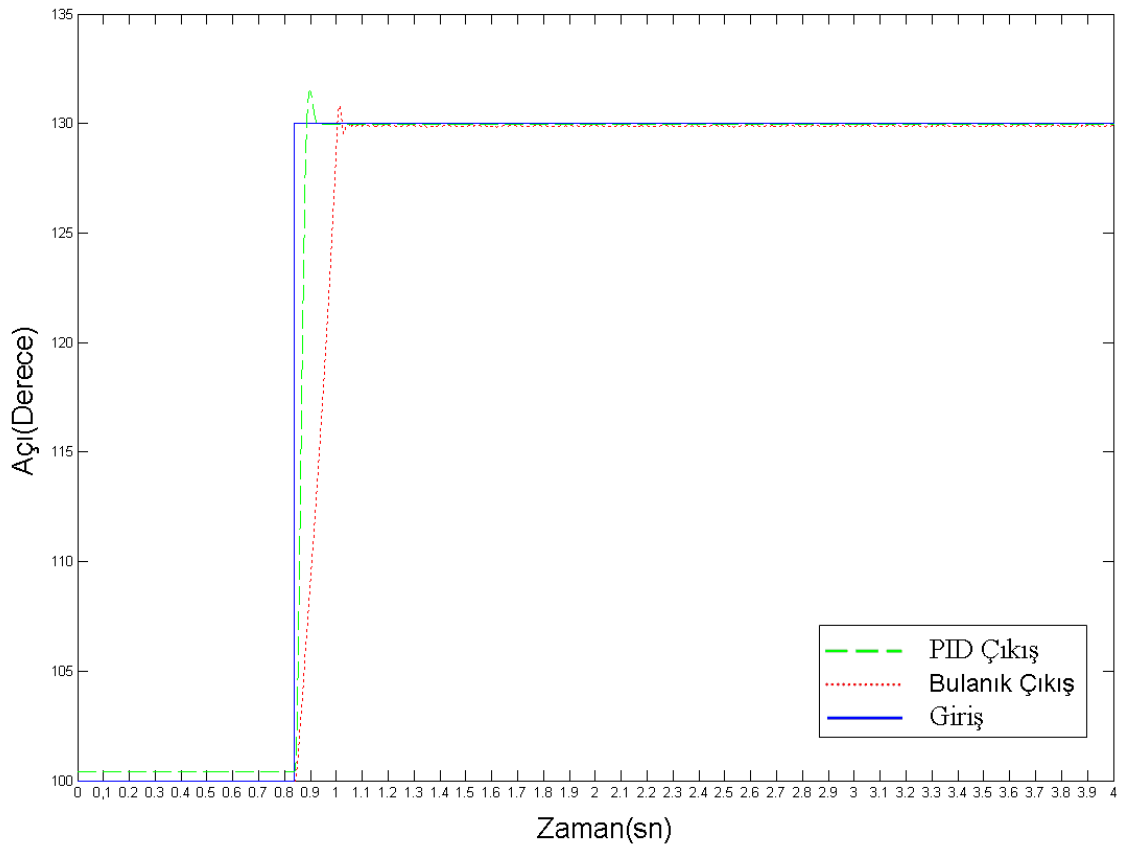
Şekil 5.1 : Durulaştırıcı Bisector İken.



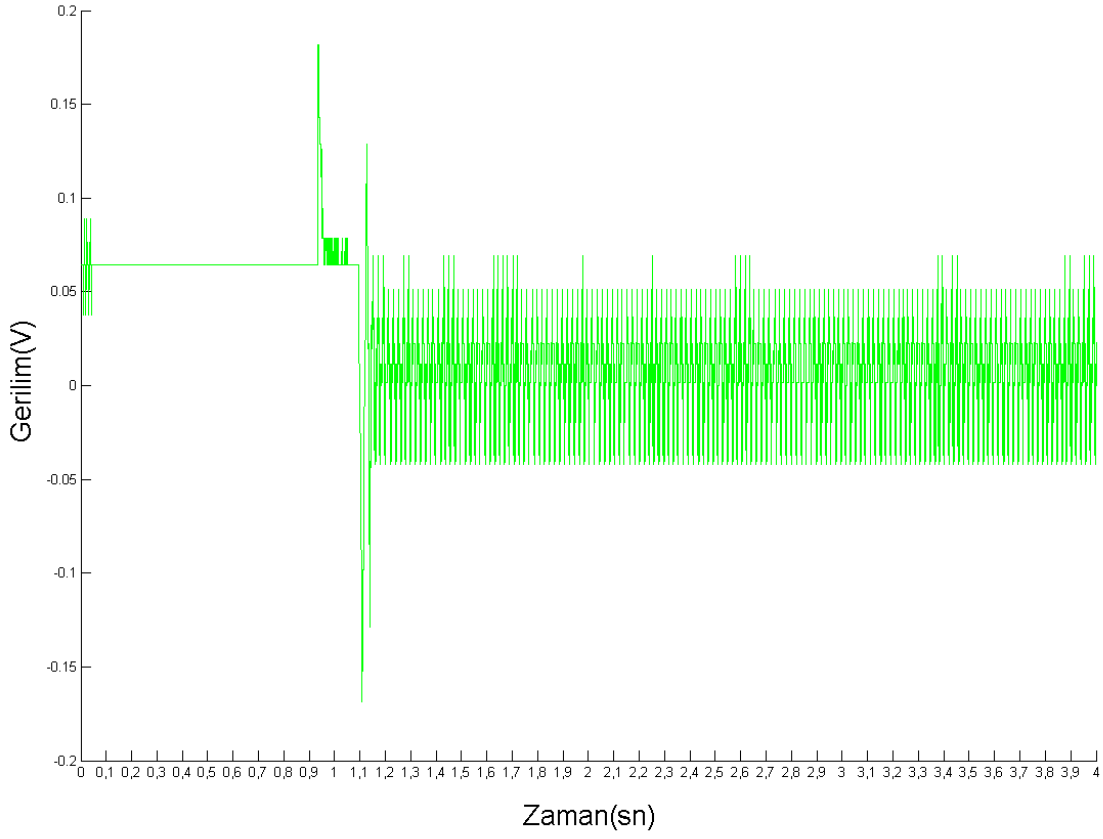
Şekil 5.2 : Durulaştırıcı Centroid İken.

5.1.2 DC Motor konum kontrolü

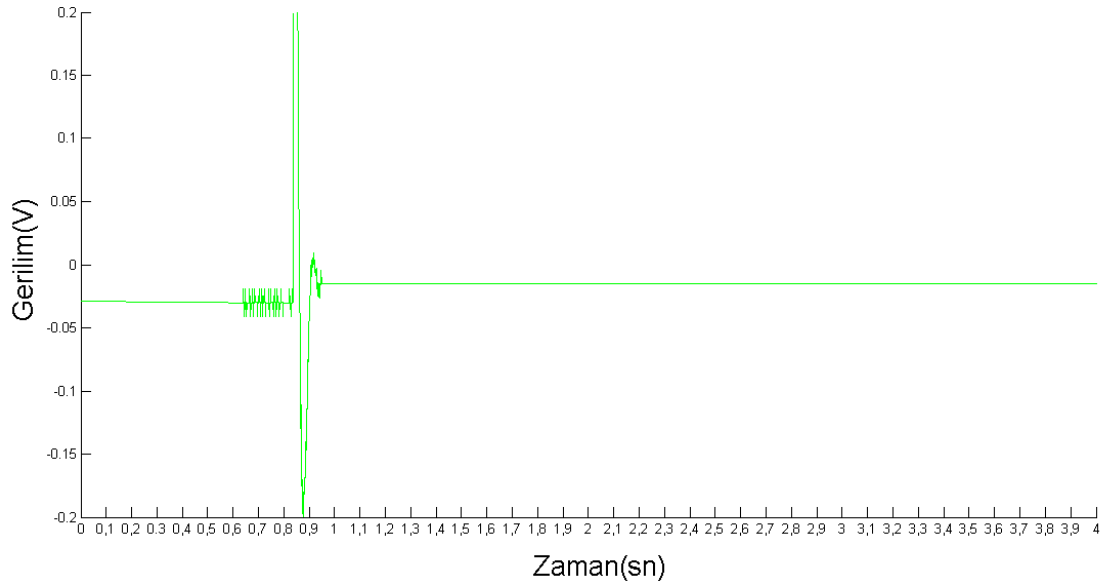
Yukarıdaki çalışma sonucunda elde edilen deneyimler sayesinde DC motor konum kontrolü için bulanık kontrolör tasarımı yapılmıştır. Sisteme 30 derecelik basamak giriş sinyali uygulandığında sistemin verdiği çıkış Şekil 5.3’de görülmektedir. Grafikteki kırmızı olan bulanık kontrolcü çıkışı yeşil ise PID kontrolcü çıkışıdır. PID kontrolcü daha erken yerleşme zamanına sahip olmasına rağmen sürekli hal hatası ve aşım açısından bulanık kontrolcüye göre daha kötü performans sergilemiştir. Bulanık kontrolcü ise daha geç yerleşme zamanına sahip olmasına rağmen genel olarak diğer cevaba göre daha iyi performans göstermiştir. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de ise üretilen kontrol işaretleri görülmektedir. Bu kontrol işaretlerine bakıldığında bulanık kontrolcünün kontrol işaretinde küçük bir miktar titreşim olduğu göze çarpmaktadır. Fakat titreşimin aralığı çok küçük olduğundan sistem açısından çok büyük bir önem arz etmemektedir.



Şekil 5.3 : Basamak Giriş Karşılaştırma.



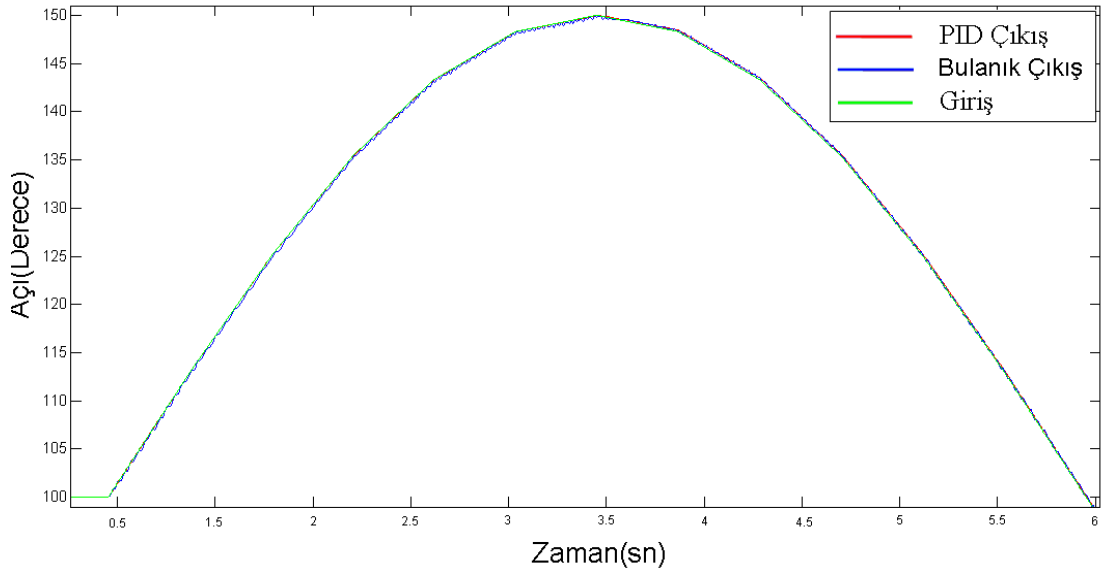
Şekil 5.4 : Bulanık Kontrolör Kontrol İşareti.



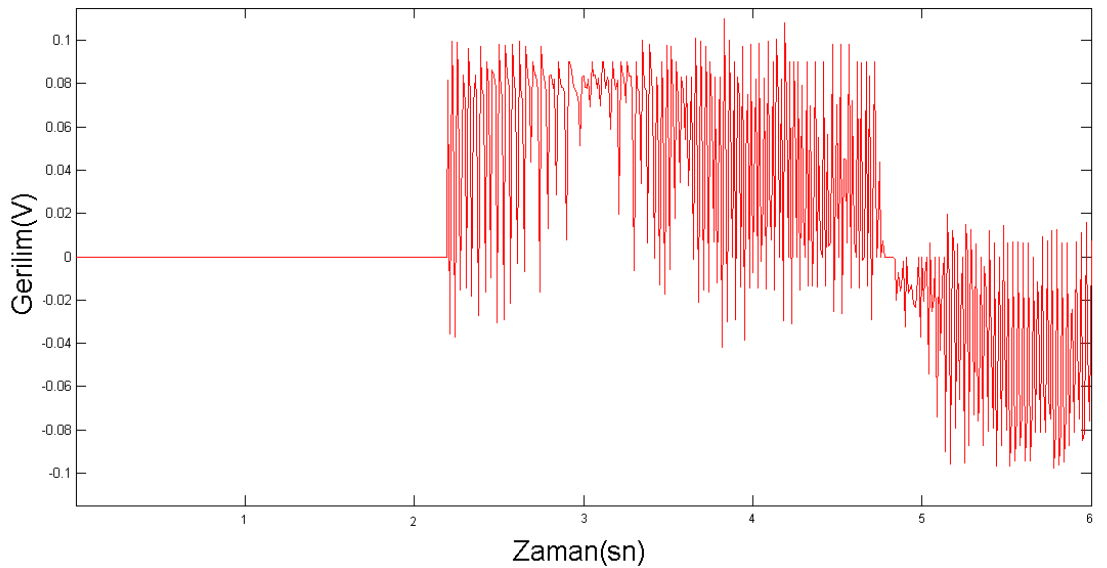
Şekil 5.5 : PID Kontrol İşareti.

5.1.3 DC Motor yörünge kontrolü

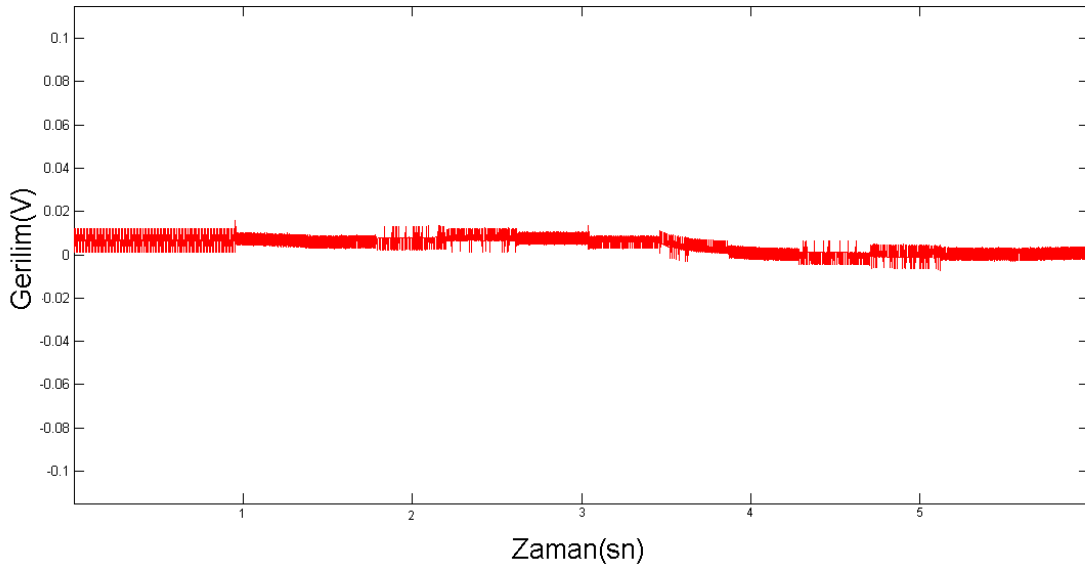
DC motor kontrolü için tasarlanan kontrolöre referans olarak sinüs işareti uygulandığında sistemin cevabı Şekil 5.6’da görülmektedir. Burada sadece sinüsün zaman eksenine göre pozitif yönde olan kısmı alınmıştır. Bulanık kontrolörün de PID kontrolör kadar iyi takip yaptığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de üretilen kontrol işaretleri görülmektedir.



Şekil 5.6 : Sinüs Karşılaştırma.



Şekil 5.7 : Bulanık Kontrol İşareti.



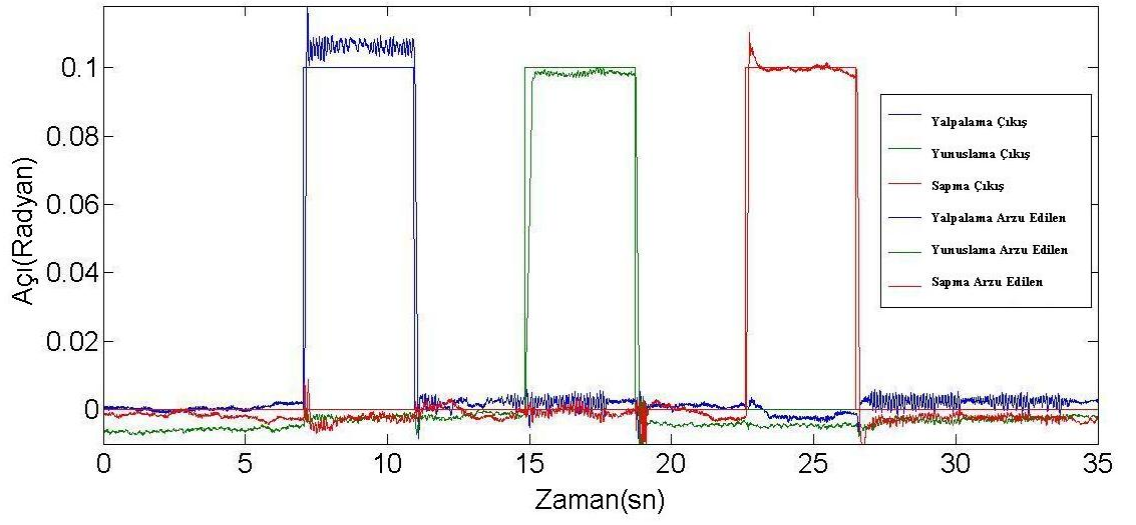
Şekil 5.8 : PID Kontrol İşareti.

5.2 Dört Rotorlu Hava Aracı Bulanık Kontrol Deneyisel Sonuçlar

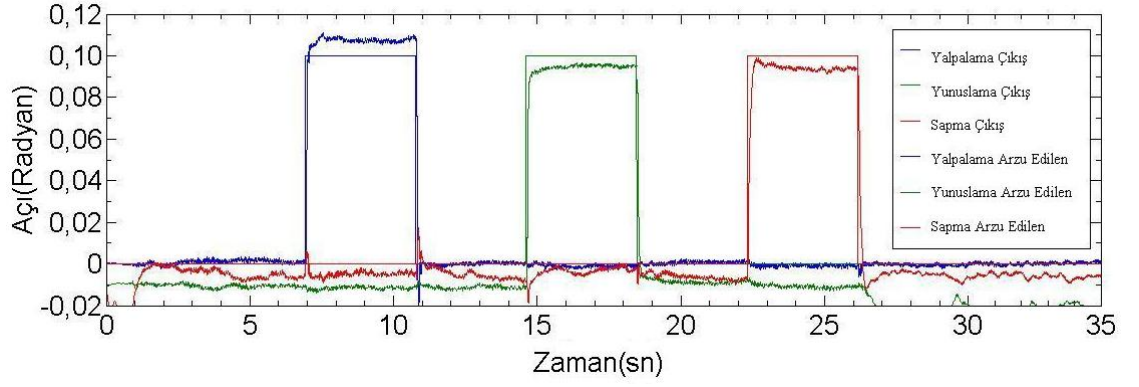
Dört rotorlu hava aracının konum kontrolü için basamak fonksiyonu ve yörünge takip performansı için de sinüs giriş fonksiyonları uygulanmıştır.

5.2.1 Dört rotorlu hava aracı konum kontrolü

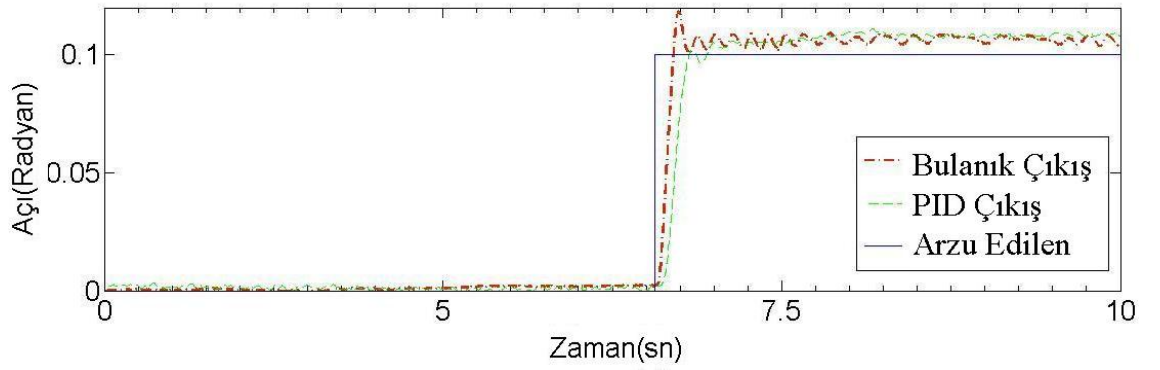
Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da sisteme uygulanan basamak giriş fonksiyonu ve sırasıyla sistemin bulanık kontrolör cevabı ile PID kontrolör cevabı görülmektedir. Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de sistemin sırasıyla yalpa, yunus ve sapma eksenlerindeki bulanık kontrolcü ile PID kontrolcü sistem cevaplarının karşılaştırılması görülmektedir. Bu kısımda sisteme uygulanmış olan basamak girişinin aralığı 0-0.1 radyandır. Şekil 5.11 ve 5.13’de bulanık kontrolcünün yalpa ve sapma eksenlerinde daha kısa yükselme zamanına sahipken Şekil 5.12’de daha uzun bir yükselme zamanına sahip olduğu görülmektedir. Fakat üç eksen de bulanık kontrolcünün PID kontrolcüye nazaran daha kısa yerleşme zamanı ve daha az sürekli hal hatasına sahip olduğu söylenebilir.



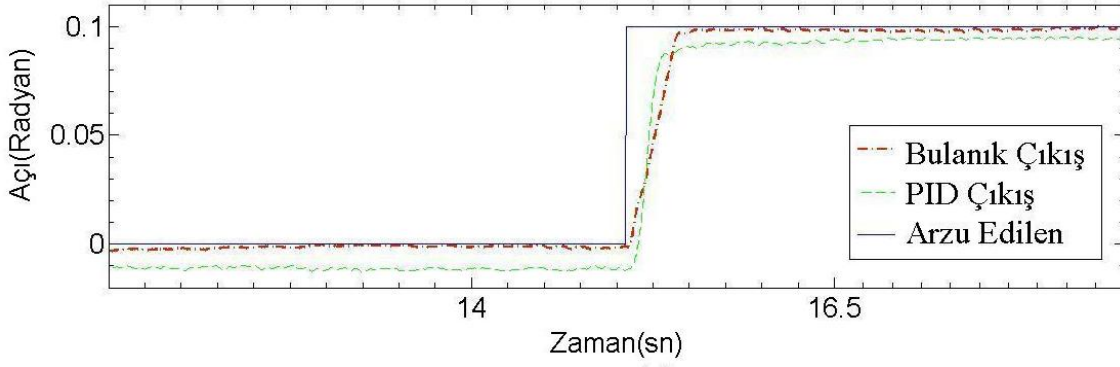
Şekil 5.9 : Birim Basamak Giriş Bulanık Kontrolör Cevabı.



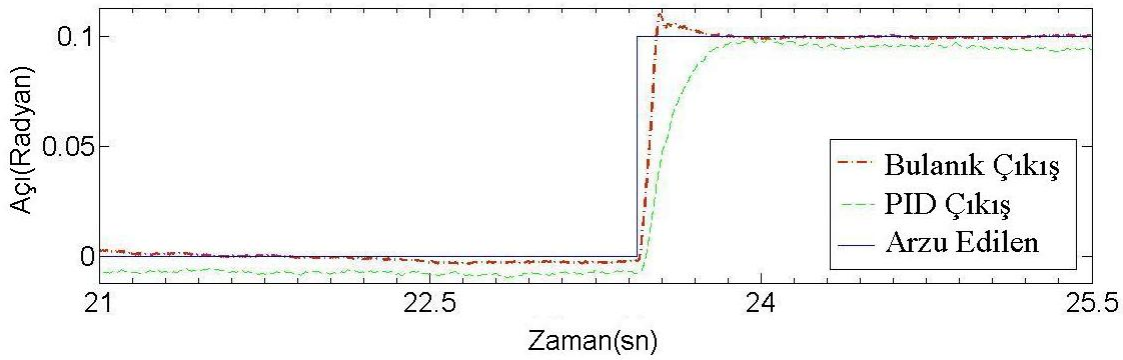
Şekil 5.10 : Birim Basamak Giriş PID Kontrolör Cevabı.



Şekil 5.11 : Birim Basamak Giriş Yalpalama Ekseninde Karşılaştırma.



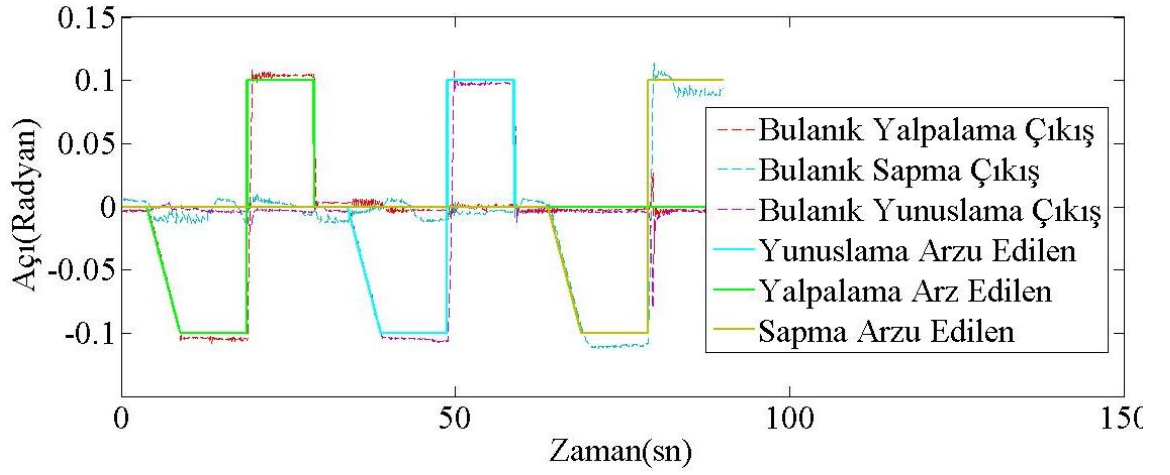
Şekil 5.12 : Birim Basamak Giriş Yunuslama Ekseninde Karşılaştırma.



Şekil 5.13 : Birim Basamak Giriş Sapma Ekseninde Karşılaştırma.

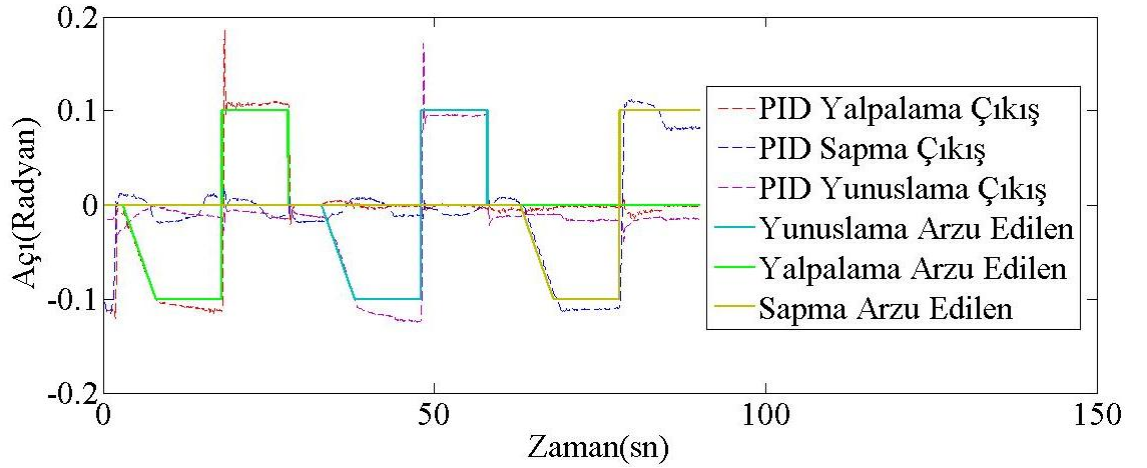
Tasarlanmış olan kontrolörün daha geniş açılardaki dayanıklılığını test edebilmek için oluşturulmuş olan test sinyali ve kontrolcülerin bu test sinyaline karşılık verdikleri cevaplar birbirleri ile karşılaştırılmış bir halde Şekil 5.17, Şekil 5.18, şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de görülmektedir.

Bu kısımda sisteme uygulanan test sinyalinin aralığı -0.1’den 0.1’e kadardır. Bu kısımdaki kullanılan kontrolörlerin katsayıları ile basamak uygulandığında kullanılan katsayılar aynı olup sistem için tasarlanan kontrolörler değiştirilmemiştir. Uygulanan test sinyalindeki amaç sistem için tasarlanmış olan kontrolcülerin dayanıklılığını test etmektir. Genel olarak kontrolör cevaplarına bakıldığında PID daha fazla aşım ve daha çok sürekli hal hatasına sahip iken bulanık kontrolcü daha oturmuş ve istenene daha yakın bir sistem cevabı üretmiştir.

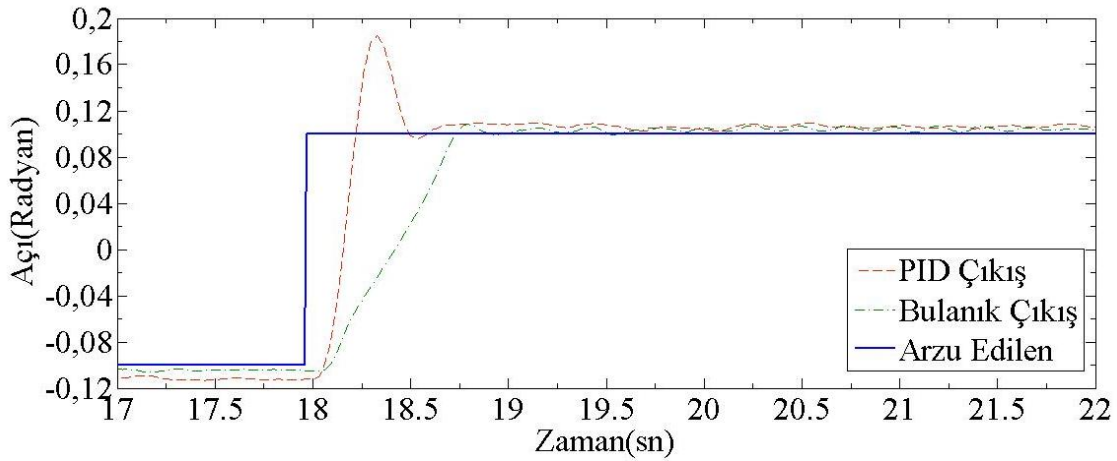


Şekil 5.14 : Dayanıklılık Testi Bulanık Kontrolör Cevabı.

Şekil 5.14’de bulanık kontrolcü cevabı incelendiğinde her üç ekseninde de çok hafif bir aşım ve çok az bir sürekli hal hatası olduğu görülmektedir. Ayrıca sistemin her eksenindeki hareketi eş zamanlı olarak diğer eksenlerde de bir harekete sebebiyet vermiştir. Fakat Şekil 5.15’deki PID kontrolcü cevabına bakıldığında aşırı derecede bir aşım ve sürekli hal hatası görülmektedir.

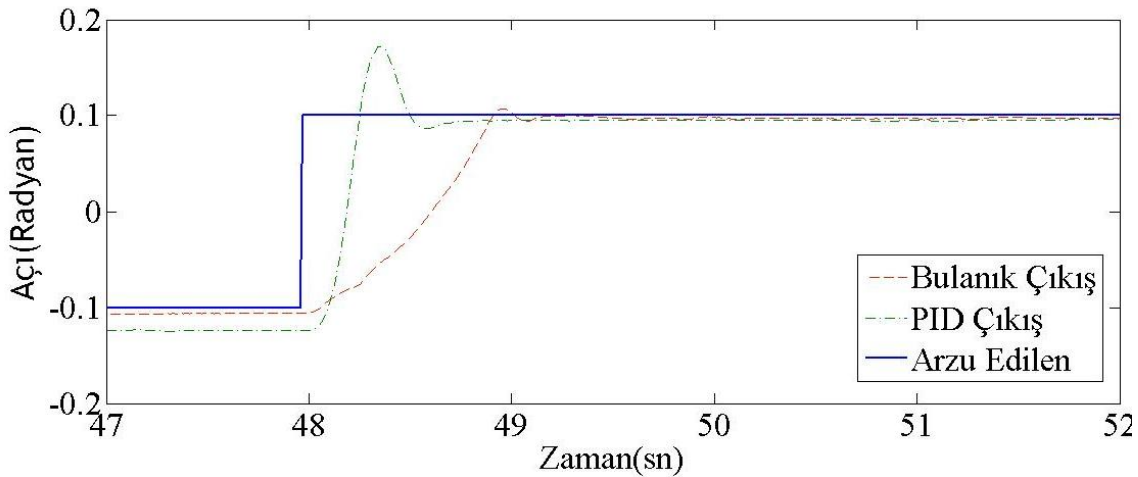


Şekil 5.15 : Dayanıklılık Testi PID Kontrolör Cevabı.



Şekil 5.16 : Dayanıklılık Testi Yalpa Ekseninde Karşılaştırma.

Şekil 5.16’da her iki kontrolcünün de yalpalama eksenindeki cevapları görülmektedir. Bu grafik basamaktan önce ve sonra olmak üzere iki kısımda incelendiğinde PID’nin ilk kısımda negatif yönde yaklaşık 0.015 radyanlık bir sürekli hal hatası mevcut iken bulanık kontrolcüde bu değer 0.005 radyan mertebesinde olmuştur. İkinci kısım incelendiğinde ise PID 0.07 radyanlık bir aşımın ardından yaklaşık olarak 1.75 saniyede yerleşirken bulanık kontrolcü herhangi bir aşım sebebiyet vermeden aynı zaman zarfı içerisinde yerleşmiştir. PID’nin birinci kısımda var olan aşırı sürekli hal hatası ise ikinci kısımdaki sürekli hal hatasının gereğinden az olmasına sebep olmuştur. Böylece bulanık kontrolcü ile ikinci kısımdaki hal hatası neredeyse aynı olmuştur.



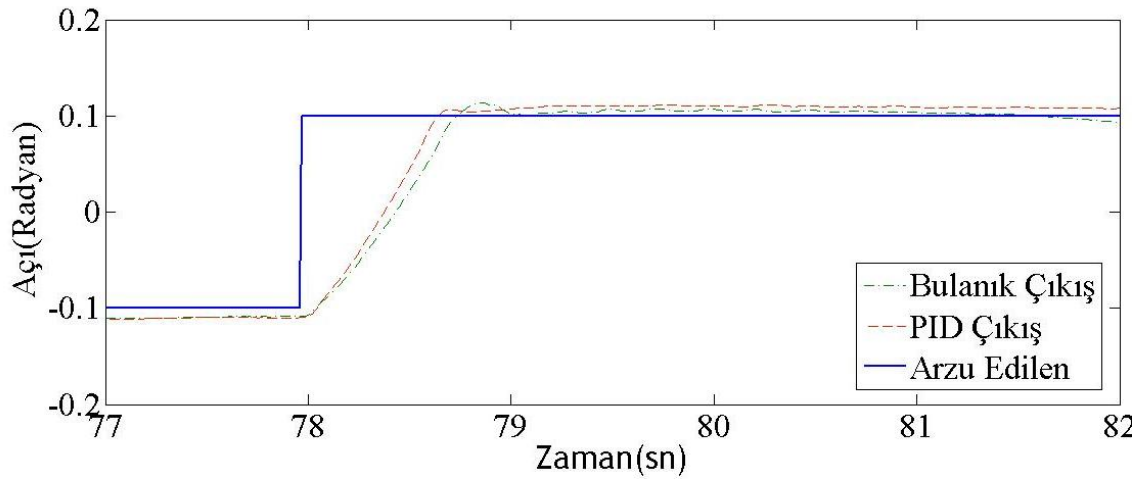
Şekil 5.17 : Dayanıklılık Testi Yunuslama Ekseninde Karşılaştırma.

Şekil 5.17’de her iki kontrolcünün de yunuslama eksenindeki cevapları görülmektedir. Bu grafik basamaktan önce ve sonra olmak üzere iki kısımda incelendiğinde PID ‘nin

ilk kısımda negatif yönde yaklaşık 0.02 radyanlık bir sürekli hal hatası mevcut iken bulanık kontrolcüde bu değer 0.002 radyan mertebesinde olmuştur. İkinci kısım incelendiğinde ise PID 0.06 radyanlık bir aşımın ardından yaklaşık olarak 0,6 saniyede yerleşirken bulanık kontrolcü herhangi bir aşım sebebiyet vermeden 1 saniyede yerleşmiştir. PID 'nin birinci kısımda var olan aşırı sürekli hal hatası ise ikinci kısımdaki sürekli hal hatasının gereğinden az olmasına sebep olmuştur. Böylece bulanık kontrolcü ile ikinci kısımdaki hal hatası neredeyse aynı olmuştur.

Dört rotorlu hava aracı için yalpalama ile yunuslama hareketi dinamik denklemlerden de görülebileceği gibi birbirlerinin aynısı olduğu ve her iki eksen içinde sistemin cevapları yaklaşık olarak aynı olması olağandır. Buna karşın sapma hareketi diğer iki ekseninde yapılan hareketten bağımsızdır. Bu sebepten dolayı sapma hariç diğer eksenlerdeki sonuçlar yaklaşık aynı çıkmıştır.

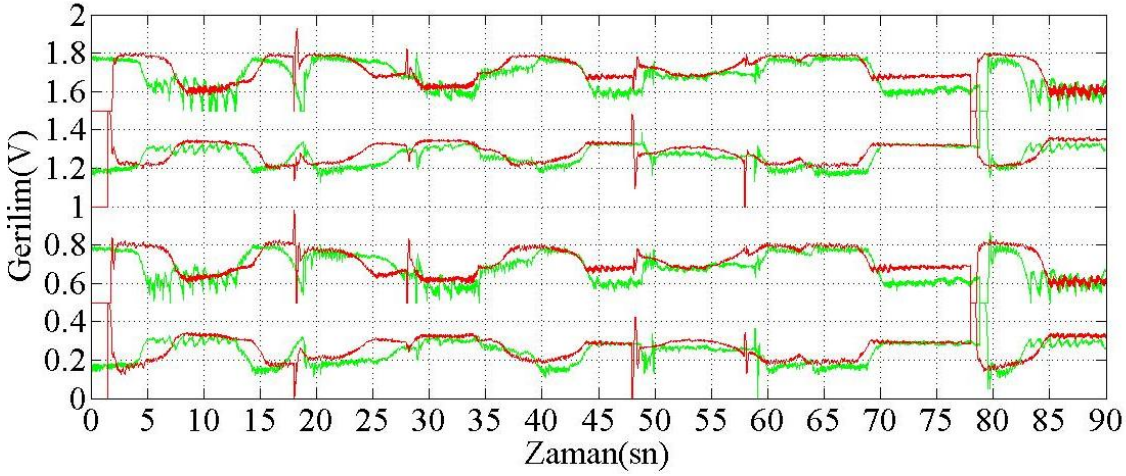
Şekil 5.18'de de kontrolcülerin sapma ekseninde ki sistem cevapları görülmektedir. Her iki kontrolcüde yaklaşık 0,6 saniye yükselme ve yerleşme zamanına sahiptir. Bulanık kontrolcünün sürekli hal hatası PID kontrolöre nazaran biraz daha az iken PID kontrolörün yükselme zamanı bulanık kontrolcüye göre çok az kısa olmuştur.



Şekil 5.18 : Dayanıklılık Testi Sapma Ekseninde Karşılaştırma.

Şekil 5.19'da yeşil renk bulanık kontrolcünün her bir motor için ürettiği kontrol işaretlerini, kırmızı renk ise PID'nin her bir motor için ürettiği kontrol işaretlerini göstermektedir. Dört motor için üretilen kontrol işaretlerinin hepsi aynı grafikte gösterilebilmesi için birinci motor hariç diğer her birisine kümülatif olarak y ekseninde 0.5 değeri eklenmiştir. PID kontrol işaretlerine bakıldığında kontrol işaret aralığının

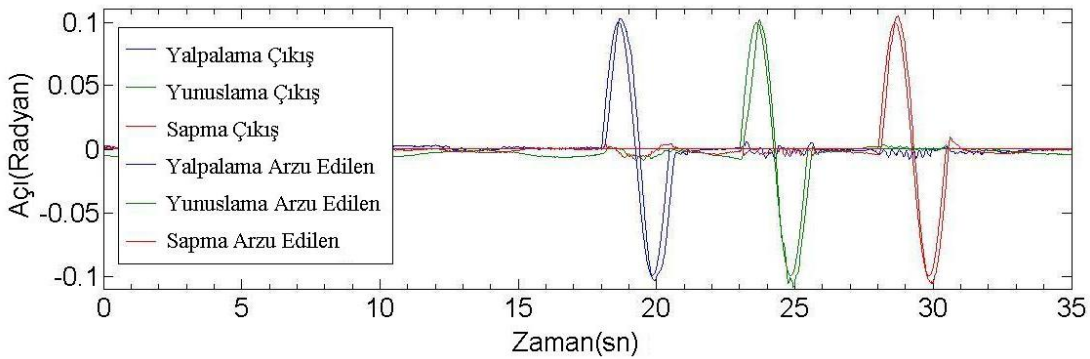
bulanık kontrolöre nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da hatanın büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Yani düzeltilmesi gereken hata ne kadar büyük ise kontrol işareti de o kadar büyük olur.



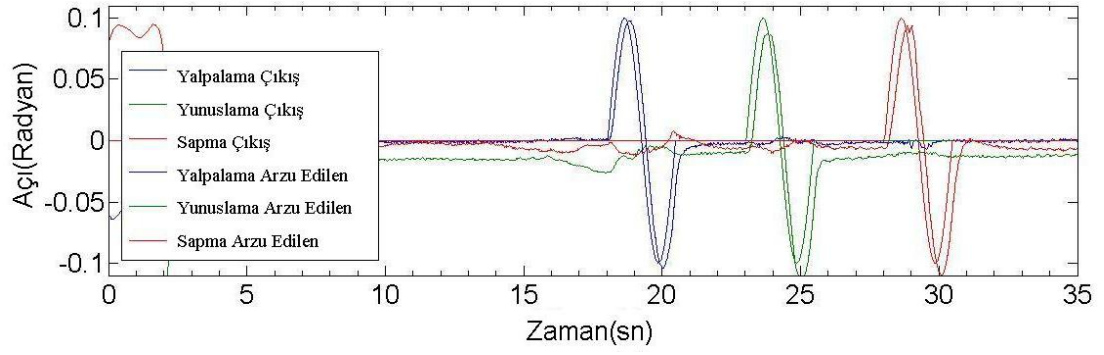
Şekil 5.19 : Dayanıklılık Testi Kontrol İşaretleri Karşılaştırma.

5.2.2 Dört rotorlu hava aracı yörünge kontrolü

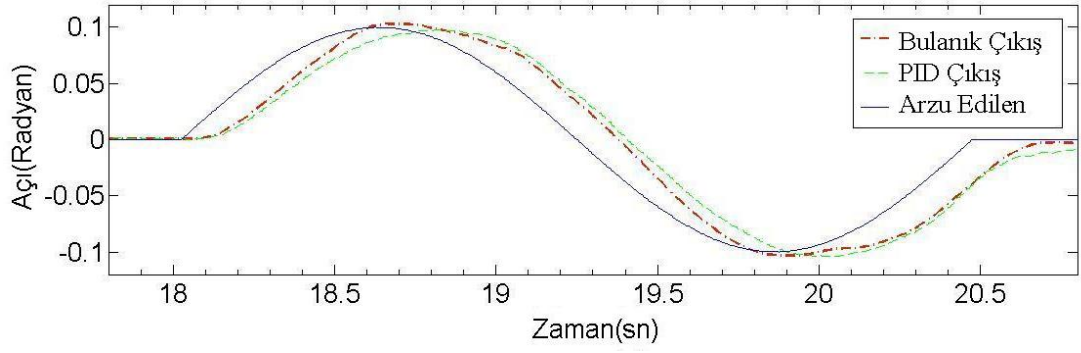
Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de sisteme uygulanan sinüs giriş fonksiyonu ve sırasıyla sistemin bulanık kontrolör cevabı ile PID kontrolör cevabı görülmektedir. Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’de sistemin sırasıyla yalpa, yunus ve sapma eksenlerindeki bulanık kontrolcü ile PID kontrolcü sistem cevaplarının karşılaştırılması görülmektedir. Bu üç grafiğe bakılarak bulanık kontrolcünün PID kontrolcüye nazaran yörünge takip performansının daha iyi olduğu söylenebilir.



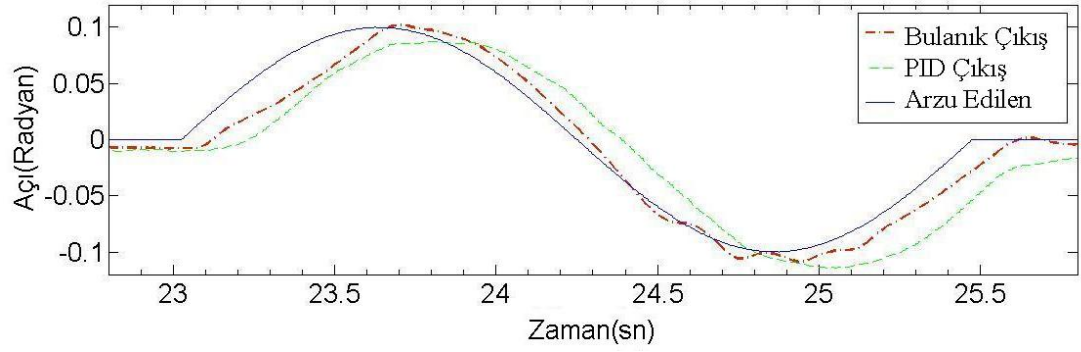
Şekil 5.20 : Yörünge Kontrolü İçin Bulanık Kontrolör Cevabı.



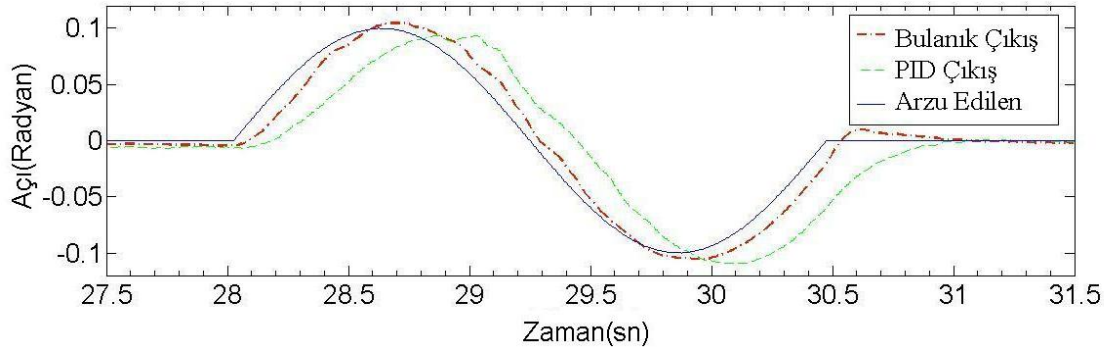
Şekil 5.21 : Yörünge Kontrolü İçin PID Kontrolör Cevabı.



Şekil 5.22 : Yörünge Kontrolü Yalpalama Ekseninde Karşılaştırma.



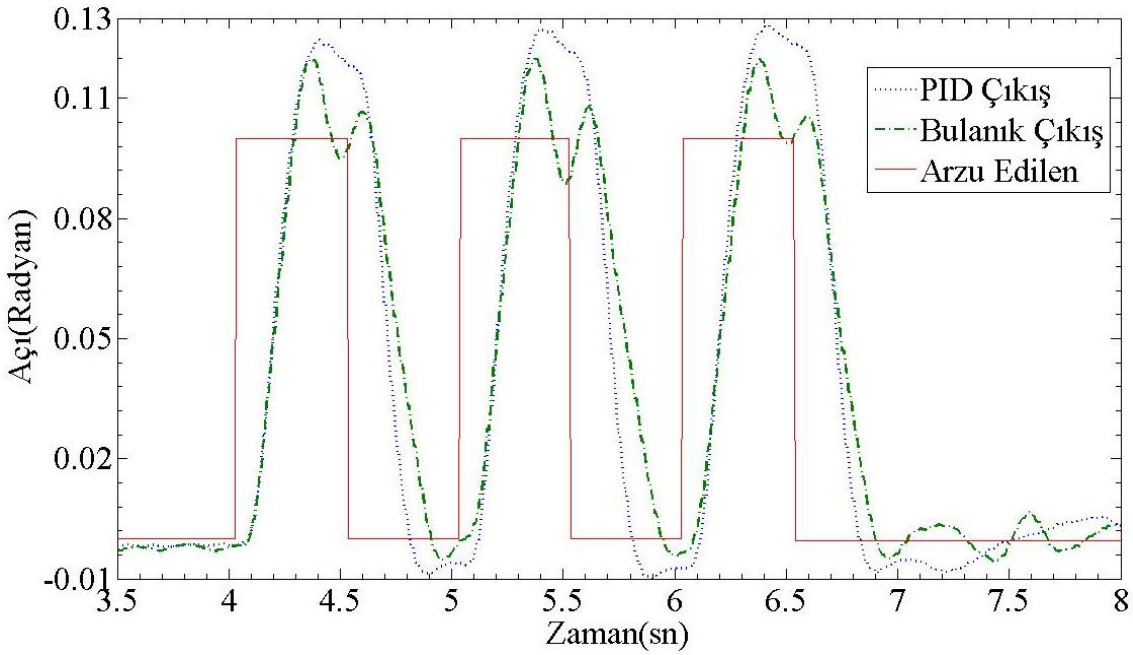
Şekil 5.23 : Yörünge Kontrolü Yunuslama Ekseninde Karşılaştırma.



Şekil 5.24 : Yörünge Kontrolü Sapma Ekseninde Karşılaştırma.

5.2.3 Tasarlanan kontrolör için durum çalışması deney sonuçları

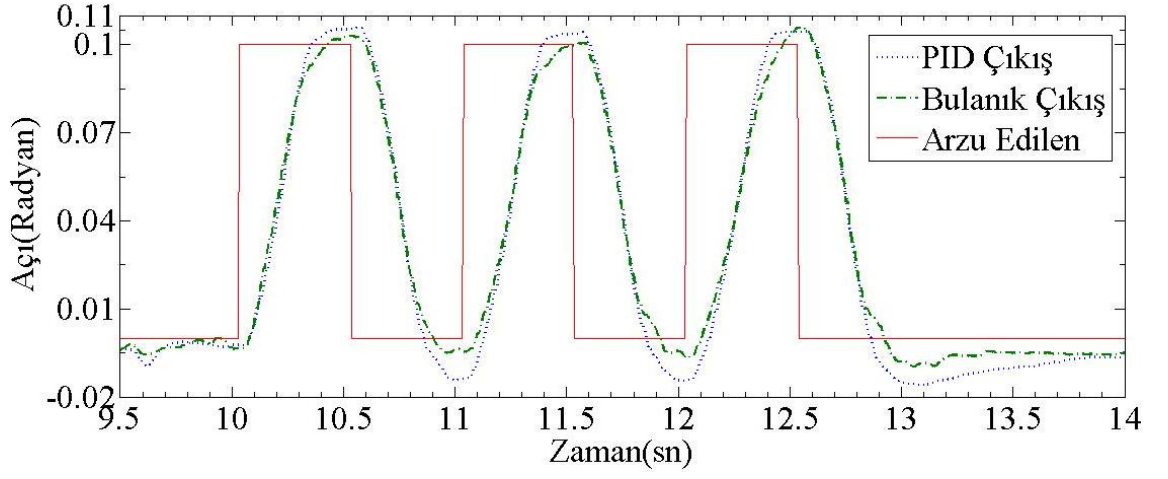
Dört rotorlu hava aracı için tasarlanmış olan bulanık kontrolör ile PID kontrolör dayanıklılıklarını karşılaştırmak için sisteme 0.5 saniye aralıklarla 0.5 saniyelik darbe fonksiyonu uygulanmıştır. Bu giriş sinyali için bulanık kontrolör ve PID kontrolör yalpalama eksenindeki sistem cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.25’de gösterilmiştir.



Şekil 5.25 : Durum Çalışması Yalpalama Ekseninde Karşılaştırma.

Yalpalama eksenindeki dayanıklılık deneyi 100Hz de yapılmıştır. Bu grafik incelendiğinde bulanık kontrolörün PID kontrolöre göre daha az aşım yaptığı görülmektedir.

Bulanık kontrolör ve PID kontrolör sapma eksenindeki sistem cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.26'da gösterilmiştir.



Şekil 5.26 : Durum Çalışması Sapma Ekseninde Karşılaştırma.

Sapma eksenindeki grafik incelendiğinde bulanık kontrolörün PID kontrolöre göre daha az aşım yaptığı ve referans işareti daha iyi takip ettiği görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dinamik modeli itibari karmaşık yapıda olan dört rotorlu hava aracı için iki adet birbirinden bağımsız bulanık kontrolör tasarlanmıştır. Ayrışamayan doğrusal olmayan dinamikleri itibariyle ilgi çekici bir yapıda olan dört rotorlu hava aracı konum ve yörünge kontrolü için gerçek zamanda sistem davranışı göz önüne alınarak özgün yapıda bulanık kontrolörler tasarlanmıştır.

Bulanık mantık yönteminin özünde olan uzman bilgisi, gerçek zamanda yapılan deneyler sonucunda yapılan çıkarımlarla özellikle üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi sağlanmıştır. Böylelikle farklı matematiksel yapılardaki dinamik sistemlerin kontrolü için gerçek zamanlı deneysel ortamlarla etkin bir bulanık kontrolör tasarımı yapılabileceği gösterilmiştir.

Bulanık kontrolör tasarımı aşamasında yapılan çeşitli denemeler sonucunda bulanık kontrolör sistem cevabındaki titreşimin “hatanın türevi” girişi ile, oluşan sürekli hal hatasının ise “hata” girişi ile bağlantılı olduğu değerlendirilmiştir. Gerçek zamanlı deney seti sayesinde kontrolörlerde hangi tip üyelik fonksiyonunun kullanılacağına deneme yanılma yöntemi ile karar verilmiştir.

Sistemin kontrolü için tasarlanmış olan bulanık kontrolörün üyelik fonksiyonlarının birbirlerini simetrik olarak kestiği durumda sistemde bir titreşim meydana geldiği ortaya çıkmış, bu titreşimin engellenmesi için sıfır ve yakın değerlerindeki üyelik fonksiyonlarının daha sık diğer uç noktalardaki olanların ise biraz daha seyrek olması gerekliliği yapılan denemeler sonucunda anlaşılmıştır. Sistem cevabındaki sürekli hal hatasının ise sistem giriş değer uzayının büyüklüğü ile ilgili olduğu ve bu uzayın ne kadar küçük olursa sistemin o kadar hassas çalışacağı anlaşılmıştır. Fakat bu kısımda giriş uzayının çok küçük olması da aynı zaman da sistemin kararlılığını doğrudan etkilediği için kontrolörün girişinde bulunan ayarlama katsayılarının belirlenmesi sistemin hem kararlı hem de hatasız çalışması için oldukça fazla önem arz etmektedir.

Gerçek zamanlı deneysel ortam kullanılarak çalışmanın en büyük avantajı da bu çalışma için bu katsayıların rahatlıkla ve çok kısa sürede belirlenmesi olmuştur.

Tasarlanan bulanık kontrolcülerin sistem cevapları yine aynı şekilde gerçek zamanlı deney seti ile katsayıları ayarlanmış olan PID kontrolör sistem cevapları ile detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için kullanılan PID kontrolörün katsayılarının bulunmasında Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak değerlerin başlangıç noktaları hesaplanmış ve bu noktalardan itibaren deney setindeki denemelerle uygun değerler bulunmuştur.

Denenen dokuz kurallı kontrolör DC motoru kontrol edilebilirken dört rotorlu hava aracı için yetersiz kalmıştır. Dört rotorlu hava aracı için yirmi beş kurallı yeni bir model denendiğinde ise sürekli hal hatasının tamamen kaybolmadığı ve dört rotorlu hava aracı gibi yüksek dereceli doğrusal olmayan bir sistem için minimum kırk dokuz adet kurala sahip bir kontrolör gerekli olduğu anlaşılmıştır. Bundan daha fazla kurala sahip bir kontrolör için ise işlem yükü çok arttığından sistem tepki süresi çok artmıştır. Dolayısıyla dört rotorlu hava aracı seviyesinde doğrusal olmayan bir sistem için uygun üyelik fonksiyon sayısı her giriş için yedi olarak belirlenmiş olup kural tabanı ise kırk dokuz kuraldan oluşmalıdır.

Doğrusal olmayan ve ayrışamayan matematiksel denklemlere sahip dinamik sistemlerin kontrolünde özellikle modellenemeyen ve farklı çalışma durumlarında ortaya çıkan dinamiklerde söz konusu olacağından hesaplamalı yöntemlere göre bulanık kontrolörlerin gerçek zamanlı deney ortamlarında tasarımlarının yapılmasının başarımlı açısından daha etkin kullanılabileceği bu çalışmayla gösterilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan dört rotorlu hava aracı kontrolü için üç serbestlik dereceli hareket yani platform davranış kontrolü (attitude control) esas alınmıştır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan bulanık kontrolörler uçuş kontrol sistemi tasarımında da kullanılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Paul I-Hai Lin, Santai Hwang, John Chou** , “Comparison On Fuzzy Logic And Pld Controls For A Dc Motor Position Controller”, National Taipei Institute of Technology Taipei, Taiwan, Republic of China
- [2] **Jamal Abd Altayef, Zu Qun-Ziong**, “Real –Time DC Motor Position Control by (FPID)Controllers and design (FLC)Using Labview software Simulation”, Beijing University of Chemical Technology
- [3] **Mohd Fua’ad Rahmat, Mariam Md Ghazal**, “Performance Comparison Between Pld And Fuzzy Logic Controller In Position Control System Of Dc Servomotor”, Universiti Teknologi Malaysia, Jurnal Teknologi, 45(D) Dis. 2006: 1–17
- [4] **C.B. Tzeng, Y. C. Liu, M. S. Young**, “A Preliminary Study of Fuzzy Control Parameters and Taguchi- Method on D.C. Servo Motor Control”
- [5] **Changhua Lu, ling Zhang**, “Design and Simulation of a Fuzzy-PID Composite Parameters' Controller with MATLAB”, School of Computer & Information Hefei University of Technology Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences Hefei, Anhui Province, China,2010
- [6] **Mohammed Mahmood Hussein**, “Design and Implementation of a Fuzzy Controller for Small Rotation Angles”, Computer Engineering Department College of Engineering University of Mosul, IRAQ,2010
- [7] **Seda Aydemir, Serkan Sezen, H.Metin Ertunc**, “Fuzzy Logic Speed Control Of A Dc Motor”, Dept. Of Electrical Engineering Kocaeli University, Kocaeli, Turkey
- [8] **Mehmet Çunkaş, Ömer Aydoğdu**, “Realization Of Fuzzy Logic Controlled Brushless Dc Motor Drives Using Matlab/Simulink”, Mathematical and Computational Applications, Vol. 15, No. 2, pp. 218-229, 2010.
- [9] **Mills, P**, “Fuzzy Logic Control of a Four Rotor Autonomous Aerial Platform” , Neverland Software and Systems, Arlington, ABD, 2001.
- [10] **Kivrak, A.Ö**, “Design Of Control Systems For A QuadrotorFlight Vehicle Equipped With Inertial Sensors”, Atılım Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye, Aralık 2006.
- [11] **Coza, C, Macnab, C.J.B.**, “A New Robust Adaptive-Fuzzy Control Method Applied to QuadrotorHelicopter Stabilization”, Calragy Üniversitesi, Alberta, Kanada, 2006.
- [12] **B. Erginer, E. Altuğ**, “Modeling and PD Control of a QuadrotorVTOL Vehicle” , IEEE Intelligent Vehicles Symposium, İstanbul, Türkiye, Haziran 2007.

- [13] **Ender Ortak**, “4 Rotorlu Bir İnsansız Hava Aracı (Dört Rotorlu Hava Aracı) İçin Bulanık Kontrolcü Tasarımı Ve Simulasyonu”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul,2010.
- [14] **Alexandros Soumelidis, P’eter G’asp’ar, Gergely Regula, B’ela Lantos**, “Control of an Experimental Mini Quad-Rotor Uav”.
- [15] <http://www.nuveforum.net/65-felsefe/5145-bulanik-mantigin-tarihcesi>.
- [16] **Z. Şen**, "Bulanık mantık ve modelleme ilkeleri”.
- [17] http://www.omerfarukbay.com/userfiles/file/EBE-563/6bmd_elemanlar.

EKLER

EK A: Maxon Motor Teknik Özellikleri

EK B : dSPACE DS 1104 Teknik Özellikleri

EK C : dSPACE DS 1103 Teknik Özellikleri

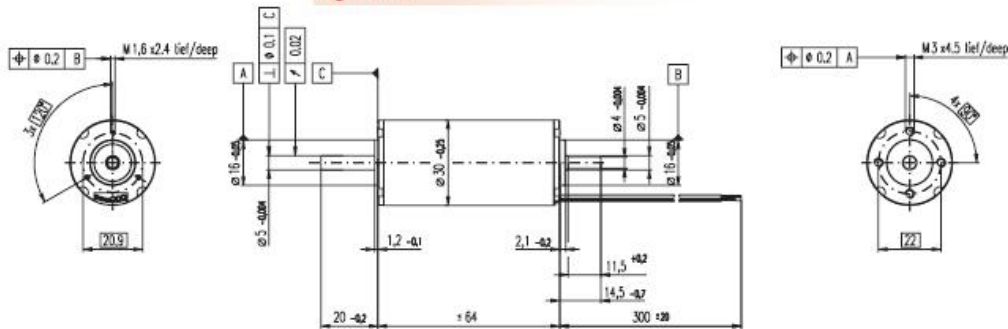
EK Ç : MicroStrain Teknik Özellikleri

EK A: Maxon Motor Teknik Özellikleri

EC-powermax 30 Ø30 mm, brushless, 200 Watt

HighPower

maxon EC-powermax



M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Order Number

305013 305014 305015

Motor Data (provisional)

Values at nominal voltage

	V	24.0	36.0	48.0
1 Nominal voltage	V	24.0	36.0	48.0
2 No load speed	rpm	17000	17000	16500
3 No load current	mA	885	590	422
4 Nominal speed	rpm	16200	16200	15800
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	114	119	120
6 Nominal current (max. continuous current)	A	9.21	6.39	4.70
7 Stall torque	mNm	3180	3460	3430
8 Starting current	A	236	171	124
9 Max. efficiency	%	88	89	89
Characteristics				
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.102	0.210	0.386
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.0163	0.0368	0.0653
12 Torque constant	mNm / A	13.5	20.2	27.6
13 Speed constant	rpm / V	710	473	346
14 Speed / torque gradient	rpm / mNm	5.36	4.92	4.83
15 Mechanical time constant	ms	1.87	1.72	1.68
16 Rotor inertia	gcm ²	33.3	33.3	33.3

Specifications

Thermal data

- 17 Thermal resistance housing-ambient 5.3 K / W
- 18 Thermal resistance winding-housing 0.0785 K / W
- 19 Thermal time constant winding 0.738 s
- 20 Thermal time constant motor 848 s
- 21 Ambient temperature -20 ... +100°C
- 22 Max. permissible winding temperature +155°C

Mechanical data (preloaded ball bearings)

- 23 Max permissible speed 25000 rpm
- 24 Axial play at axial load < 6.0 N 0 mm
- 25 Radial play > 6.0 N 0.14 mm
- 26 Max. axial load (dynamic) 5.5 N
- 27 Max. force for press fits (static) 100 N
- 28 Max. radial loading, 5 mm from flange 1300 N
- 29 Max. radial loading, 5 mm from flange 25 N

Other specifications

- 29 Number of pole pairs 2
- 30 Number of phases 3
- 31 Weight of motor 271 g

Values listed in the table are nominal.

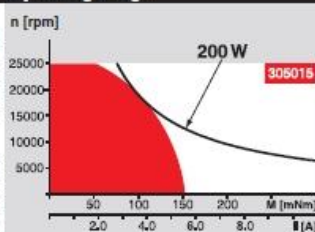
Connection Motor (Cable AWG 18)

- black Motor winding 2
- white Motor winding 3
- red Motor winding 1

Connection Sensors (Cable AWG 26)

- black/grey Hall sensor 2
- blue GND
- green V_{bat} 4.5 ... 24 VDC
- red/grey Hall sensor 1
- white/grey Hall sensor 3

Operating Range



Comments

- Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- Assigned power rating

maxon Modular System

Planetary Gearhead

Ø32 mm

8 Nm

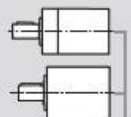
Page 242

Planetary Gearhead

Ø42 mm

3 - 15 Nm

Page 245



Recommended Electronics:
DECS 50/5 Page 284
DEC 70/10 286
DES 70/10 287
EPOS 70/10 295
EPOS2 50/5 295
Notes 20

Overview on page 16 - 21

Encoder MR

128 - 1000CTP,

3 channels

Page 258

Encoder HEDL 5540

500CTP,

3 channels

Page 266

Brake AB 20

Ø20 mm

24 VDC, 0.1 Nm

Page 306

EK B : dSPACE DS 1104 Teknik Özellikleri

Parameter		Specification
Processor		■ MPC8240 processor with PPC 603e core and on-chip peripherals ■ 64-bit floating-point processor ■ CPU clock: 250 MHz ■ 2 x 16 KB cache, on-chip ■ On-chip PCI bridge (33 MHz)
Memory	Global memory	■ 32 MB SDRAM
	Flash memory	■ 8 MB
Timer	4 general-purpose timers	■ 32-bit down counter ■ Reload by hardware ■ 80-ns resolution
	1 sampling rate timer (decrementer)	■ 32-bit down counter ■ Reload by software ■ 40-ns resolution
	1 time base counter	■ 64-bit up counter ■ 40-ns resolution
Interrupt controller		■ 5 timer interrupts ■ 2 incremental encoder index line interrupts ■ 1 UART interrupt ■ 1 slave DSP interrupt ■ 1 slave DSP PWM interrupt ■ 5 A/D converter (end of conversion) interrupts ■ 1 host interrupt ■ 4 external interrupts (user interrupts)
A/D converter	Channels	■ 4 multiplexed channels equipped with one sample & hold A/D converter (1x16-bit) ■ 4 parallel channels each equipped with one sample & hold A/D converter (4x12-bit) ■ Note: 5 A/D converter channels (1x16-bit and 4x12-bit) can be sampled simultaneously
	Resolution	■ Multiplexed channels: 16 bit ■ Parallel channels: 12 bit
	Input voltage range	■ ± 10 V
	Conversion time	■ Multiplexed channels: 2 μs¹⁾ ■ Parallel channels: 800 ns¹⁾
	Offset error	■ ± 5 mV
	Gain error	■ Multiplexed channels: $\pm 0.25\%$ ■ Parallel channels: $\pm 0.5\%$
	Offset drift	■ 40 μ V/K
	Gain drift	■ 25 ppm/K
	Signal-to-noise ratio	■ Multiplexed channels: >80 dB ■ Parallel channels: >65 dB
D/A converter	Channels	■ 8 channels
	Resolution	■ 16-bit
	Output range	■ ± 10 V
	Settling time	■ Max. 10 μ s (full-scale, accuracy $\frac{1}{2}$ LSB)
	Offset error	■ ± 1 mV
	Gain error	■ $\pm 0.1\%$
	Offset drift	■ 130 μ V/K
	Gain drift	■ 25 ppm/K
	Signal-to-noise ratio	■ >80 dB
	I_{max}	■ ± 5 mA

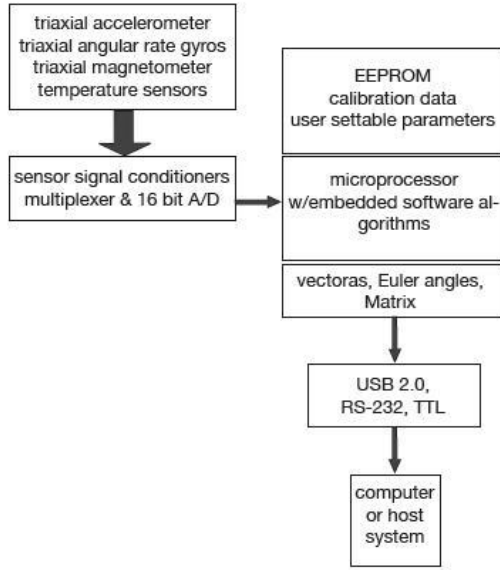
Parameter		Specification
Digital incremental encoder interface	Channels	■ 2 independent channels ■ Selectable single-ended (TTL) or differential (RS422) input (software programmable for each channel)
	Position counters	■ 24-bit resolution ■ Max. 1.65 MHz input frequency, i.e., fourfold pulse count up to 6.6 MHz ■ Counter reset or reload via software
	Sensor supply voltage	■ 5 V/0.5 A
Serial interface	Configuration	■ Single UART (universal asynchronous receiver and transmitter) with FIFO ■ PLL-driven UART for accurate baud rate selection ■ RS232/RS422/RS485 compatibility
	Baud rate	■ Up to 115.2 kBd (RS232) ■ Up to 1 MBd (RS422/RS485)
Slave DSP	Type	■ Texas Instruments TMS320F240 DSP ■ 16-bit fixed-point processor
	Clock rate	■ 20 MHz
	Memory	■ 64Kx16 external code memory ■ 28Kx16 external data memory ■ 4Kx16 dual-port memory for communication ■ 32 KB flash memory
	I/O channels ⁹⁾	■ 10 PWM outputs ■ 4 capture inputs ■ 1 serial peripheral interface
	Input voltage range	■ TTL input/output level ■ A/D converter inputs: 0 ... 5 V
	Output current	■ Max. ±13 mA
	Host interface	■ Requires one 33 MHz / 32-bit 5-V PCI slot
Physical characteristics	Physical size	■ 185 x 107 mm (7.28 x 4.2 in)
	Ambient temperature	■ 0 ... 55 °C (32 ... 131 °F)
	Cooling	■ Active cooling by fan
	Power consumption	■ 18.5 W
	Power supply	■ +5 V ±5%, 2.5 A ■ +12 V ±5%, 0.3 A ■ -12 V ±5%, 0.2 A

EK C : dSPACE DS 1103 Teknik Özellikleri

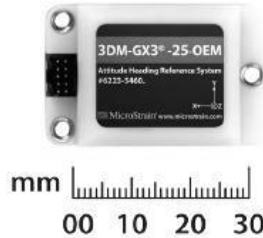
Parameter		Specification
Processor	PowerPC Type	■ PPC 750GX
	CPU clock	■ 1 GHz
	Cache	■ 32 KB level 1 (L1) instruction cache ■ 32 KB level 1 (L1) data cache ■ 1 MB level 2 (L2)
	Bus frequency	■ 133 MHz
	Temperature sensor	■ Reads actual temperature at the PPC
Memory	Local memory	■ 32 MB application SDRAM as program memory, cached
	Global memory	■ 96 MB communication SDRAM for data storage and data exchange with host
Timer	2 general-purpose timers	■ One 32-bit down counter ■ Reload by software ■ 15-ns resolution
		■ One 32-bit up counter with compare register ■ Reload by software ■ 30-ns resolution
	1 sampling rate timer (decrementer)	■ 32-bit down counter ■ Reload by software ■ 30-ns resolution
	1 time base counter	■ 64-bit up counter ■ 30-ns resolution
Interrupt controller		■ 3 timer interrupts ■ 7 incremental encoder index line interrupts ■ 1 UART (universal asynchronous receiver and transmitter) interrupt ■ 1 CAN interrupt ■ 1 slave DSP interrupt ■ 2 slave DSP PWM interrupts ■ 1 host interrupt ■ 4 external interrupts (user interrupts)
A/D converter	Channels	■ 16 multiplexed channels equipped with 4 sample & hold A/D converters (4 channels belong to one A/D converter. 4 consecutive samplings are necessary to sample all channels belonging to one A/D converter.) ■ 4 parallel channels each equipped with one sample & hold A/D converter ■ Note: 8 A/D converter channels (4 multiplexed and 4 parallel) can be sampled simultaneously.
	Resolution	■ 16-bit
	Input voltage range	■ ± 10 V
	Overvoltage protection	■ ± 15 V
	Conversion time	■ Multiplexed channels: 1 μ s ¹⁾ ■ Parallel channels: 800 ns ¹⁾
	Offset error	■ ± 5 mV
	Gain error	■ $\pm 0.25\%$
	Offset drift	■ 40 μ V/K
	Gain drift	■ 50 ppm/K
	Signal-to-noise ratio	■ >83 dB
D/A converter	Channels	■ 8 channels
	Resolution	■ 16-bit
	Output range	■ ± 10 V
	Settling time	■ 5 μ s (14-bit)
	Offset error	■ ± 1 mV

D/A converter	Signal-to-noise ratio	■ >83 dB
	I_{max}	■ ±5 mA
	CI_{max}	■ 10 nF
Digital I/O	Channels	■ 32-bit parallel I/O ■ Organized in four 8-bit groups ■ Each 8-bit group can be set to input or output (programmable by software)
	Voltage range	■ TTL input/output levels
	$I_{\text{out, max}}$	■ ±10 mA
Digital incremental encoder interface	Channels	■ 6 independent channels ■ Single-ended (TTL) or differential (RS422) input (software programmable for each channel)
	Position counters	■ 24-bit resolution ■ Max. 1.65 MHz input frequency, i.e., fourfold pulse count up to 6.6 MHz ■ Counter reset or reload via software
	Encoder supply voltage	■ 5 V/1.5 A ■ Shared with analog incremental encoder interface
Analog incremental encoder interface	Channels	■ 1 channel ■ Sinusoidal signals: 1 Vpp differential or 11 µApp differential (software programmable)
	Position counters	■ < 5° resolution ■ 32-bit loadable position counter ■ Max. 0.6 MHz input frequency, i.e., fourfold pulse count up to 2.4 MHz
	A/D converter performance	■ 6-bit resolution ■ 10 MSPS
	Encoder supply voltage	■ 5 V/1.5 A ■ Shared with digital incremental encoder interface
CAN interface	Configuration	■ 1 channel based on SAB 80C164 microcontroller ■ ISO DIS 11898-2 CAN high-speed standard
	Baud rate	■ Max. 1 Mbit/s
Serial interface	Configuration	■ TL6C550C single UART with FIFO ■ PLL-driven UART for accurate baud rate selection ■ RS232/RS422 compatibility
	Baud rate	■ Up to 115.2 kBd (RS232) ■ Up to 1 Mbd (RS422)
Slave DSP	Type	■ Texas Instruments TMS320F240 DSP
	Clock rate	■ 20 MHz
	Memory	■ 64Kx16 external code memory ■ 28Kx16 external data memory ■ 4Kx16 dual-port memory for communication ■ 32 KB flash memory
	I/O channels	■ 16 A/D converter inputs ■ 10 PWM outputs ■ 4 capture inputs ■ 2 serial ports
	Input voltage range	■ TTL input/output level ■ A/D converter inputs: 0 ... 5 V
	Output current	■ Max. ±13 mA
	Host interface	■ Plug & Play support ■ Requires a full-size 16-bit ISA slot
Physical characteristics	Physical size	■ 340 x 125 x 45 mm (13.4 x 4.9 x 1.77 in)
	Ambient temperature	■ 0 ... 50 °C (32 ... 122 °F)
	Cooling	■ Passive cooling
	Power supply	■ +5 V ±5%, 4 A ■ +12 V ±5%, 0.75A

EK Ç : MicroStrain Teknik Özellikleri



The system architecture has been carefully designed to substantially eliminate common sources of error such as hysteresis induced by temperature changes and sensitivity to supply voltage variations. On-board coning and sculling compensation allows for use of lower data output rates while maintaining performance of a fast internal sampling rate.



Weighing only 11.5 grams, the OEM version of the 3DM-GX3* -25 AHRS

Specifications

Orientation range	360° about all axes
Accelerometer range	± 5 g standard; ± 2 g, ± 18 g, and ± 50 g also available
Accelerometer bias stability	± 0.005 g for ± 5 g range ± 0.003 g for ± 2 g range ± 0.010 g for ± 18 g range ± 0.050 g for ± 50 g range
Accelerometer nonlinearity	0.2 %
Gyro range	± 300°/sec standard, ± 1200°/sec, ± 600°/sec, ± 150°/sec, ± 50°/sec also available
Gyro bias stability	± 0.2°/sec for ± 300°/sec
Gyro nonlinearity	0.2 %
Magnetometer range	± 2.5 Gauss
Magnetometer nonlinearity	0.4 %
Magnetometer bias stability	0.01 Gauss
A/D resolution	16 bits (SAR) (oversampled to 17 bits)
Orientation Accuracy	± 0.5° typical for static test conditions ± 2.0° typical for dynamic (cyclic) test conditions & for arbitrary orientation angles
Orientation resolution	<0.1°
Repeatability	0.2°
Output modes	acceleration, angular rate and magnetic field deltaAngle and deltaVelocity Euler angles rotation matrix
Interface options	standard: USB 2.0 or RS232 OEM: USB 2.0 / TTL serial (3.3 volts)
Data rate	1 Hz to 1,000 Hz
Filtering	sensors sampled at 30 kHz, digitally filtered (user adjustable) and scaled into physical units; coning and sculling integrals computed at 1 kHz.
Baud rate	115,200 baud to 921,600 baud
Supply voltage	standard: 4.4 to 6 volts [up to 15 volts operation possible at limited temp range or low duty cycle] OEM: 3.2 to 5.5 volts
Power consumption	80 mA @ 5 volts with USB
Connectors	micro-DB9, OEM: Samtec FTSH-105-01-F-D-K
Operating temp.	-40°C to +75 °C (consult factory for higher temperature operation)
Dimensions	44 mm x 25 mm x 11 mm - excluding mounting tabs, width across tabs 37 mm, OEM: 38 mm x 24 mm x 12 mm
Weight	18 grams RS-232 and USB, 11.5 grams OEM
Shock limit	1000 g (unpowered), 500g (powered)

*Accuracy and stability specifications obtained over operating temperatures of -40 to 70°C with known sine and step inputs, including angular rates of ± 300° per second.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Gökhan GÜL
Doğum Yeri ve Tarihi: Ordu 1982
Adres: Eski Havaalanı Caddesi Yeşilköy Mahallesi Hava Lojmanları Orgun 6\1, Bakırköy \ İstanbul
E-Posta: g.gul52@yahoo.com
Lisans: Hava Harp Okulu Elektronik Müh.Böl. \ 2001-2005
Yüksek Lisans Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü \ 2010-2012

Mesleki Deneyim ve Ödüller: 2005-2006 yılları arasında Hv.Tek.Ok.K.lığı'nda Kontrolör Subay Temel Eğitimi'ni tamamladı. 2006-2010 yılları arasında “Önleme Kontrolör” olarak Hv.Rd.Mvz.K.lığı\İZMİR’de görev yaptı. 2010 yılında HUTEN(Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü)’de yüksek lisans eğitimine başladı.