

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİNCİ DERECEDEDEN ÖLÜ ZAMANLI BİR SİSTEMDE
BULANIK MANTIK UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ared TÜYSÜZYAN**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONTROL MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

**İKİNCİ DERECEDEDEN ÖLÜ ZAMANLI BİR SİSTEMDE
BULANIK MANTIK UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ared TÜYSÜZYAN
(504041123)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Salman KURTULAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Müjde GÜZELKAYA (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Dursun Ali ŞAŞMAZ (İ.T.Ü.)**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Endüstriyel kontrol sistemlerinde son yıllarda ilgi duyulan bir konu olan bulanık kontrol sistemleri ile ilgili yapmış olduğum bu tez çalışması esnasında öncelikle her zaman bilgi ve fikirlerini aktarmaya çalışsan ve daha önceden endüstriyel otomasyon sistemlerine daha çok ilgi duymamı sağlamış olan değerli tez danışmanım Doç. Dr. Salman Kurtulan' a; bu konu ile ilgili lisansüstü ders programı hazırlayıp bilgilerini aktaran değerli Prof. Dr. İbrahim Eksin'e ve Arş.Gör. Engin Yeşil' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam esnasında manevi desteklerini sürekli hissettiren eşime ve aileme de teşekkür ederim.

Mayıs, 2007

Ared Tüysüzyan

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. BULANIK MANTIK VE BULANIK KÜMELER	3
2.1 Bulanık Mantık	3
2.2 Bulanık Kümeler	4
2.2.1 Bulanık Kümelerde Temel İşlemler	5
2.2.2 Bulanık Bağıntı	6
2.2.3 Normal ve Konveks Bulanık Kümeler	7
2.3 Üyelik Fonksiyonları	8
2.4 Bulanık Sayılar	9
3. BULANIK KONTROL SİSTEMLERİ	11
3.1 Giriş	11
3.2 Dilsel Değişkenler	11
3.3 Bulanık Kontrol Sistemi Yapısı	12
3.3.1 Giriş ve Çıkış İşaretlerini Ölçeklendirme	12
3.3.2 Bulandırma İşlemi	12
3.3.3 Kural Tabanı ve Bulanık Çıkarım İşlemi	14
3.3.3.1 Kural Tabanı	14
3.3.3.2 Bulanık Çıkarım İşlemi	15
3.3.4 Durulama İşlemi	16
3.4 Bulanık Kontrolör Tipleri	19
3.4.1 Doğrudan Bulanık Kontrolörler	20
3.4.1.1 Sabit Bulanık PID-tipi Kontrolörler	21
3.4.1.2 Sabit Bulanık PID İçermeyen Tip Kontrolörler	23
3.4.1.3 Doğrudan Uyarlamalı Bulanık Kontrolörler	23
3.4.2 Dolaylı Bulanık Kontrolörler	24
3.5 Bulanık PID Kontrolör Yapısı	25
4. İKİNCİ DERECEDEKİ ZAMANLI SİSTEMDE BULANIK MANTIK KONTROLÖRÜ İLE YAPILAN UYGULAMA	28
4.1 Kontrol Edilecek Sistem	28
4.2 İkinci Dereceden Sistemlerin Yapısı	30
4.2.1 Sistemdeki Önemli Parametrelerin Tanımı	30
4.2.2 Klasik PID Kontrolörü Katsayılarının Bulunması	34
4.3 Sistem Davranışının Gözlemlenmesi	41

4.3.1	Giriş-Çıkış İşaretlerinin Değerlendirilmesi	41
4.3.2	Sisteme Basamak Girişleri Uygulanması	42
4.3.3	Parametrelerin Hesaplanması	44
4.4	Klasik PID Kontrolörünün Uygulanması	45
4.4.1	PID Kontrolör Yapısı	45
4.4.2	PID Kontrolörünün Oluşturulması	47
4.4.3	PID Katsayılarının Seçimi	50
4.4.4	PID Kontrolörünün Uygulanması	50
4.5	Bulanık PID Kontrolörünün Uygulanması	53
4.5.1	Bulanık Kontrolör Yapısı	53
4.5.2	Üyelik Fonksiyonlarının Seçimi	53
4.5.3	Kural Tabanının Oluşturulması	54
4.5.4	Bulandırma, Çıkarım ve Durulama İşlemleri	55
4.5.5	Bulanık Kontrolörün Oluşturulması	56
4.5.6	Bulanık PID Katsayılarının Seçimi	57
4.5.7	Bulanık PID Kontrolörünün Uygulanması	59
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	62
	KAYNAKLAR	63
	EKLER	65
	ÖZGEÇMİŞ	95

KISALTMALAR

PLC	: Programlanabilir Lojik Kontrolör
PID	: Proportional Intergral Derivative
PI	: Proportional Intergral
PD	: Proportional Derivative
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
SCL	: Sequential Control List programlama dili
LAD	: Ladder programlama dili

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 A ve B Bulanık Sayılarının Elemanları ve Üyelik Dereceleri.....	10
Tablo 2.2 C Bulanık Sayısının Elemanları ve Üyelik Dereceleri.....	10
Tablo 3.1 4 ve 12 Giriş Değerlerinin “Mesafe” Dilsel Değişkeni İçin Aldığı Değerler.....	14
Tablo 3.2 Bulanık Çıkarımda Kural Tiplerinin Yapısı.....	16
Tablo 3.3 Durulama Yöntemlerinin Bazı Kriterlere Göre Durumu.....	18
Tablo 3.4 Örnek 3.1 için Kural Tabanı.....	18
Tablo 3.5 Örnek 3.1 için Giriş Değişkenlerinin Bulandırma İşlemi Sonucu...	19
Tablo 3.6 Örnek 3.1 için Çıkış Değişkeninin Bulanık Çıkarım İşlemi Sonucu	19
Tablo 3.7 Bazı Sabit Bulanık PID Kontrolör Uygulamaları.....	22
Tablo 3.8 Doğrudan Uyarlamalı Bulanık PID Kontrolör Uygulamaları.....	25
Tablo 3.9 Bulanık PID Kontrolör Tipleri.....	27
Tablo 4.1 Bulanık PID Kontrolörü İçin Kural Tablosu.....	55
Tablo 4.2 Bulanık PID Kontrolörü Giriş İşaretlerinin Bulandırılması.....	55
Tablo 4.3 Bulanık Giriş İşaretlerine Göre Aktif Olan Kurallar.....	56
Tablo A.1 ζ Ve S_R Oranına Bağlı Olarak PID Katsayıları.....	65
Tablo D.1 Sistem Giriş Çıkış Değerleri ve Hesaplanan Parametreler.....	73

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Geleneksel Mantıkta 180 cm. Boy Değerine Göre “Kısa” ve “Uzun” Nitelendirmeleri.....	3
Şekil 2.2 : Bulanık Mantıkta 180 cm. Boy Değerine Göre “Kısa” Ve “Uzun” Nitelendirmeleri.....	4
Şekil 2.3a : A ve B Bulanık Kümelerinin Birleşimi.....	5
Şekil 2.3b : A ve B Bulanık Kümelerinin Kesişimi.....	5
Şekil 2.3c : A Bulanık Kümesinin Tümleyeni.....	5
Şekil 2.4 : a) “Normal”, (b) “Normal ve Konveks” Bulanık Küme.....	8
Şekil 2.5 : Bazı Üyelik Fonksiyonu Tipleri. (a) “Çan eğrisi”, (b) “Üçgen”, (c) “Yamuk”, (d) “Singleton”, (e) “S tipi”, (f) “Z tipi”.....	9
Şekil 3.1 : Bulanık Kontrol Sisteminin Genel Yapısı.....	12
Şekil 3.2 : İki Sayısal Girişin Bulandırma İşlemi ile Dilsel Değişkenlere Dönüşümü.....	13
Şekil 3.3 : a) Ağırlık merkezi , (b) Alanlar Toplamının Merkezi, (c) En Büyük Alanın Merkezi, (d) Max. Durulayıcılar, (e) Yüksekliklerin Ortalaması.....	17
Şekil 3.4 : Temel Bulanık Kontrolör Sınıfları.....	20
Şekil 3.5 : Doğrudan Bulanık Kontrolör.....	21
Şekil 3.6 : 2 Girişli 1 Çıkışlı Bulanık PID Kontrol Yapısı.....	27
Şekil 4.1 : Endüstriyel Otomasyon Laboratuvarında Bulunan Düzenek.....	29
Şekil 4.2 : Sistemin Kontrolünde Kullanılan SIEMENS S7-300 PLC Cihazı.....	30
Şekil 4.3 : Doğal Frekansı $\omega_n=1$ rad/s olan İkinci Dereceden Sistemlerin Sönüm Oranına Göre Birim Basamak Girişine Yanıtı.....	31
Şekil 4.4 : Az Sönümlü Sistemin Birim Basamak Girişe Yanıtı.....	32
Şekil 4.5 : Az Sönümlü Ölü Zamanlı Sistemin Birim Basamak Girişe Yanıtı	34
Şekil 4.6 : z-düzlemi Kapalı Çevrim Kutup Değişim Eğrisi.....	38
Şekil 4.7 : Sistemin 14000 Giriş Değerine Cevabı.....	42
Şekil 4.8 : Sistemin 26000 Giriş Değerine Cevabı.....	43
Şekil 4.9 : 14000 den 23000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.....	43
Şekil 4.10 : 26000 den 14000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.....	44
Şekil 4.11 : Klasik PID Kontrolör Gösterimi.....	45
Şekil 4.12 : Ayrık Zamanda Oluşan Klasik PID Kontrolör Gösterimi.....	47
Şekil 4.13 : STEP-7 Programında Oluşturulan Parametre Hesaplama Fonksiyonları.....	48
Şekil 4.14 : Tasarlanan Klasik PID Kontrolörün Blok Yapısı.....	49
Şekil 4.15 : STEP-7 Programında Oluşturulan PID Kontrol Fonksiyon Bloğu.....	49
Şekil 4.16 : Sistemin PID Kontrolör ile Verdiği Davranış (Hedef Değer=14472)..	51
Şekil 4.17 : Sistemin PID Kontrolör İle Verdiği Davranış (Hedef Değer=18272)..	51
Şekil 4.18 : PID Kontrolör ile Sistem Davranışı (Hedef Değer Geçiş: 14472-17500).....	52

Şekil 4.19 : PID Kontrolör ile Sistem Davranışı (Hedef Değer Geçişi: 17500-14772).....	52
Şekil 4.20 : Tasarlanan Bulanık PID Kontrol Sistemi Yapısı.....	53
Şekil 4.21 : Bulanık PID Kontrolörde Seçilen Üyelik Fonksiyonları, (a) e girişi, (B) ce girişi, (C) u * çıkışı için.....	54
Şekil 4.22 : STEP-7 Programında Oluşturulan Bulanık PID Kontrolör Fonksiyon Bloğu.....	57
Şekil 4.23a : MATLAB SIMULINK Toolbox da Oluşturulan Bulanık PID Kontrol Yapısı.....	58
Şekil 4.23b : Katsayıların Ayarlanarak Benzetimden Elde Edilen Sistem Cevabı...	58
Şekil 4.24 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=14472)	60
Şekil 4.25 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=18272)	60
Şekil 4.26 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi = 14472 - 16350).....	61
Şekil 4.27 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi = 17500 - 14472).....	61
Şekil B.1 : Sistemin 8000 Giriş Değerine Verdiği Cevap.....	67
Şekil B.2 : Sistemin 11000 Giriş Değerine Verdiği Cevap.....	67
Şekil B.3 : Sistemin 17000 Giriş Değerine Verdiği Cevap.....	68
Şekil B.4 : Sistemin 20000 Giriş Değerine Verdiği Cevap.....	68
Şekil B.5 : Sistemin 23000 Giriş Değerine Verdiği Cevap.....	69
Şekil B.6 : Sistemin 27500 Giriş Değerine Verdiği Cevap.....	69
Şekil C.1 : 11000 Den 17000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.....	70
Şekil C.2 : 11000 Den 26000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.....	70
Şekil C.3 : 17000 Den 27000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.....	71
Şekil C.4 : 20000 Den 26000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.....	71
Şekil C.5 : 20000 Den 11000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.....	72
Şekil C.6 : 23000 Den 17000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.....	72
Şekil E.1 : PID Kontrolör ile Sistem Davranışı (Hedef Değer: 15344).....	74
Şekil E.2 : PID Kontrolör ile Sistem Davranışı (Hedef Değer Geçişi: 16350-14772).....	74
Şekil F.1 : ANFIS Editörü Modülünde Giriş-Çıkış İşaretlerinin Tanımlanması....	75
Şekil F.2 : ANFIS Editörü Modülünde Hata (e) Girişi Üyelik Fonksiyonlarının Tanımlanması.....	76
Şekil F.3 : ANFIS Editörü Modülünde Hata Değişimi (ce) Girişi Üyelik Fonksiyonlarının Tanımlanması.....	76
Şekil F.4 : Anfis Editörü Modülünde Kontrol Çıkış İşareti (u) Üyelik Fonksiyonlarının Tanımlanması.....	77
Şekil F.5 : ANFIS Editörü Modülünde Kuralların Oluşturulması.....	77
Şekil F.6 : ANFIS Editörü Modülünde Çıkarım ve Durulama İşlemleri.....	78
Şekil G.1 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=14472, Katsayılar: PI=110, PD=5.5, U_PM=0.4).....	79
Şekil G.2 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=17000, Katsayılar: PI=110, PD=5.5, U_PM=0.4).....	79
Şekil G.3 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=18272, Katsayılar: PI=110, PD=5.5, U_PM=0.4).....	80
Şekil G.4 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi=18272-14472, Katsayılar: PI=110, PD=5.5, U_PM=0.4).....	80
Şekil G.5 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=14472, Katsayılar: PI=115, PD=3, U_PM=0.4).....	81

Şekil G.6	: Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=17000, Katsayılar: PI=115, PD=3, U_PM=0.4).....	81
Şekil G.7	: Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=18272, Katsayılar: PI=115, PD=3, U_PM=0.4).....	82
Şekil G.8	: Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi=18272-14472, Katsayılar: PI=115, PD=3, U_PM=0.4).....	82
Şekil G.9	: Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Katsayılar: PI=120, PD=5.5, U_PM=0.4).....	83
Şekil G.10	: Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Katsayılar: PI=120, PD=5.5, U_PM=0.4).....	83
Şekil G.11	: Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Katsayılar: PI=120, PD=5.5, U_PM=0.4).....	84
Şekil G.12	: Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi=18272-14472, Katsayılar: PI=120, PD=5.5, U_PM=0.4).....	84

İKİNCİ DERECEDEEN ÖLÜ ZAMANLI BİR SİSTEMDE BULANIK MANTIK UYGULAMASI

ÖZET

Genel olarak klasik kontrol yöntemlerinde kontrol edilecek sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat özellikle endüstriyel otomasyon uygulamalarında çoğu sistemin karakteristiklerinin doğrusal olmaması, yapılarının karmaşıklığı ve bilinmeyen parametreleri, modellemede zorlanmaya yol açmaktadır. Modelleme işlemi parametre belirlemelerinde çok vakit almakta ve maliyetli olmaktadır. Modelleme zorluğunu azaltmak için uyarlamalı kontrol yöntemleri mevcut olmakla birlikte, karmaşık yapıları uygulamada başka bir zorluk yaratmaktadır. Bunun dışında endüstride sıkça kullanılan uygun maliyetli ve basit yapıdaki PID kontrolörleri de doğrusal olmayan sistemlerde sağlıklı bir kontrol işlemi gerçekleştirememektedir.

Bulanık mantığın kontrol sistemlerine uygulanması, kontrol problemlerinin çözümü için bir alternatif oluşturmuştur. Bulanık mantık ile kontrol, sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmadan insan düşünüş yapısına yakın ifadelerin kullanılması ile gerçekleşir. Bulanık kontrol sistemleri, klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık, doğrusal olmayan sistemlerde ve klasik yöntemlerin kullanıldığı sistemlerde daha uygun ve kolay kontrol imkânı sağlamıştır. Bulanık kontrolörlerin iyi bir performansa sahip olabilmeleri için tasarımları esnasında dilsel değişkenlere uygun üyelik fonksiyonlarının seçilmesi ve kuralların belirlenmesi için uzman bilgi ve deneyimlerinden doğru şekilde faydalanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak bulanık mantığın temel yapısı, bulanık kontrol sistem yapıları ve tipleri anlatılarak uygulamada tasarlanması düşünülen bulanık PID kontrolörü yapısı gösterilmiştir. Daha sonra ikinci dereceden sistemlerin karakteristikleri ve parametreleri hakkında bilgi verilerek kutup-sıfır silme yöntemi ile klasik PID katsayılarının hesaplanması gösterilmiştir. Anlatılan bu bilgilere dayanılarak laboratuvar ortamındaki sistem için programlanabilir lojik kontrolör (PLC) cihazlarında klasik PID ve bulanık PID kontrolörleri tasarlanmış ve sırası ile kontrol işlemi uygulanmıştır. Veriler PLC deki veri bloklarına kaydedilmiş ve buradan bilgisayar ortamına aktararak grafik haline getirilmiştir. Bu grafikler her iki kontrolör için ayrı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlardan, standart yapılar ile tasarlanan her iki kontrolörün de aşım yapmadığı fakat bulanık PID kontrolörünün daha hızlı yerleşme zamanına sahip olduğu görülmüştür. Konu ile ilgili ilerde yapılması düşünülen araştırmalar anlatılarak çalışma tamamlanmıştır.

FUZZY LOGIC APPLICATION IN A SECOND ORDER SYSTEM WITH DEAD TIME

SUMMARY

The mathematical model of the system to be controlled is generally required in classical control methods. However, the non-linear characteristics of most systems in especially industrial automation applications, the complexity of the structure and the unknown parameters render the modelling process difficult. The modelling process in parameter determination takes a long time and is costly. Despite the fact that adaptive control methods, that can deal with the difficulty of the modelling process, exist, these adaptive systems' complex structure cause other problems in applications. Besides, the PID controllers that are used frequently in the industry thanks to their low cost and simple structures, can not perform reliable control to the non-linear systems, as well.

The application of fuzzy logic to control systems is an alternative to the solution of control problems. Control via fuzzy logic is achieved through the utilization of human-like reasonings, without having recourse to mathematical models. Fuzzy control systems provide more suitable and easier control to complex and nonlinear systems where classical methods are inefficient, and also in systems where classical methods are used. In order to perform well, the appropriate membership functions for linguistic variables must be chosen and the knowledge and experience of experts must be used accurately for determining rules.

In the first part of this study, the basic structure of fuzzy logic, fuzzy logic system structures and types are elaborated while the fuzzy PID controller which is considered to be designed for application is shown. Thereafter, the characteristics and parameters of the second order systems are explained and the calculation of classical PID coefficients with pole-zero suppression method is shown. On the strength of this information, classical PID and fuzzy PID functions are coded in the programmable logic controller devices (PLC) for the system in the laboratory and the control process is applied respectively. Data is saved in the data blocks of PLC and is transformed to graphs by transferring the data to the computer. These graphics are, then, investigated separately for both controllers that are basically designed and from the results, it is observed that both controllers has eliminated overshoot problem while fuzzy PID has better settling time compared to classical one. The study is concluded by describing the studies planned to be done in the future.

1. GİRİŞ

Bulanık kontrol sistemlerinin temeli, yaklaşık kırk yıl önce bulanık mantık ve bulanık kümeler kavramlarının Prof. L.A. Zadeh [1] tarafından tanıtılması ile atılmıştır. Bu kavramların ortaya çıkmasına yol açan ise, gerçek dünyadaki belirsizlik, karmaşıklık ve kusursuz olamama durumlarının problem çözümleri için daha ileri bir mantık yapısı kullanarak ifade etme isteği olmuştur. O zamandan bu yana bulanık kümeler teorisi gelişerek, özellikle veritabanı yönetimi, operasyon analizi, karar destek sistemleri, işaret işleme gibi alanlarda uygulanmıştır. Bunların yanında, kontrol sistemleri en çok dikkat çeken uygulama alanı olarak belirmiştir.

Kontrol sistemlerinde; özellikle uzay (ve bilgisayar) teknolojisinin gelişimi ile birlikte endüstriyel tesislerde kullanılan cihaz ve alt sistemlerin seri, problemsiz ve en az insan hatası ile çalışabilmesi için otomasyon uygulamaları daha çok düşünülerek hayata geçirilmeye başlanmıştır. Bu anlamda endüstriyel otomasyon uygulamalarında PLC (programlanabilir lojik kontrolör) cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Klasik mantığa sahip PLC cihazları da geliştirilmiş ve PID kontrol fonksiyonları eklenerek daha etkin bir kontrol işlevi görecektir yapıya ulaşmıştır.

Kontrol edilmek istenen sistemin matematiksel modelinin oluşturulamadığı veya oluşturulmasının çok zor olduğu durumlarda kontrol ve programlama için alternatif yöntemlerden biri olarak bulanık mantık ile kontrol kullanılmaya başlanmıştır. Bulanık kontrol sistemleri ile ilgili çalışmalarda özellikle;

- Uzman operatörlerin kontrol hareketlerini, tecrübelerini doğrudan kontrolöre aktarmak,
- Ayrık kontrolör çıkışları arasında yumuşak bir geçiş elde etmek,

isteği yer almaktadır [2]. Temel olarak bulanık kontrol sistemlerinin hedefi, klasik kontrol sistemlerinin mevcut başarılı teknik ve metotlarını mümkün olduğu kadar genişletmek ve birçok yeni ve özel tip metotlar geliştirmektir.

Teknolojinin gelişimine paralel olarak bulanık mantık kontrolörleri PLC cihazları içinde entegre olarak bulunabilmekte ve bilgisayar arayüzleri ile doğrudan programlanabilmektedir.

Özellikle karmaşık ve çok değişkenli doğrusal olmayan yapıdaki sistemleri kontrol etmek için kullanılan bulanık mantık kontrolörlerinin istenen kontrol performansına ulaşabilmesi, klasik kontrolörler ile etkileşme şekline, sistem davranışlarını iyi etüt ederek oluşturulacak kural tabanı ve üyelik fonksiyonlarının seçimine ve son zamanlarda yapılan çalışma ve araştırmalarda görüldüğü üzere akıllı sistem ve algoritmalar ile etkileşerek oluşturulan yapıların sağlamlığına bağlı olduğu söylenebilir.

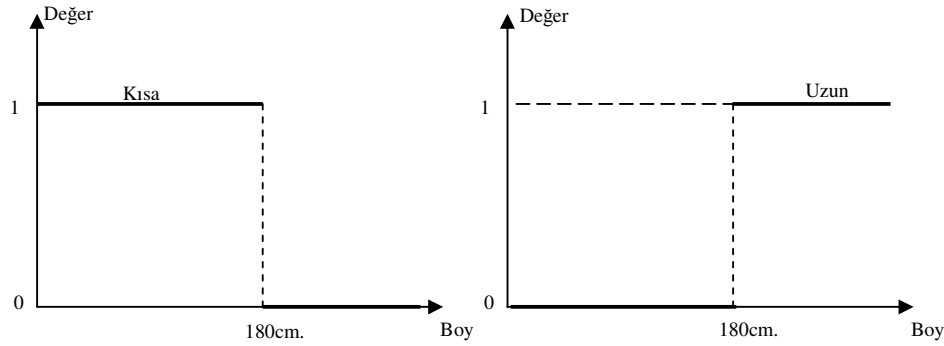
İleriki bölümlerde, bulanık mantıkla ilgili temel kavramlar, bulanık kontrol sistemi yapıları ve kullanılan kontrolör tipleri ile ilgili bilgiler verilmiş ve ikinci dereceden sistemlerin yapısı ile ilgili tanımlardan bahsedildikten sonra laboratuvar ortamında gerçekleştirilen klasik PID ve bulanık PID tasarımları ve yapılan uygulamalar anlatılmıştır.

2. BULANIK MANTIK VE BULANIK KÜMELER

2.1 Bulanık Mantık

Bulanık mantık ve bulanık kümeler kavramı ilk olarak 1965 yılında Prof. L. A. Zadeh [1] tarafından tanıtıldı. Geleneksel mantık sisteminin sadece “0” ve “1” gibi kesin değerler ile tariflediği gerçek dünya olay ve durumların, farklı olarak, kesin değerler alması gerekmeyen değişkenlerin kullanılarak da ifade edilebileceğinden söz edildi.

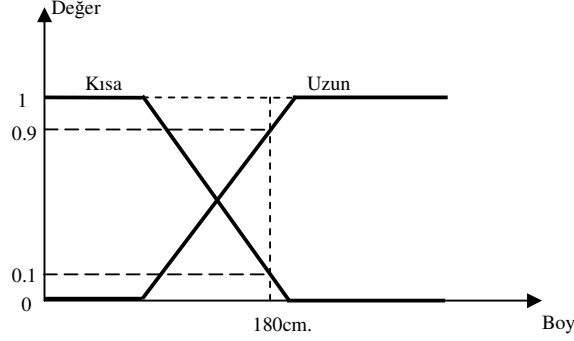
Bulanık mantık, gerçek dünyada kullandığımız sözlü ifadeleri matematiksel bir yapı ile belirterek, özellikle karmaşık problemlerin çözümünü kolaylaştırmaktadır. Şekil 2.1 de geleneksel mantıkta, boyu 180 cm. üzerinde olan insanlar “uzun”, boyu 180 cm. altında olan insanlar ise “kısa” diye nitelendirilmiş olsun. Bu durumda, birbirine çok yakın sınırdaki değerlerde farklı nitelermeler olacaktır. Mesela, boyu 179 cm. olan bir kişi “kısa”, boyu 181 cm. olan kişi ise “uzun” olarak nitelendirilecek, bunun yanında boyu 100 cm. olan kişi de “kısa” olarak nitelendirilecektir.



Şekil 2.1 : Geleneksel Mantıkta 180 Cm. Boy Değerine Göre “Kısa” ve “Uzun” Nitelemeleri.

Bulanık mantık kavramı, değişkenlerin hangi derece ile o nitelemeye ait olduğunu belirten bir yapıyı ortaya koymaktadır. Şekil 2.2 de gösterildiği gibi boy değerleri

sadece “kısa” veya sadece “uzun” olarak nitelendirilmemekte, her iki dilsel niteleyiciye de belli bir derece ile ait olmaktadır.



Şekil 2.2 : Bulanık Mantıkta 180 Cm. Boy Değerine Göre “Kısa” ve “Uzun” Nitelemeleri.

2.2 Bulanık Kümeler

Bir kümenin elemanları, o kümeye $[0,1]$ arasında üyelik değerleri ile ait oluyorlar ise bu kümeler bulanık kümeler olarak tanımlanır. Bulanık kümeye ait elemanlar, kümeye üyelik değerleri ile beraber aşağıdaki gibi gösterilir.

$$A = \{ (x_1, \mu_A(x_1)), (x_2, \mu_A(x_2)), \dots \} \quad (2.1)$$

Diğer bir ifade de;

$$A = \{ (\mu_A(x_1) / x_1), (\mu_A(x_2) / x_2), \dots \} \quad (2.2)$$

şeklindedir. Burada A bulanık küme, x_1, x_2 küme elemanları ve $\mu_A(x_1)$ de A kümesindeki x_1 elemanın üyelik derecesi olarak gösterilmektedir. Bulanık kümenin her elemanı $[0,1]$ arasında bir üyelik derecesine sahiptir. Bu şekilde, bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonu, küme elemanlarının bu aralıktaki üyelik değerlerini gösterir.

2.2.1 Bulanık Kümelerde Temel İşlemler

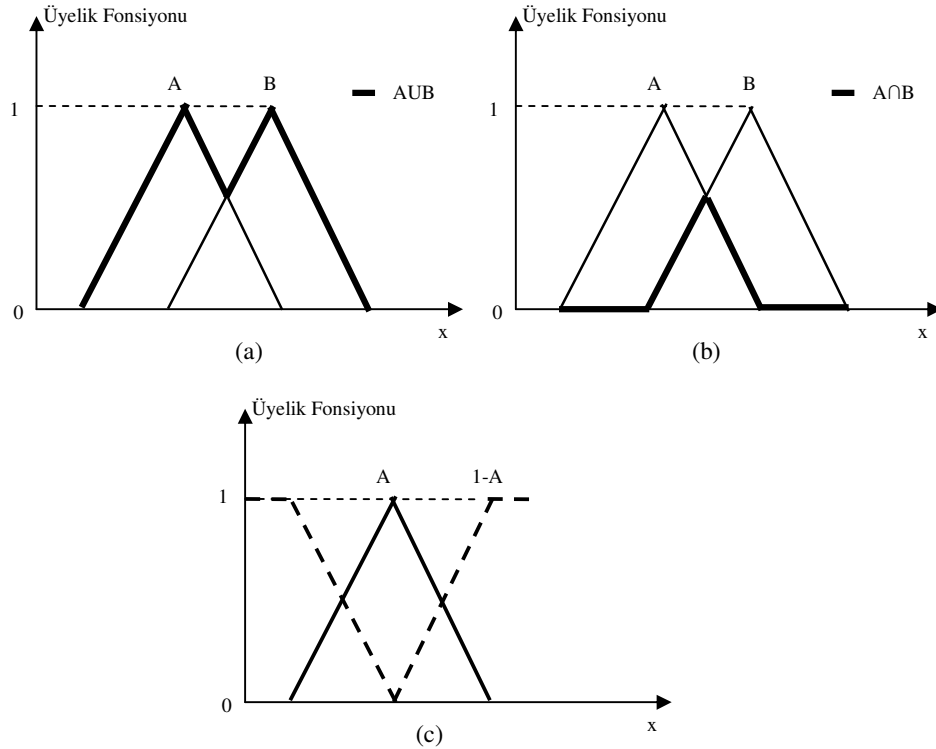
Bulanık kümeler arası işlemler, üyelik fonksiyonları ile (elemanların üyelik dereceleri ile) yapılır. Örnek olarak, A ve B iki bulanık küme için, μ_A ve μ_B üyelik fonksiyonu olmak üzere sırasıyla birleşim, kesişim ve tümleyen işlemleri;

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.3)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.4)$$

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.5)$$

olarak ifade edilir. İfadelere ait örnek grafikler Şekil 2.3 de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : (a) A ve B Bulanık Kümelerinin Birleşimi, (b) A ve B Bulanık Kümelerinin Kesişimi, (c) A Bulanık Kümesinin Tümleyeni

Geleneksel kümelerdekine benzer bu işlemlerin yanında bir bulanık kümenin kendisi ile tümleyeninin birleşimi evrensel küme, kesişimi ise boş küme değildir.

$$\mu_{A \cup A^c}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_{A^c}(x)) \neq 1 \quad (2.6)$$

$$\mu_{A \cap A^c}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_{A^c}(x)) \neq 0 \quad (2.7)$$

2.2.2 Bulanık Bağntı

Kontrol edilen bir sistemin giriş ve çıkış değişkenleri arasında bir bağntı sağlanması çok önemlidir. Bulanık kümelerde bu bağntı; A ve B bulanık değişkenleri sırasıyla X ve Y evreninde tanımlı olmak üzere, koşullu dilsel bir önerme kullanılarak gerçekleşir.

$$\text{EĞER } A \text{ O ZAMAN } B \text{ ya da } A \rightarrow B \quad (2.8)$$

Bu bağntı A ve B kümelerinin kartezyen çarpımı olarak gösterilir.

$$R = A \times B \quad (2.9)$$

R bağntısı ve R bağntısının üyelik fonksiyonu, $x \in X$ ve $y \in Y$ sonlu kümeler için aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mu_R(x,y) = \mu_{A \times B}(x,y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2.10)$$

$$R = \{(x,y), \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \mid x,y \in X \times Y\} \quad (2.11)$$

Benzer şekilde iki bağntının bileşkesi de, $R_1: A \times B$ ve $R_2: B \times C$ olarak tanımlanmış bağntılar olmak üzere $R: A \times C$ bileşke bağntısı,

$$R_1 \Theta R_2 = \{(a,c), \max\{\min(\mu_{R_1}(a,b), \mu_{R_2}(b,c))\} \mid a \in A, b \in B, c \in C\} \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir. Bu tür bileşke bağıntılarına sup-min ya da max-min bağıntısı denir. Bu ifade, a dan b ye ve b den c ye olan bağıntıların en düşük üyelik derecelerinden olanların oluşturduğu kümeden en yüksek üyelik dereceli olanı seçmeyi göstermektedir. Bunun dışında inf-max ya da min-max olarak ifade edilen bileşke bağıntı da;

$$R_1 (*) R_2 = \{(a,c), \min \{ \max (\mu_{R_1}(a,b) , \mu_{R_2}(b,c)) \} \mid a \in A, b \in B, c \in C \} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifade de, a dan b ye ve b den c ye olan bağıntıların en yüksek üyelik derecelerinden olanların oluşturduğu kümeden en düşük üyelik dereceli olanı seçmeyi göstermektedir. Uygulamada en sık rastlanan bulanık bileşke bağıntıları yukarıdaki ifadeler olup, en çok kullanılan sup-min (ya da max-min) bileşke bağıntısıdır.

2.2.3 Normal ve Konveks Bulanık Kümeler

Üyelik dereceleri 0 ile 1 arasında değişen elemanlardan oluşan bir A bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu;

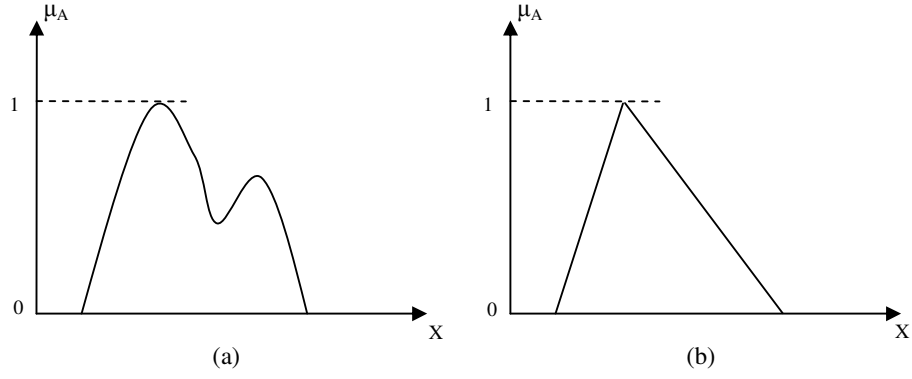
$$\max \mu_A(x) = 1 \quad (2.14)$$

özelliğini taşıyorsa bu küme “normal” bulanık küme olarak ifade edilir.

Bir A bulanık kümesinde $x_1, x_2 \in X$ evreni elemanları ve $\lambda \in [0,1]$ olmak üzere üyelik fonksiyonu;

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1-\lambda) x_2) \geq \min \{ \mu_A(x_1), \mu_A(x_2) \} \quad (2.15)$$

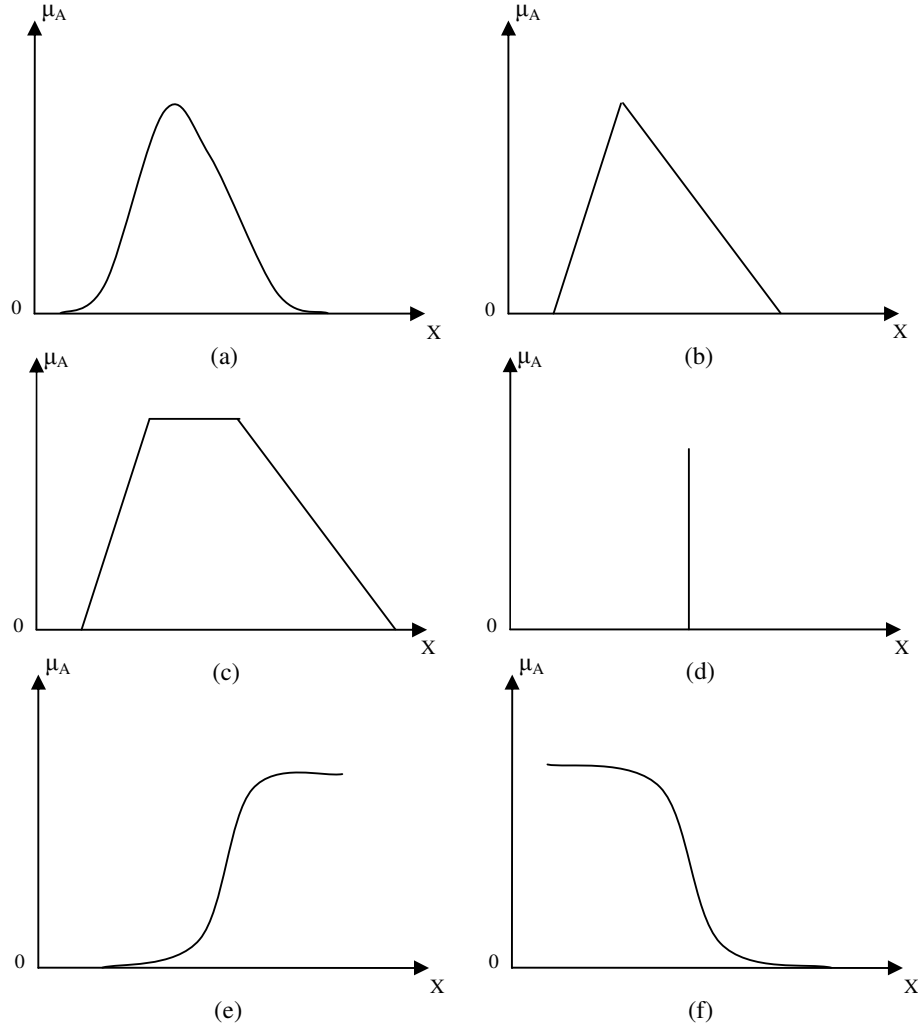
bağıntısını sağlıyorsa “konveks” bulanık küme olarak ifade edilir. Şekil 2.4 de bu özellikleri gösteren üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : (a) "Normal", (b) "Normal ve Konveks" Bulanık Küme

2.3 Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları bir bulanık kümedeki elemanların kümeye ait olma derecelerini gösterir. Birçok farklı tipte olabilen üyelik fonksiyonları genellikle biçimsel olarak adlandırılır. Şekil 2.5 de bunlardan bazıları gösterilmiştir. Bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonlarının seçiminde belirli bir ölçüt olmamasına karşın, uygulamada en çok kullanılan; üçgen, yamuk, çan eğrisi (veya gauss), Singleton tipleridir.



Şekil 2.5 : Bazı Üyelik Fonksiyonu Tipleri. (a) “Çan eğrisi”, (b) “Üçgen”, (c)“Yamuk”, (d) “Singleton”, (e) “S tipi”, (f) “Z tipi”

Üyelik fonksiyonlarının, $\mu(x) = 1$ olan tüm x elemanlarını kapsayan bölgesi “göbek” olarak adlandırılır. Benzer şekilde, üyelik fonksiyonlarının $0 < \mu(x) < 1$ olan tüm x elemanlarını kapsayan bölgesi “sınır” olarak, $\mu(x) > 0$ olan tüm bölgeleri de “destek” olarak adlandırılır.

2.4 Bulanık Sayılar

Bir bulanık küme “normal” ve “konveks” özelliğini taşıyorsa bu bir bulanık sayıdır. Bulanık sayılarda da normal sayılarda olduğu gibi temel işlemler üyelik

fonksiyonları ile beraber yapılır. Toplama işlemine örnek olarak, Tablo 2.1 de gösterildiği gibi iki bulanık sayı verilmiş olsun.

Tablo 2.1: A ve B Bulanık Sayılarının Elemanları Ve Üyelik Dereceleri.

Bulanık Sayı	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0	0.1	0.3	0.8	1	0.7	0.5	0.2	0	0
B	0	0.3	0.6	1	0.9	0.7	0.4	0.1	0	0

Bu iki bulanık sayının toplamından oluşan C sayısı, $x,y,z \in R$ olmak üzere;

$$\mu_C(z) = \max_{z=x+y} [\min(\mu_A(x), \mu_B(y))] \quad (2.16)$$

ifadesi ile hesaplanır. Tablo 2.2 de Tablo 2.1 de verilen A ve B bulanık sayılarının toplamı olan C bulanık sayısı verilmiştir.

Tablo 2.2: C Bulanık Sayısının Elemanları ve Üyelik Dereceleri.

Bulanık Sayı	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C	0	0.1	0.3	0.3	0.6	0.8	1	0.9	0.7	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1	0

Benzer şekilde, üyelik fonksiyonları grafik üzerinde gösterilen bulanık sayılarda temel işlemleri fonksiyon tanımına uygun olarak gerçekleştirilir.

3. BULANIK KONTROL SİSTEMLERİ

3.1 Giriş

Prof. L.A. Zadeh' in 1965 [1] yılında bulanık küme ve bulanık kavramlarını ortaya koyduğundan itibaren, bu konuda mevcut birçok değişik alanda başarılı uygulamalar yapılmıştır. İlk olarak E.H. Mamdani ve S. Assilian [3], 1974 yılında bulanık mantığı kontrol alanında uygulamış ve bulanık kontrol araştırmacılar arasında büyük bir ilgi uyandırmıştır. Bu ilk uygulama bir buhar türbin kontrol sistemi üzerine gerçekleşmiştir. Daha sonra 1976 yılında sıcak su süreç kontrolü [4] ve 1982 yılında da çimento fırını kontrolü uygulamaları [5] yapılmıştır. Bu uygulamalardan sonra özellikle 1985 yılından itibaren endüstriyel alandaki uygulama sayısı giderek artmış, 1987 yılında da ilk tüketici ürünü pazarlanmıştır.

3.2 Dilsel Değişkenler

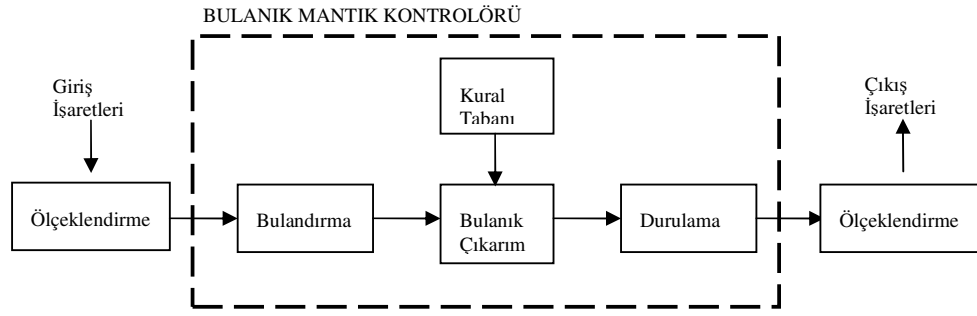
Günlük hayatımızda kullandığımız “AZ, ÇOK, YÜKSEK, BÜYÜK, HIZLI, KISA,...” vb. birçok niteleyici dilsel değişkenler olarak adlandırılır. Bulanık kontrol sistemlerinde; kullanılan sayısal değişkenler artık dilsel değişkenler olarak ifade edilir. Dilsel niteleyiciler dışında “VE, VEYA, DEĞİL” gibi bağlaçlar da bulanık kontrol işlemlerinde yer almaktadır. Ayrıca x,y,z gibi tanımların yerine “HIZ, SICAKLIK, MESAFE, HATA, SET DEĞERİ” gibi dilsel tanımlar da kullanılmaktadır. Dilsel değişkenlerin kullanımı ve detayı Bölüm 3.3 içinde gösterilmiştir.

3.3 Bulanık Kontrol Sistemi Yapısı

Bir bulanık mantık kontrolörü temel olarak aşağıda ve Şekil 3.1 de gösterilen aşamalardan oluşur.

- Bulandırma,
- Kural tabanı ve bulanık çıkarım,
- Durulama

Bu aşamalardan önce ve sonra kullanılmak üzere giriş ve çıkış işareti ölçeklendirme işlemleri de genel yapıda düşünülmektedir.



Şekil 3.1 : Bulanık Kontrol Sisteminin Genel Yapısı.

3.3.1 Giriş ve Çıkış İşaretlerini Ölçeklendirme

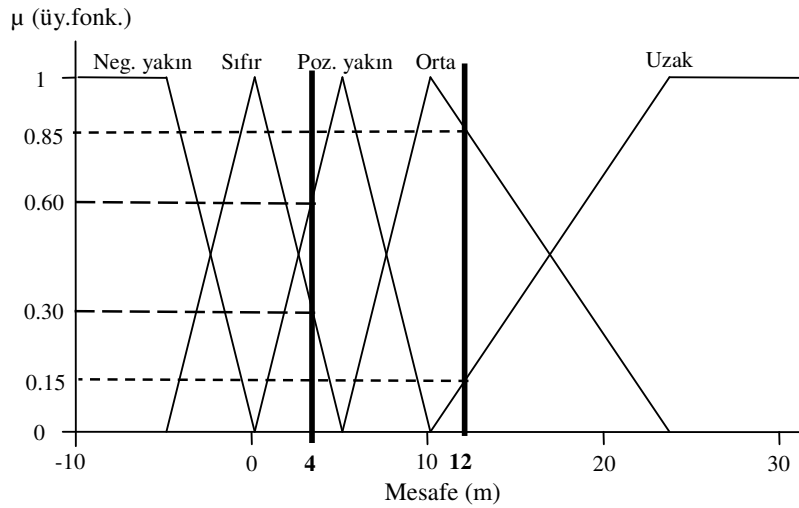
Giriş işaretleri genel olarak ölçüm cihazlarından gelen değerlerdir. Bu değerler ölçeklendirme işlemi ile kontrole daha uygun standart bir aralığa çevrilebilir ve kontrol işleminin dışında kalan işaretler de uygun şekilde sınırlandırılabilir. Benzer şekilde, hesaplanan çıkış işaretini de kontrol noktasındaki gerçek değer işaretine dönüştürmek için ölçeklendirme kullanılır.

3.3.2 Bulandırma İşlemi

Bulandırma işlemi, sayısal giriş işaretlerini dilsel değişkenler ve üyelik değerleri ile ifade etmemizi sağlar. Bu işlem için ilk olarak giriş değişkeninin kaç adet dilsel

değişken ile ifade edileceği belirlenir. Dilsel değişken sayısı arttıkça bulanık kontrol sistemi girişinin çözünürlüğü artar ve bunun sonucu olarak daha yumuşak bir kontrol cevabı oluşur. Bunun yanında, geniş dilsel terim sayısı ilave hesaplama zamanı gerektirmektedir. Dolayısı ile uygulamada her bir giriş değişkeni için en çok görülen dilsel terim sayısı 3...9 arasında seçilir. Dilsel terim sayısı genelde tek sayıda seçilir. Bunlardan bir tanesi “ORTA, NORMAL” gibi dilsel terim olmak üzere diğerleri karşıt terimler (“SICAK-SOĞUK”, “UZAK-YAKIN”, “YAVAŞ-HIZLI”, vb.) şeklinde seçilerek kullanılır.

Her bir giriş değişkeni için dilsel terimler belirlendikten sonra bu terimlere ait üyelik fonksiyonları önceki konularda bahsedilen fonksiyon tipleri arasından kontrol edilen sisteme uygun şekilde seçilir. Her dilsel terim, üyelik fonksiyonu ile birlikte belirlendikten sonra sayısal giriş işaretleri, bulanık dünyadaki karşılığını bulur. Şekil 3.2 de dilsel terimleri ve üyelik fonksiyonları seçilmiş bir giriş değişkeninin iki farklı giriş değerine göre durumu gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : İki Sayısal Girişin Bulandırma İşlemi ile Dilsel Değişkenlere Dönüşümü.

Burada “Mesafe” dilsel giriş değişkeni için tanımlanmış beş adet dilsel niteleyici ve üyelik fonksiyonları, sayısal giriş değerlerini bulandırdığı görülür. Tablo 3.1 de sayısal giriş işaretlerinin bulandırma işlemi sonrasındaki durumu gösterilmiştir.

Tablo 3.1: 4 ve 12 Giriş Değerlerinin “Mesafe” Dilsel Değişkeni İçin Aldığı Değerler.

Mesafe	Neg.Yakın	Sıfır	Poz.Yakın	Orta	Uzak
4	0	0.3	0.6	0	0
12	0	0	0	0.85	0.15

3.3.3 Kural Tabanı ve Bulanık Çıkarım İşlemi

3.3.3.1 Kural Tabanı

Kontrol edilen bir sistemde giriş ve çıkış işaretleri arasında özellikle gözlemlere dayalı olarak kurulan ilişkilerin bütünü kural tabanını oluşturur. Kural tabanı, bir bulanık kontrol sisteminin temelini oluşturur.

Kural tabanı, “EĞER-O ZAMAN” kural dizisinden oluşmaktadır. Genel olarak, her bir kural yapısı;

EĞER [ilk bölüm] ise O ZAMAN [son bölüm] şeklindedir.

“İlk bölüm”, giriş değişkenlerinin (Mesafe, Hız, Sıcaklık, Hata vb.) ait oldukları niteliklerin (Uzak, Yavaş, Az, Yüksek vb.) belirtildiği ve bunların “VE, VEYA, DEĞİL” bağlaçları ile birleştirildiği bölümdür. “Son bölüm” ise çıkış değişken(ler)inin, “ilk bölüm” deki etkileşimlere bağlı olarak ait oldukları nitelikleri gösterir. Kural tabanlarının oluşturulması için kullanılan en yaygın yaklaşımlar;

- bir uzmanın bilgi ve/veya deneyimlerinden yararlanmak,
- sürecin bir bulanık modelinin kullanılması,
- operatörün süreç üzerinde gerçekleştirdiği işlemleri izleme,
- kendi kendine öğrenen algoritmaların kullanılması,

şeklindedir [6].

3.3.3.2 Bulanık Çıkarım İşlemi

Kontrol sistemindeki giriş işaretleri bulandırma işleminden geçtikten sonra, bulanık giriş işaretleri haline gelirler. Bulanık giriş işaretlerinin kural tabanındaki kurallarla etkileşmesi ve bir bulanık çıkış işareti oluşturması, bulanık çıkarım olarak adlandırılır. Çıkarım işleminin ilk safhasında bulanık giriş işaretleri değerlendirilir. Örnek olarak; x ve y giriş değişkenleri ve A,B niteleyiciler (bulanık kümeler) olmak üzere kullanılan bağlaçlara göre,

$$x = A \text{ VE } y = B : \min (\mu_A(x) , \mu_B(y)) \quad (3.1)$$

$$x = A \text{ VEYA } y = B : \max (\mu_A(x) , \mu_B(y)) \quad (3.2)$$

$$x = A \text{ DEĞİL } : 1 - \mu_A(x) \quad (3.3)$$

ifadeleri ile değerlendirme yapılır. Her bir kural için, “ilk bölüm” den elde edilen değer o kuralın “harekete geçme derecesi” olarak tanımlanabilir. Çıkarım işleminin son safhasında ise, elde edilen “harekete geçme derecesi” çıkış değişkeni işaretinin (bulanık küme, değer, giriş işaretlerinden oluşan fonksiyon) derecesi olur. Eğer aynı çıkış işaretine sahip iki veya daha fazla kural mevcut ise bunların en yüksek değeri alınır. Bu işlem, z çıkış değişkeni, C çıkış işareti ve $\mu_C(z_1)$, $\mu_C(z_2)$ de Kural 1 ve Kural 2 nin “harekete geçme derecesi” ise olmak üzere;

$$\mu_C(z) = \max (\mu_C(z_1) , \mu_C(z_2)) \quad (3.4)$$

ifadesi ile gerçekleşir.

Bulanık çıkarım veya kural tabanı, bir kuralın “son bölüm” ündeki çıkış değişkeninin yapısına göre farklı isimlerle belirtilir. Buna göre;

1. Mamdani tipi bulanık çıkarım.

2. Tekli (Singleton) tip bulanık çıkarım.
3. Takagi-Sugeno (T-S) tip bulanık çıkarım.

en çok kullanılan yapılardır.

Bulanık çıkarımda, yukarda bahsedilen kural tiplerinin yapısı Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2: Bulanık Çıkarımda Kural Tiplerinin Yapısı.

Kural Tipi	İlk Bölüm	Sonuç Bölümü
Mamdani	$x = [\text{dilsel terim}]$	$y = [\text{dilsel terim}]$
Tekli (Singleton)	$x = [\text{dilsel terim}]$	$y = [\text{sayı}]$
Takagi-Sugeno	$x = [\text{dilsel terim}]$	$y = f(x)$

Uygulamada Mamdani ve Takagi-Sugeno tipi kural tipleri sık olarak görülmektedir. Her iki kural tipinin avantajları için;

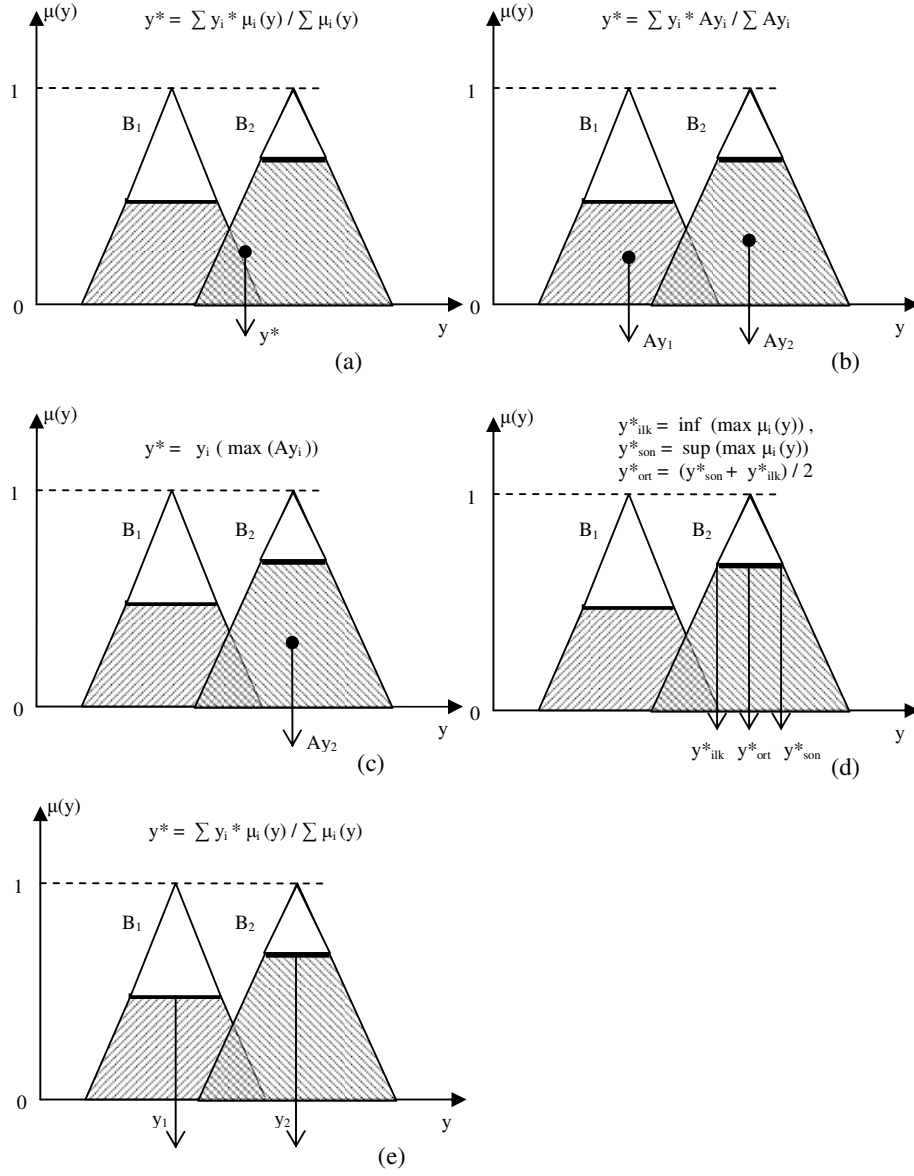
Mamdani tipi: Uzman kişilerce kolay anlaşılabilmesi, kuralları formüle etme kolaylığı.

Takagi-Sugeno tipi: Hesaplama olarak daha etkili olması, sistem ve matematik analizinde daha kullanışlı olması, çıkış işaretinin devamlılığını garanti etmesi.

söylenbilir.

3.3.4 Durulama İşlemi

Bulanık çıkarım sonrası elde edilen çeşitli derecelere sahip bulanık çıkış değişkenlerinin gerçek çıkış işaretine dönüştürülmesi işlemine durulama denir. Kontrol edilen bir sistem için çıkış işareti, kontrol işaretidir. Birçok farklı durulama yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 3.3 de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : (a) Ağırlık merkezi , (b) Alanlar Toplamının Merkezi, (c) En Büyük Alanın Merkezi, (d) Max. Durulayıcılar, (e) Yüksekliklerin Ortalaması

Genelde yöntemlerden herhangi birinin değerine göre bariz bir üstünlüğü bulunmamakta ve kullanılacak yöntemin seçimi kişisel tercihlere bağlı olmaktadır. Bunun dışında Tablo 3.3 de, verilen bazı temel ölçütlere göre yöntemlerin durumu incelenerek kullanılacak yöntem seçilebilir [7].

Tablo 3.3: Durulama Yöntemlerinin Bazı Kriterlere Göre Durumu.

Kriter	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Akla Yatkinlik	İyi	İyi	İyi	Kötü	İyi
Hesap Basitliği	İyi (Ayrık ifadede)	Kötü	Kötü	İyi	İyi
Süreklilik	İyi	İyi	Kötü	Kötü	İyi

Uygulamada kullanılan en yaygın yöntem Ağırlık Merkezi yöntemidir.

Örnek 3.1: Mamdani tipi kurallara sahip (Tablo 3.4), “Mesafe” ve “Hız” girişleri ile “Frenleme Yüzdesi” çıkışı olan bir kontrol sistemi örneği üzerinde bulanık çıkarım ve durulama işlemleri şu şekilde gerçekleşir.

Dilsel Değişkenler:

Mesafe : (çok yakın, yakın, orta, uzak, çok uzak),

Hız: (çok az, az, orta, fazla, çok fazla),

Fren.Yüz.: (sıfır, düşük, orta, yüksek, çok yüksek) dilsel terimleri ile verilsin.

Tablo 3.4: Örnek 3.1 için Kural Tabanı.

Kural	Mesafe	Bağlaç	Hız	Fren. Yüzdesi
1	Yakın	VE	Fazla	Yüksek
2	Orta	VE	Orta	Orta
3	Çok Uzak	VE	Çok Fazla	Düşük
4	Çok Yakın	VE	Az	Orta

Mesafe = 60 m ve Hız = 70 m/sn giriş değerleri için Tablo 3.5 de verilen bulandırma sonuçları yukarıdaki kurallara uygulanırsa;

Tablo 3.5: Örnek 3.1 için Giriş Değişkenlerinin Bulanırma İşlemi Sonucu.

Giriş	Çok Yakın	Yakın	Orta	Uzak	Çok Uzak
Mesafe (60m)	0	0.2	0.8	0.5	0
Giriş	Çok Az	Az	Orta	Fazla	Çok Fazla
Hız (70 m/sn)	0	0	0.7	0.4	0

Kural 1: $\min(0.2 ; 0.4) = 0.2$, Kural 2: $\min(0.8 ; 0.7) = 0.7$,

Kural 3: $\min(0 ; 0) = 0$, Kural 4: $\min(0 ; 0) = 0$,

değerleri elde edilir. Bulanık çıkarımın sonuç kısmı işlendiğinde çıkış dilsel değişkeninin değerleri Tablo 3.6 daki gibi olur.

Tablo 3.6: Örnek 3.1 için Çıkış Değişkeninin Bulanık Çıkarım İşlemi Sonucu.

Çıkış	Sıfır	Düşük	Orta	Yüksek	Çok Yüksek
Fren. Yüz.	0	0	$\frac{0.7}{\max(0.7,0)}$	0.2	0

Durulama işleminde sadece “Orta” ve “Yüksek” dilsel terimleri, üyelik değerleri 0 dan farklı olduğu için kullanılır. Sırası ile bu terimlere karşı gelen gerçek çıkış değerleri %50 ve %75 olsun. Durulama işleminde Ağırlık merkezi yöntemi kullanıldığında;

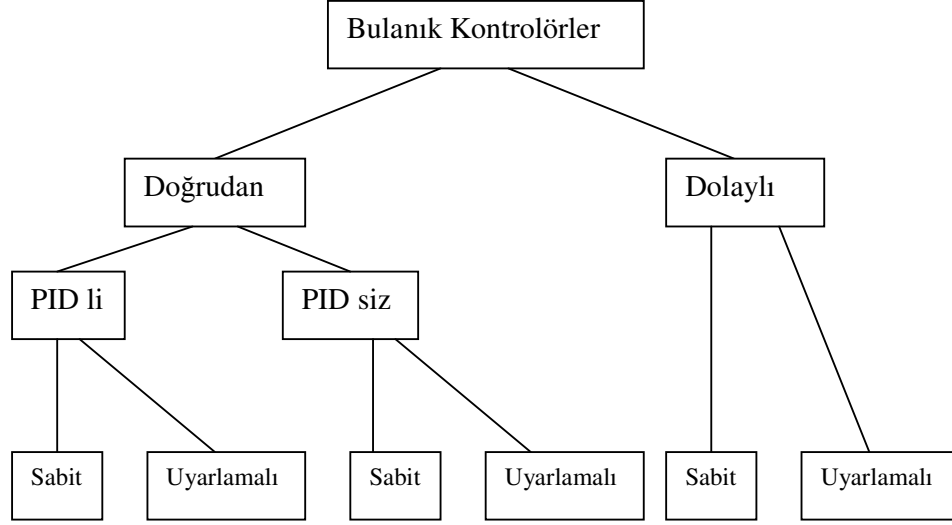
$$\text{Frenleme Yüzdesi İşareti} = (0.7 * \%50 + 0.2 * \%75) / (0.7 + 0.2) = \%55.5$$

olarak elde edilir.

3.4 Bulanık Kontrolör Tipleri

Kontrol sistemleri ile ilgili yapılan araştırmalara bakıldığında bulanık kontrolörlerin önemli bir birim olarak kullanıldığı görülmektedir. Bulanık kontrolörlerin sınıflandırılmasında, bir sistemin kontrol döngüsünde hangi konum ve seviyede buldukları önem taşımaktadır. Bu şekilde, nerdeyse klasik kontrolörler kadar çok

tipinde olan bulanık kontrolörler bazı temel sınıflar altında Şekil 3.4 de gösterildiği gibi toplanabilir [8].



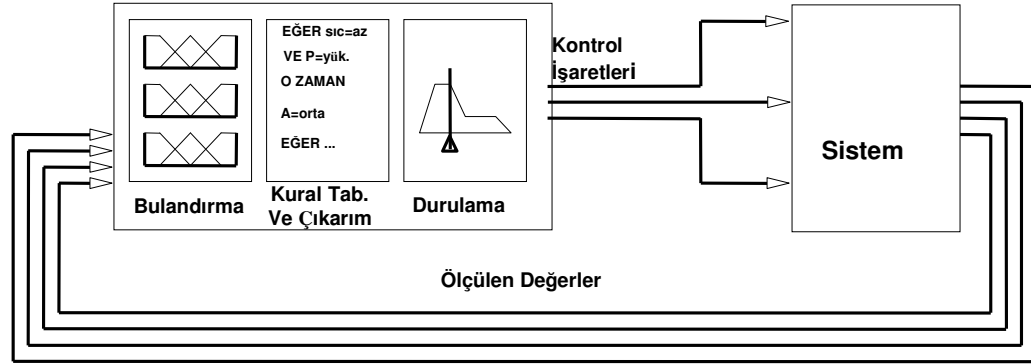
Şekil 3.4 : Temel Bulanık Kontrolör Sınıfları.

Temel iki sınıf, doğrudan bulanık kontrol ve dolaylı bulanık kontrol olarak görülmektedir. Doğrudan bulanık kontrol, kontrol hareketlerini bulanık çıkarım içinde hesaplar ve bulanık çıkış işaretleri, doğrudan kontrolör işaretini hesaplamada kullanılır. Dolaylı tipinde ise (diğer adıyla model-tabanlı tip) kural tabanlı bulanık sistem, yaklaşık bir süreç modeli belirler. Bu belirleme, kontrol süreci esnasında öğrenilerek ya da gözlemlenen giriş-çıkış işaretleri eğitilerek gerçekleştirilebilir. Her sınıf için kontrol işlemi sabit veya uyarlamalı yapıda olabilir. Doğrudan bulanık kontrolörler hem PID li hem de PID siz tipinde olabilirler. PID tip kontrolörlere uygulamalarda daha çok önem verilmektedir [8].

3.4.1 Doğrudan Bulanık Kontrolörler

Geçmişte yapılan araştırma ve uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan bulanık kontrolör tipidir. Mamdani [9] tarafından kullanılan ilk bulanık kontrolörler bu tiptedir. Bulanık kontrolör doğrudan kapalı çevrim sistemi içine yerleştirilir (Şekil

3.5). Bulanık kontrolör, geri besleme sinyallerini kullanarak süreci harekete geçirecek gerekli kontrol işaretini çıkarır.



Şekil 3.5 : Doğrudan Bulanık kontrolör.

3.4.1.1 Sabit Bulanık PID-tipi Kontrolörler

Doğrudan bulanık kontrolörlerin büyük çoğunluğu bulanık PID tipindedir. Tablo 3.7 de geçmiş bazı önemli uygulamalara yer verilmiştir. Buradan, bulanık PID uygulamalarının büyük çoğunluğunun iki girişli PI veya PD tip kontrolörler olduğu görülmektedir. Sonra bu kontrolör hareketleri birleştirilerek bulanık PID yapılandırması oluşturulmuştur. 80 li yıllar ve öncesinde bulanık çıkarım ve hesaplamalar çevrimdışı yapılmakta iken son yıllarda sistematik tasarımların yapıldığı duyurulmuştur. Bu tasarımlarda bulanık kontrolörlerin sinir ağları ile uygulandığında eğitildiği görülmüştür. Benzer şekilde genetik algoritmalar da bulanık kontrolörün sistematik geniş kapsamlı bir arama ile tasarlanmasını sağlamıştır. Bulanık kontrolör tasarımları için klasik kontrol teknikleri son zamanlarda daha popüler olmaya başlamıştır. Bu durum, akıllı kontrol tekniklerinin uzmanlar tarafından kabul görmesi ile oluşmuştur [8].

Tablo 3.7: Bazı Sabit Bulanık PID Kontrolör Uygulamaları.

Sene	Kontrol tipi	Giriş işaretleri	Kural sayısı	Uygulama
1975	PI PI	$e, \Delta e$ $e, \Delta e$	15 9	Buhar Türbini
1976	PI I, P	$e, \Delta e$ e	6 5, 3	Sıcak su tesisinin akış kontrolü
1977	PI	$e, \Delta e$	15	Karıştırılmış tankta sıcaklık kontrolü
1979	PI	$e, \Sigma e$	49	Birçok bilinen ve tanımlanamayan sistem
1988	PI PID	$e, \Delta e$ $e, \Delta e, \Delta^2 e$	49 343	Elektrik ocağı
1989	PI	$e, \Delta e$	64	Sürekli biyolojik süreç
1989	PI (iki aşama)	$e, \Delta e$	4 & 6	Servomotor konum kontrolü
1989	PD	$e, \Delta e$	8	Kaynak meşalesi konum kontrolü
1990	PI	$e, \Delta e$	4	Birkaç doğrusal ve doğrusal olmayan tesisler
1991	PD	$e, \Delta e$	5 & 9	Doğru akım motoru konum kontrolü
1992	P PI	Δe $e, \Delta e$	7 9	Basınç kontrolü
1992	PI	$e, \Delta e$	49	Tersine sarkaç konum kontrolü
1993	PI	$e, \Delta e$	40	Hidrolik motor hız kontrolü
1993	PI	$e, \Delta e$	9	Tren arabası havalandırma kontrolü
1993	PID	$e, \Delta e$	49 x 3	Birkaç doğrusal ve doğrusal olmayan tesisler
1993	PID	$e, \Delta e$	49	Birkaç doğrusal ve doğrusal olmayan tesisler
1994	PI	$e, \Delta e$	25 x 3	pH kontrol için karıştırılmış tank reaktörü
1994	PD	$e, \Delta e$	8	İkinci dereceden sistem
1994	PD	$e, \Delta e$	25 & 49	Doğru akım servo motor konum kontrolü
1994	PID	$e, \Delta e$	25	Doğru akım servo motor konum kontrolü
1995	PI & PD	$e, \Delta e$	4 x 2	Birkaç doğrusal ve doğrusal olmayan tesisler
1995	PI	e	7	Bio reaktör karıştırılmış tank
1995	PID	$e, \Delta e$	49 x 2	Seperatörde sıcaklık ve pH kontrolü
1995	PID	$e, \Delta e$	8	Servomotor hız kontrolü
1996	PID	$e, \Delta e$	49	İkinci ve üçüncü dereceden doğrusal modeller
1996	PI	$e, \Delta e$	9–25	Tersine sarkaç
1996	PD	$e, \Delta e$	9	Tabanını döndürerek tersine sarkacın kararlılığı
1996	PI+D	$e, \Delta e + y, \Delta y$	4 + 4	Birkaç doğrusal ve doğrusal olmayan tesisler
1997	PD+I	$e, \Delta e$	4 + 4	Laboratuarda esnek robot kolu
1997	PI	$e, \Delta e$	49 x 2	Güneş enerjisi tesisinde sıcaklık kontrolü
1998	PI	$e, \Delta e$	9	Sürekli dökümde seviye kontrolü

Bunlardan bazıları, kayma-kipli yaklaşım, hücreden hücreye örtüleme tekniği ve sezgisel doğrusal PID ayarlamalarıdır. Bulanık kontrolörler çoğu zaman doğrusal PID kontrolörleri ile karşılaştırılmış ve çoğu zaman daha iyi performans göstermişlerdir. Bazı durumlarda gelişmiş performans elde etmek için birden fazla bulanık PID kontrolörü anahtarlamalı olarak kullanılmışlardır [8].

Hata işaretinden hareketlenen kazanç belirlemeli bulanık PID kontrolörler, her üç kazanç için hata tabanlı öz ayarlamalı kuralların oluşturulma güçlüğü sebebiyle daha az popülerdir. Bunun sonucunda kazanç belirlemeli tipler, bilgi tabanlı yapıyı formüle etmek için doğrusal PID ayarlama kurallarından yararlanır. Performans tabanlı kazanç belirlemeli tip kontrolörlerde kurallar, saha cevabındaki PID kazançlarının temel davranışından türetilmiştir [10]. Performans tabanlı kontrolörlerin kendinden organize olma özellikleri ve uyarlama kaliteleri hata işaretinden hareketlenen tipe göre daha yüksek derecededir.

3.4.1.2 Sabit Bulanık PID İçermeyen Tip Kontrolörler

Takagi-Sugeno-Kang tabanlı bulanık modelleme metodu PID yapısında olmamakla beraber, PID tiplerini de içeren birçok kontrol problemi tipinde uygulanabilmektedir. Diğer alt sınıfların büyük çoğunluğu klasik veya genel yapıya göre daha belirgin olarak problem odaklıdır. Örneğin bir otomatik tren işletim sisteminde kontrol sistemi birçok performans ölçütü ile takip edilmektedir (insan konforu, yakıt harcaması, güvenlik vb.). Burada bulanık kontrolör bir öngörücü kontrolör olarak kullanılmıştır. Benzer şekilde de uçak uçuş kontrolünde kullanılan çok-girişli çok-çıkışlı kontrolör de sabit bulanık PID içermeyen bir kontrolördür. Bu tipteki birçok kontrol sistemi örneği, Japon endüstrisi ve ev aygıtları için verilmiştir [8].

3.4.1.3 Doğrudan Uyarlamalı Bulanık Kontrolörler

Áström ve Wittenmark [11] bir uyarlamalı kontrolörü, “ayarlanabilir parametreleri ve bunları ayarlama mekanizması bulunan bir kontrolör” olarak tanımlamışlardır. Bunun dışında “öz-organize olan kontrol” veya “öğrenen kontrol sistemleri” ifadeleri de kullanılmaktadır. Doğrudan uyarlamalı bulanık kontrolörleri, sistem dinamiklerinde ve/veya parametrelerindeki değişimlerde kontrol edilen ünitenin

kazanç veya ayar parametrelerini değiştirebilmelidir. İlk doğrudan uyarlamalı bulanık kontrolör 1979 da tanıtılmıştır [12]. Uyarlamalı kontrolörler genel olarak iki ilave eleman içerir. Bunlar “süreç izleme” ve “uyarlama mekanizması”dır [13]. Doğrudan uyarlamalı bulanık kontrolörleri iki kategoride sınıflandırılmaktadır.

Tip 1: Bulanık kontrolörün kural tabanı parametreleri, bulanık veya bulanık olmayan bir sistem ile güncellenmektedir.

Tip 2: Klasik PID kontrolörünün doğrusal kazançları bulanık bir sistem ile güncellenmektedir.

Tablo 3.8 de geçmiş bazı önemli uygulamalara yer verilmiştir [8].

3.4.2 Dolaylı Bulanık Kontrolörler

Giriş-çıkış verileri ile süreç belirlemesi geleneksel olarak doğrusal gerileme, stokastik yaklaşım ve ilgileşim analizi gibi istatistiksel metotlar ile yapılmaktadır. Nitel ve nicel verilerin birleşimi, sistem dinamiklerinin istatistiksel öğrenme algoritmaları ile yapılandırılarak daha az güç harcayarak modellenmesine izin vermektedir. Bulanık kontrol sistem tasarımında bulanık modelleme, temel başarılarından biridir. Kontrol problemlerini modellemek için bulanık ilişkisel açıklama ve kavramlar üzerinde çalışılmış ve endüstriyel tesislerdeki sistemlerde yaklaşık olarak değerlendirilmiştir. Bir kontrol problemi için model belirleme algoritması çevrimiçi olarak uygulanırsa, sistem, süreç ve çevresindekilere olabilecek herhangi bir değişimi kolaylıkla hesaplayabilir. Bu şekilde uyarlamalı kontrol otomatik olarak elde edilebilir. Bu sebeple, bulanık sinir ağları ile yapılan modelleme veya belirleme uyarlamalı bulanık sistemler olarak ifade edilir [8].

Tablo 3.8: Doğrudan Uyarlamalı Bulanık PID Kontrolör Uygulamaları.

Sene	Kontrol tipi	Giriş işaretleri	Uyarlama Tipi	Uygulama
1979	PI	e, Δe	Kurallar	Zaman gerilemesi içeren çeşitli doğrusal modeller
1988	PID	e, Δe e, Δe, Δ ² e	Kurallar	Çeşitli yüksek dereceden modeller . (doğrusal olmama eklenmesi ile)
1988	PI	e, Δe	Kurallar	İki boyutlu robot hareketi
1988	PI	e, Δe	Kurallar	Isıtıcı sıcaklık ve dc motor hız kontrolü
1991	PI	e, Δe	Kurallar	İkinci dereceden ölü zamanlı bir sistem
1993	PI	e, Δe	Kurallar	Kaymaya karşı frenleme sistemi
1998	PI	e, Δe	Üy.Fonks.	Tank seviye kontrolü
1982	PI	e, Δe	Üy.Fonks.	Kalıp döküm tesisinde malzeme seviyesi kontrolü
1991	PI	e, Δe	Üy.Fonks. (son kısım)	Birinci dereceden bir süreç ve tersine sarkaç
1992	PD	e, Δe	Bulanık Çıkış	Servomotor konum kontrolü
1992	PID	e, Δe	Kurallar	Doğrusal ikinci dereceden sönümlü ve osilasyonlu modeller
1995	PI	e, Δe	Kurallar	Sıcaklık ve asansör kontrolü
1990	PI & PID siz.	e, Δe & /	Ölçek. Faktör.	Yağ rafineri ünitesi oktan kontrolü
1995	PID	e,	Doğr. PID kazançları	Minimumu olmayan faz sistemi
1995	PID	e, Δe	Ölçek. Faktör.	Doğrusal ikinci dereceden sistem
1989	PID	e	Doğr. PID kazançları	Planer robot hareketini izleme
1994	PI	e	Doğr. PI kazançları	DC motor hız kontrolü
1995	PID	e	Doğr. PID kazançları	DC motor hız kontrolü
1992	PID	e, Δe, Δ ² e	Ölçek. Faktör ve Kurallar	İkinci dereceden gecikmeli sistem

3.5 Bulanık PID Kontrolör Yapısı

Herhangi bir k anında ve T periyodunda Bir klasik PID kontrolörün çıkış ifadeleri,

$$u_{PID}(k) = K_p * e(k) + K_I * T * \sum e(k) + (K_D / T) * \Delta e(k) \quad (3.5)$$

$$\Delta u_{PID}(k) = K_p * \Delta e(k) + K_I * T * e(k) + (K_D / T) * \Delta^2 e(k) \quad (3.6)$$

$$u_{PID}(k) = u_{PID}(k-1) + \Delta u_{PID}(k) \quad (3.7)$$

mutlak ve artan değer olarak verilir. Burada K_p , K_I , K_D sırasıyla oransal, entegral ve türev katsayılarına karşı gelmektedir. Hata durum değişkenleri ise, $y(k)$ sistem cevabı, $r(k)$ da hedef işareti olacak şekilde;

$$\text{hata} = e(k) = y(k) - r(k), \text{ hata değişimi} = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1),$$

$$\text{hata değişiminin oranı} = \Delta^2 e(k) = \Delta e(k) - \Delta e(k-1),$$

$$\text{hata toplamı} = \sum e(k) = e(0) + \dots + e(k) \text{ şeklindedir.}$$

Bir bulanık PID kontrolöründe (3.5) ve (3.6) de verilen hata ifadeleri dilsel biçimde ifade edilir ve bulanık kurallar kullanılarak bulanık kontrol hareketi çıkarımı yapılır. Dilsel biçimde ifade edilen hata giriş değişkenleri bulanık sayılara dönüştürülmek üzere ölçeklendirme katsayıları ile çarpılarak bulanık işlemlere tabi tutulur. Böylece normalize edilen hata bulanık giriş işaretleri,

$$e = K_e * e(k), \Delta e = K_{ce} * \Delta e(k), \Delta^2 e = K_{rce} * \Delta^2 e(k), \sum e = K_{se} * \sum e(k)$$

ifadeleri ile verilir. Burada K_e , K_{ce} , K_{rce} ve K_{se} sırası ile hata, hata değişimi, hata değişimi oranı ve hata toplamı giriş bulanık işaretlerinin ölçeklendirme katsayıları olarak tanımlanır. Durulama işleminin sonucu çıkış işareti u olarak gösterilir.

Tanımlanan hata giriş işaretlerinin birleşimleri ile farklı tipte bulanık kontrol yapıları oluşturulabilir. Pratik yapıların oluşması için aşağıdaki notlar düşülebilir.

Not 1: Hata toplamı ifadesi ile kontrol kurallarını hesaplamak, sürekli hal koşulları bilinmediği zaman zordur. Bu koşulların bilindiği kontrol problemleri için kullanılması mümkündür.

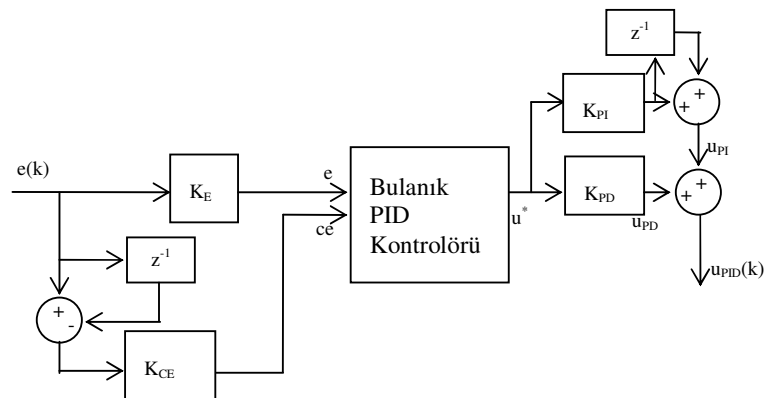
Not 2: Hata işareti kontrol işareti üretilmesinde en temel giriş işaretidir. Çeşitli sistem durumları için oransal hareket ile kontrolü ivmelendirir. Bu sebepten giriş işareti olarak mutlaka yer almalıdır.

Hata bulanık giriş işaretleri bu koşullar göz önüne alınarak aşağıda Tablo 3.9 da belirtilen tiplerde bulanık kontrolör yapılarını oluştururlar. Yapıların daha detaylı içerikleri [14] den incelenebilir.

Tablo 3.9: Bulanık PID Kontrolör Tipleri.

Kontrolör tipi	Açıklama
3 girişli – 1 çıkışlı	e , Δe , ve $\Delta^2 e$ bulanık girişleri tek kural tabanında işlem göerek Δu çıkışını oluştururlar.
3 girişli – 3 çıkışlı	e , Δe , ve $\Delta^2 e$ bulanık girişleri üç kural tabanında ayrı işlem göerek Δu_P , Δu_I ve Δu_D çıkışlarını oluştururlar. Bu çıkışlar toplanarak Δu_{PID} oluşur.
2 girişli – 1 çıkışlı	e , Δe bulanık girişleri tek kural tabanında işlem göerek u_{PD} çıkışını oluştururlar.
2 girişli – 2 çıkışlı	e , Δe , bulanık girişleri 2 ayrı kural tabanında ayrı işlem göerek u_P , u_D çıkışlarını oluştururlar. Bu çıkışlar toplanarak Δu_{PID} oluşur.
1 girişli – 1 çıkışlı	e , bulanık girişi tek kural tabanında işlem göerek u_P çıkışını oluşturur. Bu işaretten u_D ve u_I işaretleri oluşturulur.
1 girişli – 3 çıkışlı	e , bulanık girişi 3 kural tabanında ayrı işlem göerek u_{P1} , u_{P2} , u_{P3} çıkışını oluşturur. Bu işaretlerden u_P , u_D ve u_I işaretleri oluşturulur.

Bu şekilde oluşturulabilecek kontrolör tiplerinin uygulamalarda en yaygın olarak kullanılanı “iki girişli – bir çıkışlı” bulanık kontrolör tipidir. Bu yapı, Şekil 3.6 da verilmiş olup, uygulamada kullanılacak olan bulanık PID kontrolörü buna göre tasarlanmıştır.



Şekil 3.6 : 2 Girişli 1 Çıkışlı Bulanık PID Kontrol Yapısı.

4. İKİNCİ DERECEDEDEN ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMDE BULANIK MANTIK KONTROLÖRÜ İLE YAPILAN UYGULAMA

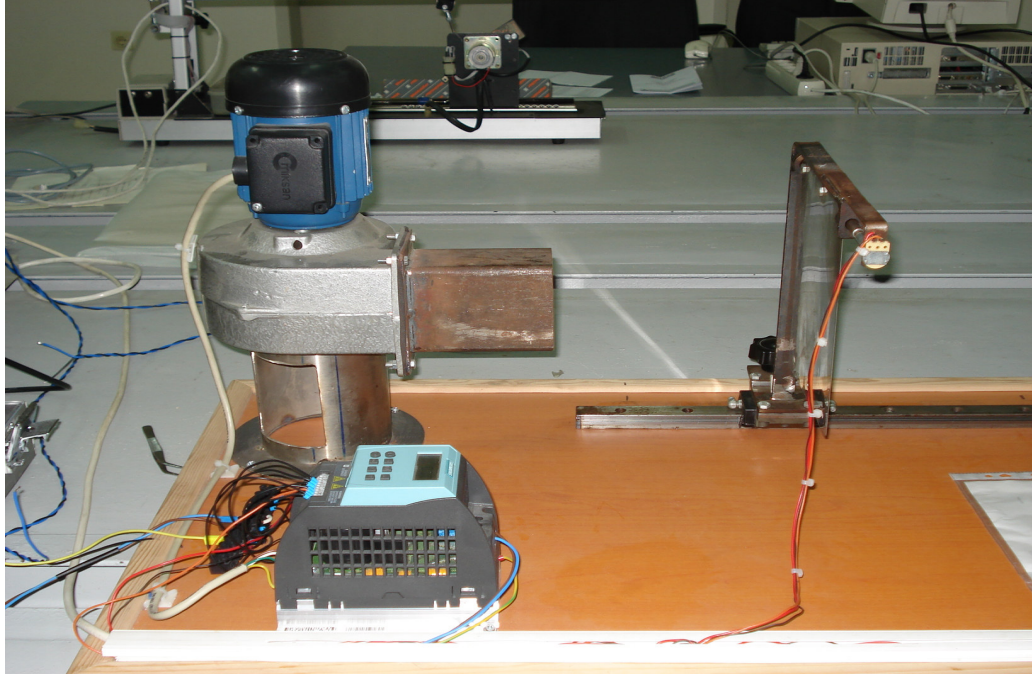
Uygulama ile ilgili çalışmalar şu aşamalardan oluşmuştur.

- İkinci dereceden sistemlerin matematiksel yapısı, parametrelerin bulunması.
- Sisteme çeşitli basamak girişleri uygulanarak sistem cevaplarının elde edilmesi ve parametrelerin hesaplanması.
- Klasik PID kontrol yapısının oluşturulması ve uygulanması.
- Bulanık Mantık içeren PID (Bulanık PID) kontrol yapısının oluşturulması ve uygulanması.

Bu aşamalar alt bölümler olarak anlatılmıştır. İlk olarak, sistemle ilgili düzenek yapısından bahsedilmiştir.

4.1 Kontrol Edilecek Sistem

Endüstriyel Otomasyon Laboratuvarında bulunan (İTÜ Ele. Elek. Fak. binasında), Şekil 4.1 de gösterilen düzenek üzerinde uygulama gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 : Endüstriyel Otomasyon Laboratuvarında Bulunan Düzenek.

Düzenekteki kontrolün amacı, belli bir mesafede dikey durumda sabitlenmiş bir plakanın istenen hedef konumda (açıda) durmasını sağlamaktır. Bu amaçla düzenekte bulunan fan motoruna bir frekans dönüştürücüsü de bağlıdır.

Sistem giriş ve çıkış işaretleri, Şekil 4.2 de gösterilen SIEMENS S7-300 PLC (Programlanabilir Lojik Kontrolör) kontrol cihazının analog giriş (SM-331) ve analog çıkış (SM-332) modüllerine bağlıdır. Düzenekteki plaka hareket ettikçe üzerinde bulunan mile bağlı algılayıcı 0-10 V arasında bir değeri konum bilgisi olarak analog giriş modülüne gönderir. Çıkış kontrol işareti ise ± 10 V arasındaki bir değer ile motor frekans dönüştürücüsünün analog girişine gönderilir. Frekans dönüştürücüsü bu değeri uygun çıkış frekansı ile motora aktarır.



Şekil 4.2 : Sistemin Kontrolünde Kullanılan SIEMENS S7-300 PLC Cihazı.

S7-300 PLC cihazının programlanması ise cihazın haberleşme kablosu ile bağlı olduğu standart bir kişisel bilgisayarda bulunan Windows™ işletim sistemi tabanlı SIEMENS “SIMATIC Manager” ın STEP-7™ program arayüzü ile gerçekleştirilmiştir. STEP-7 de programlama dili olarak SCL ve LAD kullanılmıştır [15,16,17].

4.2 İkinci Dereceden Sistemlerin Yapısı

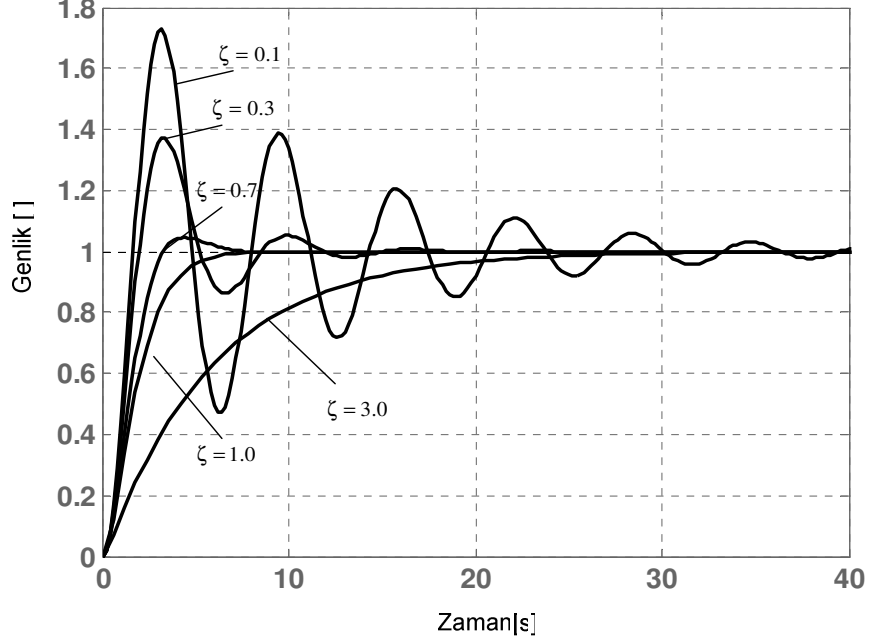
4.2.1 Sistemdeki Önemli Parametrelerin Tanımı

İkinci dereceden sistemlerin matematiksel modeline ilişkin s-tanım bölgesi transfer fonksiyonu,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.1)$$

biçimindedir. Burada ζ sönüm oranı, ω_n doğal frekans olarak tanımlanır. Bu tür sistemler ζ parametresine göre az sönümlü, kritik sönümlü, aşırı sönümlü ve

sönümsüz sistemler olarak sınıflandırılır. Şekil 4.3'te sönüm oranının değişik değerlerine karşı düşen sistem yanıtları gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Doğal Frekansı $\omega_n=1$ rad/s olan İkinci Dereceden Sistemlerin Sönüm Oranına Göre Birim Basamak Girişine Yanıtı.

Sönüm oranı $0 < \zeta < 1$ değerinde olan sistemler az sönümlü, sönüm oranı $\zeta=1$ değerinde olan sistemler kritik sönümlü, sönüm oranı $\zeta > 1$ değerinde olan sistemler aşırı sönümlü ve sönüm oranı $\zeta=0$ değerinde olan sistemler sönümsüz sistem olarak tanımlanır.

Az sönümlü sistemlerin birim basamak girişe yanıtı (Şekil 4.4), $R(s)=\frac{1}{s}$ yazılarak elde edilen

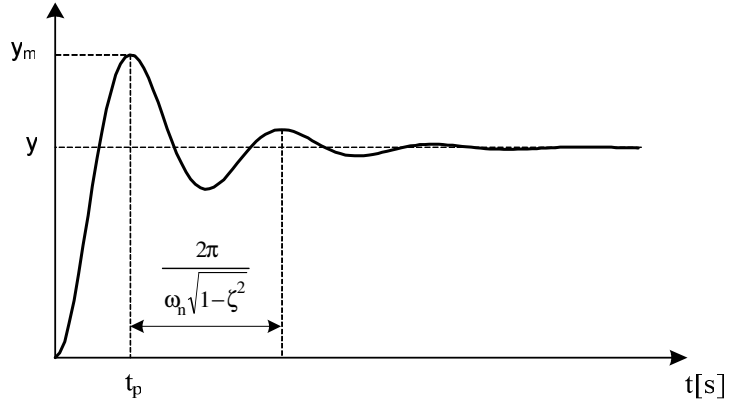
$$Y(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} R(s) = \frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (4.2)$$

ifadesinin ters Laplace dönüşümü alınarak,

$$y(t) = K \left(1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega t + \cos^{-1} \zeta) \right); \quad (4.3)$$

$$\omega = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}, \quad 0 < \zeta < 1 \quad (4.4)$$

biçiminde elde edilir. Az sönümlü sisteme ilişkin K , ζ ve ω_n parametreleri, sistemin basamak girişe yanıtından bulunabilir.



Şekil 4.4 : Az Sönümlü Sistemin Birim Basamak Girişe Yanıtı.

$$\text{Aşım Yüzdesi} = \frac{y_m - y}{y} \quad (4.5)$$

$$\delta = \ln \frac{(y_m - y)}{y} = \ln(y_m - y) - \ln(y), \quad 0 < y < y_m < 2y \quad (4.6)$$

$$\text{Sönüm, } \zeta = \sqrt{\frac{\delta^2}{\pi^2 + \delta^2}} \quad (4.7)$$

$$\text{Doğal Frekans, } \omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1-\zeta^2}}, \quad 0 < \zeta < 1 \quad (4.8)$$

ilişkileri kullanılarak K , ζ ve ω_n parametreleri bulunur.

İkinci mertebeden az sönümlü sistemlere ilişkin z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu sıfıncı mertebeden tutucu kullanılarak;

$$G(z) = Z\{G_{\text{ZOH}}(s)G(s)\} = Z\left\{\frac{1-e^{-sT}}{s} \frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}\right\} = (1-z^{-1})Z\left\{\frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}\right\}$$

ifadesinden hareketle,

$$G(z) = K \frac{(1 - a \cos \theta - a b \sin \theta)z + a^2 - a \cos \theta + a b \sin \theta}{z^2 - (2a \cos \theta)z + a^2} \quad (4.9)$$

biçiminde elde edilir. Burada a, b ve θ büyüklükleri;

$$a = e^{-\zeta\omega_n T}, \quad (4.10)$$

$$b = \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (4.11)$$

$$\theta = \omega T, \quad (4.12)$$

olarak tanımlanır. Bu ifade düzenlenerek,

$$G(z) = K(1 - a \cos \theta - a b \sin \theta) \frac{z + \frac{a^2 - a \cos \theta + a b \sin \theta}{1 - a \cos \theta - a b \sin \theta}}{z^2 - (2a \cos \theta)z + a^2} \quad (4.13)$$

biçiminde yazılır. K_z , z-tanım bölgesindeki kazanç olacak şekilde

$$b_0 = \frac{a^2 - a \cos \theta + a b \sin \theta}{1 - a \cos \theta - a b \sin \theta} \quad (4.14)$$

$$K_z = K(1 - a \cos \theta - a b \sin \theta) \quad (4.15)$$

tanımları yapılırsa,

$$G(z) = \frac{K_z(z + b_0)}{z^2 - (2a \cos \theta)z + a^2}, \quad z_{p1,2} = a(\cos \theta \pm j \sin \theta) \quad (4.16)$$

olarak elde edilir.

Benzer şekilde ikinci mertebeden az sönümlü ölü zamanlı sistemlerin transfer fonksiyonu da,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-sL} \quad (4.17)$$

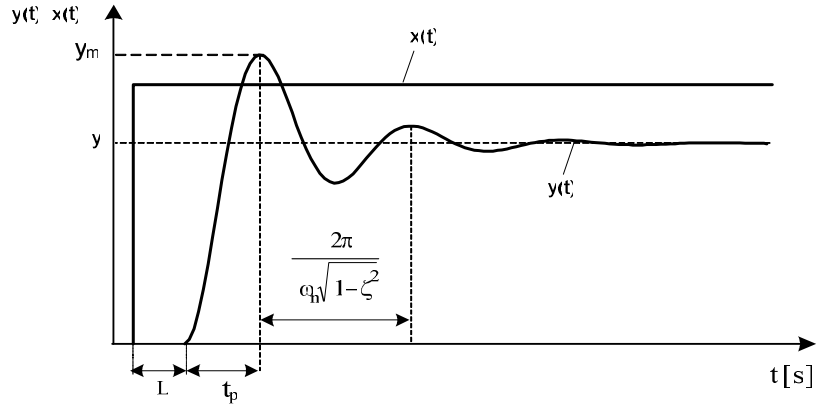
biçiminde tanımlanır. Burada L ölü zaman değeridir. Bu tür bir sisteme basamak giriş uygulanırsa sistem yanıtı Şekil 4.5’da gösterildiği gibi değişir.

Ölü zaman değerinin örnekleme zamanına oranı $d = \frac{L}{T}$ olan bir sistem için z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu,

$$G(z) = \frac{K_z(z + b_0)}{z^2 - (2a \cos \theta)z + a^2} z^{-d} \quad (4.18)$$

biçiminde tanımlanır.

Burada a, b, θ , b_0 ve K_z parametreleri, (4.10-4.12, 4.14, 4.15) bağıntılarındaki ifadelerle aynıdır.



Şekil 4.5 : Az Sönümlü Ölü Zamanlı Sistemin Birim Basamak Girişe Yanıtı.

4.2.2 Klasik PID Kontrolörü Katsayılarının Bulunması

PID kontrolörüne ilişkin z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu;

$$G_{PID}(z) = K_c \left(1 + \frac{T}{T_i} \frac{1}{z-1} + \frac{T_d}{T} \frac{z-1}{z} \right) = K_c \left(1 + I \frac{1}{z-1} + D \frac{z-1}{z} \right) \quad (4.19)$$

biçiminde yazılır ve

$$I = \frac{T}{T_i}, \quad D = \frac{T_d}{T} \quad (4.20)$$

tanımları yapılırsa,

$$G_{PID}(z) = K_c \left(\frac{z(z-1) + Iz + D(z-1)^2}{z(z-1)} \right) = K_c \left(\frac{z^2 - z + Iz + D(z^2 - 2z + 1)}{z(z-1)} \right)$$

$$G_{PID}(z) = K_c \frac{z^2(1+D) + z(-1+I-2D) + D}{z(z-1)} \quad (4.21)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade,

$$G_{PID}(z) = K_c (1+D) \frac{z^2 + z \frac{-1+I-2D}{1+D} + \frac{D}{1+D}}{z(z-1)} = K_c (1+D) \frac{z^2 - z \frac{2D+1-I}{1+D} + \frac{D}{1+D}}{z(z-1)}$$

$$G_{PID}(z) = K_c (1+D) \frac{z^2 - z \frac{2D+1-I}{1+D} + \frac{D}{1+D}}{z(z-1)} \quad (4.22)$$

şeklinde düzenlenir ve

$$K_p = K_c (1+D) = K_c \frac{T+T_d}{T} \quad (4.23)$$

$$\alpha = -\frac{2D+1-I}{1+D} = \frac{T^2 - 2T_d T_i - T T_i}{T_i (T + T_d)} \quad (4.24)$$

$$\beta = \frac{D}{1+D} = \frac{T_d}{T+T_d} \quad (4.25)$$

tanımları yapılırsa,

$$G_{PID}(z) = K_P \frac{z^2 + \alpha z + \beta}{z(z-1)} \quad (4.26)$$

elde edilir.

İkinci dereceden az sönümlü ölü zamanlı sistem ve PID kontrolöründen oluşan sistemin toplam transfer fonksiyonu,

$$G(z)G_{PID}(z) = K_Z K_c (1+D) \frac{z + b_0}{z^2 - (2a \cos \theta)z + a^2} z^{-d} \frac{z^2 - z \frac{2D+1-I}{1+D} + \frac{D}{1+D}}{z(z-1)} \quad (4.27)$$

biçiminde yazılır ve kutup-sıfır silme yöntemi [18,19] gereği,

$$\frac{2D+1-I}{1+D} = 2a \cos \theta, \quad (4.28)$$

$$\frac{D}{1+D} = a^2 \quad (4.29)$$

seçilirse,

$$G(z)G_{PID}(z) = K_Z K_c (1+D) \frac{z + b_0}{z(z-1)} z^{-d}$$

$$G(z)G_{PID}(z) = K^* \frac{z + b_0}{z(z-1)} z^{-d}, \quad K^* = K_Z K_c (1+D) \quad (4.30)$$

ifadesi elde edilir. T_d ve T_I PID kontrol parametreleri (4.20), (4.28), (4.29) bağıntılarından,

$$D = \frac{a^2}{1-a^2}, \quad T_d = DT,$$

$$T_d = \frac{a^2}{1-a^2} T, \quad (4.31)$$

$$\frac{2D+1-I}{1+D} = 2a \cos \theta \quad \rightarrow \quad 2D+1-I = (1+D)2a \cos \theta$$

$$I = (2D+1) - 2(D+1)a \cos \theta = 2\left(\frac{a^2}{1-a^2} + 1\right) - 2\left(\frac{a^2}{1-a^2} + 1\right)a \cos \theta$$

$$I = \left(\frac{2a^2 + 1 - a^2}{1-a^2}\right) - 2\left(\frac{a^2 + 1 - a^2}{1-a^2}\right)a \cos \theta = \frac{a^2 + 1}{1-a^2} - \frac{2a \cos \theta}{1-a^2} = \frac{a^2 + 1 - 2a \cos \theta}{1-a^2}$$

$$I = \frac{T}{T_I} = \frac{a^2 + 1 - 2a \cos \theta}{1-a^2}$$

$$T_I = \frac{1-a^2}{a^2 - 2a \cos \theta + 1} T \quad (4.32)$$

şeklinde bulunur.

PID K_C oransal kazanç değerinin bulunması için PID ile kontrol edilen sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu

$$T(z) = \frac{G(z)G_{PID}(z)}{1 + G(z)G_{PID}(z)} = \frac{K^* \frac{z + b_0}{z(z-1)} z^{-d}}{1 + K^* \frac{z + b_0}{z(z-1)} z^{-d}} = \frac{K^* (z + b_0) z^{-d}}{z(z-1) + K^* (z + b_0) z^{-d}}$$

$$T(z) = \frac{K^* (z + b_0) z^{-d}}{z^2 - z + K^* (z + b_0) z^{-d}} = \frac{K^* (z + b_0)}{z^{d+2} - z^{d+1} + K^* (z + b_0)} \quad (4.33)$$

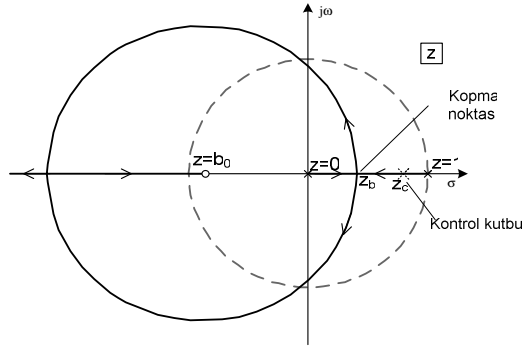
yazılır ve karakteristik denklem,

$$z^{d+2} - z^{d+1} + K^* (z + b_0) = 0 \quad (4.34)$$

biçiminde elde edilir. Bu ifadeden toplam kazanç için,

$$K^* = \frac{z^{d+1}(1-z)}{z+b_0} \quad (4.35)$$

ifadesi yazılabilir. Kapalı çevrim sistemin basamak girişine yanıtının istenen dinamik davranış özelliklerine göre kapalı çevrim baskın kontrol kutbunun nerede olması gerektiği belirlenir. Kapalı çevrim kutuplarının değişimine ilişkin eğriden (Şekil 4.6), kazanç değerinin $z=z_b$ kopma noktasına kadar olan değerlerinde aşım olmaması beklenir.



Şekil 4.6 : z-düzlemi Kapalı Çevrim Kutup Değişim Eğrisi.

Kopma noktası, (4.35) ifadesinin türevi alınıp 0 a eşitlenerek,

$$\frac{dK^*}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\frac{z^{d+1}(1-z)}{z+b_0} \right) = \frac{d}{dz} \frac{z^{d+1} - z^{d+2}}{z+b_0} = 0 \quad (4.36)$$

elde edilir. Bu ifade açılıp düzenlenirse,

$$\frac{dK^*}{dz} = \frac{d}{dz} \frac{z^{d+1} - z^{d+2}}{z+b_0} = \frac{((d+1)z^d - (d+2)z^{d+1})(z+b_0) - (z^{d+1} - z^{d+2})}{(z+b_0)^2} = 0$$

$$((d+1)z^d - (d+2)z^{d+1})(z+b_0) - (z^{d+1} - z^{d+2}) = 0$$

yazılır ve

$$(d+1)z^{d+1} - (d+2)z^{d+2} + b_0(d+1)z^d - b_0(d+2)z^{d+1} - z^{d+1} + z^{d+2} = 0,$$

$$z^{d+2}(-d-1) + z^{d+1}(d - b_0(d+2)) + z^d b_0(d+1) = 0,$$

$$z^d [(-d-1)z^2 + (d - b_0(d+2))z + b_0(d+1)] = 0,$$

$$z^2 + \frac{d - b_0(d+2)}{(-d-1)}z + \frac{b_0(d+1)}{(-d-1)} = z^2 + \frac{b_0(d+2) - d}{(d+1)}z - \frac{b_0(d+1)}{(d+1)} = 0,$$

$$z^2 + \frac{b_0(d+2) - d}{(d+1)}z - b_0 = 0 \quad (4.37)$$

bulunur. Bu ifadede,

$$b_1 = \frac{b_0(d+2) - d}{(d+1)} \quad (4.38)$$

olarak tanımlanırsa kopma noktaları;

$$z_{1,2} = \frac{-b_1 \pm \sqrt{b_1^2 + 4b_0}}{2} \quad (4.39)$$

olarak bulunur.

karakteristik denklem K^* kazancına göre düzenlenir ve

$$G(z)G_{PID}(z) = K^* \frac{z + b_0}{z(z-1)} z^{-d} = K^* \frac{z + b_0}{z^{d+2} - z^{d+1}}$$

şeklinde yazılır. Kontrol kritik sönümlü olması için $\zeta = 1$ alınır ve bu durumda kazanç değeri,

$$z = a_1 = e^{-\omega_n T}, \quad (4.40)$$

$$K^* = \frac{a_1^{d+1}(1 - a_1)}{a_1 + b_0} \quad (4.41)$$

olarak bulunur. (4.30) bağıntısından,

$$K_C = \frac{K^*}{K_Z(1+D)} = \frac{K^*}{K_Z(1+Td/T)} = \frac{K^*T}{K_Z(T+Td)} \quad (4.42)$$

Buna göre s-tanım bölgesi transfer fonksiyonu,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

biçiminde verilen bir sistemin kritik sönümlü olmasını sağlayan PID kontrolör katsayıları aşağıdaki ifadeler kullanılarak elde edilebilir.

$$a = e^{-\zeta\omega_n T}, \quad (4.43)$$

$$b = \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (4.44)$$

$$\theta = \omega T, \quad \omega = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}, \quad (4.45)$$

$$T_d = \frac{a^2}{1-a^2} T, \quad (4.46)$$

$$T_I = \frac{1-a^2}{a^2 - 2a \cos \theta + 1} T, \quad (4.47)$$

$$a_1 = e^{-\omega_n T}, \quad (4.48)$$

$$b_0 = \frac{a^2 - a \cos \theta + a b \sin \theta}{1 - a \cos \theta - a b \sin \theta}, \quad (4.49)$$

$$d = \frac{L}{T}, \quad (4.50)$$

$$K^* = \frac{a_1^{d+1}(1-a_1)}{a_1 + b_0}, \quad (4.51)$$

$$K_Z = K(1 - a \cos \theta - b \sin \theta), \quad (4.52)$$

$$K_C = \frac{K^* T}{K_Z(T + Td)} \quad (4.53)$$

Bu ifadelerin bir kısmı,

$$S_R = \frac{\omega_s}{\omega_n} \quad (4.54)$$

olarak tanımlanan örnekleme frekansının doğal frekansa oranına göre düzenlenirse;

$$T = \frac{2\pi}{S_R \omega_n} \text{ ilişkisinden } \omega_n = \frac{2\pi}{TS_R} \text{ olur ve}$$

$$a = e^{-\zeta \omega_n T} = \exp\left(-\zeta \frac{2\pi}{TS_R} T\right) = \exp\left(-\zeta \frac{2\pi}{S_R}\right), \quad (4.55)$$

$$\theta = \omega T = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} T = \frac{2\pi}{TS_R} \sqrt{1 - \zeta^2} T = \frac{2\pi}{S_R} \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.56)$$

şeklinde yazılabilir. Bu şekilde sönüm oranı ve S_R oranına bağlı olarak katsayılar tablosu oluşturulabilir [18-20]. Bazı ζ ve S_R değerlerine ilişkin bir tablo Ek_A da verilmiştir.

4.3 Sistem Davranışının Gözlemlenmesi

4.3.1 Giriş-Çıkış İşaretlerinin Değerlendirilmesi

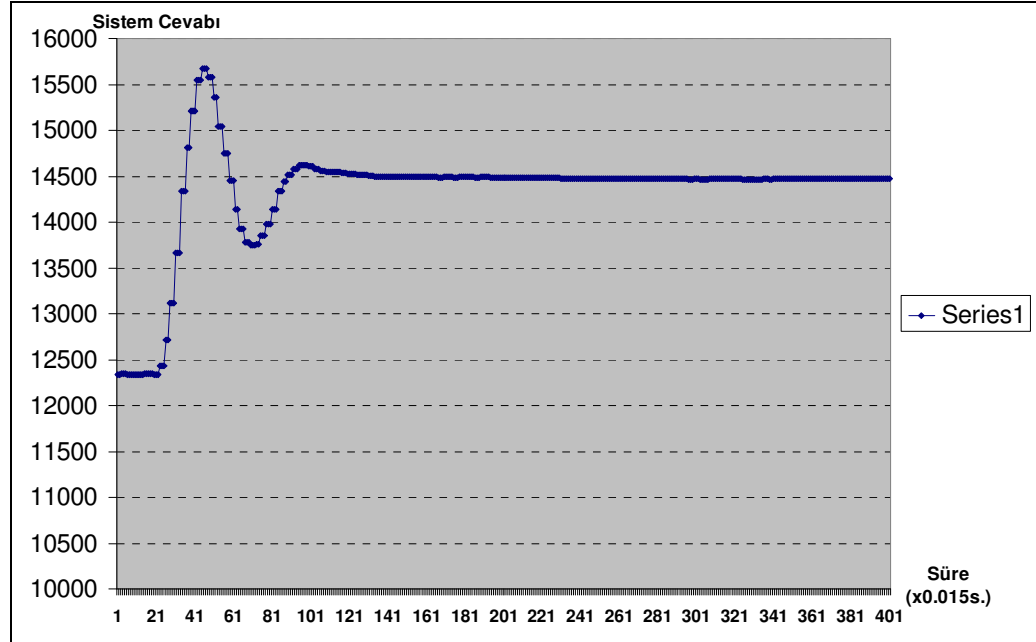
Bölüm 4.1 de bahsedildiği gibi, düzeneğin bağlı olduğu SIEMENS S7-300 PLC cihazına bilgisayarda yüklü “Simatic Manager” programı ile bağlantı kurularak proje oluşturulmuştur. PLC cihazının analog giriş ve çıkış modüllerine bağlı olan giriş ve çıkış işaretleri, bu modüllerin programda tanımlanmış adresleri vasıtası ile

gözlemlenmiştir. Analog giriş-çıkış modülleri ± 10 V olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde modüllerde bulunan ADC (Analog Dijital Çevirici) ve DAC (Dijital Analog Çevirici) sayesinde bu işaretlerin sayısal karşılıkları programda -27648...+27648 aralığında belirlenmiştir.

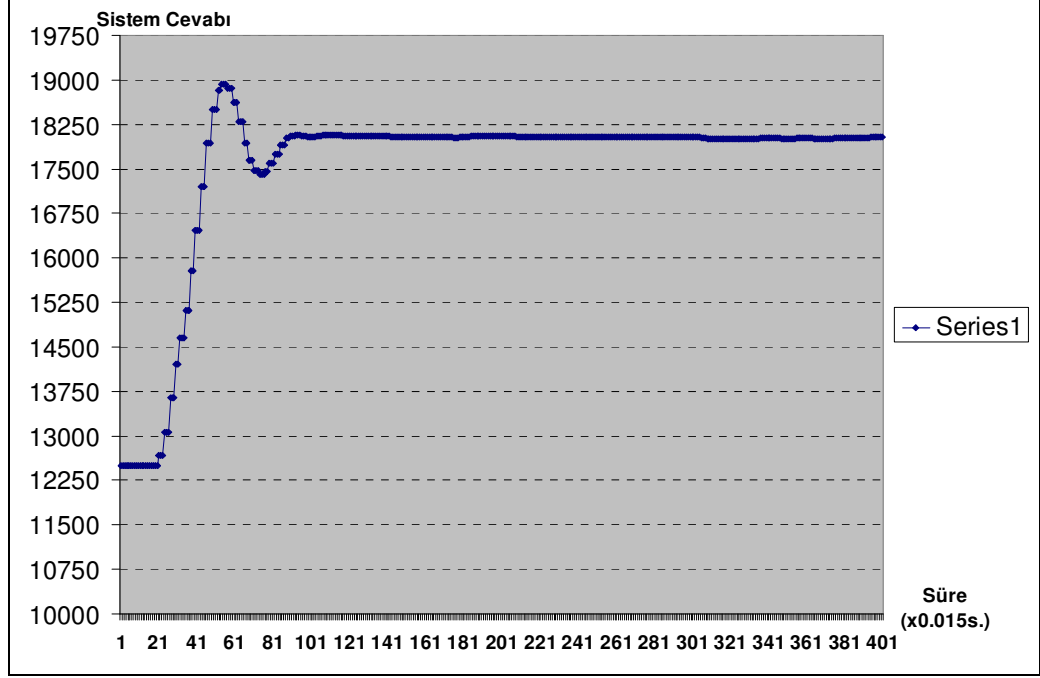
4.3.2 Sisteme Basamak Girişleri Uygulanması

Sistemin davranışını gözlemek üzere, programda bir fonksiyon bloğu yazılmış ve PLC cihazına yüklenmiştir. Program üzerinden, çeşitli çıkış sinyali değerleri girilmiş ve bu değerlere karşı sistemin verdiği cevaplar, örnekleme periyodu 0.015/0.02 sn. seçilerek algoritmada numarası belirtilen PLC cihazındaki veri tabanına kaydedilmiştir. Bu veriler okunmuş ve grafikler haline getirilerek sistem davranışı hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Şekil 4.7 ve 4.8 de bu grafiklerden bazıları gösterilmiştir. Sistem cevabına ait diğer grafikler Ek_B de verilmiştir.

Sisteme herhangi bir çıkış uygulanmadığı zaman, sistemden gelen konum bilgisi işareti 12200 – 12600 sayısal değer aralığında gözlenmiştir. Sisteme en yüksek giriş değeri uygulandığında ise konum bilgisi işareti yaklaşık 18272 sayısal değeri ile gözlenmiştir. Bu verilerden yola çıkarak sistemi kontrol edeceğimiz alt ve üst sınır değerleri belirlenmiştir.

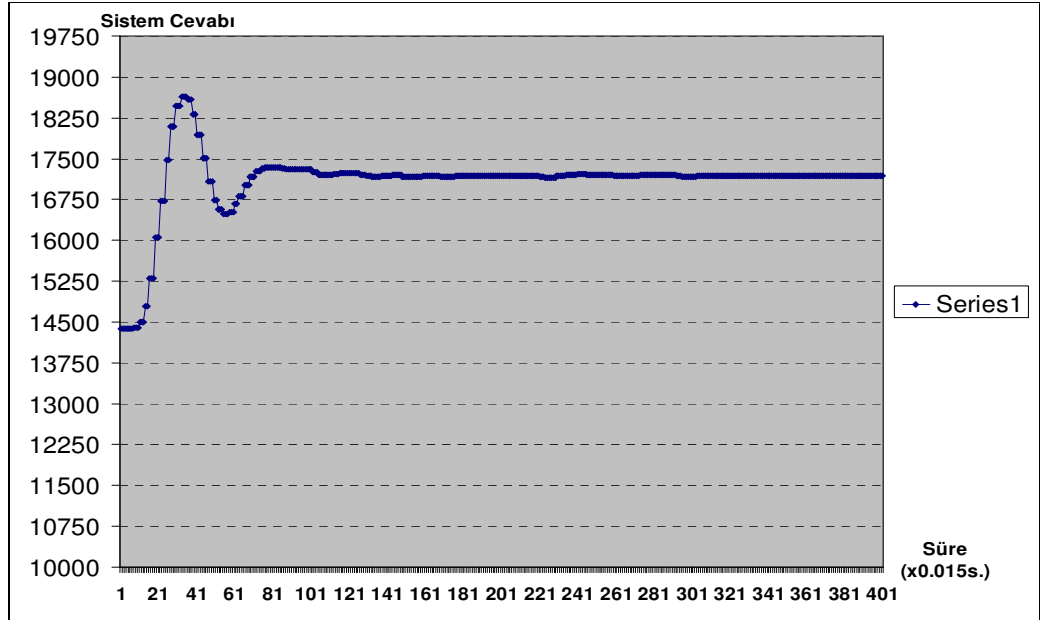


Şekil 4.7 : Sistemin 14000 Giriş Değerine Cevabı.

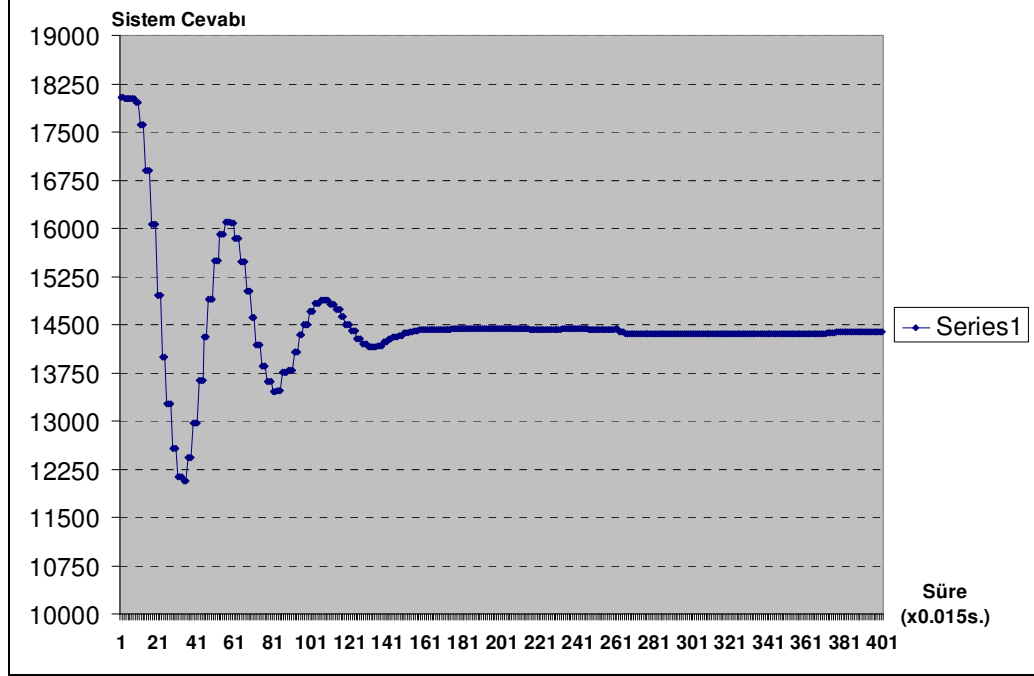


Şekil 4.8 : Sistemin 26000 Giriş Değerine Cevabı.

Sistemin farklı durumlardaki davranışını gözlemlemek amacı ile önce belirli bir basamak işareti gönderilmiş ve sistemin cevabı oturduktan sonra yeni bir basamak işareti daha gönderilerek sistemin cevabı gözlenmiş ve benzer şekilde kaydedilmiştir. Bu verilere ait bazı grafikler Şekil 4.9 ve 4.10 da gösterilmiştir. Elde edilen diğer grafikler Ek_C de verilmiştir.



Şekil 4.9 : 14000 den 23000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.



Şekil 4.10 : 26000 den 14000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.

Şekil 4.10 da görüldüğü gibi, sistem yüksek bir noktada çalışırken düşük bir noktaya inmesi durumunda daha çok salınım yaptığı ve sürekli duruma daha geç oturduğu gözlenmiştir.

4.3.3 Parametrelerin Hesaplanması

Elde edilen giriş-çıkış işaretleri ile ilgili verilerden ve grafikteki eğrilerden de yararlanılarak bazı parametrelerin değerleri bulunmuştur. Bunlar, bilinen x , x_0 , T verileri dışında y_0 , y_{max} , y , t_p , ve L değerleridir. Burada T örnekleme periyodunu, x ve x_0 sırası ile son ve ilk basamak giriş değerlerini, y_0 , y_{max} ve y ise sırası ile sistem cevabının başlangıç, tepe ve son durum değerlerini, t_p , ve L ise sırası ile tepe zamanı ve ölü zamanı göstermektedir.

K sistem kazancı olmak üzere;

$$K = (y - y_0) / (x - x_0) \quad (4.57)$$

olarak hesaplanmıştır. Aşım, sönüm ve doğal frekans değerleri de (4.5-4.8) bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde diğer parametreler (4.43-4.53) bağıntıları ile hesaplanmıştır. Örneğin, 17000 giriş basamak değeri ve $T = 0.015$ s için veri ve grafik eğrisinden,

$$y_0 = 12312, y_{\max} = 16824, y = 15344, t_p = 0.39 \text{ s ve } L = 0.3 \text{ s}$$

değerleri bulunur. Diğer parametreler de sırasıyla,

$$\text{Aşım yüzdesi} = 0.488, \zeta = 0.223, \omega_n = 8.263, \omega = 8.055, \theta = 0.121,$$

$$a = 0.973, b = 0.228, T_d = 0.264, T_I = 0.054, a_1 = 0.883, b_0 = 0.982,$$

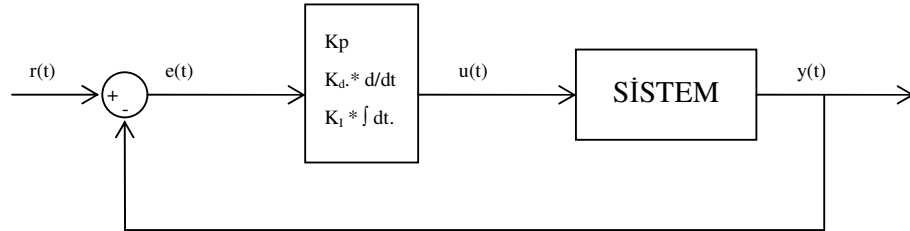
$$K^* = 0.00463, K_z = 0.0134, K_c = 0.185$$

olarak elde edilir. Diğer sistem cevaplarına göre hesaplanan parametreler bir tablo halinde Ek_D de verilmiştir.

4.4 Klasik PID Kontrolörünün Uygulanması

4.4.1 PID Kontrolör Yapısı

PID tipi kontrolörlerin genel yapısı Şekil 4.11 deki gibidir.



Şekil 4.11 : Klasik PID Kontrolör Gösterimi.

Genel olarak, PID tip kontrolörlerde $u(t)$ kontrol işareti, $e(t)$ hata işaretinin kendisi, entegrali ve türevi alınıp sırası ile K_p , K_I ve K_D katsayıları ile çarpılıp birbirleri ile toplanmasından oluşur. Burada P oransal kontrol; I entegral kontrolü ve D ise türev kontrolünü göstermektedir.

$$u(t) = K_p * e(t) + K_I * \int e(t) dt + K_D * (d e(t)/dt) \quad (4.58)$$

PID tip kontrolörler uygulamalarda farklı birleşimlerle de kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, PI-tip, PD-tip, PI+D-tip şeklindedir. Sürekli zamanda verilen (4.58) bağıntısı s-tanım bölgesinde [18,19],

$$u(s) = K_p * e(s) + (K_I * e(s) / s) + s * K_D * e(s) \quad (4.59)$$

şeklinde ifade edilir. Ayrık zamandaki ifadeleri elde etmek için her bir kontrol işaretinin z-tanım bölgesindeki ifadeleri [19],

$$P \text{ kontrolü için, } u(z) = K_p * e(z) \quad (4.60)$$

$$I \text{ kontrolü için, } u(z) = K_I * T * z * e(z) / (z-1) \quad (4.61)$$

$$D \text{ kontrolü için, } u(z) = K_D * (z-1) * e(z) / T * z \quad (4.62)$$

şeklinde yazılır. Burada ayrık entegral kontrolü, geri entegrasyon yaklaşımı seçilerek ifade edilmiş olup diğer yaklaşım ifadeleri [18,19]den incelenebilir.

Ayrık zaman için,

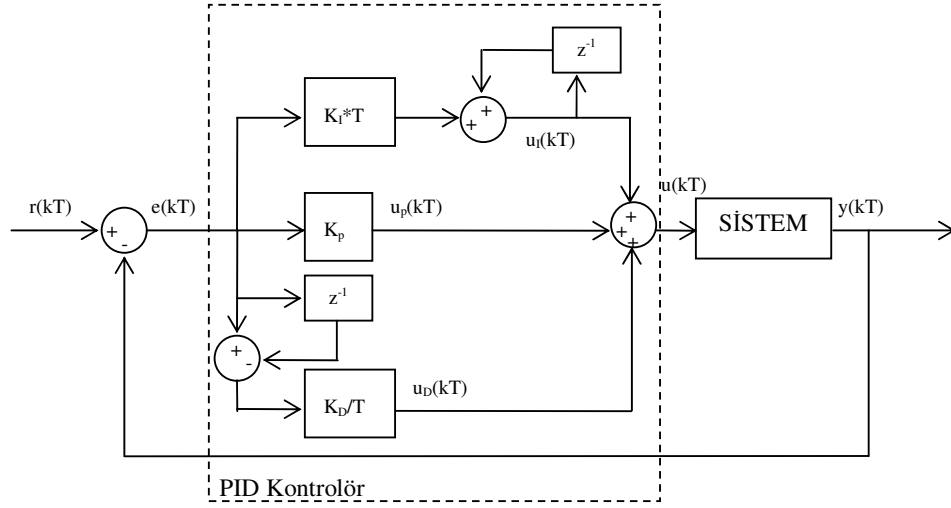
$e(kT) = e(z)$, $e(kT-T) = z^{-1} * e(z)$ dönüşümlerinin yapılması için (4.60-4.62) ifadeleri z^{-1} e göre düzenlenirse;

$$u_p(kT) = K_p * e(kT) \quad (4.63)$$

$$u_I(kT) = K_I * T * e(kT) + u_I(kT-T) \quad (4.64)$$

$$u_D(kT) = K_D * (e(kT) - e(kT-T)) / T \quad (4.65)$$

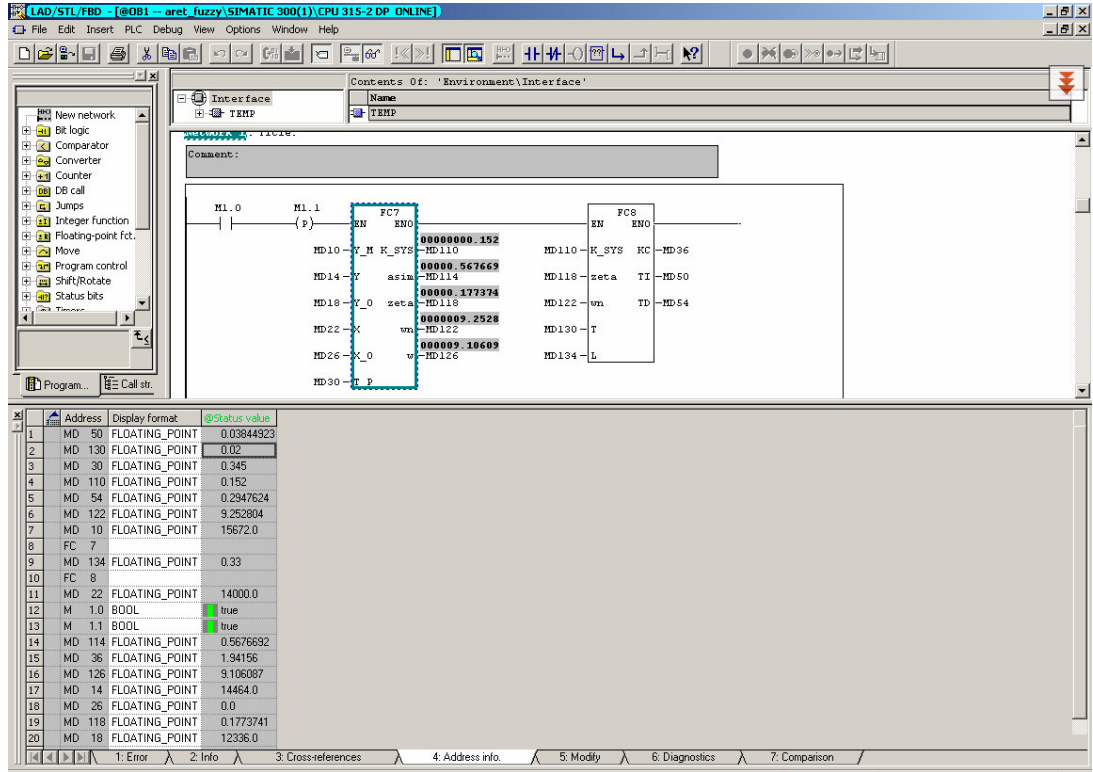
ifadeleri bulunur [18,19]. Şekil 4.12 de bu ifadelerle oluşan kontrolörün genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : Ayrık Zamanda Oluşan Klasik PID Kontrol Sistemi.

4.4.2 PID Kontrolörünün Oluşturulması

Sistemden elde edilen veriler ve oluşturulan grafik eğrileri üzerinden hesaplanan sistem parametreleri ile ilgili, programda iki ayrı fonksiyon (FC7, FC8) oluşturularak PLC cihazına yüklenmiştir. Böylece (4.5-4.8) ve (4.43-4.53) denklemleri programlanmıştır. Bu fonksiyonlar Şekil 4.13 de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 : STEP-7 Programında Oluşturulan Parametre Hesaplama Fonksiyonları.

Bölüm 4.4.1 de genel yapısı verilen ayrıık zamandaki PID kontrolör yapısının benzeri oluşturulmak üzere bir fonksiyon bloğu yaratılmıştır. Şekil 4.14 de tasarlanan PID fonksiyonun blok yapısı gösterilmiştir.

Bu yapıda, sistemin verdiği cevapta (süreç değeri) bulunan bozucu işaretlerin sönümlenmesi amacı ile süreç değeri, birinci dereceden bir filtreden geçirilerek değerlendirilmiştir. Kullanılan birinci dereceden filtrenin ifadesi; x filtre giriş işareti, y filtre çıkış işareti ω_c köşe frekansı olmak üzere,

$$y(kT) = A*y(kT-T) + (1-A)*x(kT), \quad A = \exp(-\omega_c T) \quad (4.66)$$

biçimindedir. Köşe frekansı, doğal frekansın 5-6 katı civarında seçilerek tasarlanan fonksiyon bloğunun bir parametresi olarak girilmiştir.

aralıklarda kalması sağlanmıştır. Toplam kontrol çıkış işareti de aynı şekilde sınırlandırılmış, fakat alt sınır değeri 0 seçilmiştir. Bunun sebebi, (-) çıkış kontrol işareti değerlerinde düzenekte bulunan motorun ters yönde çalışarak tekrar pozitif değerde kontrol hareketi sağlamasıdır. Kontrolör yüksek bir hedef noktasından daha alt bir hedef noktasına geçiş yaparken 0 değerinin altında oluşan kontrol işaretleri motoru en yüksek devirde çalıştırarak hedeften iyice uzaklaşmasına sebep olduğu gözlenmiştir.

4.4.3 PID Katsayılarının Seçimi

Çeşitli giriş-çıkış işaretleri için elde edilen parametrelerden başta ζ , ω_n , parametreleri incelenerek sistemin açık çevrim transfer fonksiyonu yaklaşık olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Ek_D de verilen parametre tablosu incelendiğinde ζ ve ω_n çoğunlukla,

$$0.15 < \zeta < 0.25 \quad \text{ve} \quad 8.0 < \omega_n < 9.5 \text{ (rad/s)}$$

değerleri aralığında değiştiği görülmüştür. Bu verilere istinaden sistemin açık çevrim transfer fonksiyonu, 14000 basamak girişine göre oluşan sistem cevabından hesaplanan ζ ve ω_n değerleri seçilerek ($\zeta = 0.18053$, $\omega_n = 9.2582$ rad/s) belirlenmiştir. Özellikle bu değerlere karşı gelen K_c , T_i ve T_d PID parametrelerini hesaplayan fonksiyon, genel program döngüsünün uzun sürmemesi için sadece bir döngü çalıştırılacak şekilde tasarlanmıştır. Bununla birlikte ana program bloğunun (OB35) döngü süresinin parametre hesaplarında, PID kontrolöründe ve tasarlanan bulanık PID kontrolöründe kullanılan örnekleme periyodu değerini aşıp aşmadığı kontrol edilmiş [21] ve 0.02 sn olarak seçilmiştir.

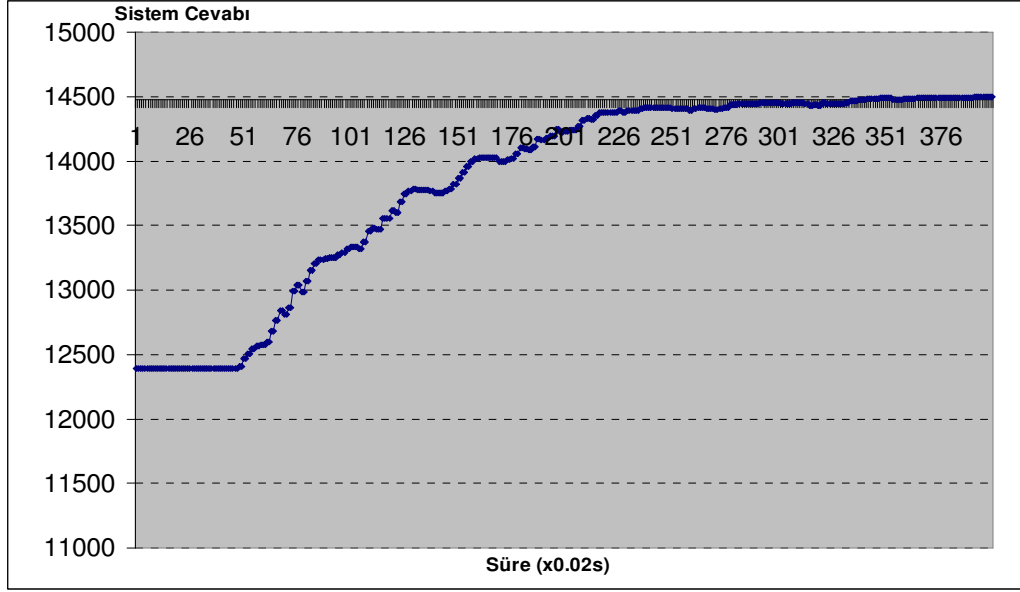
4.4.4 PID Kontrolörünün Uygulanması

PID fonksiyon bloğu (FB7) aktif hale getirilerek parametrelerin atanması sağlanmıştır. Bu aşamadan sonra oluşturulan PID kontrolörüne çeşitli hedef değerleri girilerek sistem davranışı gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Kaydedilen değerler grafik haline getirilerek incelenmiştir. Bazı grafikler Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 de gösterilmiş, diğerleri de Ek_E de verilmiştir. Yapılan incelemelerde sistem cevabının hedef değere oturma zamanının, Şekil 4.16 için 4.5-5.5 s (226-276 kayıtları) aralığında; Şekil 4.17 için de 6-6.5 s (301-326 kayıtları) aralığında gerçekleştiği görülmüştür.

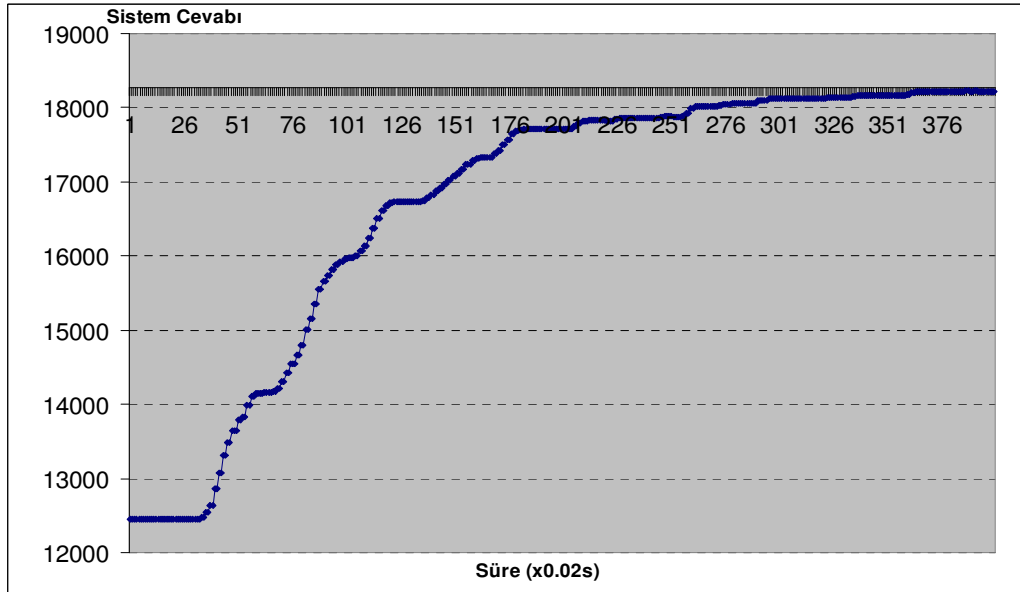
Kontrolör belirli bir hedef noktasında çalışırken, kontrolöre yeni bir hedef noktası girilmiş ve sistemin davranışı gözlemlenerek veriler kaydedilmiştir. Benzer şekilde kaydedilen veriler grafik haline getirilerek incelenmiştir. Yapılan incelemelerde

sistem cevabının hedef değere oturma zamanının, Şekil 4.18 de verilen grafik için 3-4 s (151-201 kayıtları) aralığında, Şekil 4.19 için de 4-5 s (201-251 kayıtları) aralığında gerçekleştiği görülmüştür.

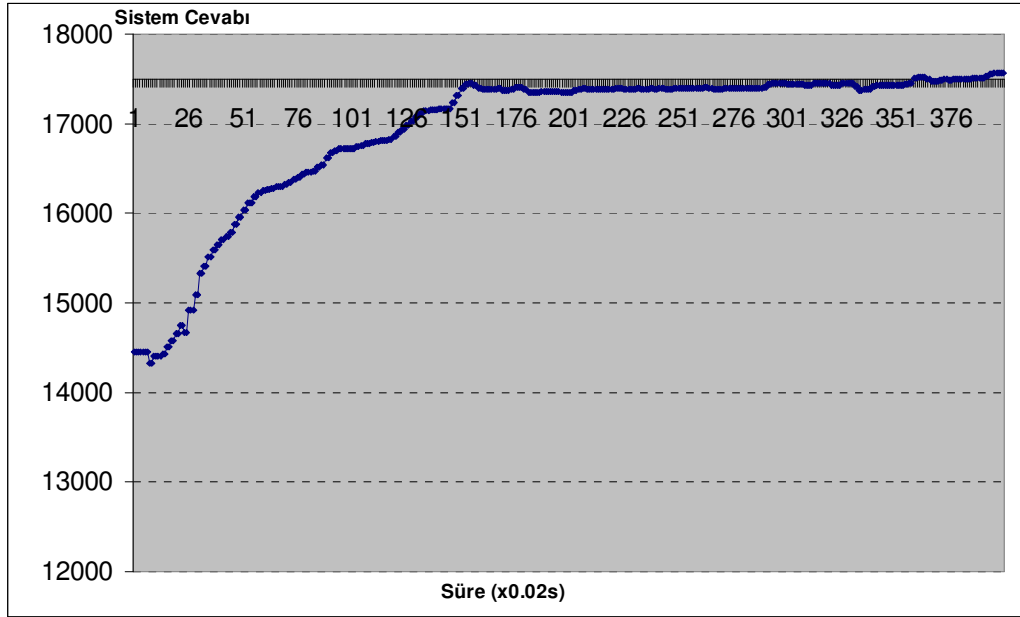
Seçilmiş olan PID parametreleri ile aşım sorunu giderilmiş, oturma zamanı da ise genel olarak 4-5 s aralığında gerçekleşmiştir. Endüstride karşılaşılan otomasyon sistemlerinin kontrolünde belirlenen hedef noktasında ve farklı hedef noktalarında geçişte az da olsa aşım istenmemesi düşüncesi, elde edilen verilerde yüksek aşım değerlerinin de incelenerek parametre seçimi yapılmasını sağlamıştır.



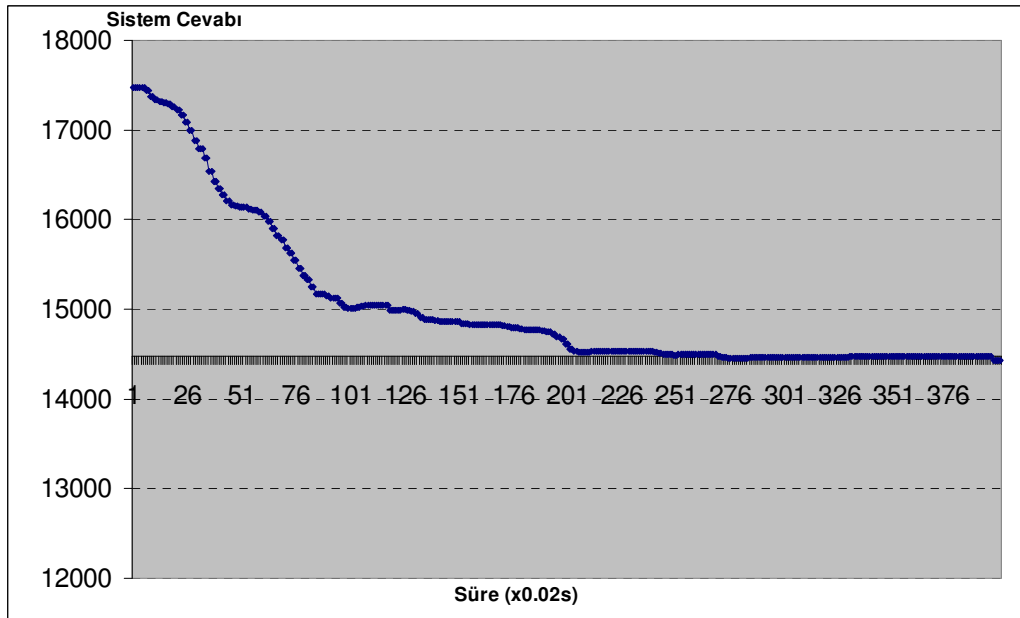
Şekil 4.16 : Sistemin PID Kontrolör ile Verdiği Davranış (Hedef Değer=14472).



Şekil 4.17 : Sistemin PID Kontrolör ile Verdiği Davranış (Hedef Değer=18272).



Şekil 4.18 : PID Kontrolör ile Sistem Davranışı (Hedef Değer Geçişi: 14472-17500).

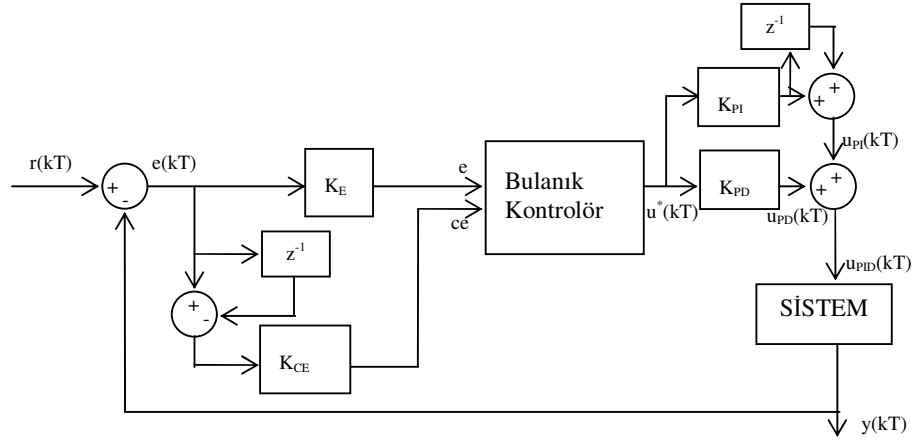


Şekil 4.19 : PID Kontrolör ile Sistem Davranışı (Hedef Değer Geçişi: 17500-14472).

4.5 Bulanık PID Kontrolörünün Uygulanması

4.5.1 Bulanık Kontrolör Yapısı

Sistemde kullanılması tasarlanan bulanık kontrol sisteminin yapısı Şekil 4.20 de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 : Tasarlanan Bulanık PID Kontrol Sistemi Yapısı.

Bulanık kontrol sisteminin girişleri hata (e) ve hatanın değişimi (ce), çıkışı ise bulanık kontrol işareti (u^*) olarak seçilmiştir. Hata ve hatanın değişimi K_E ve K_{CE} katsayıları ayarlanarak bulanık giriş işaretleri haline almıştır. Bulanık çıkış işareti, K_{PI} ve K_{PD} katsayıları ayarlanarak u_{PD} ve u_{PI} kontrol işaretleri haline gelir ve sisteme uygulanacak kontrol çıkışı bu işaretlerin toplanması ile oluşur.

4.5.2 Üyelik Fonksiyonlarının Seçimi

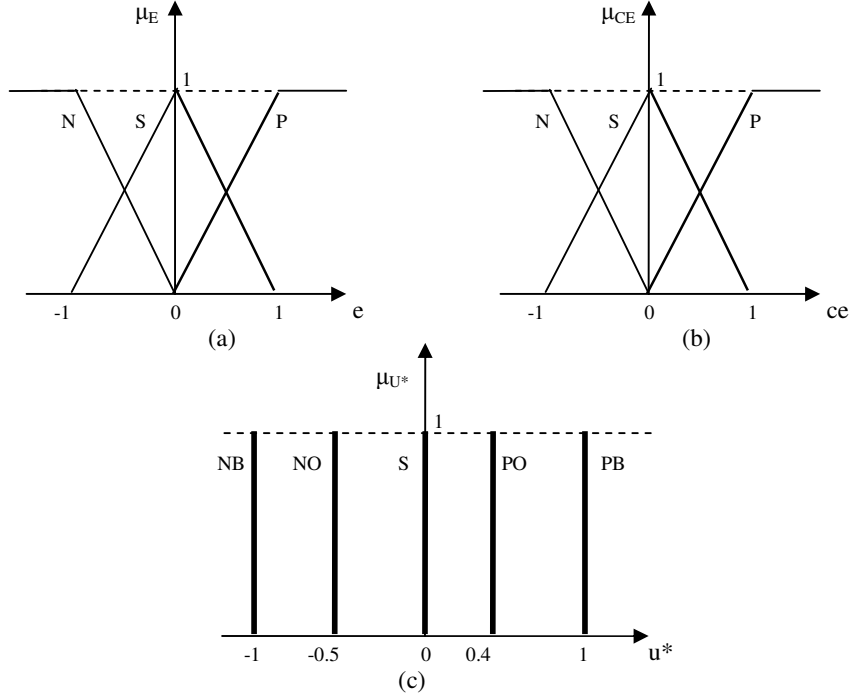
Tasarlanan bulanık kontrolörün giriş işaretleri için üçgen tipi üyelik fonksiyonları, çıkış işareti için ise Singleton tipi üyelik fonksiyonları seçilmiştir.

Hata giriş işareti fonksiyonları = (N, S, P),

Hatanın değişimi giriş işareti fonksiyonları = (N, S, P),

Çıkış işareti fonksiyonları = (NB, NO, S, PO, PB)

Bu ifadelerde giriş fonksiyonları N=negatif, S=sıfır, P=pozitif olarak tanımlanmış, çıkış fonksiyonları ise NB=negatif büyük, NO=negatif orta, S=sıfır, PO=pozitif orta ve PB=pozitif büyük olarak tanımlanmıştır. Seçilen fonksiyonların yapısı Şekil 4.21 de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 : Bulanık PID Kontrolörde Seçilen Üyelik Fonksiyonları, (a) e girişi, (b) ce girişi, (c) u* çıkışı için

4.5.3 Kural Tabanının Oluşturulması

Bulanık giriş işaretlerine ait üçer adet üyelik fonksiyonu tanımından toplam 9 kural oluşturulmuştur. Bunlar;

K1: EĞER $e = N$ ve $ce = N$ ise $u^* = NB$ dır.

K2: EĞER $e = N$ ve $ce = S$ ise $u^* = NO$ dır.

K3: EĞER $e = N$ ve $ce = P$ ise $u^* = S$ dır.

K4: EĞER $e = S$ ve $ce = N$ ise $u^* = NO$ dır.

K5: EĞER $e = S$ ve $ce = S$ ise $u^* = S$ dır.

K6: EĞER $e = S$ ve $ce = P$ ise $u^* PO$ dır.

K7: EĞER $e = P$ ve $ce = N$ ise $u^* S$ dır.

K8: EĞER $e = P$ ve $ce = S$ ise $u^* PO$ dır.

K9: EĞER $e = P$ ve $ce = P$ ise $u^* PB$ dır.

şeklinde. Kural ifadeleri Tablo 4.1 de kural tablosu olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Bulanık PID Kontrolörü İçin Kural Tablosu.

$e \backslash u^* \quad ce$	N	S	P
N	NB	NO	S
S	NO	S	PO
P	S	PO	PB

4.5.4 Bulandırma, Çıkarım ve Durulama İşlemleri

Bulandırma işleminde, aynı yapıda üyelik fonksiyonlarına sahip giriş işaretleri aldıkları değer aralığına göre üyelik fonksiyonları aktif olarak bulanık işaret şekline dönüşürler. Üyelik fonksiyonlarının değer aralığından hareketle her iki giriş işaretinin bulandırma durumu Tablo 4.2 de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Bulanık PID Kontrolörü Giriş İşaretlerinin Bulandırılması.

e, ce durumu	Üyelik Fonksiyonları durumu		
	N	S	P
< -1	1	0	0
-1..0	-e, -ce	e+1, ce+1	0
0..1	0	1-e, 1-ce	e, ce
> 1	0	0	1

Çıkarım işleminde kurallarda kullanılan VE bağlacı için ,

$$\text{EĞER } e \text{ VE } ce = \min(\mu_E, \mu_{CE})$$

işlemi seçilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları Singleton tip seçildiğinden çıkarım Mamdani tipidir.

Bulanık giriş işaretlerinin niteliklerine göre çıkarım işleminde 1, 2, ve 4 kuralın aktif olduğu durumlar gerçekleşir. Tablo 4.3 de bu durumlar gösterilmiştir.

Durulama işlemi için ağırlık merkezi yöntemi seçilmiştir. Buna göre çıkarımlardan elde edilen üyelik değerleri kullanılarak çıkış işareti ;

$$u^* = \sum u_i * \mu_{ui} / \sum \mu_{ui} \quad (4.67)$$

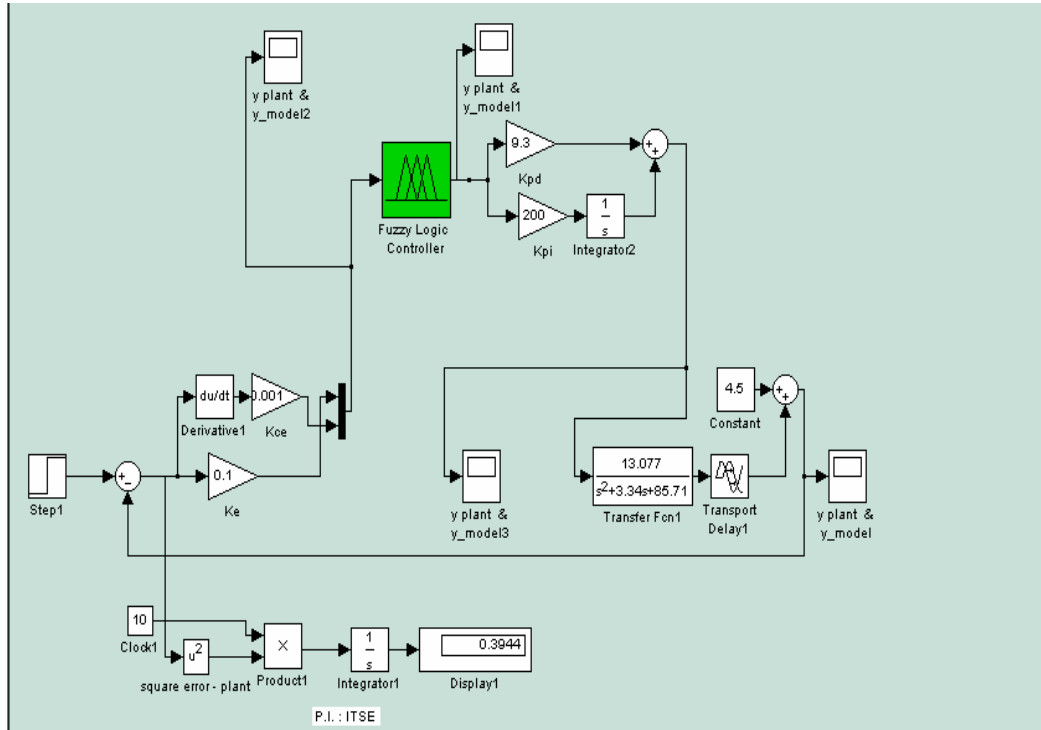
olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.3: Bulanık Giriş İşaretlerine Göre Aktif Olan Kurallar.

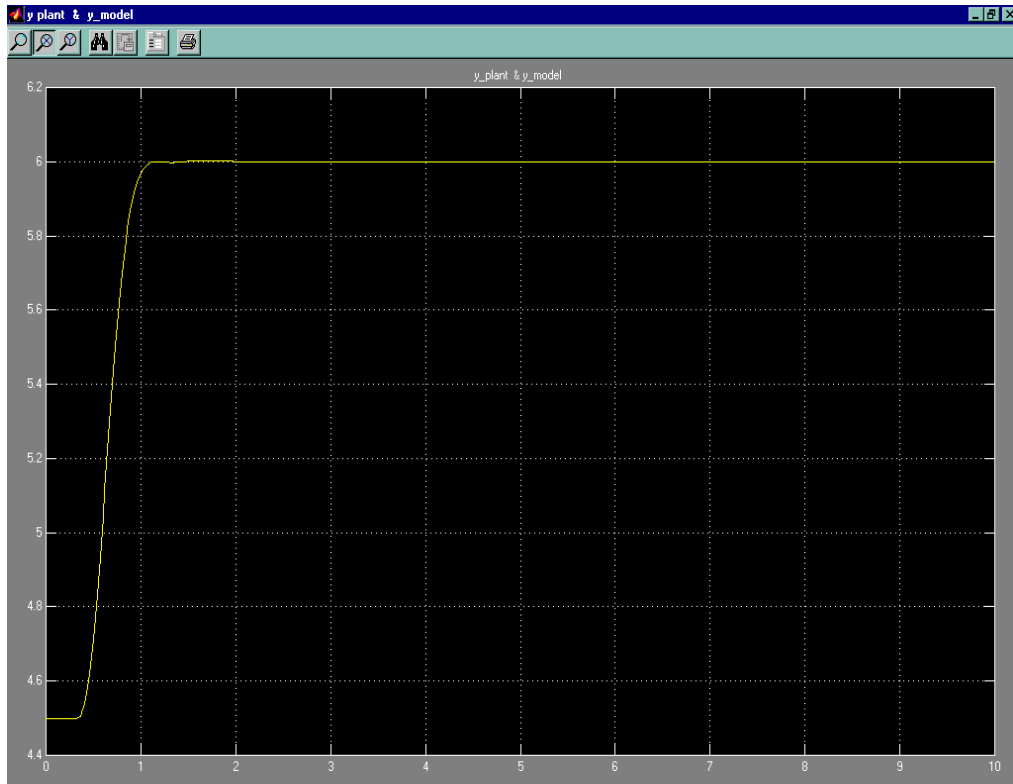
e	ce	Aktif olan kurallar
< -1	< -1	1
< -1	-1..0	1,2
< -1	0..1	2,3
< -1	> 1	3
-1..0	< -1	1,4
-1..0	-1..0	1,2,4,5
-1..0	0..1	2,3,5,6
-1..0	> 1	3,6
0..1	< -1	4,7
0..1	-1..0	4,5,7,8
0..1	0..1	5,6,8,9
0..1	> 1	6,9
> 1	< -1	7
> 1	-1..0	7,8
> 1	0..1	8,9
> 1	> 1	9

4.5.5 Bulanık Kontrolörün Oluşturulması

Bölüm 4.5.1-4.5.4 arasında tasarlanan bulanık PID kontrolör yapısını oluşturmak için STEP-7 programında bir fonksiyon bloğu (FB6) yaratılmış ve PLC cihazına yüklenmiştir. Klasik PID tasarımında olduğu gibi burada da sistem cevabındaki gürültüleri süzmek amacı ile (4.66) denklemi ile ifade edilen birinci dereceden alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Şekil 4.22 de tasarlanan bulanık PID kontrolörü fonksiyon bloğu yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.23a : MATLAB SIMULINK Toolbox da Oluşturulan Bulanık PID Kontrol Yapısı.



Şekil 4.23b : Katsayıların Ayarlanarak Benzetimden Elde Edilen Sistem Cevabı.

Benzetim sonuçlarından,

$K_E = 0.1$, $K_{CE} = 0.001$ $K_{PD} = 9.3$ ve $K_{PI} = 200$ katsayı seçimlerinde aşısız uygun sistem cevabı bulunmuştur.

4.5.7 Bulanık PID Kontrolörünün Uygulanması

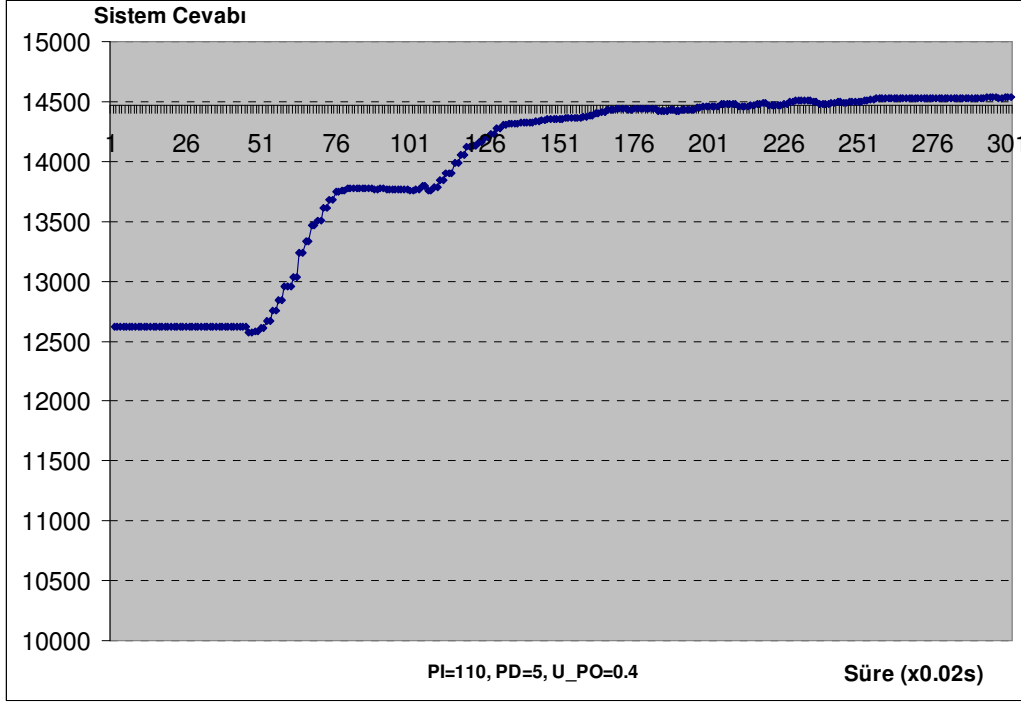
Benzetim sonuçlarından elde edilen K_E , K_{CE} , K_{PD} ve K_{PI} katsayıları bulanık PID fonksiyon bloğuna (FB6) girilmiş ve PLC cihazına yüklenmiştir. Bu aşamadan sonra oluşturulan bulanık PID kontrolörüne çeşitli hedef değerleri girilerek sistem davranışı gözlemlenmiştir. Gözleme esnasında bu katsayıların birebir olarak kullanılamayacağı görülmüş olup bazı denemeler sonucunda K_E , K_{CE} katsayıları sabit tutularak K_{PD} ve K_{PI} katsayılarının çeşitli değerlerine göre sistem davranışı gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Bunun dışında çıkış üyelik fonksiyonlarından PO'nun değeri 0.5 den 0.4 e değiştirilmiştir.

Kaydedilen değerler grafik haline getirilerek incelenmiştir. Kontrolöre girilen en son katsayı değerlerine göre iki grafik Şekil 4.24 ve Şekil 4.25 de gösterilmiş, diğerleri de Ek_G de verilmiştir. Yapılan incelemelerde sistem cevabının hedef değere oturma zamanının, Şekil 4.24 için 3-4 s (151-201 kayıtları) aralığında; Şekil 4.25 için de 2.7-3 s (135-151 kayıtları) aralığında gerçekleştiği görülmüştür.

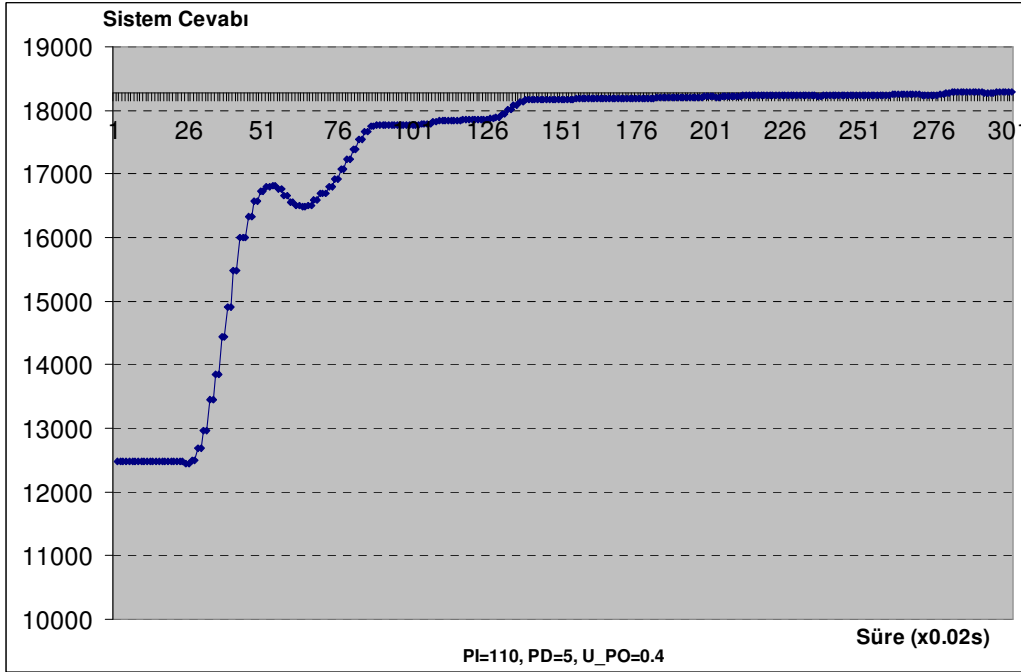
Özellikle endüstride kullanılan otomasyon sistemlerinde kontrolün belirli hedef noktaları arasında yapılması sıkça istenen bir durumdur. Bu yüzden kontrolör belirli bir hedef noktasında çalışırken, kontrolöre yeni bir hedef noktası girilmiş ve sistemin davranışı gözlemlenerek veriler kaydedilmiştir. Yapılan incelemelerde sistem cevabının hedef değere oturma zamanının, Şekil 4.26 de verilen grafik için 1.8-2 s (90-101 kayıtları) aralığında, Şekil 4.27 için de 2-2.5 s (101-126 kayıtları) aralığında gerçekleştiği görülmüştür.

Seçilmiş olan katsayılarla bulanık PID kontrolörü devrede iken aşım sorunu gözlenmemiş, oturma zamanı ise genel olarak 2-2,5 s aralığında gerçekleşmiştir.

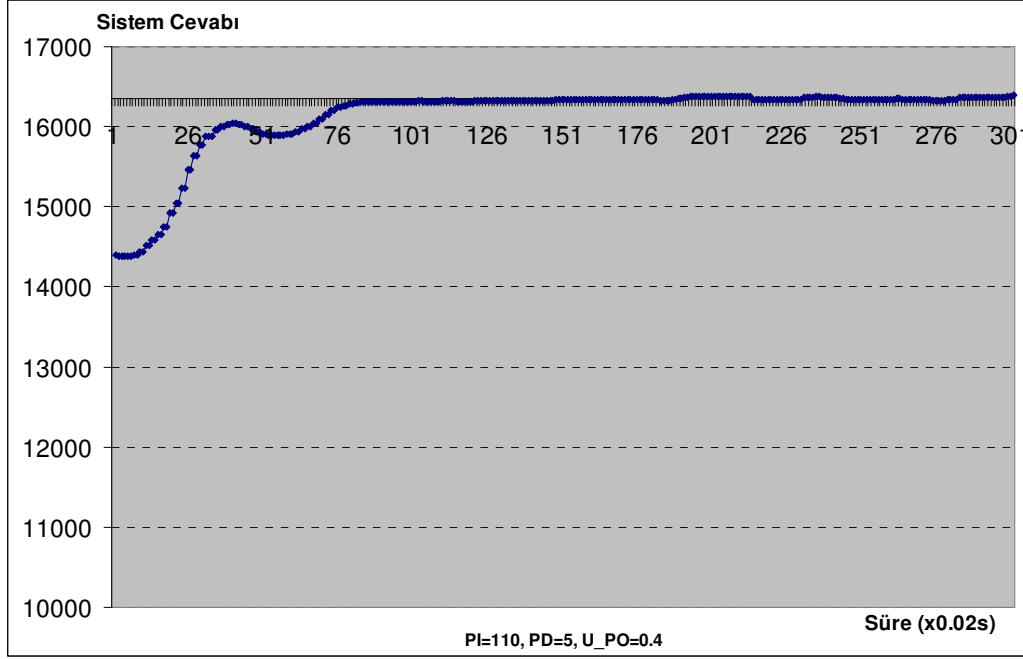
STEP-7 programında yazılan tüm fonksiyon kodları Ek_H de verilmiştir.



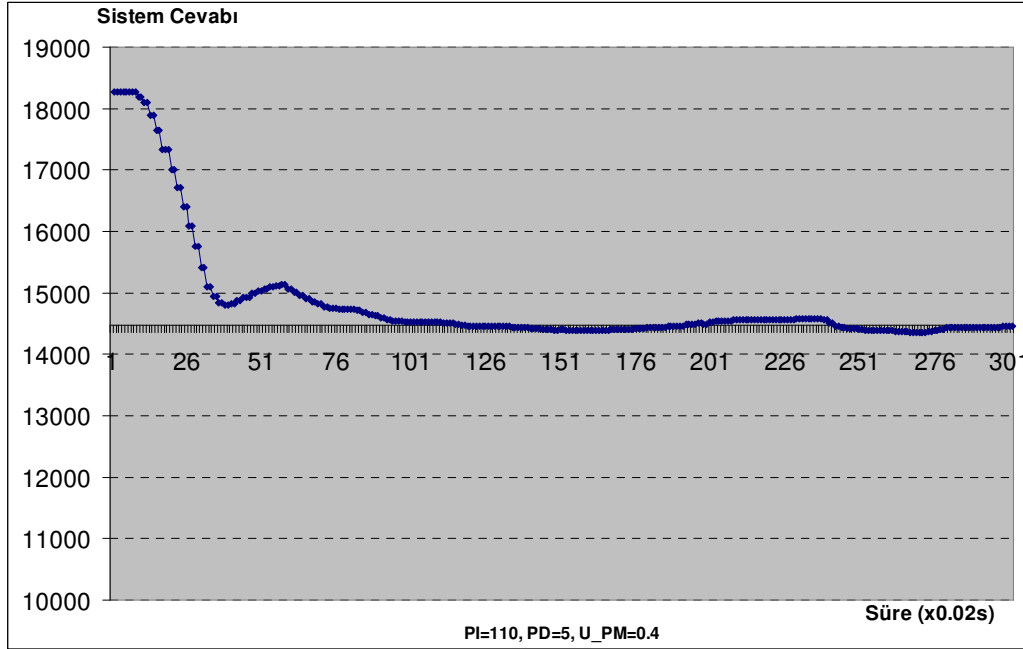
Şekil 4.24 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=14472).



Şekil 4.25 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=18272).



Şekil 4.26 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi = 14472-16350).



Şekil 4.27 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi = 18272-14472).

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ilk olarak , yaklaşık 40 sene önce Prof. L.A. Zadeh tarafından tanıtılan [1] Bulanık Mantık kuramı ve kontrol sistemlerinde uygulanan hali ile bulanık kontrol sistemleri ile ilgili temel önemi bilgiler verilerek kullanım şekilleri gösterilmiştir. Daha sonra, bulanık kontrol sistemleri ile ilgili uygulamalar ve çalışmalar hakkında bahsedilmiştir.

Çalışmanın asıl olan uygulama kısmında ikinci dereceden ölü zamanlı bir sistem üzerinde SIEMENS S7-300 ailesi PLC cihazları ve bunları programlamak için gerekli SIMATIC Manager – STEP-7 paket programı kullanılarak önce klasik PID kontrolörü tasarlanarak uygulanmış, daha sonra da bulanık tip PID kontrolörü tasarlanarak uygulama gerçekleştirilmiştir. Sistem cevapları grafik gösterimler oluşturularak incelenmiştir. Tasarlanan her iki kontrolörde de, mümkün olan her çalışma bölgesi için uygun olacak şekilde katsayılar seçilmeye çalışılmıştır. Bu seçimlerde, özellikle endüstride kullanılan otomatik sistemlerin kontrol hareketlerinde aşım istenmemesi düşüncesi etken olmuştur. Bu şekilde seçilen katsayılar göre tasarlanan bulanık PID tip kontrolörün sistem cevabının hedef değere oturma süresi, tasarlanan klasik PID kontrolörü sistem cevabına göre yaklaşık 2-2,5 sn. daha iyi olduğu görülmüştür.

Bu uygulama çalışmasında tasarlanan her iki kontrolör, klasik yapılar kullanılarak oluşturulmuştur. Buradaki temel düşünce, endüstride otomatik kontrol sistemleri ile ilgili çalışmalarda karşılaşılabilecek herhangi bir kontrol probleminde en düşük maliyette ve hızlı bir şekilde çözüm getirmek olmuştur.

Bu aşamadan sonra, karşılaşılabilecek daha karmaşık sistemlerin kontrolü için bulanık kontrolörlerdeki uyarlamalı kontrol yapıları üzerinde yapılan araştırma, çalışmalar ve tekniklerin incelenerek uygulamalarda hangi şekillerde kullanılabilecekleri, ileride yapılabilecek çalışmalar olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Zadeh, L.A.**, 1965. Fuzzy Sets, *Information and Control*, **8**, 338-353.
- [2] **Chen, G. and Pham, T.T.** 2001. Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy control systems, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [3] **Mamdani, E.H.**, 1974. Application of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant, *Proceedings of IEE*, **121**, 1585-1588.
- [4] **Kickert, W.J.M. and Van Nauta Lemke, H.R.**, 1976. Application of a fuzzy controller in a warm water plant, *Automatica*, **12**, 301-308.
- [5] **Holmblad, L.P. and Ostergaard, J.J.**, 1982. Control of a cement kiln by fuzzy logic, In Gupta, M.M and Sanchez, E. Editors, *Fuzzy Information and Decision Processes*, North Holland, Amsterdam.
- [6] **Jantzen, J.**, 1998. Design of fuzzy controllers, Tech. report no 98-E 864 (design), Technical University of Denmark, Department of Automation, Lyngby, Denmark.
- [7] **Reznik, L.**, 1997. Fuzzy Controllers, Newnes, Melbourne, Australia.
- [8] **Mann, G.K.I.**, 1999. Systematic analysis and design of fuzzy logic controllers for proses control, *PhD Thesis*, Memorial University of Newfoundland, Canada.
- [9] **Mamdani, E.H. and Assilian, S.**, 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *Int. J. Man-Machine Studies*, **7**, 1-13.
- [10] **De Silva, C.W.**, 1995. Intelligent Control: Fuzzy logic applications, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.
- [11] **Áström, K.J. and Wittenmark, B.**, 1995, Adaptive Control, Addison-Wesley, 2nd ed., USA.
- [12] **Procyk, T.Z. and Mamdani, E.H.**, 1979. A linguistic self-organizing process controller, *Automatica*, **15**, 15-30.

- [13] **Driankov, D., Hellendoorn, H. and Reinfrank, M.**, 1996. An Introduction to Fuzzy Control, Springer-Verlag, New York.
- [14] **Mann, G.K.I., Hu, B.G and Gosine R.G.**, 1999. Analysis of Direct Action Fuzzy PID Controller Structures, *IEEE Trans. on Man and Cybernetics, Part B* , **29**, 371-388.
- [15] **Kurtulan, S.**, 2001. PLC ile endüstriyel otomasyon, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [16] **Berger, H.**, 2005. Automating with STEP 7 in STL and SCL: Programmable Controllers SIMATIC S7-300/400, Wiley-VCH, Germany.
- [17] **Berger, H.**, 2005. Automating with STEP 7 in LAD and FBD: Programmable Controllers SIMATIC S7-300/400, Wiley-VCH.
- [18] **Levine, W.S.**, 2000. Control System Fundamentals, CRC Press.
- [19] **Kuo, B.C.**, 1999. Otomatik Kontrol Sstemleri : çev. Atilla Bir, Literatür Yay., İstanbul.
- [20] **Tzafestas, S.G.**, 1985. Applied Digital Control, Hardbound, North Holland.
- [21] **Berger, H.**, 2006. Automating with SIMATIC: Controllers, Software, Programming, Data Communication, Operator Control and Process Monitoring, Wiley-VCH.
- [22] **The Math Works.**, 1998. Fuzzy Logic oolbox for use with Matlab User's Guide.

EKLER

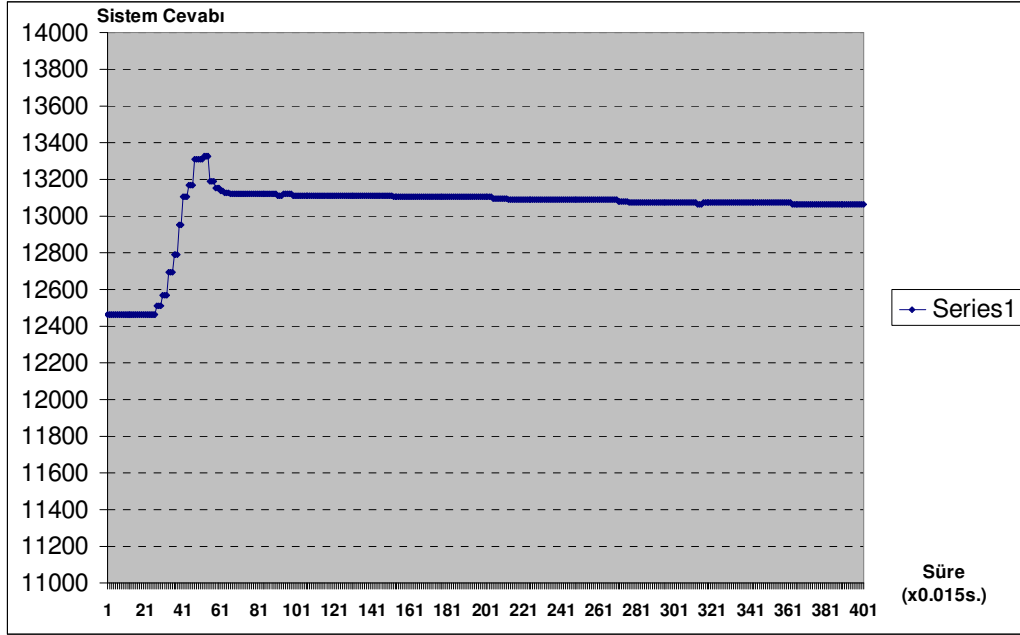
EK_A : İKİNCİ DERECEDEDEN ÖLÜ ZAMANLI SİSTEME AİT KATSAYI TABLOSU

Tablo A.1: ζ ve S_R Oranına Bağlı Olarak PID Katsayıları.

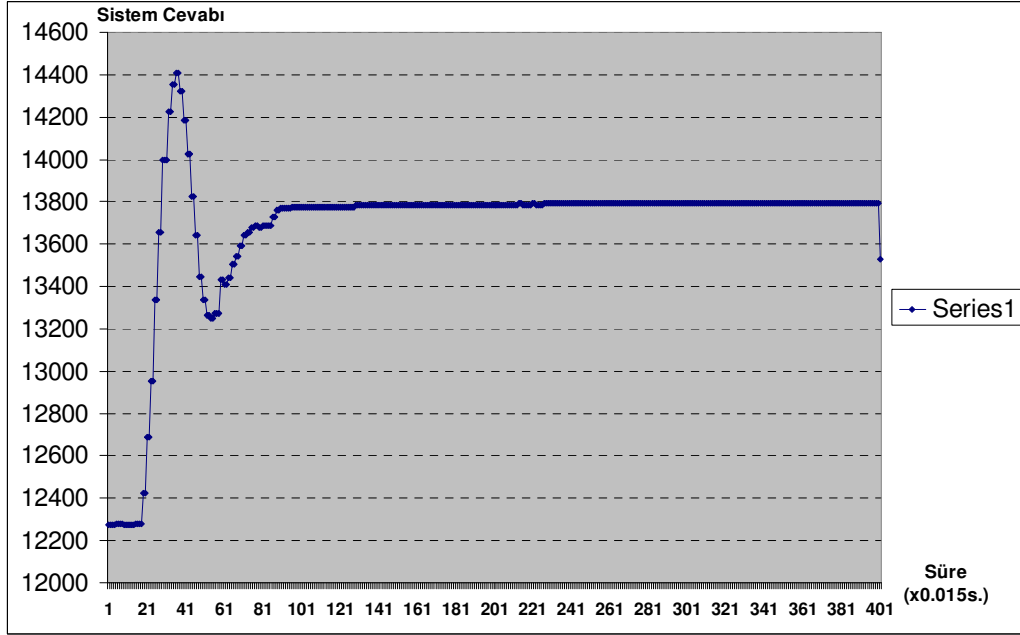
ζ	S_R	A	θ	b	b_0	K_z/K	Td/T	T_I/T	a_I	KK_C
0.1	5	0.8819	1.2503	0.1005	0.9154	0.6381	3.4998	0.1818	0.2846	0.18414
0.1	10	0.9391	0.6252	0.1005	0.9584	0.1833	7.4682	0.3290	0.5335	0.25293
0.1	15	0.9590	0.4168	0.1005	0.9723	0.0841	11.4436	0.4845	0.6578	0.28368
0.1	20	0.9691	0.3126	0.1005	0.9792	0.0479	15.4207	0.6419	0.7304	0.30107
0.1	40	0.9844	0.1563	0.1005	0.9896	0.0122	31.3336	1.2759	0.8546	0.33017
0.1	80	0.9922	0.0781	0.1005	0.9948	0.0031	63.1633	2.5478	0.9245	0.34625
0.3	5	0.6859	1.1988	0.3145	0.7679	0.5497	0.8885	0.5449	0.2846	0.32738
0.3	10	0.8282	0.5994	0.3145	0.8806	0.1692	2.1839	0.9869	0.5335	0.54471
0.3	15	0.8819	0.3996	0.3145	0.9192	0.0797	3.4998	1.4535	0.6578	0.64586
0.3	20	0.9101	0.2997	0.3145	0.9389	0.0460	4.8209	1.9256	0.7304	0.70363
0.3	40	0.9540	0.1498	0.3145	0.9690	0.0119	10.1182	3.8276	0.8546	0.80087
0.3	80	0.9767	0.0749	0.3145	0.9844	0.0030	20.7246	7.6434	0.9245	0.85487
0.5	5	0.5335	1.0883	0.5774	0.6462	0.4796	0.3978	0.9061	0.2846	0.35234
0.5	10	0.7304	0.5441	0.5774	0.8093	0.1568	1.1436	1.6446	0.5335	0.66666
0.5	15	0.8110	0.3628	0.5774	0.8691	0.0756	1.9221	2.4224	0.6578	0.82520
0.5	20	0.8546	0.2721	0.5774	0.9003	0.0442	2.7092	3.2094	0.7304	0.91834
0.5	40	0.9245	0.1360	0.5774	0.9490	0.0117	5.8793	6.3793	0.8546	1.07863
0.5	80	0.9615	0.0680	0.5774	0.9742	0.0030	12.2390	12.7390	0.9245	1.16933
0.7	5	0.4149	0.8974	0.9802	0.5465	0.4233	0.2080	1.2646	0.2846	0.31482
0.7	10	0.6442	0.4487	0.9802	0.7442	0.1457	0.7092	2.3020	0.5335	0.66017
0.7	15	0.7459	0.2991	0.9802	0.8219	0.0718	1.2538	3.3913	0.6578	0.84911
0.7	20	0.8026	0.2244	0.9802	0.8634	0.0425	1.8102	4.4931	0.7304	0.96378
0.7	40	0.8959	0.1122	0.9802	0.9293	0.0115	4.0656	8.9310	0.8546	1.16665
0.7	80	0.9465	0.0561	0.9802	0.9640	0.0030	8.6037	17.8345	0.9245	1.28417

0.9	5	0.3227	0.5478	2.0647	0.4653	0.3775	0.1163	1.6196	0.2846	0.20567
0.9	10	0.5681	0.2739	2.0647	0.6850	0.1358	0.4765	2.9589	0.5335	0.47756
0.9	15	0.6859	0.1826	2.0647	0.7774	0.0683	0.8885	4.3600	0.6578	0.64076
0.9	20	0.7537	0.1369	2.0647	0.8281	0.0409	1.3153	5.7767	0.7304	0.74395
0.9	40	0.8682	0.0685	2.0647	0.9100	0.0112	3.0603	11.4827	0.8546	0.93333
0.9	80	0.9318	0.0342	2.0647	0.9540	0.0029	6.5853	22.9301	0.9245	1.04666

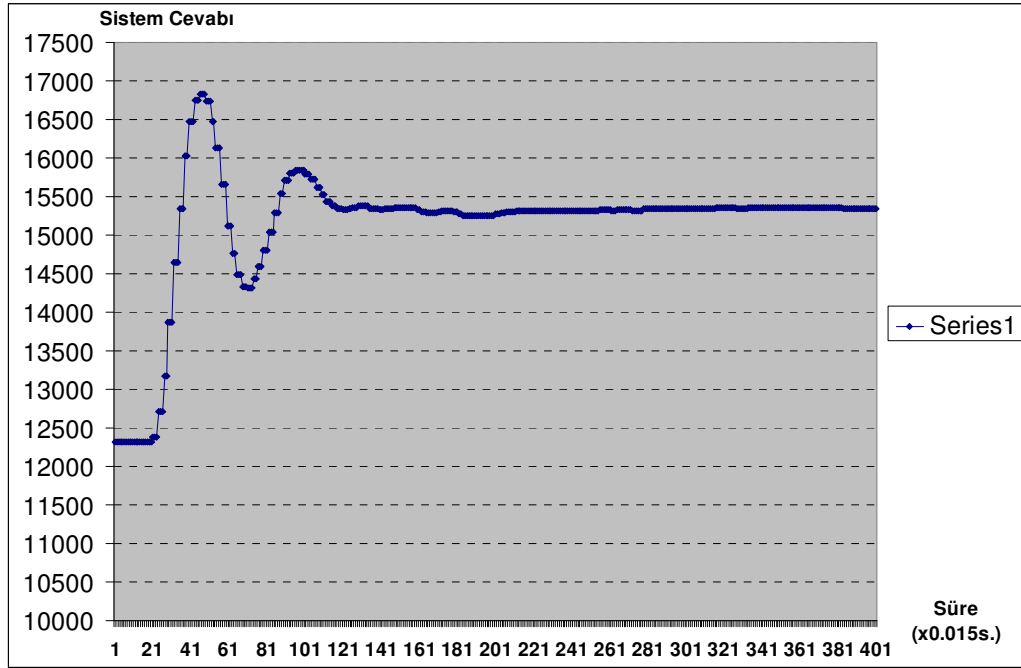
EK_B : ÇEŞİTLİ BASAMAK GİRİŞLERİ VE SİSTEM DAVRANIŞI



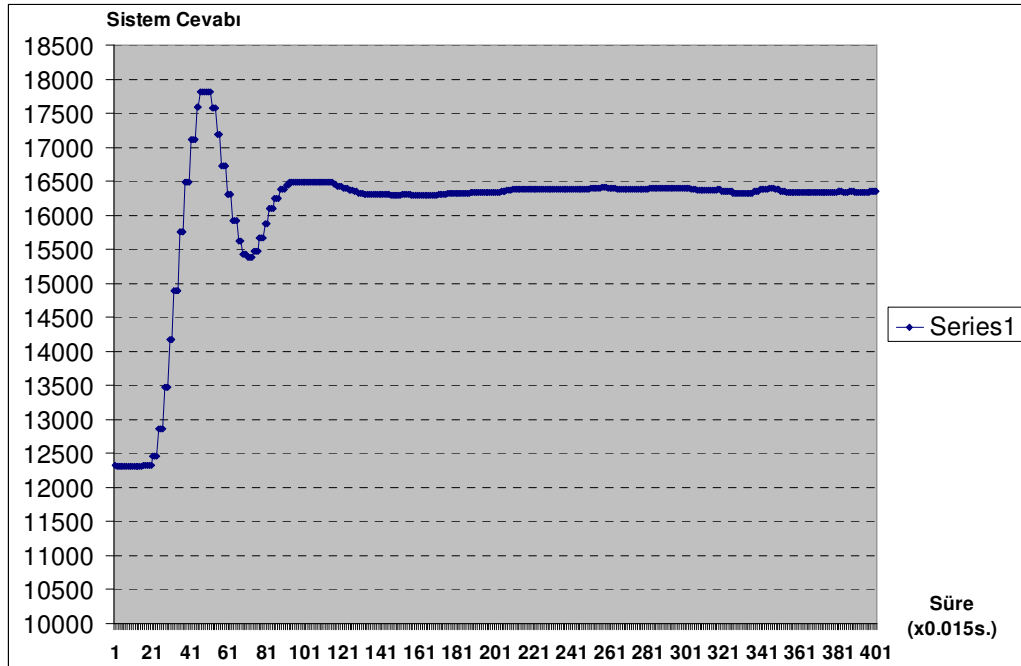
Şekil B.1 : Sistemin 8000 Giriş Değerine Cevabı.



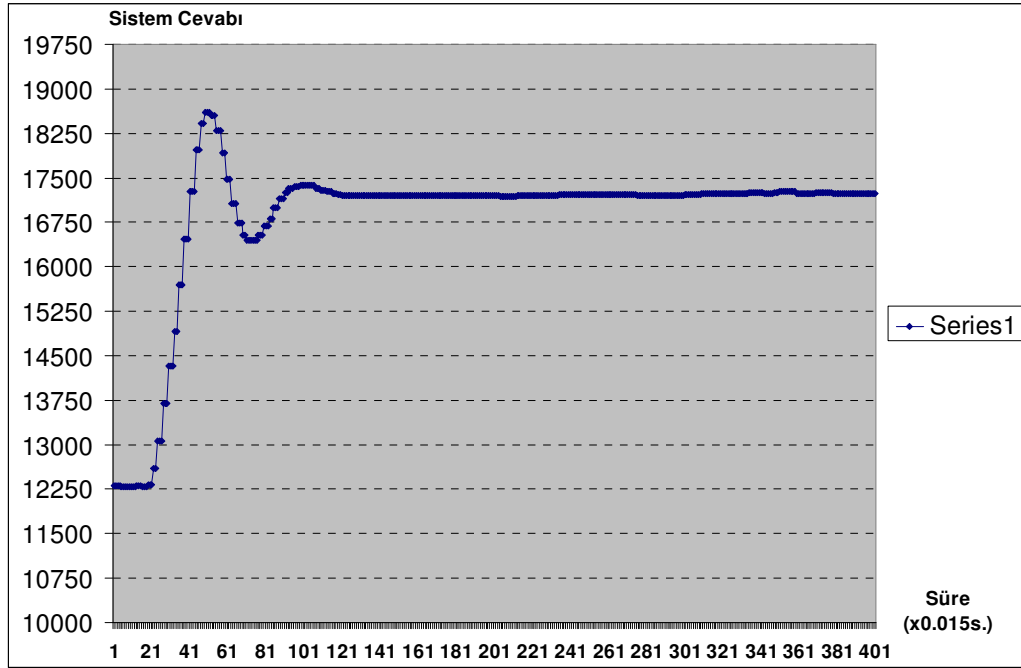
Şekil B.2 : Sistemin 11000 Giriş Değerine Cevabı.



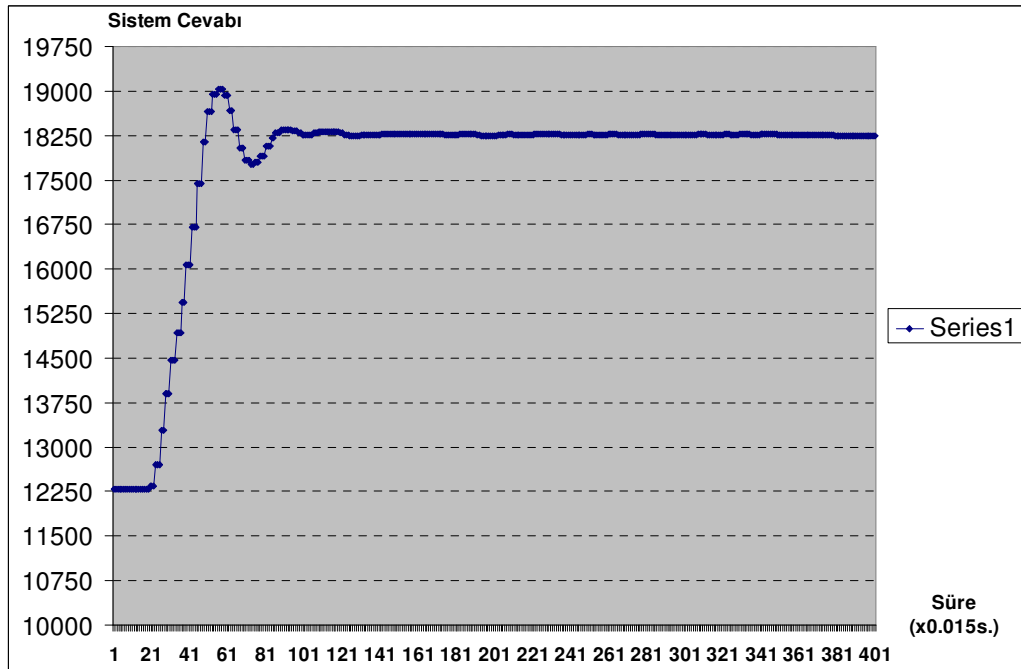
Şekil B.3 : Sistemin 17000 Giriş Değerine Cevabı.



Şekil B.4 : Sistemin 20000 Giriş Değerine Cevabı.

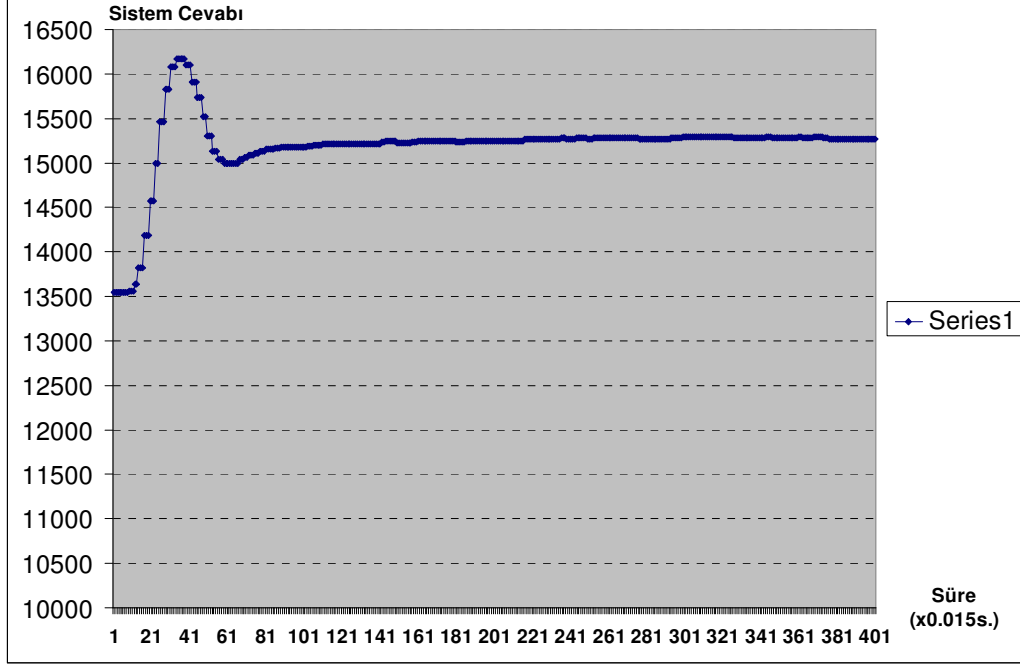


Şekil B.5 : Sistemin 23000 Giriş Değerine Cevabı.

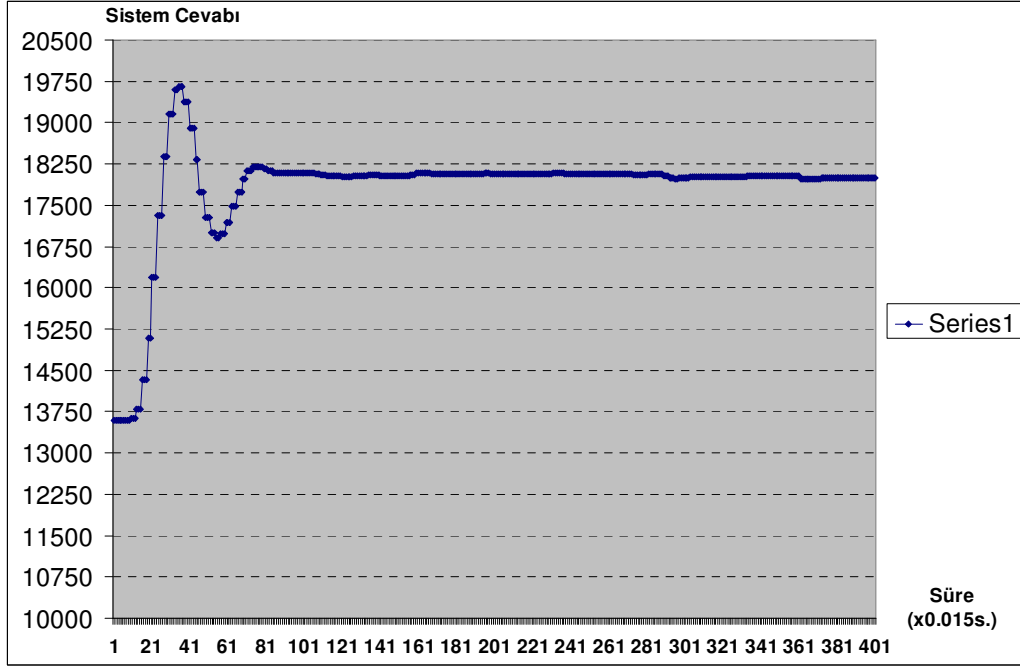


Şekil B.6 : Sistemin 27500 Giriş Değerine Cevabı.

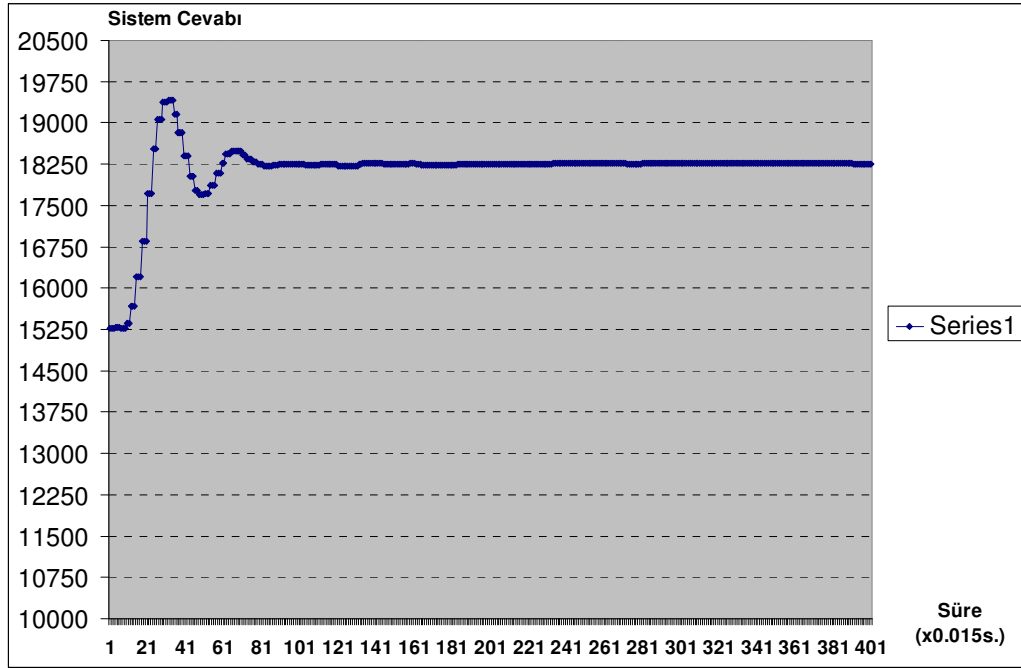
EK_C : İKİ BASAMAK GİRİŞİ GEÇİŞİNDE SİSTEM DAVRANIŞI



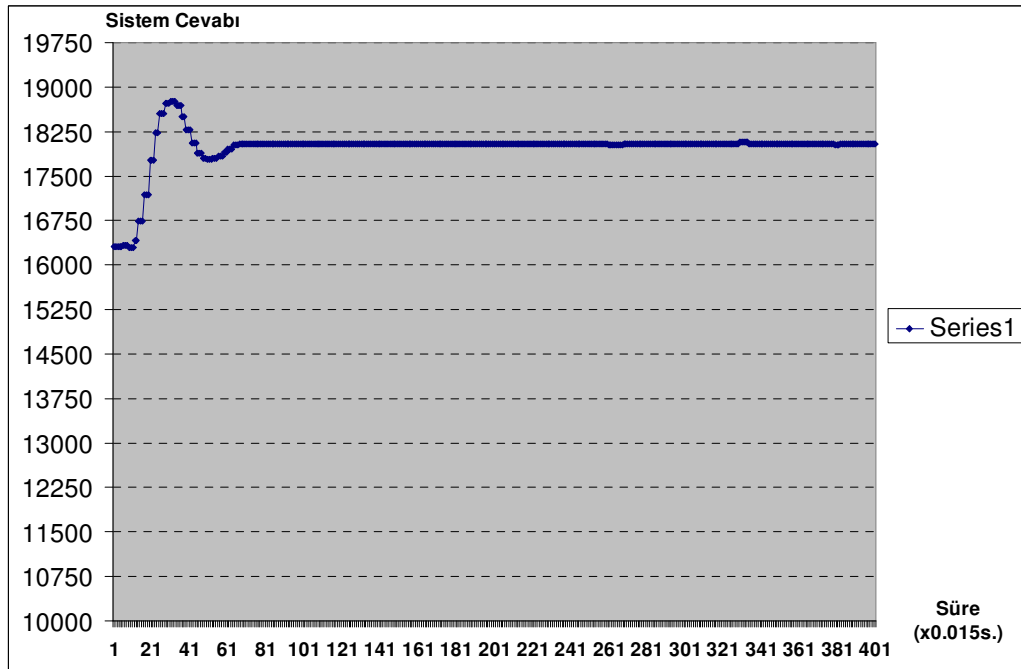
Şekil C.1 : 11000 den 17000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.



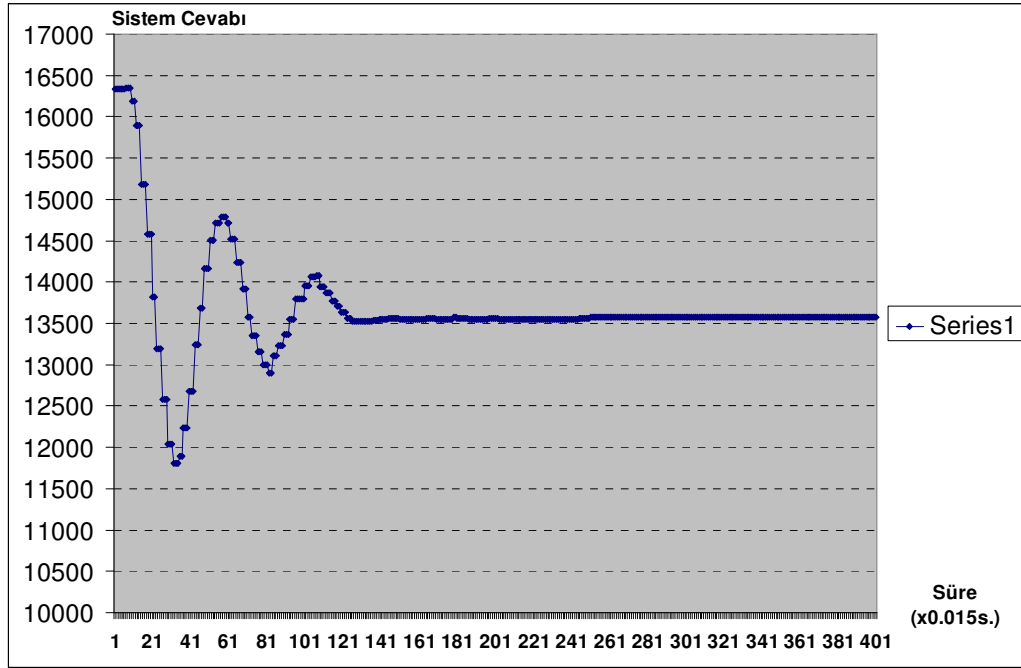
Şekil C.2 : 11000 den 26000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.



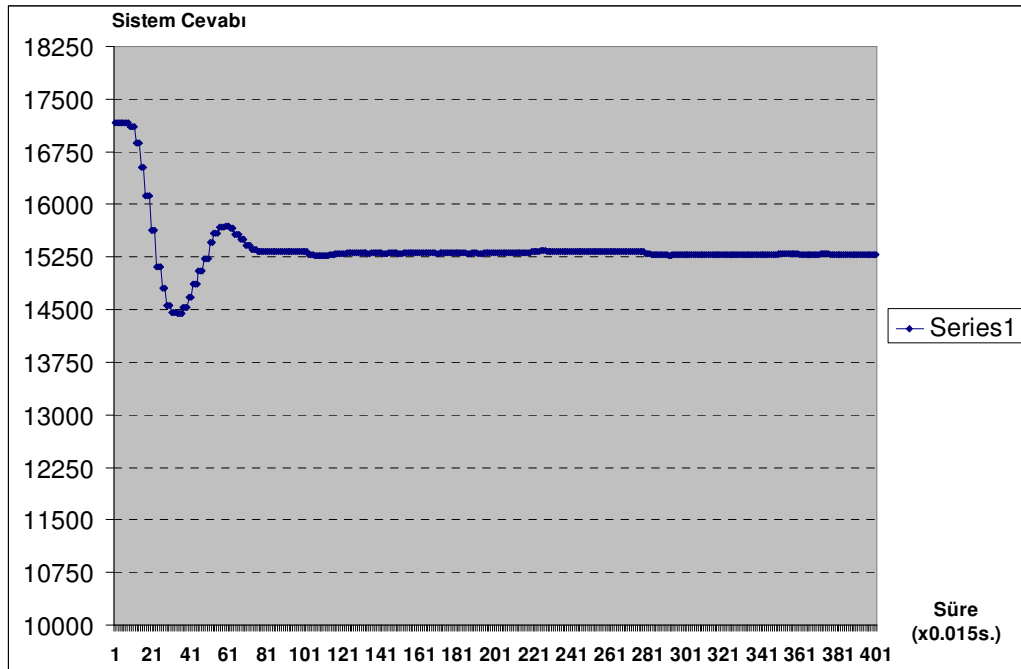
Şekil C.3 : 17000 den 27000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.



Şekil C.4 : 20000 den 26000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.



Şekil C.5 : 20000 den 11000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.



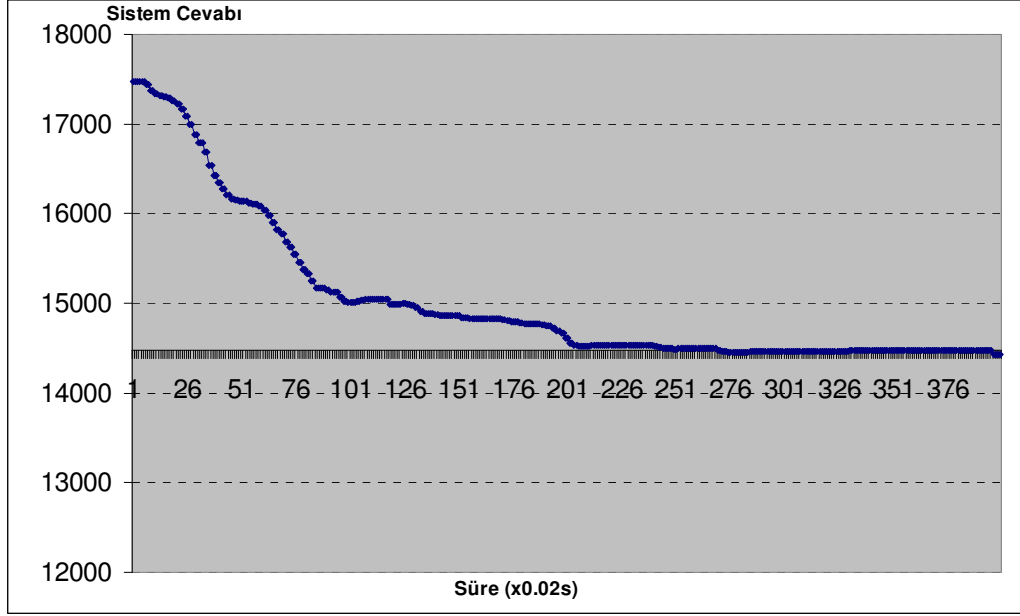
Şekil C.6 : 23000 den 17000 Giriş Değerine Geçişte Sistemin Cevabı.

EK_D : SİSTEM CEVAPLARINA GÖRE HESAPLANAN PARAMETRELER

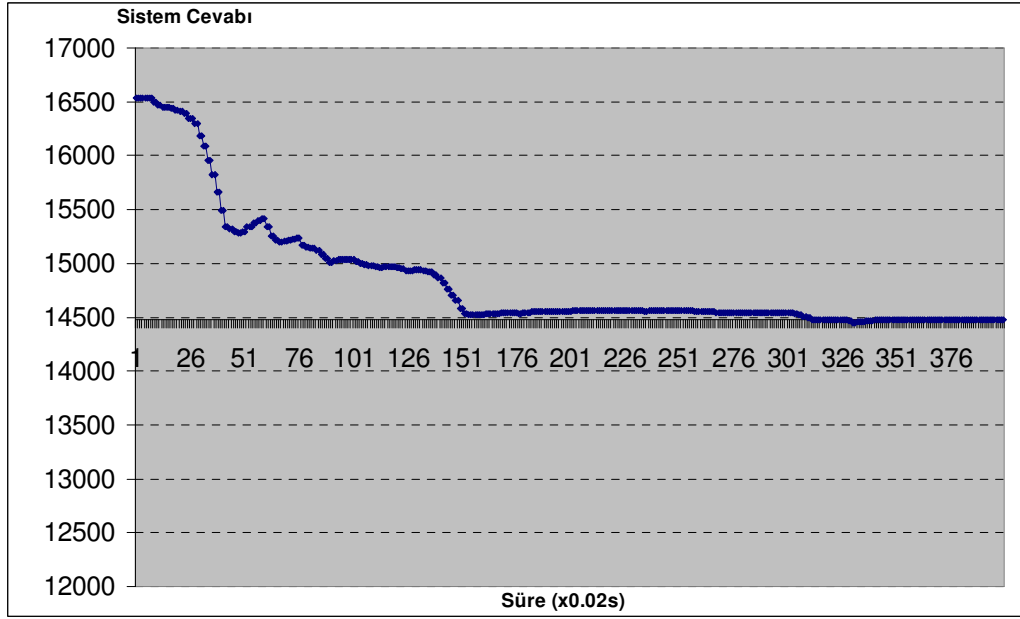
Tablo D.1: Sistem Giriş-Çıkış Değerleri ve Hesaplanan Parametreler.

Değer. / Sis.Giriş.	Proses Değ.	Kazanç	Tp	Aşım	Zeta - ζ	wn	w	teta-θ	a	b	T_d	T_l	a1	b0	K*	Kz	Kc
8000	13072	0,076	0,39	0,42105	0,26546	8,35515	8,05538	0,16111	0,95661	0,27534	0,21558	0,06369	0,84611	0,97084	0,00093	0,00103	0,07679
11000	13520	0,13745	0,27	0,4127	0,27116	12,0885	11,6356	0,23271	0,93654	0,28172	0,14275	0,04508	0,78524	0,95716	0,00125	0,00383	0,04002
14000	14472	0,15257	0,345	0,56180	0,18053	9,2582	9,10609	0,18212	0,96713	0,18354	0,28927	0,03911	0,83097	0,97794	0,00333	0,00255	0,08454
17000	15344	0,17835	0,39	0,48813	0,22256	8,26262	8,05538	0,16111	0,96389	0,22829	0,26202	0,05399	0,84768	0,97576	0,0026	0,00237	0,07772
20000	16344	0,2016	0,39	0,36310	0,30691	8,46387	8,05538	0,16111	0,94937	0,32248	0,18265	0,0727	0,84427	0,96593	0,00246	0,00278	0,08717
23000	17200	0,21287	0,42	0,28758	0,36874	8,04705	7,48	0,1496	0,94238	0,39669	0,1587	0,09184	0,85134	0,96118	0,00238	0,00265	0,10061
26000	18040	0,21292	0,51	0,16185	0,5015	7,12011	6,16	0,1232	0,93108	0,57967	0,13026	0,14111	0,86727	0,95348	0,00366	0,00206	0,23718
27500	18272	0,2176	0,555	0,12567	0,55096	6,78291	5,66054	0,11321	0,92798	0,66021	0,12404	0,16271	0,87314	0,95137	0,00403	0,00190	0,29376
14-17		0,304	0,345	0,54386	0,19033	9,27564	9,10609	0,18212	0,96531	0,19387	0,27334	0,04116	0,83068	0,97671	0,01217	0,00510	0,16289
14-20		0,33333	0,345	0,44	0,25283	9,41188	9,10609	0,18212	0,95352	0,26133	0,20027	0,05389	0,82842	0,96874	0,00997	0,00571	0,15872
14-23		0,31289	0,345	0,50852	0,21044	9,31466	9,10609	0,18212	0,96156	0,21526	0,24522	0,04531	0,83003	0,97418	0,01214	0,00528	0,17351
23-14		0,31556	0,36	0,5831	0,16922	8,85436	8,72667	0,17453	0,97048	0,1717	0,32380	0,03832	0,83771	0,9802	0,01519	0,00484	0,18269
13,8-20,7		0,31019	0,36	0,52612	0,20028	8,90715	8,72667	0,17453	0,96495	0,20443	0,27039	0,04509	0,83682	0,97647	0,01515	0,00479	0,2177
20,7-13,8		0,3206	0,34	0,53069	0,1977	9,42604	9,24	0,1848	0,96342	0,20168	0,25844	0,04207	0,82818	0,97543	0,02108	0,00554	0,27326
11_17		0,288	0,345	0,51389	0,20731	9,30831	9,10609	0,18212	0,96214	0,21191	0,24924	0,04467	0,83014	0,97457	0,01008	0,00485	0,15437
11_26		0,29813	0,345	0,35242	0,31507	9,59477	9,10609	0,18212	0,94133	0,33198	0,15560	0,06588	0,82539	0,96045	0,00807	0,00526	0,17477
17-27		0,2992	0,33	0,38235	0,29263	9,95581	9,52	0,1904	0,9434	0,30603	0,16182	0,05898	0,81945	0,96185	0,01134	0,00569	0,21928
20-26		0,288	0,315	0,41204	0,27162	10,3629	9,97333	0,19947	0,94526	0,28223	0,16782	0,05261	0,81281	0,96312	0,01078	0,00594	0,19334
23-17		0,30933	0,345	0,46552	0,23648	9,3719	9,10609	0,18212	0,95664	0,24338	0,21575	0,05061	0,82908	0,97085	0,01002	0,00526	0,16149
26-14		0,30467	0,36	0,61472	0,15306	8,83072	8,72667	0,17453	0,97333	0,15489	0,36001	0,03476	0,8381	0,98212	0,01275	0,00466	0,14411

EK_E : KLASİK PID İLE KONTROL EDİLEN SİSTEMİN DAVRANIŞI

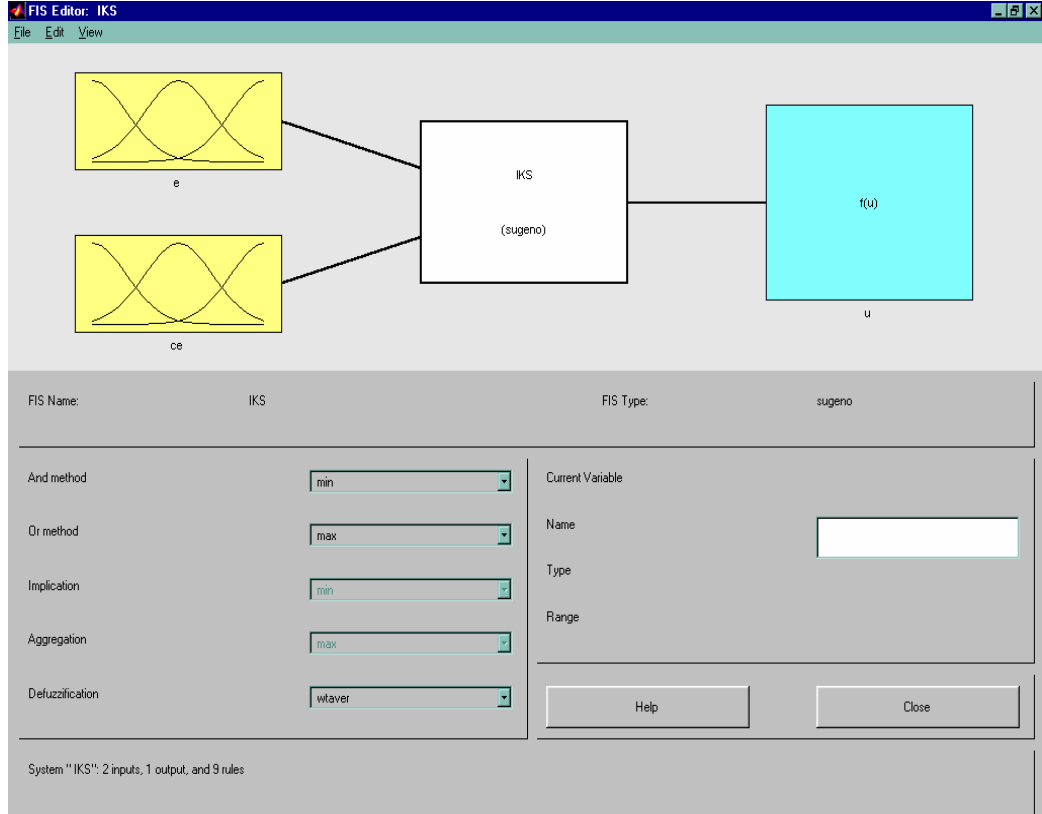


Şekil E.1 : PID Kontrolör ile Sistem Davranışı (Hedef Değer: 15344).

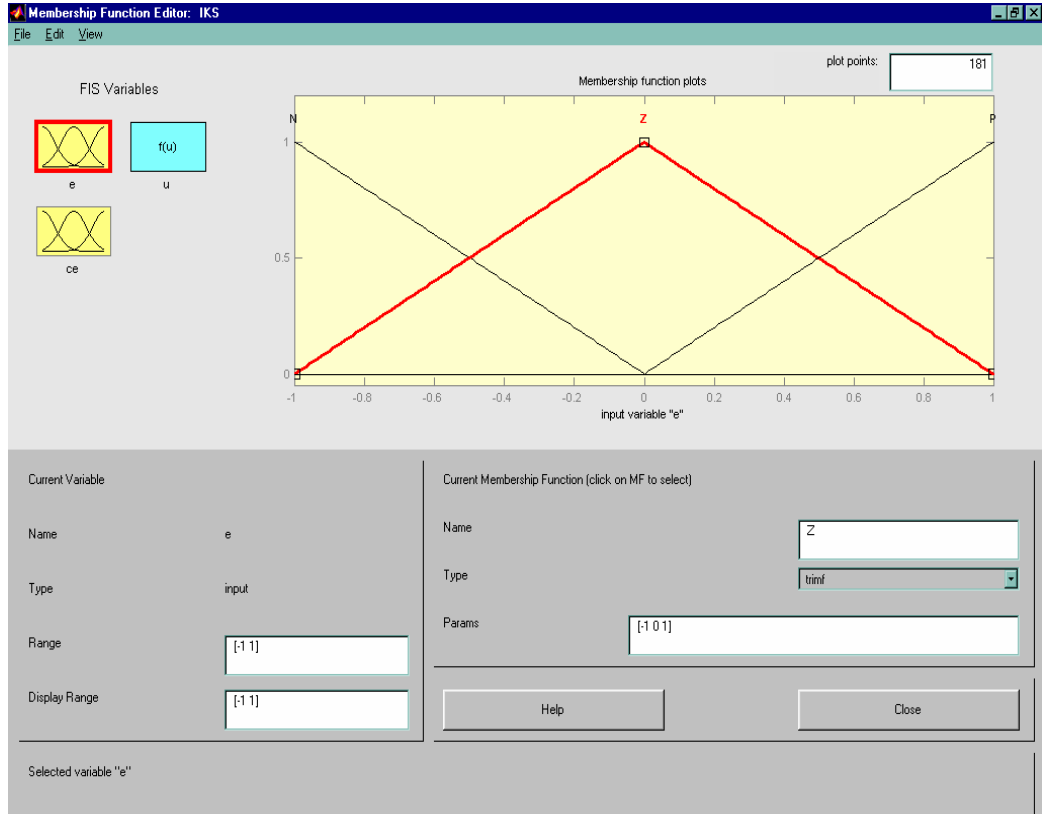


Şekil E.2 : PID Kontrolör ile Sistem Davranışı (Hedef Değer Geçişi: 16500-14472).

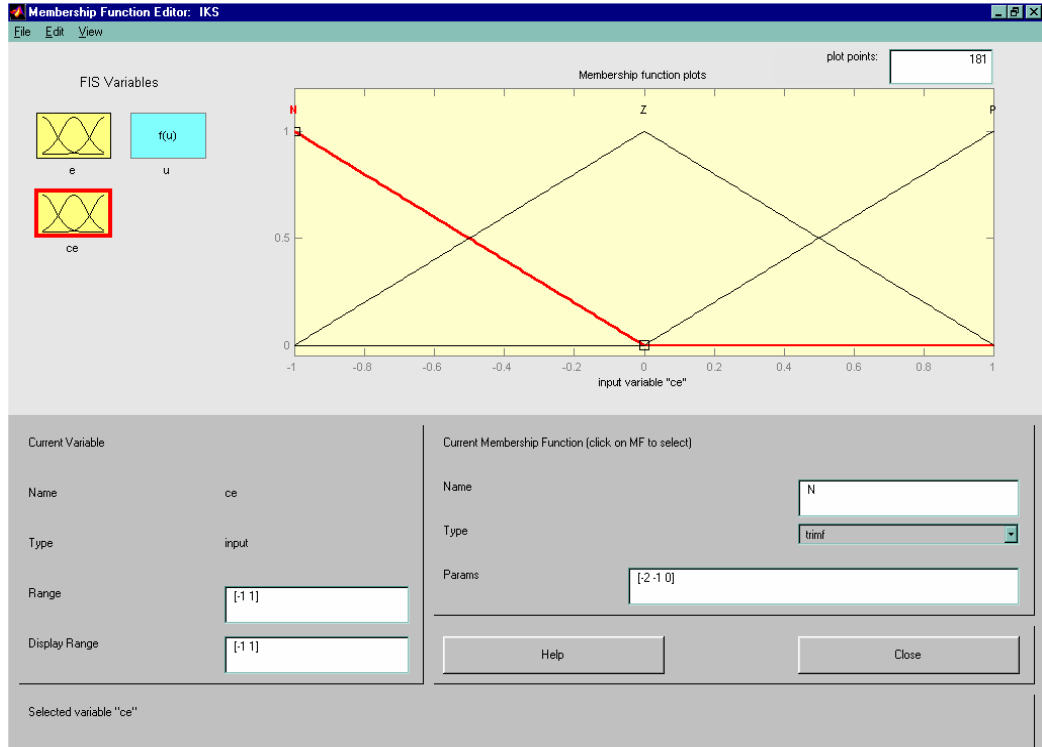
EK_F : MATLAB ANFİS EDİTÖRÜNDE MODELLENEN BULANIK KONTROLÖR ŞEMALARI



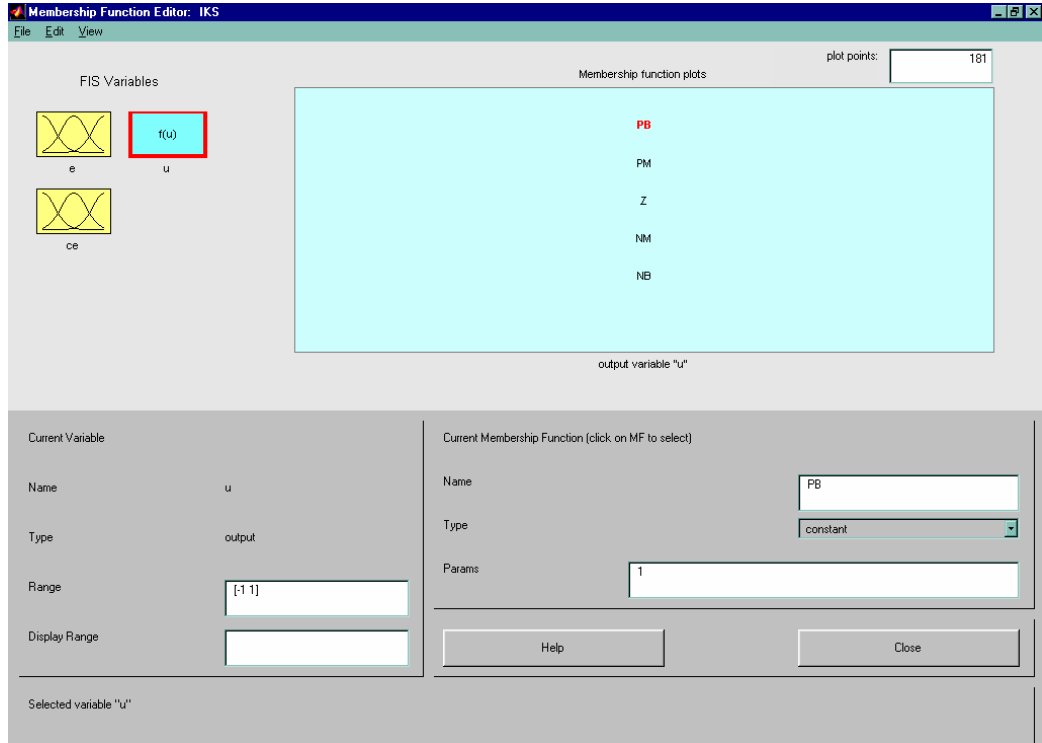
Şekil F.1 : ANFİS Editörü Modülünde Giriş-Çıkış İşaretlerinin Tanımlanması.



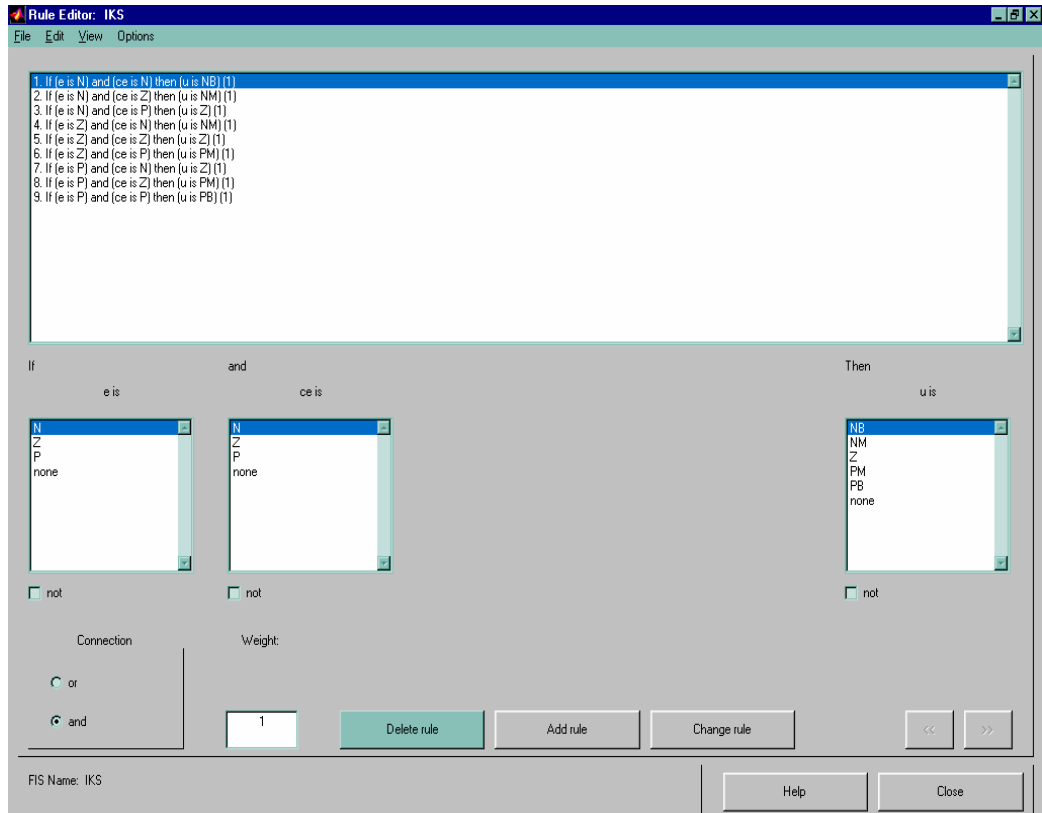
Şekil F.2 : ANFIS Editörü Modülünde Hata (E) Girişi Üyelik Fonksiyonlarının Tanımlanması.



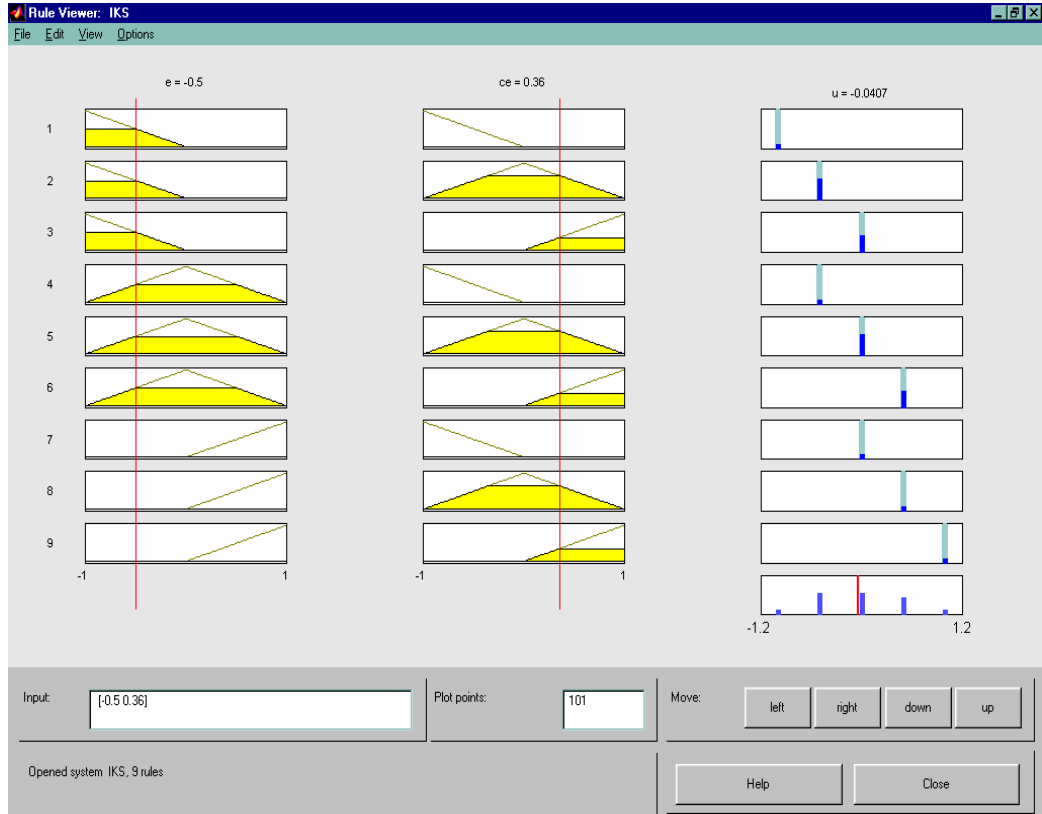
Şekil F.3 : ANFIS Editörü Modülünde Hata Değişimi (Ce) Girişi Üyelik Fonksiyonlarının Tanımlanması.



Şekil F.4 : ANFIS Editörü Modülünde Kontrol Çıkış İşareti (U) Üyelik Fonksiyonlarının Tanımlanması.

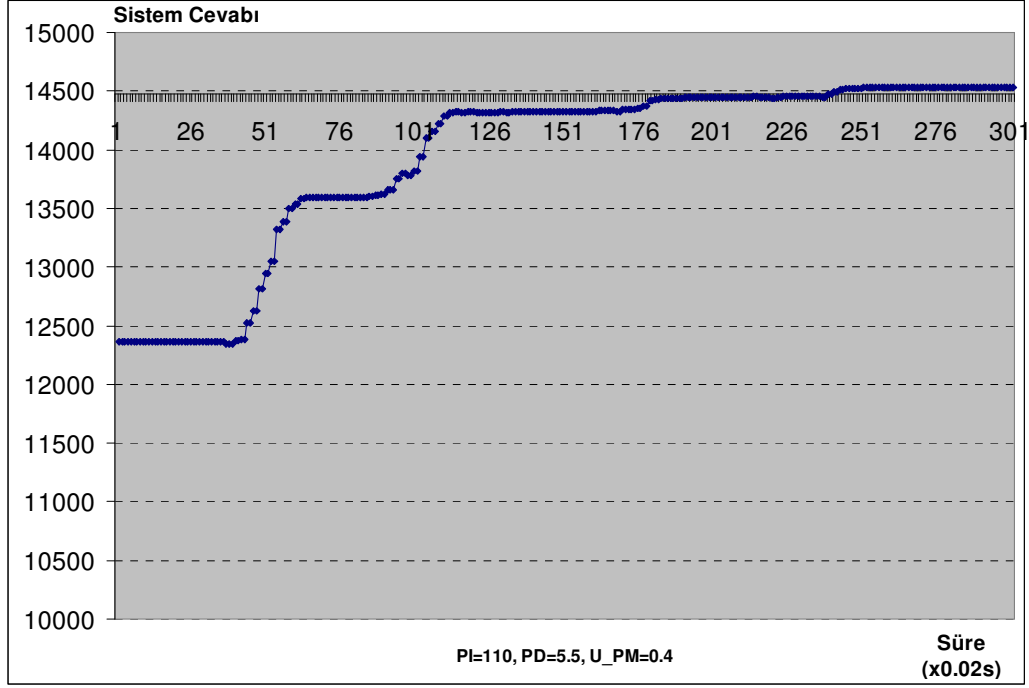


Şekil F.5 : ANFIS Editörü Modülünde Kuralların Oluşturulması

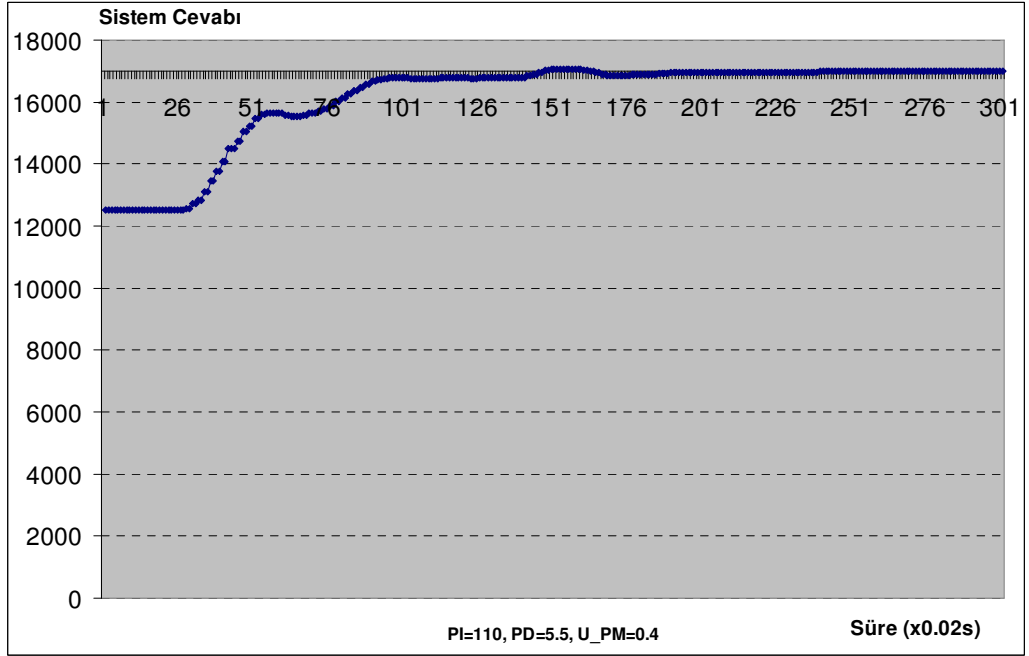


Şekil F.6 : ANFIS Editörü Modülünde Çıkarım ve Durulama İşlemleri.

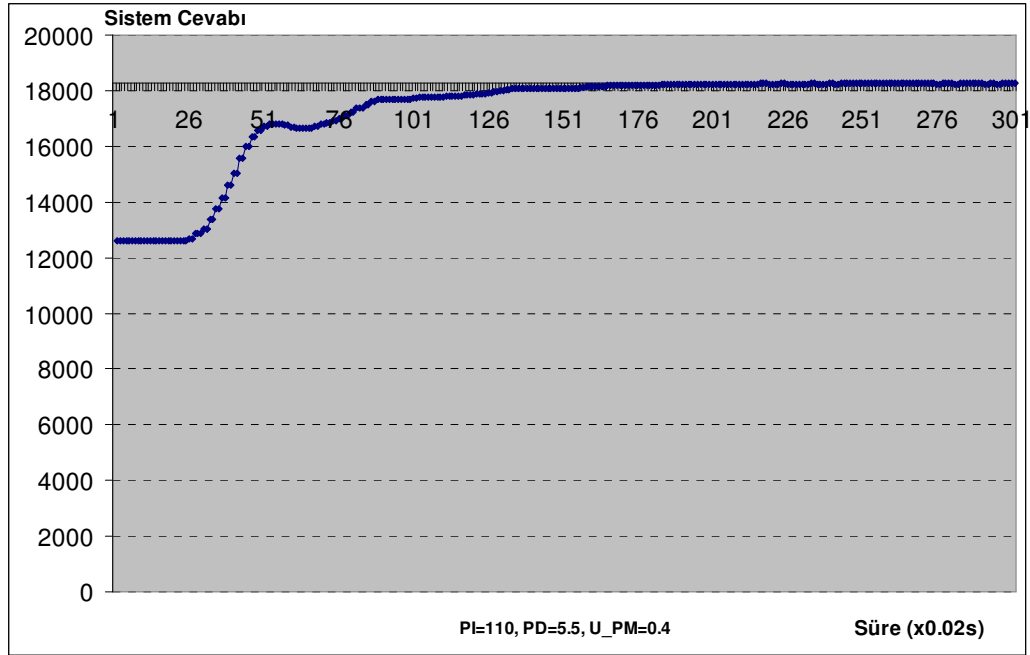
EK_G : BULANIK PID İLE KONTROL EDİLEN SİSTEMİN DAVRANIŞI



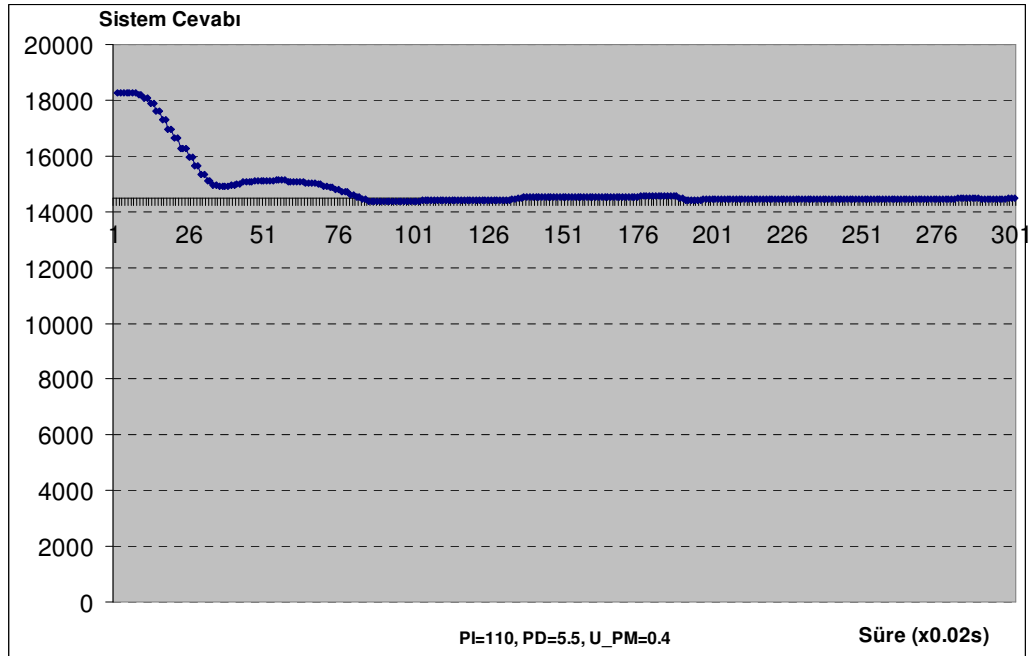
Şekil G.1 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=14472, Katsayılar: PI=110, PD=5.5, U_PM=0.4).



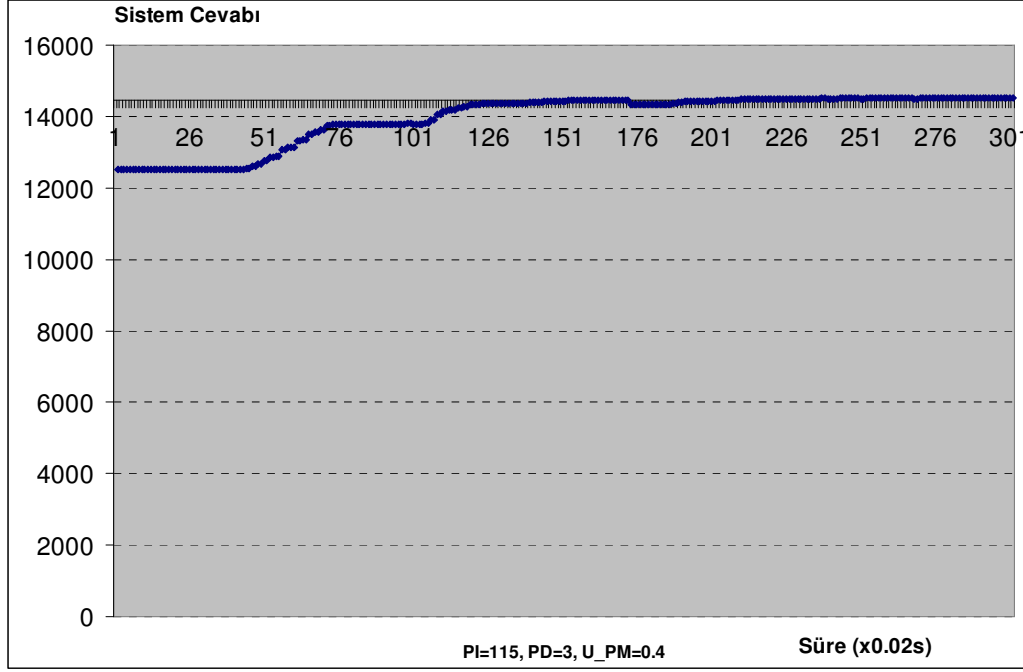
Şekil G.2 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=17000, Katsayılar: PI=110, PD=5.5, U_PM=0.4).



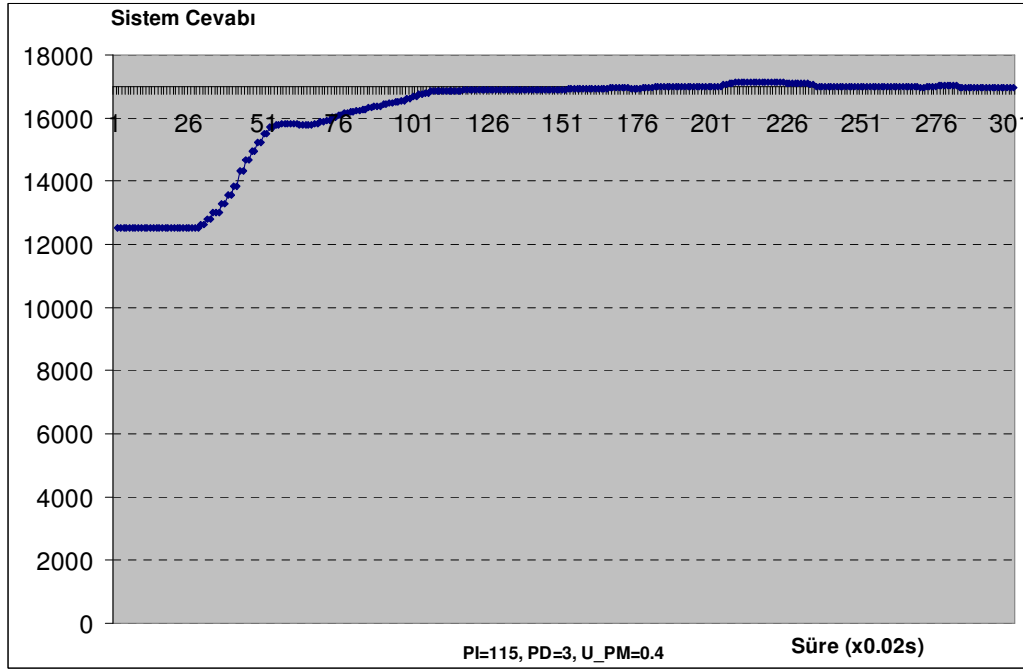
Şekil G.3 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=18272, Katsayılar: PI=110, PD=5.5, U_PM=0.4).



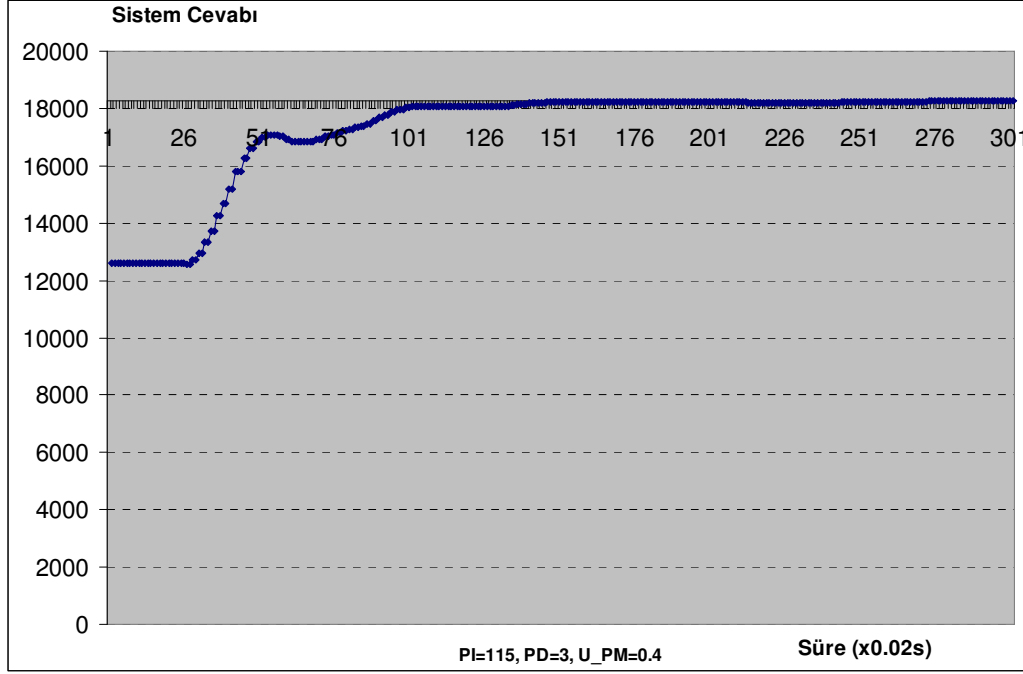
Şekil G.4 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi = 18272-14772, Katsayılar: PI=110, PD=5.5, U_PM=0.4).



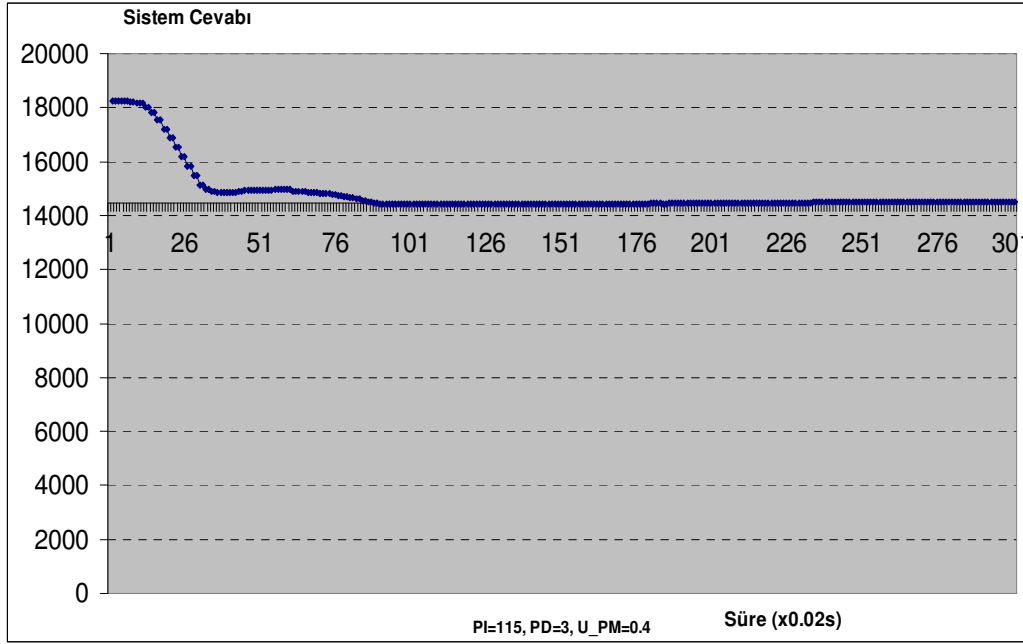
Şekil G.5 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=14472, Katsayılar: PI=115, PD=3, U_PM=0.4).



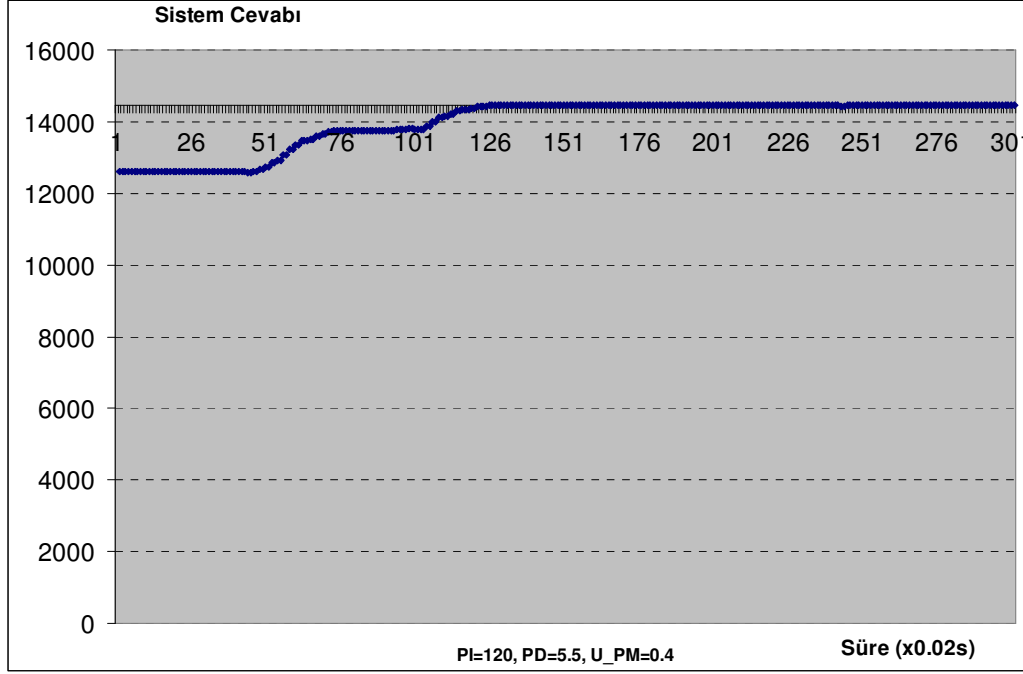
Şekil G.6 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=17000, Katsayılar: PI=115, PD=3, U_PM=0.4).



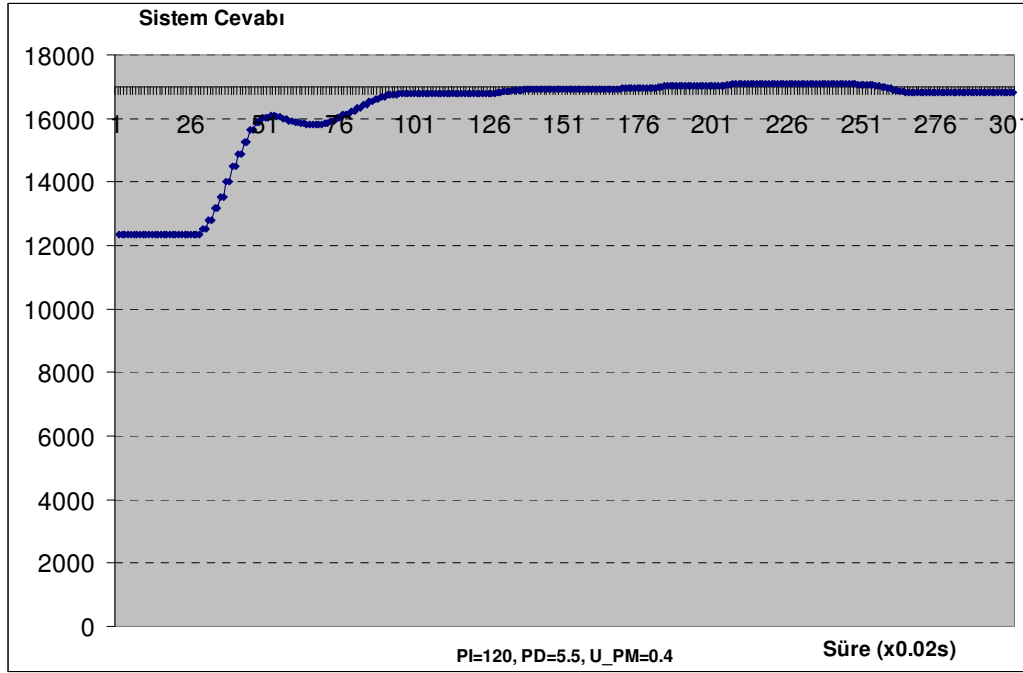
Şekil G.7 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=18272, Katsayılar: PI=115, PD=3, U_PM=0.4).



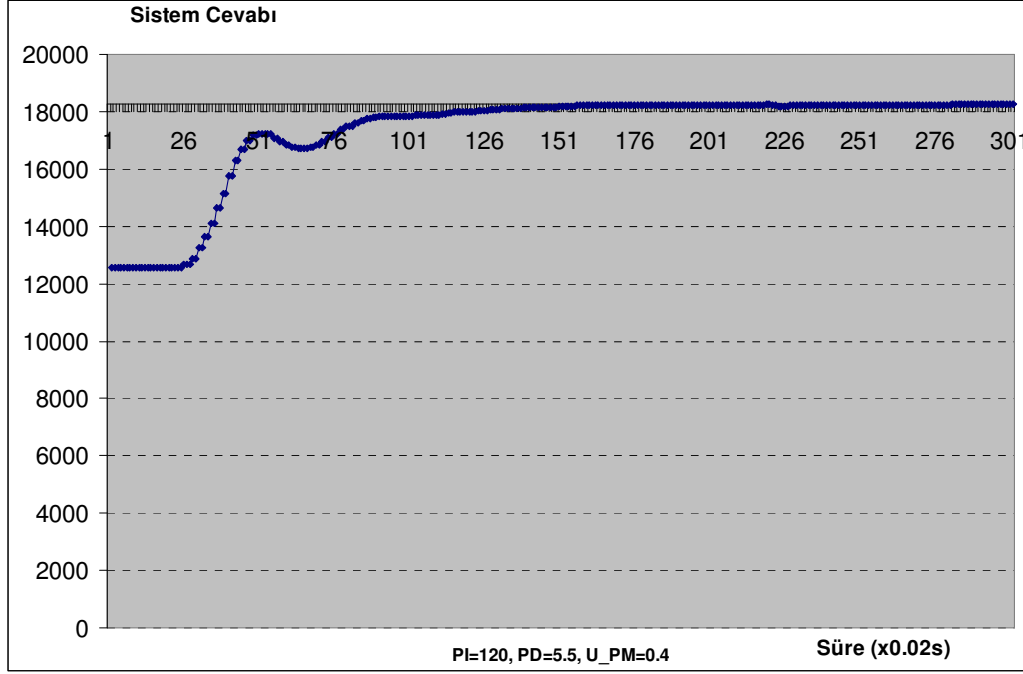
Şekil G.8 : : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçiş = 18272-14772, Katsayılar: PI=115, PD=3, U_PM=0.4).



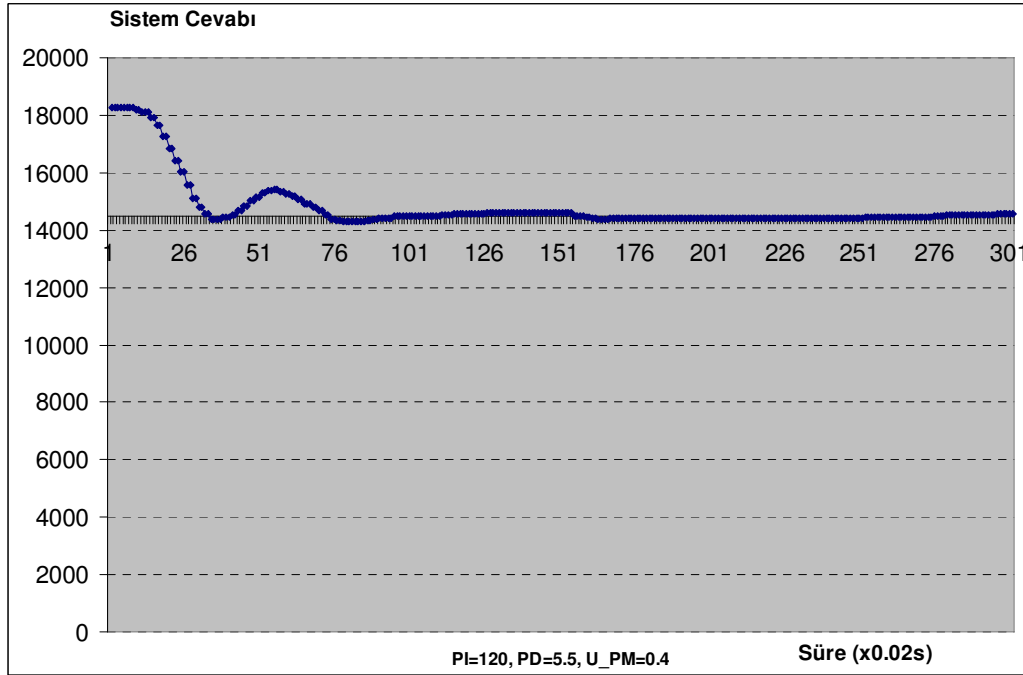
Şekil G.9 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=14472, Katsayılar: PI=120, PD=5.5, U_PM=0.4).



Şekil G.10 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=17000, Katsayılar: PI=120, PD=5.5, U_PM=0.4).



Şekil G.11 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer=18272, Katsayılar: PI=120, PD=5.5, U_PM=0.4).



Şekil G.12 : Bulanık PID Kontrolörlü Sistemin Davranışı (Hedef Değer Geçişi = 18272-14772, Katsayılar: PI=120, PD=5.5, U_PM=0.4).

EK_H : STEP-7 PROGRAMINDA OLUŞTURULAN FONKSİYON BLOĞU KODLARI

Kazanc, sönüm ve doğal frekansı hesaplayan fonksiyon

FUNCTION FC7:VOID

TITLE = 'IDS_KZW_BUL'
VERSION: '1.0'
AUTHOR: SK
NAME: SIM
FAMILY: KONTROL

VAR_INPUT
Y_M:REAL; // MAX.SISTEM CIKIS DEGERI
Y:REAL; // SISTEM CIKIS DEGERI
Y_0:REAL; // t=0 da SISTEM CIKIS DEGERI
X:REAL; // SISTEM GIRIS DEGERI
X_0:REAL; // t=0 da SISTEM GIRIS DEGERI
T_P:REAL; // SISTEM CIKIS TEPE ZAMANI
//T_S:REAL; // ORNKELEME ZAMANI
END_VAR

VAR_OUTPUT
K_SYS:REAL; // KAZANC
asim:REAL; // ASIM
zeta:REAL; // SONUM
wn:REAL; // DOGAL FREKANS
w:REAL; // FREKANS
END_VAR

VAR_TEMP
DELTA:REAL;
Y_M_t:REAL;
Y_t:REAL;
Y_0_t:REAL;
X_t:REAL;
X_O_t:REAL;
END_VAR

CONST
PI := 3.1416;
END_CONST

BEGIN
K_SYS:= (Y-Y_0)/(X-X_0);
asim:=(Y_M-Y)/(Y-Y_0);
DELTA:= LN (asim);
zeta:= SQRT ((DELTA*DELTA)/(PI*PI+DELTA*DELTA));
wn:= PI/(T_P*SQRT(1-zeta*zeta));
w:=wn*SQRT(1-zeta*zeta);
END_FUNCTION

PID katsayıları hesaplayan fonksiyon

FUNCTION FC8:VOID

TITLE = 'IDS_PID_BUL'

```

VERSION: '1.0'
AUTHOR: A_T
NAME: SIM
FAMILY: KONTROL

VAR_INPUT
K_SYS:REAL; // KAZANC
//asim:REAL; // ASIM
zeta:REAL; // SONUM
wn:REAL; // DOGAL FREKANS
T:REAL; // ORNEKLEME ZAMANI
L:REAL; // OLU ZAMAN

END_VAR

VAR_TEMP
Y_R:REAL;
D:INT;
a_1,a_0,b_1,b_0:REAL;
index:int;
a:REAL;
b:REAL;
teta:REAL;
w:REAL;
KZ:REAL;
K_Y:REAL;
END_VAR

CONST
PI := 3.1416;
END_CONST

VAR_OUTPUT
KC:REAL; // KAZANC
TI:REAL; // INTEGRAL ZAMANI
TD:REAL; // TUREV ZAMANI
END_VAR

BEGIN
OK:=TRUE;
IF zeta < 1.0 AND zeta >0.0 THEN
a:=EXP(-zeta*wn*T);
b:=zeta/SQRT(1-zeta*zeta);
w:=wn*SQRT(1-zeta*zeta);
teta:=w*T;
TD:=(a*a*T/(1-a*a));
TI:=(1-a*a)*T/(a*a-(2*a* $\cos(teta)$ )+1);
b_1:=1-(a* $\cos(teta)$ )-(a*b*SIN(teta));
b_0:=(a*a-(a* $\cos(teta)$ )+(a*b*SIN(teta)))/b_1;
a_1:=EXP(-wn*T);

KZ:=K_SYS*b_1;
K_Y:=EXP((D+1)*LN(a_1))*(1-a_1)/(a_1+b_0);
KC:=K_Y*T/(KZ*(T+TD));
ELSE
b_1:=0.0;
b_0:=0.0;
a_1:=0.0;
a_0:=0.0;
a:=0.0;

```

```

b:=0.0;
TD:=0.0;
TI:=0.0;
KZ:=0.0;
K_Y:=0.0;
KC:=0.0;
OK:=false;
RETURN;
END_IF;

D:=REAL_TO_INT (L/T);
IF D >= 100 THEN
  D:=100;
END_IF;

END_FUNCTION

```

PID kontrolör fonksiyonu

```

FUNCTION_BLOCK FB7

TITLE = 'PID_CONT'
VERSION: '1.0'
AUTHOR: A_T
NAME: SIM
FAMILY: KONTROL

VAR_INPUT

SP:INT; // SET POINT
PV:INT; // PROSES VALUE
KC:REAL; // GAIN
TI:REAL; // INT.TIME
TD:REAL; // DER.TIME
T:REAL; // SAMP.TIME
WC:REAL; // CORNER FREQ.
PV_MIN:REAL;
PV_MAX:REAL;
PV_FLT_MIN:REAL;
PV_FLT_MAX:REAL;
END_VAR

VAR_OUTPUT
// PV_FLT:INT; //TAMSAYI SISTEM CIKISI
U:INT;
ERR:INT;
END_VAR

VAR_TEMP
A:REAL;
PV_R:REAL;
SP_R:REAL;
ERR_R:REAL;
U_R:REAL;
END_VAR

VAR
PV_FLT:REAL;

```

```

PV_FLT_1:REAL;
PV_1:REAL;
IE:REAL;
I_1:REAL;
ERR_1:REAL;
P:REAL;
I:REAL;
D:REAL;
HL:BOOL;
LL:BOOL;
END_VAR

BEGIN
OK:=TRUE;

//FILTER
IF WC=0.0 OR T=0.0 THEN
OK:=FALSE;
RETURN;
END_IF;

A:=EXP(-T*WC);

PV_R:=A*PV_FLT_1+(1-A)*PV_1;

IF PV_R > PV_FLT_MAX THEN
PV_R:=PV_FLT_MAX;
END_IF;

IF PV_R < PV_FLT_MIN THEN
PV_R:=PV_FLT_MIN;
END_IF;

PV_FLT_1:=PV_R;

PV_1:=INT_TO_REAL(PV);

IF PV_1 > PV_MAX THEN
PV_1:=PV_MAX;
END_IF;

IF PV_1 < PV_MIN THEN
PV_1:=PV_MIN;
END_IF;

PV_FLT:=REAL_TO_INT(PV_R);

//ERROR SIGNAL

SP_R:= INT_TO_REAL (SP);
ERR_R:= SP_R-PV_R;
ERR:= REAL_TO_INT (ERR_R);

//PROPORTIONAL

P:= KC*ERR_R;
IF P > 27648.0 THEN
P:=27648.0;
ELSIF P < -27648.0 THEN
P:=-27648.0;

```

```

END_IF;

//INTEGRAL

IF TI > 0.0 THEN
    IE:= (P*T)/TI;
ELSE
    IE:= 0.0;
    I_1:= 0.0;
END_IF;
IF HL=TRUE OR LL=TRUE THEN
    IE:= 0.0;
END_IF;
IF SP_R=0.0 AND LL=TRUE THEN
    I_1:=0.0;
END_IF;

I:= IE+I_1;

IF I > 27648.0 THEN
    I:=27648.0;
ELSIF I < -27648.0 THEN
    I:=-27648.0;
END_IF;
I_1:= I;

//DERIVATIVE

D:= (ERR_R - ERR_1)*KC*TD/T;

IF D > 27648.0 THEN
    D:=27648.0;
ELSIF D < -27648.0 THEN
    D:=-27648.0;
END_IF;

ERR_1 := ERR_R;

// CONTROL OUTPUT & LIMITATION

U_R:= P+I+D;
IF U_R > 27648.0 THEN
    U_R:=27648.0;
    HL:= TRUE;
ELSIF U_R < 0.0 THEN
    U_R:=0.0;
    LL:= TRUE;
ELSE
    HL:= FALSE;
    LL:= FALSE;
END_IF;

U:= REAL_TO_INT (U_R);
END_FUNCTION_BLOCK

```

Bulank PID kontrolör fonksiyonu

FUNCTION_BLOCK FB6

TITLE = 'FUZZY_CONT'

VERSION: '1.0'
AUTHOR: A_T
NAME: SIM
FAMILY: KONTROL

VAR_INPUT
SP:INT; // SET POINT
PV:INT; // PROSES VALUE
K_E:REAL;
K_CE:REAL;
K_PD:REAL;
K_PI:REAL;
WC:REAL;
T:REAL;
END_VAR

VAR_OUTPUT
U:INT;
E:INT;
END_VAR

VAR
PV_R:REAL;
E_R:REAL;
CE_R:REAL;
E_F:REAL;
CE_F:REAL;
U_F:REAL;
U_PD:REAL;
U_PI:REAL;
U_R:REAL;
LL:BOOL;
END_VAR

VAR_TEMP
A:REAL;
PV_FLT_1:REAL;
PV_1:REAL;
SP_R:REAL;
E_1:REAL;
E_NEG:BOOL;
E_Z:BOOL;
E_POS:BOOL;
CE_NEG:BOOL;
CE_Z:BOOL;
CE_POS:BOOL;
E_F_NEG_MS:REAL;
E_F_Z_MS:REAL;
E_F_POS_MS:REAL;
CE_F_NEG_MS:REAL;
CE_F_Z_MS:REAL;
CE_F_POS_MS:REAL;
R1_MS:REAL;
R2_MS:REAL;
R3_MS:REAL;
R4_MS:REAL;
R5_MS:REAL;
R6_MS:REAL;
R7_MS:REAL;
R8_MS:REAL;

```

R9_MS:REAL;
R1:REAL;
R2:REAL;
R3:REAL;
R4:REAL;
R5:REAL;
R6:REAL;
R7:REAL;
R8:REAL;
R9:REAL;
U_PI_1:REAL;
U_PI_ACT:REAL;
END_VAR

CONST
PI := 3.1416;
PV_FLT_MAX:=27648.0;
PV_FLT_MIN:=-27648.0;
NB:=-1.0;
NM:=-0.5;
Z:= 0.0;
PM:=0.4;
PB:=1.0;
END_CONST

BEGIN

OK:=TRUE;
//FILTER
IF WC=0.0 OR T=0.0 THEN
OK:=FALSE;
RETURN;
END_IF;

A:=EXP(-T*WC);
PV_R:=A*PV_FLT_1+(1-A)*PV_1;
IF PV_R > PV_FLT_MAX THEN
    PV_R:=PV_FLT_MAX;
END_IF;

IF PV_R < PV_FLT_MIN THEN
    PV_R:=PV_FLT_MIN;
END_IF;

PV_FLT_1:=PV_R;
PV_1:=INT_TO_REAL(PV);

IF PV_1 > PV_FLT_MAX THEN
    PV_1:=PV_FLT_MAX;
END_IF;

IF PV_1 < PV_FLT_MIN THEN
    PV_1:=PV_FLT_MIN;
END_IF;

//PV_FLT:=REAL_TO_INT(PV_R);
//ERROR & CHANGE OF ERROR SIGNAL

SP_R:= INT_TO_REAL (SP);
E_R:= (SP_R-PV_R);

```

```

E:= REAL_TO_INT (E_R);
CE_R:=(E_R - E_1)/T;
E_F:=(E_R * K_E)/2764.8;
CE_F:=(CE_R * K_CE)/2764.8;
E_1:= E_R;
// FUZZIFICATION
//ERROR
IF E_F <= -1.0 THEN
  E_F_NEG_MS := 1.0;
  E_F_Z_MS := 0.0;
  E_F_POS_MS := 0.0;
  E_NEG:=TRUE;
  E_Z:=FALSE;
  E_POS:=FALSE;
ELSIF E_F > -1.0 AND E_F <= 0.0 THEN
  E_F_NEG_MS := -1.0 * E_F;
  E_F_Z_MS := E_F+1.0;
  E_F_POS_MS := 0.0;
  E_NEG:=TRUE;
  E_Z:=TRUE;
  E_POS:=FALSE;
ELSIF E_F > 0.0 AND E_F < 1.0 THEN
  E_F_NEG_MS := 0.0;
  E_F_Z_MS := 1.0 - E_F;
  E_F_POS_MS := E_F;
  E_NEG:=FALSE;
  E_Z:=TRUE;
  E_POS:=TRUE;
ELSIF E_F >= 1.0 THEN
  E_F_NEG_MS := 0.0;
  E_F_Z_MS := 0.0;
  E_F_POS_MS := 1.0;
  E_NEG:=FALSE;
  E_Z:=FALSE;
  E_POS:=TRUE;
END_IF;
//CH.OF ERROR
IF CE_F <= -1.0 THEN
  CE_F_NEG_MS := 1.0;
  CE_F_Z_MS := 0.0;
  CE_F_POS_MS := 0.0;
  CE_NEG:=TRUE;
  CE_Z:=FALSE;
  CE_POS:=FALSE;
ELSIF CE_F > -1.0 AND CE_F <= 0.0 THEN
  CE_F_NEG_MS := -1.0 * CE_F;
  CE_F_Z_MS := CE_F+1.0;
  CE_F_POS_MS := 0.0;
  CE_NEG:=TRUE;
  CE_Z:=TRUE;
  CE_POS:=FALSE;
ELSIF CE_F > 0.0 AND CE_F < 1.0 THEN
  CE_F_NEG_MS := 0.0;
  CE_F_Z_MS := 1.0 - CE_F;
  CE_F_POS_MS := CE_F;
  CE_NEG:=FALSE;
  CE_Z:=TRUE;
  CE_POS:=TRUE;
ELSIF CE_F >= 1.0 THEN
  CE_F_NEG_MS := 0.0;

```

```

CE_F_Z_MS := 0.0;
CE_F_POS_MS := 1.0;
CE_NEG:=FALSE;
CE_Z:=FALSE;
CE_POS:=TRUE;
END_IF;

//RULES & INFERENCE

IF E_NEG AND CE_NEG THEN
  R1_MS:= MIN (IN1:= E_F_NEG_MS, IN2:= CE_F_NEG_MS);
ELSE
  R1_MS:= 0.0;
END_IF;
IF E_NEG AND CE_Z THEN
  R2_MS:= MIN (IN1:= E_F_NEG_MS, IN2:= CE_F_Z_MS);
ELSE
  R2_MS:= 0.0;
END_IF;
IF E_NEG AND CE_POS THEN
  R3_MS:= MIN (IN1:= E_F_NEG_MS, IN2:= CE_F_POS_MS);
ELSE
  R3_MS:= 0.0;
END_IF;

IF E_Z AND CE_NEG THEN
  R4_MS:= MIN (IN1:= E_F_Z_MS, IN2:= CE_F_NEG_MS);
ELSE
  R4_MS:= 0.0;
END_IF;
IF E_Z AND CE_Z THEN
  R5_MS:= MIN (IN1:= E_F_Z_MS, IN2:= CE_F_Z_MS);
ELSE
  R5_MS:= 0.0;
END_IF;
IF E_Z AND CE_POS THEN
  R6_MS:= MIN (IN1:= E_F_Z_MS, IN2:= CE_F_POS_MS);
ELSE
  R6_MS:= 0.0;
END_IF;

IF E_POS AND CE_NEG THEN
  R7_MS:= MIN (IN1:= E_F_POS_MS, IN2:= CE_F_NEG_MS);
ELSE
  R7_MS:= 0.0;
END_IF;
IF E_POS AND CE_Z THEN
  R8_MS:= MIN (IN1:= E_F_POS_MS, IN2:= CE_F_Z_MS);
ELSE
  R8_MS:= 0.0;
END_IF;
IF E_POS AND CE_POS THEN
  R9_MS:= MIN (IN1:= E_F_POS_MS, IN2:= CE_F_POS_MS);
ELSE
  R9_MS:= 0.0;
END_IF;
R1:= R1_MS * NB;
R2:= R2_MS * NM;
R3:= R3_MS * Z;
R4:= R4_MS * NM;

```

```

R5:= R5_MS * Z;
R6:= R6_MS * PM;
R7:= R7_MS * Z;
R8:= R8_MS * PM;
R9:= R9_MS * PB;
//DEFUZZ.
U_F:=
(R1+R2+R3+R4+R5+R6+R7+R8+R9)/(R1_MS+R2_MS+R3_MS+R4_MS+R5_MS+R6_MS+R7_M
S+R8_MS+R9_MS);

//CONTROL SIGNAL
U_PD:= (K_PD * U_F) *2764.8 ;

IF U_PD > 27648.0 THEN
    U_PD:=27648.0;
ELSIF U_PD < -27648.0 THEN
    U_PD:=-27648.0;
END_IF;
U_PI_ACT:=(K_PI * U_F * T)*2764.8;

IF LL=TRUE THEN
    U_PI_ACT:= 0.0;
END_IF;
IF SP_R=0.0 AND LL=TRUE THEN
    U_PI_1:=0.0;
END_IF;
U_PI:= U_PI_ACT + U_PI_1;

IF U_PI > 27648.0 THEN
    U_PI:=27648.0;
ELSIF U_PI < -27648.0 THEN
    U_PI:=-27648.0;
END_IF;
U_PI_1:= U_PI;
U_R:= U_PD+U_PI;

IF U_R > 27648.0 THEN
    U_R:=27648.0;
ELSIF U_R < 0.0 THEN
    U_R:=0.0;
    LL:=TRUE;
ELSE
    LL:=FALSE;
END_IF;

U:= REAL_TO_INT (U_R);

END_FUNCTION_BLOCK

```

ÖZGEÇMİŞ

Ared Tüysüzyan 27 Nisan 1972 tarihinde İstanbul’ da doğdu. 1989 yılında İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği bölümüne girdi. Aynı yıl, “İngilizce Destekli Öğretim” programına katılmaya hak kazanarak bir sene boyunca teknik İngilizce eğitimi aldı. Lisans eğitimini, bu programın getirdiği ek İngilizce dersleri ile beraber 1994 yılında tamamlayarak mezun oldu. 1996 yılından itibaren MİKROHOST firmasında, endüstriyel otomasyon sektöründe “Proje Uygulama Müh.” olarak 6,5 yıl çalıştı. 2002 yılında İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği programında lisansüstü eğitimi almaya hak kazandı. Haziran 2007 tarihinde lisansüstü programından mezun oldu.

Ared Tüysüzyan, halen Kasım 2002 yılında çalışmaya başladığı SAMKO MÜH. firmasında TÜRKAK kuruluşundan akredite olan “Teknik Denetim ve Gözetim” bölümünde “Elektrik Bölüm Şefi” olarak çalışmaktadır.