

**BULANIK PID KONTROLÖRLERİ İÇİN
BİRLEŞTİRME OPERATÖRÜNE DAYALI YENİ BİR ÖZ-AYARLAMA
YÖNTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağrı GÜZAY

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2014

**BULANIK PID KONTROLÖRLERİ İÇİN
BİRLEŞTİRME OPERATÖRÜNE DAYALI YENİ BİR ÖZ-AYARLAMA
YÖNTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Çağrı GÜZAY
(504121111)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Engin YEŞİL

TEMMUZ 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504121111 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Çağrı GÜZAY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“BULANIK PID KONTROLÖRLERİ İÇİN BİRLEŞTİRME OPERATÖRÜNE DAYALI YENİ BİR ÖZ-AYARLAMA YÖNTEMİ TASARIMI”** başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Engin YEŞİL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İbrahim EKSİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Taner ARSAN
Kadir Has Üniversitesi

Teslim Tarihi : **17 Temmuz 2014**
Savunma Tarihi : **21 Temmuz 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bugüne kadar desteğini ve dostluğunu her zaman hissettiren ve attığım her adımda beni daha da cesaretlendiren aileme minnetimi sunarım. Sadece tez sürecinde olmamakla birlikte yardımlarını ve eforlarını esirgemeyen, sundukları çözümlerle yeni ufuklar açan Yrd. Doç Dr. Engin Yeşil'e ve Yrd. Doç. Dr. Tufan Kumbasar'a sonsuz teşekkür borçluyum. İTÜ BAP Birimi'ne "Bulanık PID kontrolörleri için birleştirme operatörüne dayalı yeni bir öz-ayarlama yöntemi" başlıklı projeye verdikleri maddi destek için teşekkür ederim.

Temmuz 2014

Çağrı GÜZAY
Ar. Gör.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. BULANIK MANTIK.....	7
2.1 Giriş	7
2.2 Bulanık Mantık Uygulamaları	8
2.3 Bulanık Kümeler	9
2.3.1 Tanım	9
2.3.2 Bulanık kümelerde temel kavramlar.....	10
2.3.3 Bulanık kümelerin sınıflandırılması	11
2.3.4 Üyelik fonksiyonları	12
2.3.5 Bulanık kümelerde işlemler.....	13
2.3.5.1 Tümlleme işlemi	14
2.3.6 Kesişim işlemi	14
2.3.7 Birleşim işlemi.....	14
2.3.8 T-normları ve S-normları.....	15
3. BULANIK SİSTEMLER	17
3.1 Giriş	17
3.2 Dilsel Değişkenler	17
3.3 Dilsel Niteleyiciler.....	19
3.4 Bulanıklaştırma.....	19
3.5 Kural Tabanı	20
3.6 Çıkarım Mekanizması	20
3.6.1 Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizması	20
3.6.2 Takagi - Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması	21
3.6.3 Tekli (Singleton) tip yapı için çıkarım mekanizması	22
3.6.4 Mamdani ve Takagi – Sugeno yöntemlerinin üstünlükleri.....	22
3.7 Durulaştırma	23
3.7.1 Ağırlık merkezi yöntemi.....	23
3.7.2 Ağırlık ortalaması yöntemi.....	24
3.7.3 Maksimum yöntemi.....	25

4. GAMA OPERATÖRÜ.....	27
4.1 γ Değişiminin Çözümlemesi	30
4.1.1 Kuralların Ateşlenmesi.....	31
4.1.2 4 Kurallı Bulanık Kontrolör.....	40
4.1.3 25 Kurallı Bulanık Kontrolör.....	44
4.1.4 49 Kurallı Bulanık Kontrolör.....	47
5. ÖZ-AYARLAMALI BULANIK PID KONTROLÖRÜ TASARIMI	51
5.1 Geleneksel PID Kontrolörleri.....	51
5.2 Bulanık PID Kontrolörleri	52
5.3 Bulanık PID Kontrolör Tasarımı	55
5.3.1 Birleştirme işleminde γ operatörünün kullanılması	57
5.3.2 Ölçekleme çarpanlarının seçimi	61
6. GAMA OPERATÖRÜNE BAĞLI YENİ BİR ÖZ-AYARLAMA YÖNTEMİ	67
7. BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	73
7.1 Benzetimlerin Uygulanması.....	73
7.2 Benzetim Sonuçlarının Yorumlanması	75
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	79
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	88

KISALTMALAR

BKM	: Bulanık Kontrol Mekanizması
Maks	: Maksimum
Min	: Minimum
PID	: Proportional-Derivative-Integral

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : T-normları ve S-normları.....	15
Çizelge 4.1 : Tasarlanan örnek BKM için kural tablosu.....	31
Çizelge 4.2 : Tasarlanan örnek BKM için kural tablosu.....	33
Çizelge 4.3 : Ateşlenen kurallar.....	35
Çizelge 4.4 : Ateşlenen kurallar.....	35
Çizelge 4.5 : Tasarlanan örnek BKM için kural tablosu.....	37
Çizelge 4.6 : Ateşlenen kurallar.....	37
Çizelge 4.7 : Ateşlenen kurallar.....	38
Çizelge 4.8 : 4 kurallı bulanık kontrolör için kural tablosu.....	41
Çizelge 4.9 : 4 kurallı bulanık kontrolör için kural tablosu (aitlik dereceleri gösterimi).	41
Çizelge 4.10 : 25 kurallı bulanık kontrolör için kural tablosu.....	45
Çizelge 4.11 : 49 kurallı bulanık kontrolör için kural tablosu.....	47
Çizelge 5.1 : Tasarlanan kural tablosu.....	57
Çizelge 5.2 : Büyük patlama-büyük çöküş algoritmasının detaylı adımları.....	64
Çizelge 5.3 : Büyük patlama-büyük çöküş algoritmasının ayarlanan değişkenleri.	65
Çizelge 6.1 : γ ayar mekanizması için kural tablosu.	70
Çizelge 7.1 : Çeşitli kriterlere göre $\gamma = 0$ ile önerilen yöntemin performanslarının karşılaştırılması.	76
Çizelge 7.2 : Çeşitli kriterlere göre $\gamma = 0$ ile önerilen yöntemin bozucu bastırma performanslarının karşılaştırılması.....	77

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Tipik bir bulanık kontrolörün iç yapısı.	3
Şekil 2.1 : 3'e yakın sayılar bulanık kümesinin üyelik fonksiyonları.....	9
Şekil 2.2 : Bulanık kümelerde temel kavramlar.....	11
Şekil 2.3 : Olağan ve olağanaltı bulanık küme.	11
Şekil 2.4 : Konveks ve konveks olmayan bulanık küme.	12
Şekil 2.5 : Üçgen tipi üyelik fonksiyonu.	13
Şekil 2.6 : Trapezoid tipi üyelik fonksiyonu.....	13
Şekil 2.7 : Gauss tipi üyelik fonksiyonu.	13
Şekil 2.8 : Gauss bell tipi üyelik fonksiyonu.	13
Şekil 2.9 : Bulanık A ve tümleyen A kümeleri.	14
Şekil 2.10 : Bulanık A ve B kümelerinin kesişim işlemi.	14
Şekil 2.11 : Bulanık A ve B kümelerinin birleşim işlemi.	15
Şekil 3.1 : Bulanık sistemin iç yapısı.	17
Şekil 3.2 : "Yaş" dilsel değişkeninin terimleri.	18
Şekil 3.3 : "İyi" dilsel değişkeninin niteleyicileri.	19
Şekil 3.4 : İki giriş iki kural Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizması.	21
Şekil 3.5 : İki giriş iki kural Takagi - Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması.	22
Şekil 3.6 : İki giriş iki kural tekli tip yapı için çıkarım mekanizması.....	23
Şekil 3.7 : Alanın ağırlık merkezi.	24
Şekil 3.8 : Alanın ağırlık ortalaması.	25
Şekil 3.9 : Alanın maksimumları.	26
Şekil 4.1 : Doğrusal γ operatörünün $[0, 1]$ aralığındaki tanım uzayında farklı γ değerleri için çıkışları.	28
Şekil 4.2 : Üstel γ operatörünün $[0, 1]$ aralığındaki tanım uzayında farklı γ değerleri için çıkışları.	29
Şekil 4.3 : γ operatörünün μ_1 'e göre türevinin değişen μ_2 ve γ değerlerine göre çıkışı.....	30
Şekil 4.4 : Hata ve hatanın türevi için tanımlanan örnek üyelik fonksiyonları...	32
Şekil 4.5 : Hata ve hatanın türevi için tanımlanan üyelik fonksiyonları.....	40
Şekil 4.6 : Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.....	40
Şekil 4.7 : 4 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0, 0,1, \dots, 0,5$).	43
Şekil 4.8 : 4 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0,6, 0,7, \dots, 1$).....	43
Şekil 4.9 : Hata ve hatanın türevi için tanımlanan üyelik fonksiyonları.....	44
Şekil 4.10 : Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.....	45

Şekil 4.11	: 25 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0, 0,1, \dots, 0,5$).	46
Şekil 4.12	: 25 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0,6, 0,7, \dots, 1$).	47
Şekil 4.13	: Hata ve hatanın türevi için tanımlanan üyelik fonksiyonları.	48
Şekil 4.14	: Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.	49
Şekil 4.15	: 49 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0, 0,1, \dots, 0,5$).	49
Şekil 4.16	: 49 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0,6, 0,7, \dots, 1$).	50
Şekil 5.1	: Geleneksel PID kontrolörlü kapalı çevrim sistem.	52
Şekil 5.2	: Bulanık PD kontrolörlü kapalı çevrim sistem.	53
Şekil 5.3	: Bulanık PID kontrolörlü kapalı çevrim sistem.	53
Şekil 5.4	: Parametresi ayarlanabilir bulanık PID kontrolörlü kapalı çevrim sistem.	55
Şekil 5.5	: Hata ve hatanın türevi için tanımlanan üyelik fonksiyonları.	56
Şekil 5.6	: Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.	56
Şekil 5.7	: γ değişimiyle beraber sistem cevabının değişmesi.	57
Şekil 5.8	: γ değişimine karşılık gelen sistem yanıtları.	58
Şekil 5.9	: γ değişimine karşılık gelen yükselme zamanları.	59
Şekil 5.10	: γ değişimine karşılık gelen aşım değerleri.	60
Şekil 5.11	: γ değişimine karşılık gelen sürekli haldeki salınım değerleri.	61
Şekil 5.12	: Büyük Patlama-Büyük Çöküş eniyileme algoritmasının akış diyagramı.	63
Şekil 6.1	: Öz-ayarlamalı bulanık PID kontrolörlü kapalı çevrim sistem.	68
Şekil 6.2	: γ değişimine karşılık gelen sistem yanıtları.	69
Şekil 6.3	: Hatanın mutlak değeri girişine ait üyelik fonksiyonları.	70
Şekil 6.4	: Hatanın türevinin mutlak değeri girişine ait üyelik fonksiyonları.	71
Şekil 6.5	: Ayar mekanizmasının çıkışına ait üyelik fonksiyonları.	71
Şekil 6.6	: Ayar mekanizmasına ait ayar yüzeyi.	72
Şekil 7.1	: Benzetim çalışmalarında uygulanan referans işareti.	74
Şekil 7.2	: Birleştirme işlemi VE operatörü ($\gamma = 0$) olan bulanık PID kontrolörlü sistemin çıkışı (a) ve kontrol işareti (b).	74
Şekil 7.3	: Birleştirme işlemi γ operatörü olan önerilen yöntemin uygulandığı bulanık PID kontrolörlü sistemin çıkışı (a), kontrol işareti (b), belirlenen γ değerleri (c).	75

BULANIK PID KONTROLÖRLERİ İÇİN BİRLEŞTİRME OPERATÖRÜNE DAYALI YENİ BİR ÖZ-AYARLAMA YÖNTEMİ TASARIMI

ÖZET

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle, akıllı kontrol sistemlerinin çözümlenmesindeki ve tasarımındaki engeller aşılarak pek çok yenilikçi araştırmalar yapılmıştır. Bulanık mantık teorisi de Lütü Zadeh'in 1965 yılındaki bir çalışmasıyla bilim dünyasına tanıtıldıktan sonra bir yandan akıllı kontrol sistemlerinin temelini oluşturmuştur.

Teknolojideki gelişim sadece akıllı kontrol sistemlerini etkilemekle kalmamış, geleneksel kontrol yapılarının da tasarımını ve uygulanmasını kolaylaştırmıştır. Bugün Dünya'da en yaygın olarak kullanılan kontrolör tipi geleneksel PID tipi kontrolörlerdir. Ancak, tasarımlarının etkin olarak yapılmaması nedeniyle pek çok kapalı çevrim sürecin verimleri oldukça düşüktür.

Akıllı kontrol sistemlerini, geleneksel kontrol yapıları ile birleştirmek mümkündür. Bu alandaki çalışmalar gerek teorik olarak gerekse uygulamalı olarak bu birleşimin iki farklı kontrol stratejisinin avantajlarını bir araya getireceğini göstermektedir. Bu açıdan bakıldığında, son yıllarda bulanık PID kontrolörler üzerine yapılan araştırmalar ve çalışmalar artmıştır. Bulanık PID kontrolörleri iyi bir tasarımla, bulanık mantık sayesinde daha esnek ve daha dayanıklı PID kontrolörleri anlamına gelmektedir. Bu tip kontrolörlerde tasarım bir noktaya göre yapılabileceği gibi birden fazla noktaya göre de yapılarak serbestlik derecesi artırılabilir.

Bulanık kontrolörlerin tasarım aşaması, yapısal ve ayarlama parametreleri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Yapısal parametreler giriş/çıkış birimlerini, dilsel değişkenlerle tanımlanmış üyelik fonksiyonlarını, kuralları, bulanık çıkarım ve durulaştırma mekanizmalarını içerir. Ayarlama parametreleri ise giriş/çıkış ölçekleme çarpanlarından ve üyelik fonksiyonu parametrelerinden oluşmaktadır. Tasarım, bu noktalardan biri ile yapılarak diğerleri bir reçeteye göre ayarlanabileceği gibi birden fazla noktaya göre de yapılabilir. Tasarım aşamasına benzer şekilde bulanık kontrolörlerin etkinliklerin artırılması eniyileme ya da özayarlama gibi yöntemlerle mümkündür. Özayarlama, bulanık kontrolörün serbest bırakılan bir tasarım noktasının kapalı çevrim sistemin çıkışı, hata işareti, kontrol işareti vb. ile bunların türevlerini, integrallerini girdi olarak alabilen doğrusal ya da doğrusal olmayan bir fonksiyona bağlı olmasıdır. Ayarlama parametrelerinde farklı olarak yapısal parametreler üzerinde ayarlama yapmak mümkündür. Bu tez çalışması, tamamen yenilikçi bir fikir olarak bulanık PID kontrolörleri için çıkarım mekanizmasındaki birleştirme operatörünün çevrimiçi biçimde öz-ayarlanmasını içerir. Böylece, yapısal parametrelerin de ayarlama parametreleri gibi kullanılabileceği gösterilerek, kontrolörün verimliliği artırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada birleştirme operatörü olarak bir serbest parametreye sahip Gama operatörü (γ) kullanılmaktadır.

A NOVEL SELF-TUNING METHOD BASED ON AGGREGATION OPERATOR FOR FUZZY PID CONTROLLERS

SUMMARY

Many innovative researches have been done over analysis and design of intelligent control systems with the rise of computer technology. Also, fuzzy logic is base for the intelligent control system after Lotfi A. Zadeh had introduced in 1965.

Design and application of classical control structures are also affected positively. However, it seems improvements on the technology only got design of intelligent control systems developed. Currently, PID controllers are the most commonly used controllers all over the world. Nevertheless, many of closed loop systems have poor performance due to inefficient designs.

Merging of intelligent control systems with classical control systems is possible and, literature shows that merging of these two types comes with many advantages. In this aspect, there is an enormous increment of number of studies about fuzzy PID controllers in recent years. Fuzzy PID controllers also can be more flexible and more robust than classical ones with well design.

Fuzzy controllers can be classified by three types as direct action, fuzzy gain scheduling and hybrid. Direct action means a controller structure in a closed loop replaced by a fuzzy controller (fuzzy PI, fuzzy PD, fuzzy PID etc.). The other type, fuzzy gain scheduling, includes a conventional controller and also fuzzy mechanism. In this type, fuzzy mechanism tunes the parameters of the conventional controller. Fuzzy hybrid controllers consist of a conventional and a fuzzy controller connected each other by parallel. Outputs of these two controllers are hybridized by using a function doing summation, production or another custom operation. Moreover, fuzzy controllers can be also classified by number of inputs as one, two or three. In this study, two-input direct action fuzzy controller is utilized.

The general form of a fuzzy controller includes input/output scaling factors, fuzzification unit, inference mechanism, rule base and defuzzification unit. Scaling factors are used to convert inputs or outputs in order to fit universe of discourse. In general, inputs of the fuzzy controllers are normalized to $[-1, 1]$ interval. Inputs are converted from real world or simulation environment for this interval. Outputs of the fuzzy controller are scaled in similar to scaling of inputs. Output signal multiplied by a coefficient for fitness of it to closed loop control system. Fuzzification unit consists of linguistic variables and membership functions. Shape of membership functions can vary among many forms as triangular, trapezoidal, gauss-bell, s-shaped, z-shaped etc. Each input has a number of membership functions and those are named by linguistic variables. So, scaled inputs are fuzzified in fuzzification section. Inference mechanism calculates firing strengths for each rule in rule base by using fuzzified inputs and aggregation operation. A mathematical operator merges membership grades of all inputs, and this operation is named as aggregation. Some examples of aggregation

operator are maximum, probabilistic OR, product, AND, minimum. Rule base mostly includes if-then rules. There are two types of inference mechanism as Mamdani and Takagi-Sugeno. While Mamdani type has consequences formed as membership functions in rule base, Takagi-Sugeno type has singletons or linear functions. In this study, all used fuzzy mechanisms are based on Takagi-Sugeno, and use the gamma (γ) operator, a parameterized operator that is main focus of the study. In defuzzification phase, all rules and their firing strengths are pieced together by a procedure that can be center of gravity, weighted average or maximum.

In literature, there are two forms of gamma operator: linear and exponential. This study deals with linear gamma operator. Linear gamma operator is a function combining two operators, product (AND) and probabilistic or (OR) linearly. As another aspect, gamma operator is a dual operator including a t-norm and an s-norm (t-conorm). Fuzzy sets have two classes of operations used for union and intersection. Most common t-norms and s-norms are AND and OR respectively. These mean there are some special cases for varying gamma values. If gamma is chosen as 0, operator acts as AND; if gamma is chosen as 1, operator acts as OR; if gamma is chosen between 0 and 1, operator sums weighted outputs of AND and OR. Thus, change of gamma results in change of aggregation output. To analyze how the change of gamma affects what actual parts of the fuzzy controller, there are given great effort for research, simulations and analysis. As the first step, two inputs of the operator changed by the interval of [0, 1] and gamma values are used the range of 0 and 1 by step size 0.1. So, gamma operator outputs are drawn as surfaces in order to see how firing strengths are affected. As the second step, number of fired rules by varying gamma values are considered. A fuzzy controller including 4 rules, 50% overlapped membership functions is examined to determine how control surface is transformed under all rules fired case. If a fuzzy controller 50% overlapped membership functions and 4 rules, each input combination results in all-fired rules. So, change of gamma only rotates control surface. Other configurations including 25 and 49 rules, and 50% overlapped membership functions are used and analyzed with changing gamma. In these cases, control surfaces are both rotated and smoothened in non-linear way. Except from all-fired case, gamma = 0 (AND) can provide minimum number of fired rules and, gamma = 1 (OR) can make maximum number of fired rules. Gamma values on the interval of (0, 1) generates the same fired rules with gamma = 1. In this interval, only firing strengths are affected.

Design phase of fuzzy PID controllers can be divided into two main groups as structural and tuning parameters. Structural parameters include input/output units, membership functions defined with linguistic variables, rule base, fuzzy inference and defuzzification mechanisms. Also, tuning parameters consist of input/scaling factors and membership function parameters. Design can be done via one or more freed parameters. In similar to design phase, efficiency of the fuzzy PID controllers can be improved remarkably by using of optimization based techniques or self-tuning mechanisms. Self-tuning means that a free parameter of the fuzzy PID controller can be tuned via a mechanism accepting closed loop system response, closed loop error, their derivatives, integrals as input and including linear or non-linear functions. On the other hand, as a different approach structural parameters also can be tuned rather than tuning parameters. In this study, online self-tuning of aggregation operator in the inference mechanism of fuzzy PID controllers is proposed as a completely novel idea. Thus, structural parameters can be used as tuning parameters is aimed.

To show effect of the gamma operator on closed loop system response, a simulation environment is prepared on Matlab/Simulink. Closed loop system consists of a fuzzy PID controller with gamma operator in aggregation and a non-linear time delayed system. A typical fuzzy PID controller has two inputs: error and its derivative, an output which is summation of weighted generated output of fuzzy mechanism, and weighted its integral. Utilized fuzzy controller has 49 rules and 7 singleton outputs. Controlled system and scaling factors provides fast system response are taken from a study. With this configuration system responses are collected by changing gamma in the interval of $[0, 1]$. These responses shows some important results. Lower gamma values generate faster and aggressive response with overshoot. Higher gamma values provide slower and sluggish response with no or small overshoot. In steady state, lower gamma values have oscillated system response; higher gamma values have smooth system response. It is possible to build a gamma self-tuning mechanism that lets to obtain fastest response with no or small overshoot. As a first step, scaling factors should be tuned. Selection of scaling factors can be done in many ways. Use of optimization based techniques gives suitable results. Big Bang-Big Crunch optimization algorithm is utilized to find scaling factors. Configuration of the algorithm as follows: number of iterations is 100, population size is 20, smooth factor is 10 and, cost function is minimization of the rise time. Near an operation point (a step function amplitude of 2), Big Bang-Big Crunch algorithm is run and required scaling factors are found. When the same simulation is done new scaling factors, effects of gamma change is shown much more detailed. As a second step, gamma tuning mechanism should be designed. Tuning mechanism is a fuzzy block that accepts two inputs absolute error and absolute derivative of error and, has three membership functions per input, 9 rules, 5 singleton output membership functions. Studies done show there is no importance about sign of the error or its derivative and, inputs of the tuning mechanism should be defined in positive space due to gamma be generated in the interval of $[0, 1]$. Membership functions of the tuning mechanism are selected according to system response analysis. Mechanism generates gamma values shortly as follows: if system response is far away setpoint, decrease gamma; if system response approaches setpoint, increase gamma; if system response is near setpoint, set gamma to higher or highest value. Designed fuzzy mechanism does not perform just these steps, its own rule base provides much more dynamic and flexible actions. Simulation diagram is developed and self-tuning mechanism is added. Simulation is done with a reference signal including varied amplitude of step functions. This signal begins with amplitude of 2 and changes to 3, 5, 2, 4 respectively. Proposed method, including gamma self-tuning by online, is compared with a conventional fuzzy PID controller design (gamma = 0, AND). Actually, single simulation diagram is used for both proposed and conventional methods by letting gamma be self-tuned or setting gamma to 0. Proposed method gives satisfactory results according to these simulations. In transient state, proposed method has both fast response and small or no overshoot; in steady state, proposed method has no steady state error with smooth response. Conventional fuzzy PID controller has much more overshoots, oscillations and even no-settlings in some cases. Moreover, controller performances are compared by some extra criteria as IAE (integral of absolute error), ISE (integral of square error) etc. In addition, input disturbance rejection performance of the proposed method is tested via simulations. As it was expected the proposed online tuning method also improved the disturbance rejection performance. Thus, some improvements are made for a desired

criterion via online self-tuning gamma operator by showing structural parameters can also be tuning parameters.

1. GİRİŞ

Otomatik kontrol sistemlerinin ilk örnekleri günümüzden yaklaşık iki bin yıl önce görülmesi şaşırtıcı olduğu kadar etkileyicidir. İnsanoğlunun doğayı izlemesi, anlaması ve fiziksel boyutların izin verdiği ölçülerde insan faktörünü azaltan ya da çok büyük oranda ortadan kaldıran araçları icat etmesi günümüze kadar ne denli büyük bir yol aldığımızın göstergesidir. Tarihte ilk görülen kontrol sistemi su saatidir ve basit bir biçimde kapalı çevrimde çalışmaktadır. 17. yy civarında Avrupa’da görülen başka bir kontrol sistemi ise açık çevrimde çalışan bir otomattır. Yine 17. ve 18. yy’da sırasıyla sıcaklık düzenleyici ve buhar makinaları için hız kontrolü gibi kapalı çevrim çalışan uygulamalar otomatik kontrol sistemlerinin tarihinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Gerek ihtiyaçlar gerekse araştırmalar için icat edilen bu sistemlerin kullanıldığı alanlar birbirinden çok farklı olsa da hepsinin ortak bir noktası vardır. Diğer bir deyişle; amaç, bir sistemin insan etkisi olmaksızın istenilen şekilde davranış sergilemesini sağlamaktır.

Kontrol bilimi yaklaşık 100 yıldır gerçek anlamda ele alınıp, analitik biçimde sistemin incelenmesi ve kontrol sistemi tasarımı mümkün olmuştur. Aynı zamanda geçen süre zarfında kontrol yöntemleri sistematik bir yapıya oturtulmuştur. Bugün bir kontrol sistemi tasarımı için analitik yöntemlerin izlenmesi şart değildir.

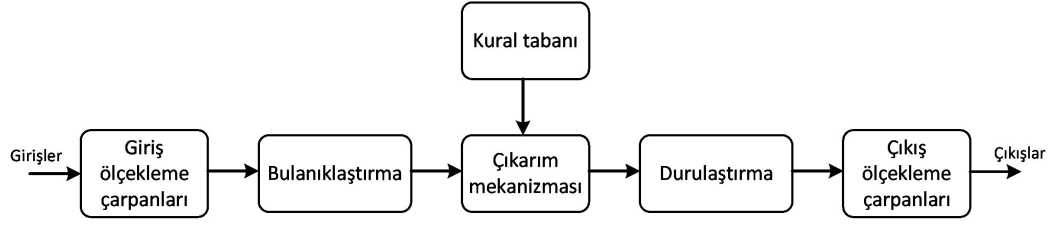
PID kontrolörler şüphesiz Dünya üzerinde çok geniş yalpazede uygulanabilen ve en yaygın şekilde kullanılan kontrolörlerdir. Aström’e göre endüstriyel çevrimlerin %90’ı PID tabanlı kontrolörler kullanılmaktadır. Bu kontrolörlerin yaygın bir biçimde kullanılmasının önemli sebepleri vardır. PID kontrolörleri hatanın geçmiş, şu an ve gelecek değerleri hesaba katar. Tasarımları, süreç tiplerine göre belirlenmiş olan reçetelere göre yapılabilir. İstenen kontrol sistemine kolay ve ucuz şekilde uygulanabilirler. Ancak sayılan bu faydalarına ve yaygın kullanımlarına rağmen PID kontrolörleri bir kriter doğrultusunda tasarlanmadığı için endüstrideki pek çok otomatik kontrol çevrimi verimsiz bir biçimde çalışmaktadır. Bu sorunun aşılması

için PID kontrolörlerinin verimini arttırmaya yönelik pek çok çalışma mevcuttur. [pid verim artırma yöntemleri, yayınlar]

Diğer bir kontrol yöntemi olan akıllı kontrol sistemleri son yıllarda oldukça revaçta olan bir konudur. Alt başlıklarında yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi çalışma konuları bulunur. Çözümlemeli yöntemlerden farklı olarak olasılık hesabı ve sezgisellik temellerine sahiptirler. Bu açıdan akıllı kontrol sistemlerinin gerek tasarım aşamaları gerekse çalışma mantıkları daha farklıdır.

PID kontrolörlerinin sayılan pek çok avantajına yönelik başta tasarımın başarım eksikliğinden kaynaklanan bazı dezavantajları olduğu daha önce söylenmişti. PID kontrolörlerinin iyileştirilmesi ve verimlerinin artırılması için akıllı kontrolör yapılarıyla veya yapılarının içinde kullanılmasının ciddi ölçülerde getirileri bulunmaktadır. Böylece, bir PID kontrolörünün istenilen kapalı çevrim çalışma noktasının sağlanmasının yanında kapalı çevrim başarımını arttırmasının imkanı vardır. Ayrıca kontrolör yapısı modelleme hatalarına, gürültülere, bozuculara ve beklenmedik etkilere karşı daha dayanıklı ve esnek yapılabilir.

Şekil 1.1'den görüldüğü gibi bulanık PID kontrolörleri yüksek serbestlik derecesine sahiptir. Bu açıdan tasarım aşaması, yapısal ve ayarlama parametreleri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Yapısal parametreler giriş/çıkış birimlerini, dilsel değişkenlerle tanımlanmış üyelik fonksiyonlarını, kuralları, bulanık çıkarım ve durulaştırma mekanizmalarını içerir. Ayarlama parametreleri ise giriş/çıkış ölçekleme çarpanlarından ve üyelik fonksiyonu parametrelerinden oluşmaktadır. Tasarım, bu noktalardan biri ile yapılarak diğerleri bir reçeteye göre ayarlanabileceği gibi birden fazla noktaya göre de yapılabilir. Tasarım aşamasına benzer şekilde bulanık kontrolörlerin etkinliklerin arttırılması eniyileme ya da öz-ayarlama gibi yöntemlerle mümkündür. Öz-ayarlama, bulanık kontrolörün serbest bırakılan bir tasarım noktasının kapalı çevrim sistemin çıkışı, hata işareti, kontrol işareti vb. ile bunların türevlerini, integrallerini girdi olarak alabilen doğrusal ya da doğrusal olmayan bir fonksiyona bağlı olmasıdır. Böylece, sistemde ölçülen işaretlerin durumuna göre bulanık kontrol yapısının bir veya birden fazla değişkeni ayarlanabilir. Sonuç olarak, öz-ayarlamanın özellikle doğrusal olmayan sistemlerde çalışma noktası esnekliği, bozucu bastırma, gürültülere karşı düşük hassasiyet, modelleme hatalarını bastırma, kapalı çevrim sistem cevabının geçici hal ve sürekli hal yanıtlarının iyileştirmesi vb. faydaları vardır.



Şekil 1.1: Tipik bir bulanık kontrolörün iç yapısı.

Son yıllarda bulanık kontrolörlerin ayarlama parametreleri üzerine yapılan çalışmaların sayısı küçümsenmeyecek derecede artmıştır. Bu araştırmalar üç ana başlık altında aşağıdaki gibi toplanabilir.

1. Geleneksel bir PID kontrolörün parametrelerinin, hata işaretini giriş olarak alan bir bulank yapı ile ayarlanması [1]
2. Bir PID kontrolörün parametrelerinin yapısında birden fazla kural tabanı olan bir bulanık yapı ile ayarlanması [2]
3. Bulanık kuralların ve genetik algoritmanın (GA) ile öz-ayarlama [3]

Bu gibi çalışmalar, görüldüğü gibi bulanık kontrolörün ayarlama parametreleri üzerine yapılmıştır. Ancak bunlardan çok farklı olarak yapısal parametreler üzerinde ayarlama yapmak mümkündür. Bu tez çalışması, tamamen yenilikçi bir fikir olarak bulanık PID kontrolörleri için çıkarım mekanizmasındaki birleştirme operatörünün çevrimiçi biçimde öz-ayarlanmasını içerir. Böylece, yapısal parametrelerin de ayarlama parametreleri gibi kullanılabileceği gösterilerek, kontrolörün verimliliği artırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada birleştirme operatörü olarak bir serbest parametreye sahip Gama operatörü (γ) kullanılmaktadır. Gama operatörü hakkında detaylı bilgi ve matematiksel tanımlar sonraki ana başlık altında verilecektir.

Bulanık PID kontrolörün ayarlama parametrelerinin üzerine bir çok çalışma olduğu daha önce belirtilmişti. Bu çalışmalara benzer şekilde, De vd. yapmış olduğu çalışmada geleneksel PID kontrolörünün parametreleri (K_p , T_i , T_d), kapalı çevrim sistemin hatasını ve hatasının türevini giriş olarak alan bir bulanık karar mekanizmasının ürettiği çıkış ile kritik kazanç ve salınım periyodu değerleri kullanılarak ayarlanmaktadır [4]. Bunun dışında ölçekleme çarpanlarının ayarlanması ayrı bir başlık altında incelenebilir. Bulanık PID kontrolörün çıkışındaki ölçekleme

çarpanları; çevrimiçi olarak çözümlemeli biçimde hesaplanmıştır [5], yapay sinir ağları ile ayarlanmıştır [6], çevrimiçi olarak başka bir bulanık karar mekanizması ile ayarlanmıştır [7]. Woo vd. ve Chopra vd. çalışmalarında ise giriş/çıkış ölçekleme çarpanları daha iyi bir performans için sırasıyla analitik olarak ve bir bulanık karar mekanizması ile çevrimiçi olarak ayarlanmıştır [8] [9]. Daha da farklı olarak, literatürde bir bulanık kontrolörün üyelik fonksiyonlarının ve kuralların ağırlıklarının ayarlanması için yapılmış olan önemli çalışmalar da vardır [10]. Shimojima vd. yapılan bir çalışmada bulanık kontrolörün verimliliğinin artırılması için üyelik fonksiyonları ve kurallar genetik algoritma (GA) kullanılarak eniyi biçimde ayarlanması önerilmiştir [11]. Diğer iki çalışmada üyelik fonksiyonu parametrelerinin ayarlanması için sırasıyla evrimsel algoritma (EA) [12] ve parçacık sürü eniyileme yöntemi [13] kullanılmıştır.

Bu tezin ana konusu olan birleştirme operatörlerinin incelenmesi, bulanık karar mekanizması üzerindeki etkileri ve uygulamalarda kullanımları üzerine literatürde pek çok çalışma vardır. Mizumoto'nun iki çalışmasında t-norm, t-conorm ve ortalama operatörlerinin çeşitli durumları [14]; BKM ile denkleyici birleştirme operatörü ve öz-çift operatör kullanımı incelenmiştir [15]. Min-Maks, Min-Ortalama operatörleri ve Gama operatörünün bir türevi birleştirme operatörü olarak kullanılmaktadır [16]. Dahası, üç farklı parametresiz operatörün (mantıksal çarpım, Hamacher çarpımı ve cebirsel çarpım) ve bir tane parametrik operatörün (Dubois) incelenmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır [17]. EA ile eniyi olarak ayarlanabilen serbest bir α parametresine sahip bir "soft" t-norm'un incelenmesi üzerine yapılan bir çalışma bulunmaktadır [18]. Gama operatörü t-norm ve t-conorm'dan oluşmaktadır ve bu yüzden yukarıda bahsi geçen çalışmalar ile yakından ilgilidir. Literatürde γ 'nın değişiminin etkilerini inceleyen ve tartışan hem teorik hem de uygulamalı bir çok çalışma bulunmaktadır. Hawas, çalışmasında γ operatörü gelişmiş yolcu bilgilendirme sistemleri ile gelişmiş trafik yönetim sistemini bütünleştirmesi için uygulanan nöro-bulanık yapıda birleştirme operatörü olarak kullanılmıştır [19]. γ operatörü coğrafi bilgi sistemlerinde (GIS) selin etkilediği alanların seçilimi için arazi değerlendirmesi [20] ve hücre tabanlı bilginin geliştirilmesi çalışmalarında [21] farklı uygulamalar olarak göze çarpmaktadır. Bir başka uygulama olarak γ operatörü e-sağlık hizmetleri için oluşturulan veri bankasındaki bulanık sınıflandırma için kullanılmıştır

[22]. Bunların dışında, bir çok çalışmada γ operatörü bulanık sistemlerde teorik olarak da incelenmiştir. Zimmerman ve Zysno, insanın karar verme mekanizmasındaki gizli bağlar üzerinde γ değişkeninin etkisini incelemiştir [23]. Ayrıca, farklı t-norm'ları ve t-conorm'ları içeren bulanık kural tabanlı sistemler üzerine bir çalışma yapılmıştır [24]. γ operatörünün bir kontrol probleminde kullanıldığı bir çalışma ise model arabanın fuzzyTECH programının kullanılarak BKM ile kontrol edilmesi üzerinedir [25].

2. BULANIK MANTIK

2.1 Giriş

Literatürde, bulanık mantık kuramı üzerine farklı yaklaşımlar ile karşılaşılmaktadır. İnsanın sahip olduğu bilgi -ki bu bilgiyi, yaşadığı dünyayı tecrübe ederek ve bir yığın halinde bulunan verilerden düzen yaratıp nedensellik oluşturarak edinir (insan bilgisini sistematik bir şekilde formüle etmek)- artan bir şekilde önem kazanmaktadır. İnsanın yetenekleri dünyayı algılamakta ve derin muhakeme etmekte sınırlı kaldığından, kendisini eksik bilgiden kaynaklanan –genellikle de ölçmedeki belirsizlikler nedeniyle- bir belirsizlik ile karşı karşıya bulur. Diğer bir kısıtlayıcı faktör de bilgiyi, iletişimi... vb tanımlama ve paylaşmada kullanılan doğal dildir. İnsan, dünyanın temel anlamını kavrayabilir ve kabul edilebilir bir doğruluk payı ile iletişim kurabilir; fakat genelde tam olarak tek bir kelime ya da genel anlam üzerinde anlaşılamaz. Kısacası, doğal diller muğlâktır [26]. İnsanın gerçek dünyayı algısında çok, uzun, daha büyük, genç, vs. gibi sınırları keskin tanımlı olmayan belirteçler kullanılmaktadır. Bu belirteçler belli bir oranda doğru ve belli bir oranda yanlıştır. Bu yaklaşım bulanık mantık olarak adlandırılmaktadır.

Bulanık mantık kavramı ilk defa 1965 yılında matematikçi, elektrik mühendisi ve bilgisayar bilimcisi olan Prof. Lotfi A. Zadeh'in konu hakkındaki makalelerini yayınlaması ile duyuldu. Zadeh, Aristo mantığına alternatif olarak önerdiği bu yeni yaklaşımda bulanık kümeleri temel aldı. Klasik kümelerde bir varlık ilgili kümenin ya elemanıdır ya da değildir yani varlık matematiksel olarak üyelik ilişkisi bakımından ya o kümeye aittir (1) ya da o kümeye ait değildir (0). Zadeh'in ortaya attığı bulanık kümelerde ise bir varlık kümeye matematiksel olarak üyelik ilişkisi bakımından $[0,1]$ aralığındaki bir değer kadar aittir.

Bulanık mantıkta, bilgisayar mantığında kullanılan ve sınırları keskin bir çizgi ile ayrılmış var - yok, siyah - beyaz, 1 - 0, doğru - yanlış, sıcak - soğuk kavramları yerine insan düşünce sisteminde kullanılan ve sınırları yumuşak geçişlerle tanımlanmış

“ılık”, “nemli”, “orta”, “biraz” gibi kesin olmayan ve bir miktar belirsizlik ifade eden kavramlar kullanılır. Örnek olarak bir otoyolda araçlar için tehlikeli olarak tanımlanan hız sınırı 120 km/s olsun. Klasik mantık kullanılarak verilecek olan bir kararda bu yolda 119,5 km/s hızla giden araç tehlikesiz olarak tanımlanmaktadır. Bulanık mantık kullanılarak bir karar verilecek olsa bu aracın tehlikeli hızda giden bir araç olduğu ortaya çıkacak idi. Bulanık mantık, yukarıdaki örnekte olduğu gibi, karar mekanizmasına esneklik getirir. Böylelikle, makine ve bilgisayarlara insaninkine yakın bir karar verme mekanizması kazandırır. Bu mekanizma tamamen matematiksel temellere dayanır ve çok değerli mantığın, olasılık teorisinin, yapay zekânın ve sinir ağlarının birleşimi ile oluşur.

2.2 Bulanık Mantık Uygulamaları

1970’li yılların başında Avrupa’da ilk endüstriyel bulanık mantık uygulamaları görülmeye başlandı. Londra’da Queen Mary College’da profesör olan Ebrahim Mamdani geleneksel teknikler ile kontrol edemediği buhar jeneratörünü bulanık mantık kullanarak kontrol etti. Almanya Aachen’daki RWTH Üniversitesi’den Hans Zimmermann yine bulanık mantık kullanarak tasarladığı karar destek sistemlerini sanayi dünyasına tanıttı. Danimarka Kopenhag’da F. L. Smith tarafından uygulanan çimento fabrikası değirmen sıcaklık ve oksijen kontrolü de ilk bulanık mantık uygulamalarından biri olarak sayılır [27].

Japonya’nın Sendai şehrindeki Nanboku Hattı’nda Hitachi firması tarafından 1987 yılında uygulanan bulanık mantık tabanlı sistemde trenin kalkışında ve durmasında oluşan sarsıntı yüksek bir oranda azaltılarak harcanan enerji insan kontrollü sisteme göre %10 oranında düşürülmüştür [28]. Yine Japonya’da Yamaichi Securities şirketi bulanık mantık kullanarak ürettiği uzman karar verme sistemi ile yıllık yaklaşık 350 milyon \$’lık bir pazarı yönetebilmektedir [29].

Bulanık mantık sadece endüstride değil aynı zamanda akademik dünyada da sıklıkla kullanılmaktadır. Kontrol, sistem tanıma, sistem modelleme, sınıflama, kümeleme, uzman sistemler, yapay zekâ, makine öğrenimi ve sinyal işleme akademik dünyada bulanık mantığın kullanıldığı çalışma alanlarından sadece birkaçıdır.

2.3 Bulanık Kümeler

2.3.1 Tanım

Klasik kümelerde bir x elemanının A kümesine aitliği veya üyeliği (X_A) kesinlik taşır. Denklem (2.1)'den de anlaşılacağı gibi eleman ya kümeye aittir (üyelik fonksiyonu değeri 1'dir), ya da ait değildir (üyelik fonksiyonu değeri 0'dır).

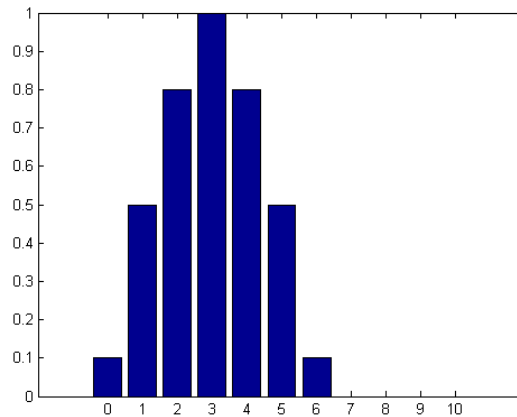
$$X_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x \in A \\ 0, & \text{eğer } x \notin A \end{cases} \quad (2.1)$$

U evrensel kümesi altında A bulanık kümesi ifade (2.2)'deki gibi tanımlanır.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in A, \mu_A(x) \in [0, 1]\} \quad (2.2)$$

Burada $\mu_A(x)$ ifadesine üyelik fonksiyonu adı verilir. $\mu_A(x)$, A bulanık kümesindeki keskin (crisp) değerli her x elemanına karşılık düşen üyelik derecesini ifade eder. Üyelik fonksiyonu her zaman $[0,1]$ aralığında tanımlanır. $\mu_A(x)$ değeri 1'e ne kadar yakın olursa x elemanı A bulanık kümesine o kadar aittir.

Örnek olarak, 3 sayısına yakın olan sayıların yazara göre oluşturduğu bulanık A kümesi ele alınırsa 0'dan 8'e kadar olan x değerlerinin üyelik fonksiyonları Şekil 2.1'deki gibi gözükmemektedir [30].



Şekil 2.1: 3'e yakın sayılar bulanık kümesinin üyelik fonksiyonları.

Denklem (2.2)'deki bulanık küme tanımından yola çıkılarak yukarıdaki örnekteki A bulanık kümesi, Denklem (2.3)'teki gibi tanımlanabilir.

$$A = \{(0, 0.1), (1, 0.5), (2, 0.8), (3, 1), (4, 0.8), (5, 0.5), (6, 0.1), (7, 0)\} \quad (2.3)$$

2.3.2 Bulanık kümelerde temel kavramlar

Bulanık kümelerin tanımlanabilmeleri için aşağıdaki kavramlara ihtiyaç vardır.

Merkez (Core)

Denklem (2.4)'ten de anlaşılacağı gibi bir A bulanık kümesi için üyelik fonksiyonu değeri 1 olan bütün x elemanlarının oluşturduğu kümedir.

$$core(A) = \{x | \mu_A(x) = 1\} \quad (2.4)$$

Sınır (Boundary)

Bir A bulanık kümesi için üyelik fonksiyonu değeri $0 < \mu_A(x) < 1$ olan bütün x elemanlarının oluşturduğu kümedir.

Dayanak (Support)

Denklem (2.5)'ten de anlaşılacağı gibi bir A bulanık kümesi için üyelik fonksiyonu değeri $\mu_A(x) > 0$ olan bütün x elemanlarının oluşturduğu kümedir.

$$supp(A) = \{x | \mu_A(x) > 0\} \quad (2.5)$$

Yükseklik (Height)

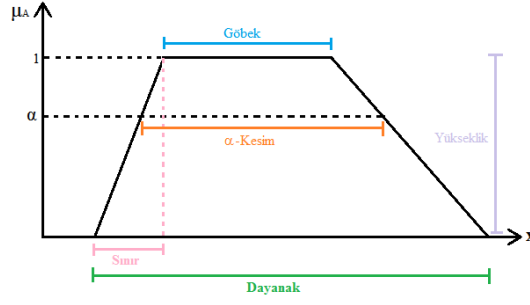
Denklem (2.6)'dan da anlaşılacağı gibi bir A bulanık kümesi için üyelik fonksiyonunun en yüksek değeri o bulanık kümenin yüksekliğidir.

$$hgt(A) = \sup_{x \in A} \mu_A(x) \quad (2.6)$$

α -kesimi (α -cut)

Bir A bulanık kümesi için üyelik fonksiyonunun α 'ya eşit veya büyük olan bütün x elemanlarının oluşturduğu kümedir.

Şekil 2.2'de üçgen (trapezoidal) bir üyelik fonksiyonu için bulanık kümelerdeki temel kavramlar gösterilmiştir.

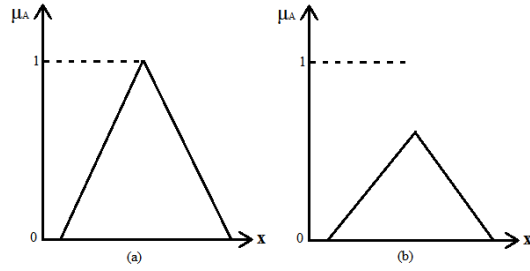


Şekil 2.2: Bulanık kümelerde temel kavramlar.

2.3.3 Bulanık kümelerin sınıflandırılması

Bulanık kümeler üyelik fonksiyonlarına göre sınıflandırılırlar. Sınıflandırma tanımları aşağıdakiler gibidir.

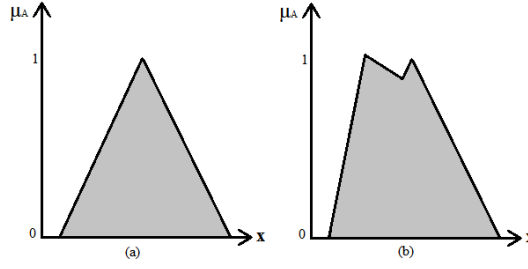
1. *Normal (Olağan) Bulanık Küme:* En az bir elemanın üyelik fonksiyonu değeri 1 olan bulanık kümedir. Şekil 2.3 (a)'da gösterilen bulanık küme normal bulanık kümedir.
2. *Olağanaltı Bulanık Küme:* Yüksekliği 1'den küçük olan bulanık kümedir. Şekil 2.3 (b)'de gösterilen bulanık küme olağanaltı bulanık kümedir.



Şekil 2.3: Olağan ve olağanaltı bulanık küme.

3. *Konveks ve Konveks Olmayan Bulanık Küme:* Eğer $[0,1]$ aralığında herhangi bir λ sayısı için ifade (2.7) doğru ise, A bulanık kümesi konvekstir, değilse konveks değildir. Şekil 2.4'te konveks ve konveks olmayan bulanık kümeler (a) ve (b) durumlarında sırayla gösterilmektedir.

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)] \quad (2.7)$$



Şekil 2.4: Konveks ve konveks olmayan bulanık küme.

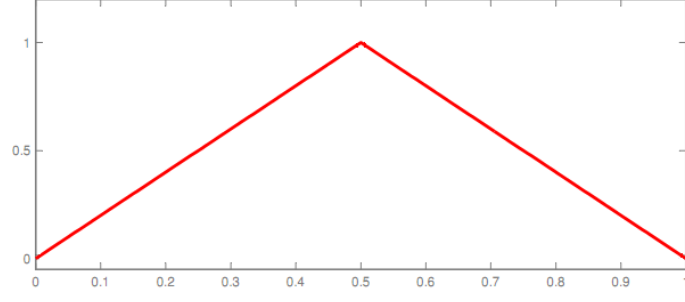
2.3.4 Üyelik fonksiyonları

Önceki bölümlerde de üzerinde durulduğu gibi bulanık kümelerde esas olan kesinlik içermeyen bir yapıya sahip olmalarıdır. Bir elemanın bulanık bir kümeye üyeliği belirsizlikler içerebilir ve bu da o elemanın kümeyle olan bağlılık derecesi ile ilgilidir. Örneğin, bir kişinin “uzun insanlar” bulanık kümesine olan üyeliği, o insanın bulanık küme tarafından tanımlanan uzun olmanın koşullarını ne kadar taşıdığına bağlıdır [30].

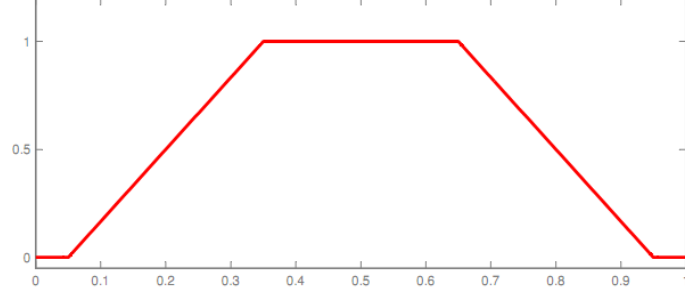
Her bulanık küme özel bir üyelik fonksiyonu ile ifade edilir. Bu kümeleri tanımlayan üyelik fonksiyonu tipinin belirlenmesi konusu bulanık küme teorisinde çok önemli bir yer teşkil etmektedir.

Üyelik fonksiyonu tipinin belirlenmesinde iki önemli yaklaşım vardır. Birinci yaklaşım insan tecrübesinin formüle edilmesidir. Bu yaklaşımla üyelik fonksiyonu için genel bir formül çıkarılabilmekte ancak sonraki aşamada bu fonksiyonun bir şekilde iyileştirilmesi gerekmektedir. İkinci yaklaşım da sistemden algılayıcılarla bilgiler toplanıp üyelik fonksiyonunun oluşturulmasıdır. Bu yaklaşımda da öncelikle üyelik fonksiyonu tipi belirlenir ve sonrasında da toplanan bilgiler kullanılarak seçilen üyelik fonksiyonu iyileştirilir.

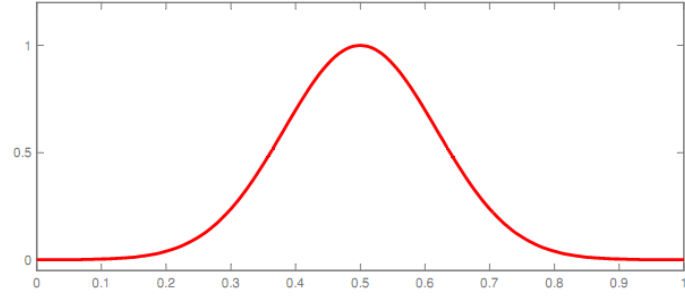
Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de en sık kullanılan üyelik fonksiyonu tipleri gösterilmektedir.



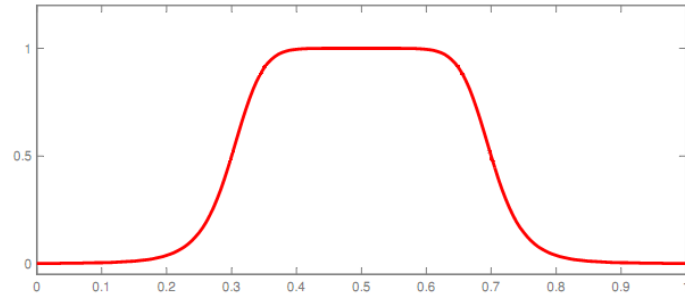
Şekil 2.5: Üçgen tipi üyelik fonksiyonu.



Şekil 2.6: Trapezoid tipi üyelik fonksiyonu.



Şekil 2.7: Gauss tipi üyelik fonksiyonu.



Şekil 2.8: Gauss bell tipi üyelik fonksiyonu.

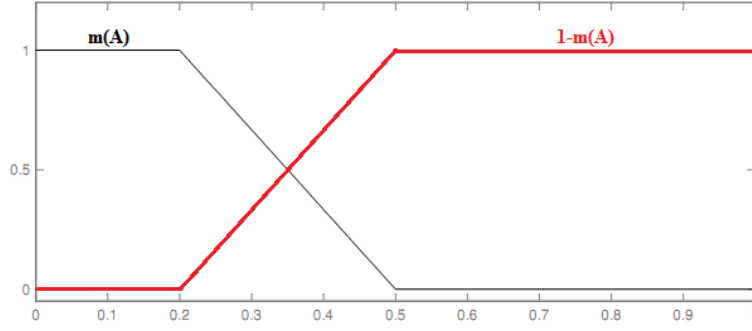
2.3.5 Bulanık kümelerde işlemler

U evrensel kümesi altındaki bulanık A kümesi için tümleme, kesişim ve birleşim işlemleri aşağıdaki alt bölümlerde tanımlanmıştır.

2.3.5.1 Tümlleme işlemi

Tümleyen A bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu olan $\mu_{\bar{A}}(x)$ ifade (2.8)'deki gibi tanımlanır.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \forall x \in U \quad (2.8)$$

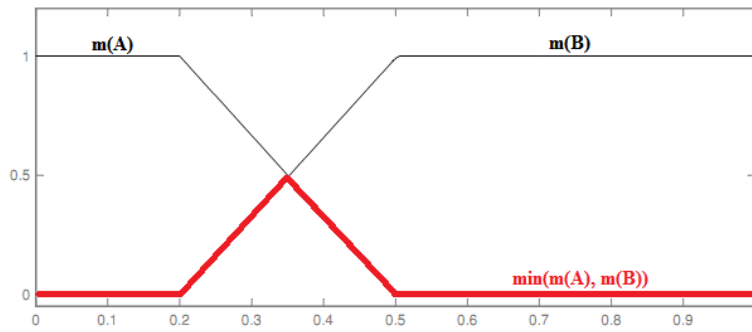


Şekil 2.9: Bulanık A ve tümleyen A kümeleri.

2.3.6 Kesişim işlemi

Bulanık A ve B kümelerinin kesişim üyelik fonksiyonu olan $\mu_{A \cap B}(x)$ ifade (2.9)'daki gibi tanımlanır.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.9)$$

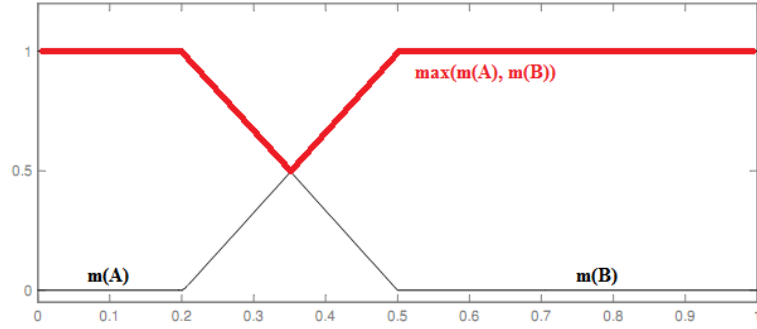


Şekil 2.10: Bulanık A ve B kümelerinin kesişim işlemi.

2.3.7 Birleşim işlemi

Bulanık A ve B kümelerinin birleşim üyelik fonksiyonu olan $\mu_{A \cup B}(x)$ ifade (2.10)'daki gibi tanımlanır.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.10)$$



Şekil 2.11: Bulanık A ve B kümelerinin birleşim işlemi.

2.3.8 T-normları ve S-normları

Bulanık kümelerde birleşim ve kesişim işlemlerini modelleyen *min* ve *max* operatörlerinin yanında bu işlemlerin yerine geçen birçok operatör vardır. Bulanık mantık teorisinde kesişim operatörleri t-normları, birleşim operatörleri de s-normları diye adlandırılır. Çizelge 2.1’de en sık kullanılan t-normları ve s-normları gösterilmektedir [31].

Çizelge 2.1: T-normları ve S-normları.

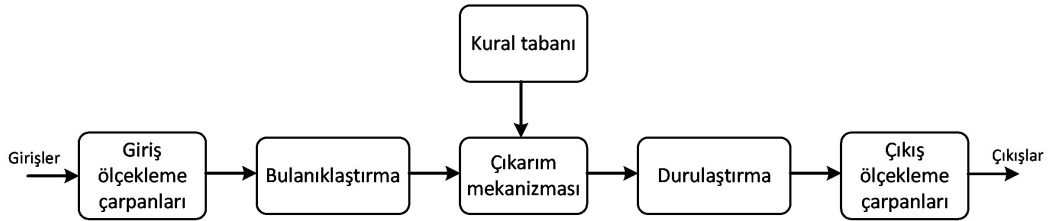
t-norm: VE	s-norm : VEYA
Minimum $\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	Maksimum $\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Cebirsel çarpım $\mu_A(x)\mu_B(x)$	Cebirsel toplam $\mu_A(x) + \mu_B(x)$
Lukasiewicz "VE" (Sınırlı fark) $\max(0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1)$	Lukasiewicz "VEYA" (Sınırlı toplam) $\max(1, \mu_A(x) + \mu_B(x))$
Einstein çarpımı $\frac{\mu_A(x)\mu_B(x)}{2 - (\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x))}$	Einstein toplamı $\frac{\mu_A(x) + \mu_B(x)}{1 + \mu_A(x) + \mu_B(x)}$
Hamacher çarpımı $\frac{\mu_A(x)\mu_B(x)}{\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x)}$	Hamacher toplamı $\frac{\mu_A(x) + \mu_B(x) - 2\mu_A(x)\mu_B(x)}{1 - \mu_A(x)\mu_B(x)}$
Yager operatörü $1 - \min(1, [(1 - \mu_A(x))^b + (1 - \mu_B(x))^b]^{1/b})$	Yager operatörü $\min(1, (\mu_A(x)^b + \mu_B(x)^b)^{1/b})$

3. BULANIK SİSTEMLER

3.1 Giriş

Bulanık sistemlerin büyük bir kısmı *eğer – o halde* kuralları aracılığı ile tanımlanır. Bu tür sistemler *kural tabanlı bulanık sistemler* olarak adlandırılır.

En genel anlamıyla bulanık sistemin ana ögeleri bulandırıcı, bulanık kural tabanı, çıkarım mekanizması ve durulayıcıdır. Bu ögelere giriş ve çıkışta ölçekleme çarpanları da eklenerek bulanık sistem tamamlanmış olur. Sistemin girişine uygulanan işaret veya bulanık kümeye girecek olan eleman öncelikle giriş ölçekleme çarpanı adı verilen bir katsayı ile çarpılarak bulanık sistem için anlamlı bir hale getirilir. Bulandırıcı birim sisteme giren keskin işareti üyelik fonksiyonlarını kullanarak bulanık değerlere çevirir. Sonrasında kural tabanında belirtilen kurallar ve çıkarım mekanizmasında tanımlanan operatörler kullanılarak bulanık sistem için çıkış değeri hazırlanır. Çıkış değeri bulanık bir değer olduğundan burada durulayıcı ögesi devreye girer ve bulanık değeri keskin değere çevirir. Son olarak sistemin çıkışında oluşan değer çıkış ölçekleme çarpanı ile çarpılarak dış dünya için veya çıkışta bulunan birim için uygun hale getirilir. Şekil 3.1’de bulanık bir sistemin iç yapısı gösterilmiştir.

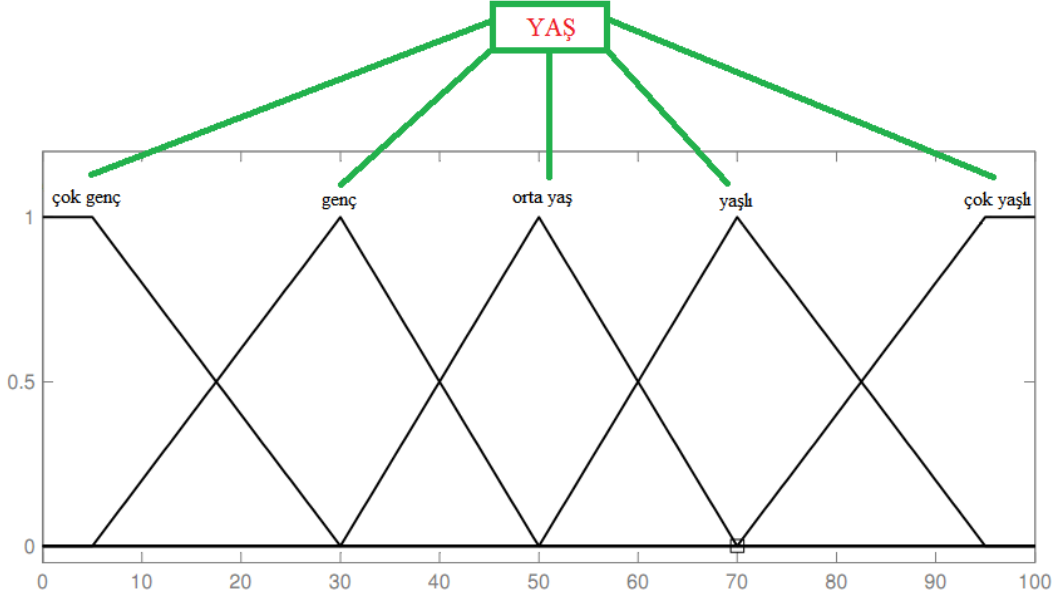


Şekil 3.1: Bulanık sistemin iç yapısı.

3.2 Dilsel Değişkenler

Doğal ve yapay dillerde değerleri kelimeler ve cümleler olan değişkenlere dilsel değişkenler denir. Dilsel değişken kavramının daha iyi anlaşılabilmesi için “yaş” değişkeni ele alınsın. “Yaş” kavramı, bireylerin muazzam sayıdaki deneyimlerinin

bir çıkarımıdır ve hiçbir zaman tam olarak tanımlanamamıştır fakat bulanık kümeler kullanılarak “yaş” kavramı yaklaşık olarak tanımlanabilir. “Yaş”, değerleri “çok genç”, “genç”, “orta yaş”, “yaşlı” ve “çok yaşlı” olan dilsel bir değişkendir. Bu değerler “yaş” dilsel değişkeninin terimleridir, yıllar ile ifade edilen çalışma uzayında tanımlanıp bulanık kümelerle ifade edilir. Şekil 3.2’de görüleceği gibi, her bir terim kendisine uygun yaklaşık bir üyelik fonksiyonuyla ifade edilmektedir.



Şekil 3.2: "Yaş" dilsel değişkeninin terimleri.

Denklem (3.1), Denklem (3.2), Denklem (3.3), Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'te yukarıdaki terimlerin üyelik fonksiyonları görülmektedir.

$$\mu_{\text{çok genç}}(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 5 \\ \frac{30-x}{25}, & 5 \leq x < 30 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\mu_{\text{genç}}(x) = \begin{cases} \frac{x-5}{25}, & 5 \leq x < 30 \\ \frac{50-x}{20}, & 30 \leq x < 50 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\mu_{\text{orta yaş}}(x) = \begin{cases} \frac{x-30}{20}, & 30 \leq x < 50 \\ \frac{70-x}{20}, & 50 \leq x < 70 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\mu_{\text{yaşlı}}(x) = \begin{cases} \frac{x-50}{20}, & 50 \leq x < 70 \\ \frac{95-x}{25}, & 70 \leq x < 95 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\mu_{\text{çok yaşlı}}(x) = \begin{cases} \frac{x-70}{25}, & 70 \leq x < 95 \\ 1, & 95 \leq x < 100 \end{cases} \quad (3.5)$$

3.3 Dilsel Niteleyiciler

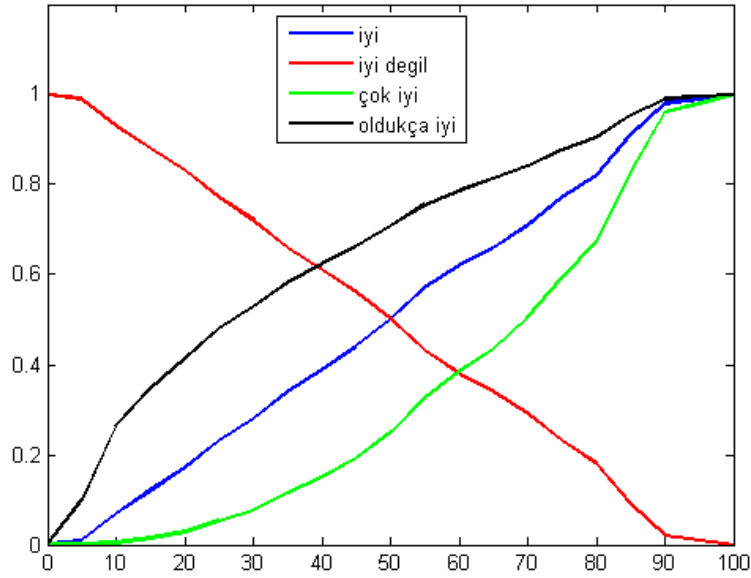
U evrensel kümesi altındaki bulanık A kümesi için üyelik fonksiyonu $\mu_A(x)$ ve dilsel niteleyici m olsun. Bu durumda mA ifadesi nitelenmiş bir bulanık kümeyi, $\mu_{mA}(x)$ ifadesi de nitelenmiş bulanık kümenin üyelik fonksiyonunu gösterir. Denklem (3.6), Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'de sıklıkla kullanılan niteleyiciler gösterilmektedir.

$$\text{değil} : \mu_{\text{değil } A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.6)$$

$$\text{çok} : \mu_{\text{çok } A}(x) = [\mu_A(x)]^2 \quad (3.7)$$

$$\text{oldukça} : \mu_{\text{oldukça } A}(x) = [\mu_A(x)]^{1/2} \quad (3.8)$$

Şekil 3.3'te bazı dilsel niteleyicilerin “iyi” dilsel değişkeninin üyelik fonksiyonları üzerindeki etkileri gösterilmektedir.



Şekil 3.3: "İyi" dilsel değişkeninin niteleyicileri.

3.4 Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma, keskin değerleri, değişik şekillerdeki (üçgen, trapezoid, gauss bell, ... vs) giriş üyelik fonksiyonları kullanarak bulanık değerlere çevirme işlemidir ve

bulanıklaştırma işlemi bulanıklaştırıcı tarafından yapılır. Bulanık kümeler, bulanık sistemin kural tabanı için giriş bilgisi oluşturduğundan ve çıkarım mekanizmasının da bulanık kümeler üzerinde işlem yapmasından ötürü bulanık sisteme gelen keskin bilginin bulanıklaştırıcı tarafından bulanıklaştırılması gerekmektedir.

3.5 Kural Tabanı

Kural tabanı bulanık sistemlerdeki *eğer – o halde* kuralları tarafından oluşur. Kural tabanında bulunan kurallar da sistemin giriş ve çıkışı arasındaki ilişkiyi sağlarlar. x_1 ve x_2 girişli y çıkışlı bir bulanık sistem için Denklem (3.9)'da örnek bir kural gösterilmektedir.

$$\text{Eğer } x_1 = A_1 \text{ ve } x_2 = A_2 \text{ ise o halde } y = B \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'da x_1 ve x_2 terimleri skaler girişleri A_1 ve A_2 terimleri bulanık kümeler ile ifade edilen giriş dilsel değişkenlerini, B 'de yine bulanık kümeler ile ifade edilen çıkış dilsel değişkenini ifade etmektedir.

3.6 Çıkarım Mekanizması

Çıkarım mekanizması bulanık sistemin en önemli ögesidir ve iki önemli görevi vardır. Çıkarım mekanizması ilk olarak girişlere bakarak kural tablosundaki her bir kuralın ne kadar ateşlendiğini bulur ve sonrasında da girişleri, ateşleme açılarını ve kural tabanını kullanarak çıkışları hesaplar.

Çıkarım mekanizması çeşitleri kural tabanında bulunan kurallardaki çıkış yapısına bağlı olarak en genel haliyle Mamdani [32], Singleton ve Takagi – Sugeno [33] olarak ayrılırlar.

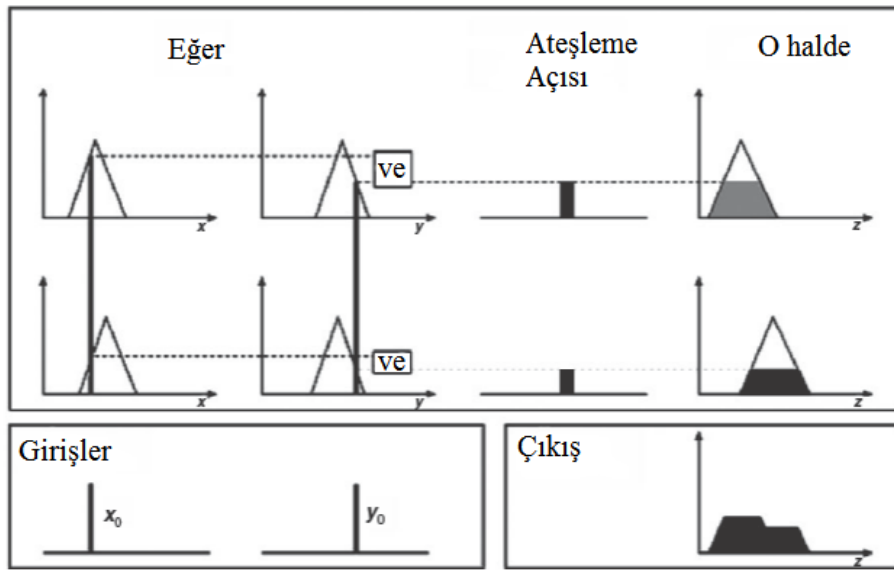
3.6.1 Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizması

Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizması 1975 yılında Mamdani ve Assilian tarafından bulunmuştur [34]. Bu çıkarım mekanizmasında, kural tabanında bulunan kurallardaki giriş ve çıkışlar dilsel değişkenler ile Denklem (3.10)'daki gibi tanımlanır.

$$K_i: \text{Eğer } x = A_i \text{ ise o halde } y = B_i \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'da, x skaler girişi, A_i 'ler giriş B_i 'ler de çıkış dilsel değişkenlerini ifade etmektedir.

Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizmasında, çıkış üyelik fonksiyonları bulanık kümelerden oluşmaktadır. Çıkarım mekanizmasında ve operasyonu çalıştıktan sonra her bir kural için durulaştırma gerektiren bulanık kümeler oluşur. Şekil 3.4'teki sistemde iki girişli ve iki kurallı Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizması gösterilmektedir.



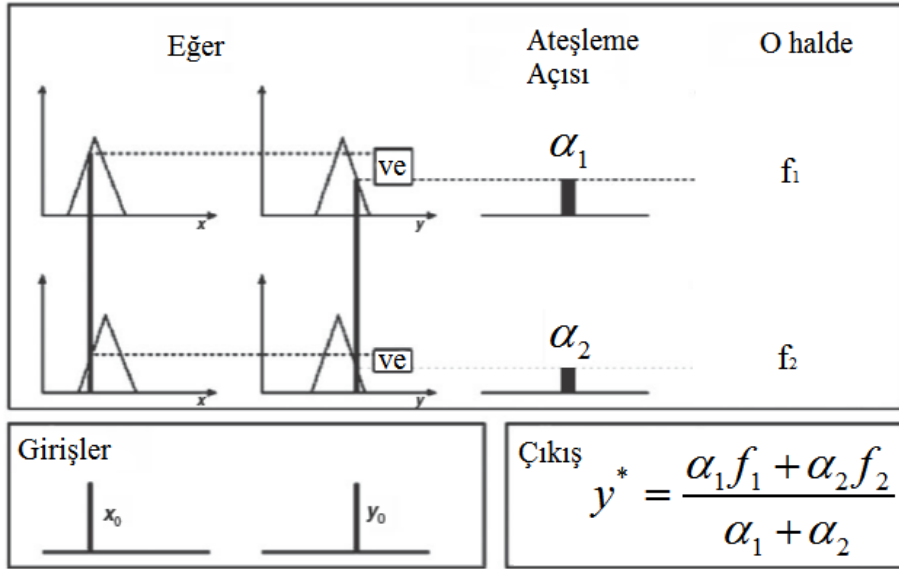
Şekil 3.4: İki giriş iki kural Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizması.

3.6.2 Takagi - Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması

Takagi - Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması 1985 yılında Takagi ve Sugeno tarafından bulunmuştur. Takagi ve Sugeno, kural tabanında bulunan kurallardaki girişleri dilsel değişkenler, çıkışları ise keskin fonksiyonlar ile Denklem (3.11)'deki gibi tanımlamıştır.

$$K_i: \text{Eğer } x = A_i \text{ ise o halde } y = f_i(x) \quad (3.11)$$

Şekil 3.5'teki sistemde iki girişli ve iki kurallı Takagi - Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.5: İki giriş iki kural Takagi - Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması.

3.6.3 Tekli (Singleton) tip yapı için çıkarım mekanizması

Tekli tip yapı için çıkarım mekanizması Mamdani ve Takagi – Sugeno tip yapılar için çıkarım mekanizmalarının özel bir halidir. Bu çıkarım mekanizmasında, kural tabanında bulunan kurallardaki girişler dilsel değişkenler, çıkışlar ise sabit keskin değerler ile Denklem (3.12)’deki gibi tanımlanır.

$$K_i: \text{Eğer } x = A_i \text{ ise o halde } y = b_i \quad (3.12)$$

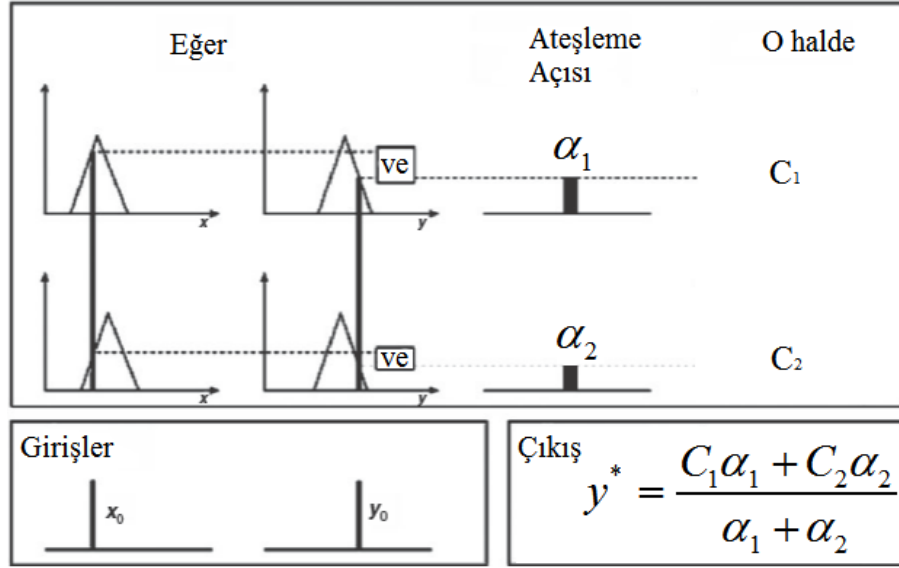
Şekil 3.6’daki sistemde iki girişli ve iki kurallı tekli tip yapı için çıkarım mekanizması gösterilmektedir.

3.6.4 Mamdani ve Takagi – Sugeno yöntemlerinin üstünlükleri

Aşağıdaki iki listede Mamdani ve Takagi – Sugeno yöntemlerinin avantajları gösterilmektedir [26].

Mamdani Yöntemi

- Sezgiseldir
- Çok yaygındır
- İnsan düşüncesine uygundur



Şekil 3.6: İki giriş iki kural tekli tip yapı için çıkarım mekanizması.

Takagi – Sugeno Yöntemi

- İşlemsel olarak verimlidir (İşlem zamanı düşüktür)
- Doğrusal teknikler ile iyi çalışır
- Optimizasyon ve adaptif teknikler ile iyi çalışır
- Çıkış yüzeyinin sürekliliğini garanti eder
- Matematiksel analize uygundur

3.7 Durulaştırma

Bulanık çıkarım mekanizmasının çalışması sonucunda oluşan ve sisteme verilecek olan bilginin keskin bir değere döndürülmesi işlemine durulaştırma denir. Durulaştırma işlemi literatürde birçok şekilde yapılmaktadır. En çok kullanılan durulaştırma yöntemleri ağırlık merkezi yöntemi, ağırlık ortalaması yöntemi ve maksimum yöntemidir. Durulaştırma işlemi için seçilen yöntemin sisteme olan etkileri ihmal edilebilir düzeydedir.

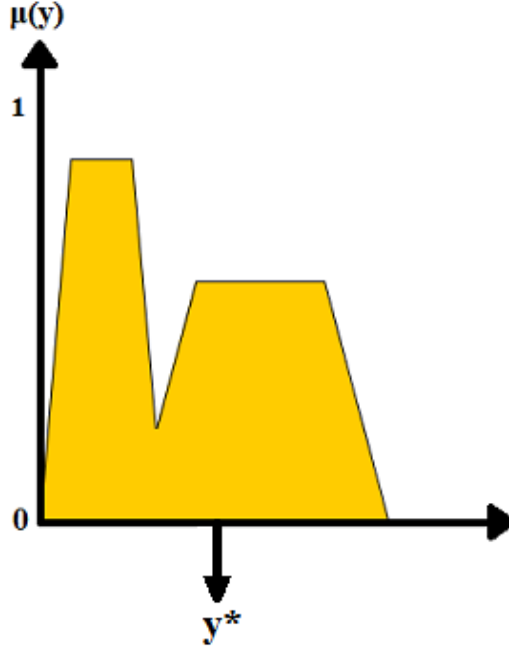
3.7.1 Ağırlık merkezi yöntemi

Ağırlık merkezi yöntemi en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde çıkarım mekanizması sonucunda oluşan alanların ağırlık merkezi bulunur ve durulaştırma ile

keskin bir değer olarak hesaplanır. Denklem (3.13)'te ağırlık merkezi yönteminin matematiksel tanımı gösterilmektedir.

$$y^* = \frac{\int_U y \mu_u(y) dy}{\int_U \mu_u(y) dy} \quad (3.13)$$

Şekil 3.7'de farklı ateşleme açıları ile tetiklenen iki çıkış üyelik fonksiyonunun birleşmesi (union) ile oluşan alanın ağırlık merkezi grafiksel olarak gösterilmektedir.



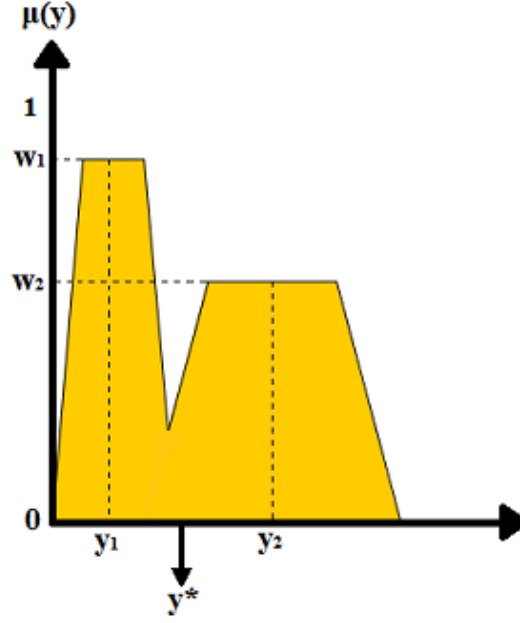
Şekil 3.7: Alanın ağırlık merkezi.

3.7.2 Ağırlık ortalaması yöntemi

Ağırlık ortalaması yöntemi genelde simetrik çıkış üyelik fonksiyonları oluştuğunda kullanılır. Her bir üyelik fonksiyonu maksimum değeri ile ağırlıklandırılarak çıkış değeri hesaplanır. Denklem (3.14)'te ağırlık ortalaması yönteminin formülasyonu gösterilmektedir.

$$y^* = \frac{\sum \mu_u(y)y}{\sum \mu_u(y)} \quad (3.14)$$

Şekil 3.8'de ve Denklem (3.15)'te ağırlık ortalaması yöntemi ile durulaştırma rneęi gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Alanın ağırlık ortalaması.

$$y^* = \frac{w_1 y_1 + w_2 y_2}{w_1 + w_2} \quad (3.15)$$

3.7.3 Maksimum yöntemi

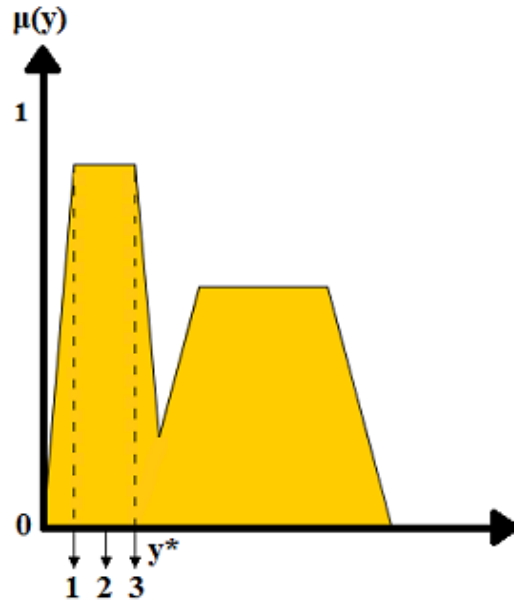
Maksimum yönteminde öncelikle yüksekliği en büyük olan alan bulunur ve ardından üç farklı tekniğe göre durulaştırma işlemi gerçekleştirilir. İlk teknikte en yüksek alanın başlangıç değeri, ikinci teknikte en yüksek alanın orta değeri ve üçüncü teknikte de en yüksek alanın bitiş değeri durulaştırılmış keskin değer olarak belirlenir. Bu üç tekniğin formülasyonları Denklem (3.16)'da, (3.17)'de ve (3.18)'de verilmektedir.

$$y_1^* = \inf y \in Y | \mu_Y(y) = hgt(Y) \quad (3.16)$$

$$y_3^* = \sup y \in Y | \mu_Y(y) = hgt(Y) \quad (3.17)$$

$$y_2^* = \frac{y_1^* + y_3^*}{2} \quad (3.18)$$

Şekil 3.9'dan, ifadeleri verilen üç yöntemin de grafiksel açıklaması kolaylıkla görülebilir.



Şekil 3.9: Alanın maksimumları.

4. GAMA OPERATÖRÜ

Literatürde γ operatörünün iki farklı gösterimi bulunmaktadır: üstel [20], [21], [23], [35] ve doğrusal [23]. Üstel ve doğrusal gösterimler sırasıyla Denklem (4.1)'de ve Denklem (4.2)'de yer almaktadır.

$$f_{\text{üstel}}(\mu_1, \mu_2, \gamma) = (\mu_1 \cdot \mu_2)^{1-\gamma}(\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \cdot \mu_2)^\gamma \quad (4.1)$$

$$f_{\text{doğrusal}}(\mu_1, \mu_2, \gamma) = (1 - \gamma)(\mu_1 \cdot \mu_2) + \gamma(\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \cdot \mu_2) \quad (4.2)$$

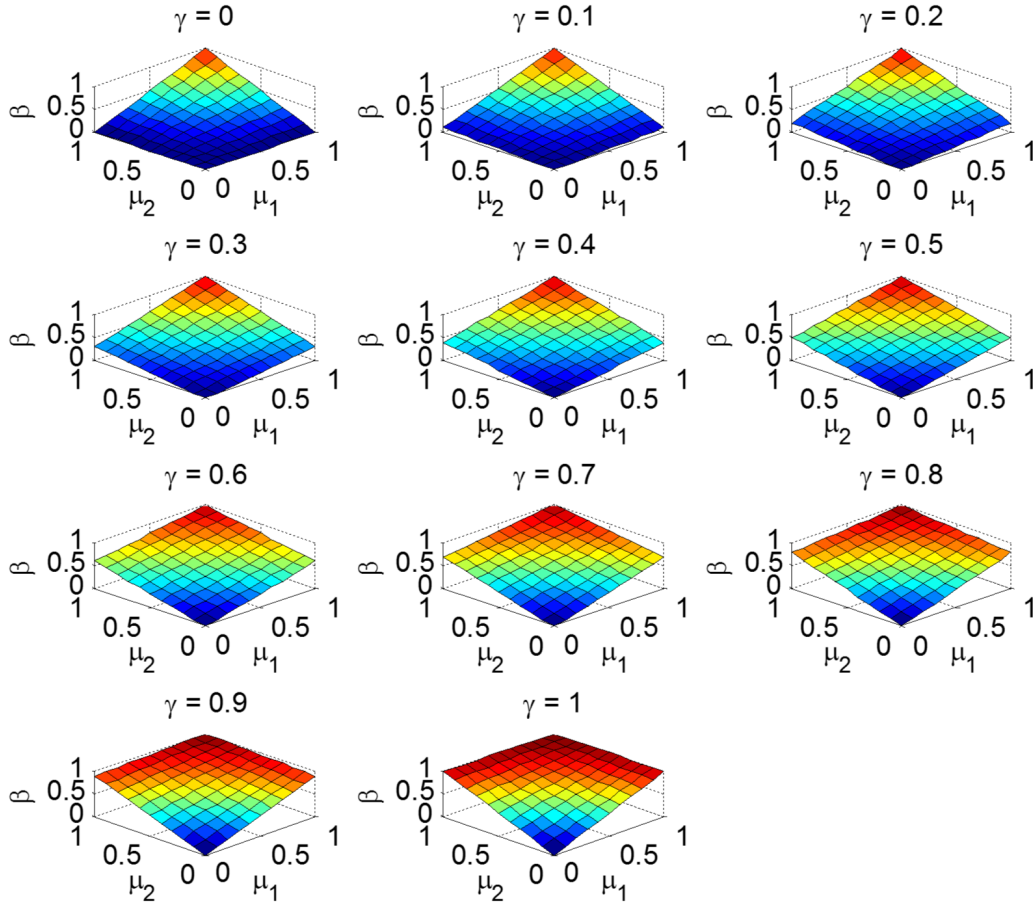
Yukarıdaki ifadelerde μ_1 ve μ_2 bulanık kontrolörün girişlerine ait üyelik derecelerini göstermektedir. Bu iki ifadenin ortak yanı aynı terimleri içermesidir: bulanık cebirsel çarpım (VE) ve bulanık cebirsel toplam (VEYA). Denklem (4.3) ve Denklem (4.4) bu operatörlere ait tanımları göstermektedir.

$$\mu_{A \cap B} = \mu_A \cdot \mu_B \quad (4.3)$$

$$\mu_{A \cup B} = \mu_A + \mu_B - \mu_A \cdot \mu_B \quad (4.4)$$

γ değerinin tanım aralığı $[0, 1]$ 'dir ve γ bu aralıkta değiştikçe aslında gerek üstel gerekse doğrusal γ operatörü çıkışında VE ile VEYA operatörlerinin harmanlanmasını verir. γ değeri 0'a yaklaştığında VE fonksiyonu ağırlık kazanırken, 1'e yaklaştığında ise VEYA fonksiyonu ağırlık kazanmaktadır. Doğrusal γ operatöründe harmanlama işlemi doğrusal sonuçlar verirken, üstel γ operatöründe ise doğrusal olmayan sonuçlar görülmektedir.

Bir bulanık kontrol mekanizmasında herhangi bir girişin üyelik derecesinin $[0, 1]$ aralığında olabileceği göz önünde bulundurularak, iki girişli bir BKM için γ 'nın değişimine bağlı olarak γ fonksiyonunun verdiği çıkışlar Şekil 4.1'de ve Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.1: Doğrusal γ operatörünün $[0, 1]$ aralığındaki tanım uzayında farklı γ değerleri için çıkışları.

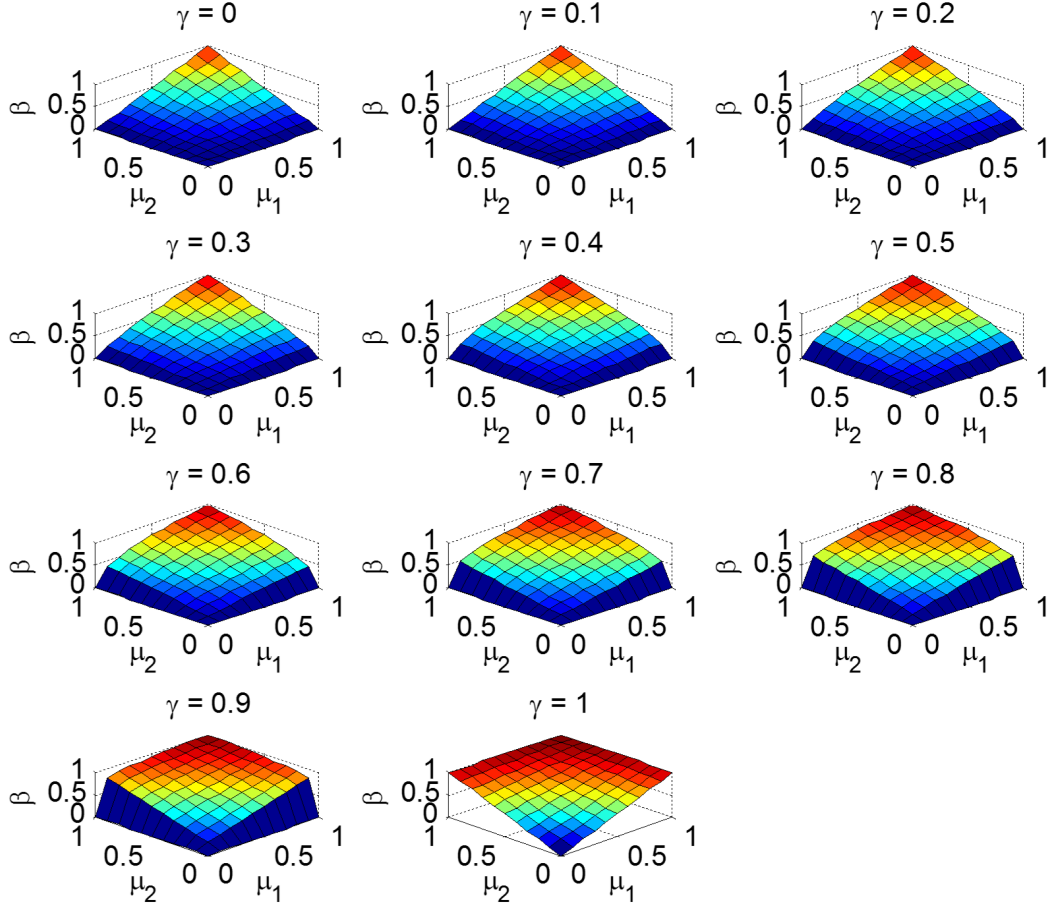
Doğrusal γ fonksiyonunun, girişlerin üyelik derecelerine (μ_1, μ_2) göre değişimi incelendiğinde farklı γ değerleri için operatörün davranışı konusunda bilgi sahibi olunabilir. Eğer Denklem (4.2)'nin, birinci girişin üyelik derecesine göre türevi alınırsa aşağıdaki gibi bir ifade ortaya çıkar.

$$\frac{\partial f}{\partial \mu_1} = \mu_2 - 2\gamma\mu_2 + \gamma \quad (4.5)$$

Ayrıca, Denklem (4.2)'nin, μ_2 'ye göre türevi alınırsa Denklem (4.5)'e çok benzer bir denklem elde edilir.

$$\frac{\partial f}{\partial \mu_2} = \mu_1 - 2\gamma\mu_1 + \gamma \quad (4.6)$$

Yorumlamanın kolaylaştırılması için Denklem (4.5) ve Denklem (4.6) düzenlenebilir.



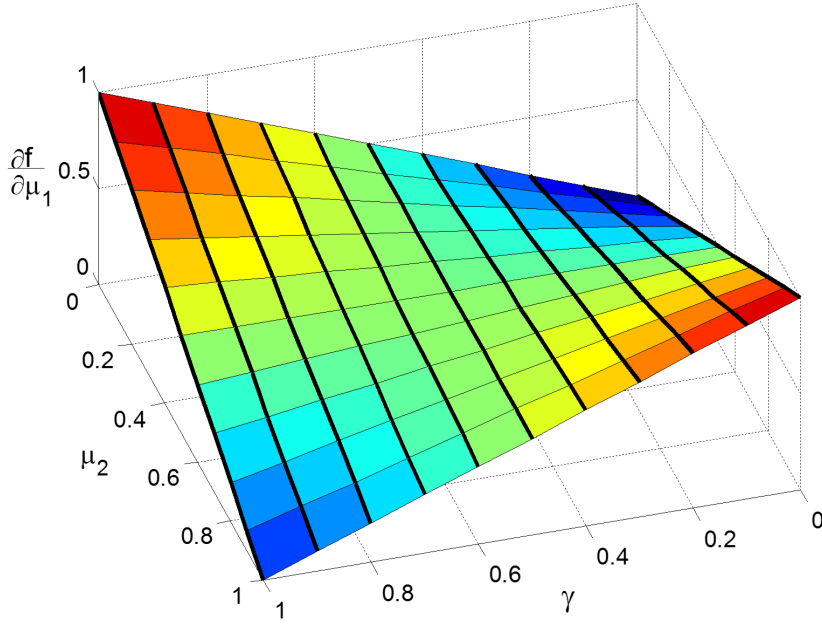
Şekil 4.2: Üstel γ operatörünün $[0, 1]$ aralığındaki tanım uzayında farklı γ değerleri için çıkışları.

$$\frac{\partial f}{\partial \mu_1} = \gamma(1 - 2\mu_2) + \mu_2 \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mu_2} = \gamma(1 - 2\mu_1) + \mu_1 \quad (4.8)$$

Denklem (4.7) ve Denklem (4.8) yakından incelendiğinde sabit bir μ_n terimine ek olarak γ ile ağırlıklandırılmış $(1 - 2\mu_n)$ terimi olduğu görülmektedir. μ_n 'in tanım uzayının $[0, 1]$ olduğu hatırlanırsa henüz γ ile ağırlıklandırılmamış ek terimin değer uzayının $[-1, 1]$ olduğu açıktır. Diğer bir deyişle γ ile ağırlıklandırılan terim μ_n üzerinde artırma ya da azaltma etkisi yapabilir. Ancak, bu etkinin yönünü sadece μ_n belirlerken, büyüklüğünü γ 'nın değeri belirler. Şekil (4.3), Denklem (4.7)'nin γ ile değişimini göstermektedir. Aynı durum Denklem (4.8) için de geçerli olmaktadır.

Şekil 4.3'ün, Denklem (4.7)'nin değişen μ_2 'ye ve γ 'ya göre aldığı değerleri içerdiğinden; ve aynı şekilde bu durumun Denklem (4.8)'in değişen μ_1 ve γ için de



Şekil 4.3: γ operatörünün μ_1 'e göre türevinin değişen μ_2 ve γ değerlerine göre çıkışı.

geçerli olduğundan bahsedilmişti. Şekil 4.3'te görülen kalın siyah doğrular Denklem (4.7)'nin μ_2 'ye göre verdiği çıkışları göstermektedir. Bahsi geçen bu doğruların γ 'nın artmasıyla beraber eğiminin değiştiği ve $\gamma = 0.5$ iken Denklem (4.7)'nin ve Denklem (4.8)'in sabit değere sahip olduğu açıktır. Bir yandan bu durum, Şekil 4.1'de $\gamma = 0.5$ değerine sahip yüzeyin düzlem olmasını da açıklamaktadır.

4.1 γ Değişiminin Çözümlemesi

Denklem (4.2) yakından incelendiğinde aslında $\gamma = 0$ için "VE", $\gamma = 1$ için "VEYA" ve $0 < \gamma < 1$ için ise VE ve VEYA terimlerinin harmanlamasını içerdiği görülmektedir. Basit bir çıkarımla $\gamma < 0,5$ için "VE" işleminin, $\gamma > 0,5$ için ise "VEYA" işleminin baskın olarak seçildiği söylenebilir. Böylece, γ 'nın farklı değerlerine göre farklı sonuçlar üretebilecek esnek bir birleştirme operatörü kullanılması mümkün olmaktadır.

"VE", "VEYA" gibi birleştirme operatörlerinin kapalı çevrim sistem cevabı üzerinde ne gibi etkileri olduğu sonraki başlık altında incelenecektir. Bu başlıkta ise γ operatörünün çift giriş-doğrudan tip bulanık PID kontrolör üzerinde ne gibi matematiksel etkileri olduğu incelenecektir. Kullanılan tüm bulanık PID kontrolörler Takagi-Sugeno yapısındadır ve hata ile hatanın türevini $[-1, 1]$ tanım uzayında giriş olarak almaktadır. Girişlere ait tüm üyelik fonksiyonları aynı ve %50 çakışık olacak

şekilde seçilip N (negatif), Z (sıfır), P (pozitif) gibi dilsel değişkenler ile ifade edilmiştir. Takagi-Sugeno formunun bir gereği olarak çıkışa ait üyelik fonksiyonları tekil belirlenmiş ve benzer biçimde adlandırılmıştır.

4.1.1 Kuralların Ateşlenmesi

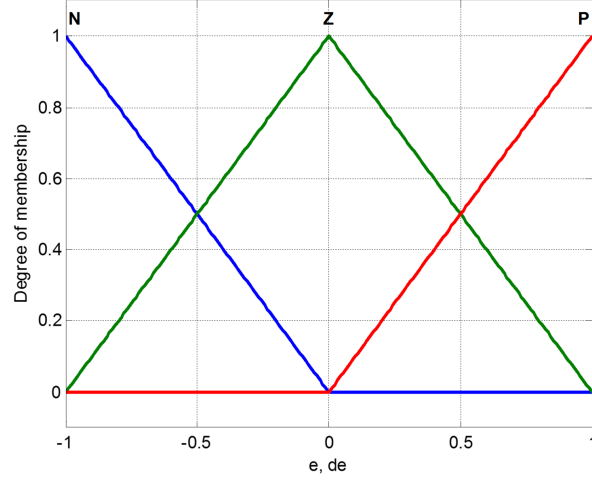
Bir bulanık kontrolörde kaç kural olursa olsun, ateşlenen kural sayısı ilgili girişlere ve birleştirme operatörüne bağlıdır. VE operatörü özel bir hal olduğu için bu operatörün kullanımı esnasında ateşlenen kural sayısı aynı girişler için kullanılacak diğer operatörlere göre en düşük halini almaktadır. Bir örnekle açıklanacak olursa; 2 girişli (hata ve hatanın türevi (e, de)), girişlerine ait üyelik fonksiyonlarının Şekil 4.4'te görüldüğü gibi aynı ve 3 tane (dilsel olarak N, Z, P (sırasıyla negatif, sıfır, pozitif) olarak adlandırılın), ayrıca %50 çakışık olduğu; çıkışa ait yine 3 tane tekil üyelik fonksiyonu (aynı şekilde dilsel olarak N=-1, Z=0, P=1 olarak adlandırılın) olduğu varsayılan bir bulanık kontrolör tasarımı olsun. Bu bulanık mekanizmaya ait kural tablosu ise aşağıda verildiği gibi tasarlansın.

Çizelge 4.1: Tasarlanan örnek BKM için kural tablosu.

Kural		1.Giriş	İşlem	2.Giriş		Çıkış
1.	Eğer	e = N	⊗	de = N	ise o halde	y = N
2.	Eğer	e = Z	⊗	de = N	ise o halde	y = N
3.	Eğer	e = P	⊗	de = N	ise o halde	y = Z
4.	Eğer	e = N	⊗	de = Z	ise o halde	y = N
5.	Eğer	e = Z	⊗	de = Z	ise o halde	y = Z
6.	Eğer	e = P	⊗	de = Z	ise o halde	y = P
7.	Eğer	e = N	⊗	de = P	ise o halde	y = Z
8.	Eğer	e = Z	⊗	de = P	ise o halde	y = P
9.	Eğer	e = P	⊗	de = P	ise o halde	y = P

Üçgen üyelik fonksiyonlarına ait genel tanım Denklem (4.9)'da verilmektedir. Denklemde görülen a ve c değişkenleri üçgenin tabanının köşelerini gösterirken; b değişkeni ise üçgenin tepe noktasının tabana olan izdüşümünü göstermektedir. Bunlardan farklı olarak, x değişkeni üçgen fonksiyonunun girdisidir.

$$f(x;a,b,c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (4.9)$$



Şekil 4.4: Hata ve hatanın türevi için tanımlanan örnek üyelik fonksiyonları.

Bir girişin sahip olduğu üyelik fonksiyonlarına göre üyelik derecelerinin genelleştirilmiş gösterimi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\mu_{m,n}(x) = f_{m,n}(x) \quad (4.10)$$

Burada:

- m, n : sırasıyla girişleri (e, de) ve girişler için tanımlanan dilsel değişkenleri temsil eder (N, Z, P)
- $f_{m,n}$: girişlere ve dilsel değişkenlerine ait her bir üyelik fonksiyonunu gösterir

Daha önceki kısımlarda γ operatörünün VE ile VEYA işlemlerinin harmanlanmasından (üstel ya da doğrusal) oluştuğundan bahsedilmişti. Aslında, γ operatörünün özel bir hali olarak $\gamma = 0$ için yalnızca VE operatörünün, $\gamma = 1$ için ise yalnızca VEYA operatörünün çalıştığı söylenebilir. Bu koşulların incelenmesi için birden fazla senaryoya ihtiyaç vardır. Herhangi bir giriş için ilgili girişin değeri ne olursa olsun en fazla iki üyelik fonksiyonu, en az ise bir üyelik fonksiyonu aktif olacaktır. Bu bilgiler ışığında, ateşlenen kuralların incelenmesi adına iki farklı durumu içeren senaryo düşünülecektir: iki girişin de en fazla sayıda üyelik fonksiyonlarının aktif olduğu durum ve bir girişin en fazla, diğerinin en az sayıda üyelik fonksiyonlarının aktif olduğu durum.

Durum 1: İki girişin de en fazla sayıda üyelik fonksiyonlarının aktif olması

Eğer her iki giriş de (-1, 0) ya da (0, 1) aralığında ise girişler için en fazla sayıda

üyelik fonksiyonu aktif olacaktır. Örneğin, $e = -0,6$ ve $de = 0,2$ değerlerine sahip olsun. Bu durumda, girişlerin üyelik dereceleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned}
\mu_{e,N}(-0,6) &= 0,6 \\
\mu_{e,Z}(-0,6) &= 0,4 \\
\mu_{e,P}(-0,6) &= 0 \\
\mu_{de,N}(0,2) &= 0 \\
\mu_{de,Z}(0,2) &= 0,8 \\
\mu_{de,P}(0,2) &= 0,2
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Hesaplanan aitlik dereceleri Çizelge 4.1’de girişlerin yerine konulursa aşağıdaki gibi bir tablo ortaya çıkar.

Çizelge 4.2: Tasarlanan örnek BKM için kural tablosu.

Kural	1.Giriş		2.Giriş		Çıkış
1.	0,6	$\otimes$	0	$\Rightarrow$	y = N
2.	0,4	$\otimes$	0	$\Rightarrow$	y = N
3.	0	$\otimes$	0	$\Rightarrow$	y = Z
4.	0,6	$\otimes$	0,8	$\Rightarrow$	y = N
5.	0,4	$\otimes$	0,8	$\Rightarrow$	y = Z
6.	0	$\otimes$	0,8	$\Rightarrow$	y = P
7.	0,6	$\otimes$	0,2	$\Rightarrow$	y = Z
8.	0,4	$\otimes$	0,2	$\Rightarrow$	y = P
9.	0	$\otimes$	0,2	$\Rightarrow$	y = P

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de görülen $\otimes$ işlemi birleştirme operatörüdür. Birleştirme operatörü için "VE" işlemi oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamanın inceleme aşamasında ise birleştirme işlemi için sabit bir operatör kullanılmadığından dolayı $\otimes$ gibi bir gösterim seçilmiştir. Bu bölümün esas amacının VE, VEYA, γ operatörlerinin kullanımı ile ateşlenen kural sayısının ilgisini incelemek olduğu daha önce vurgulanmıştı. VE ile VEYA işlemlerinin γ operatörünün özel bir hali olduğu düşünülecek olursa tüm incelemeler γ değerinin değiştirilmesi ile γ operatörü üzerinden yürütülebilir. İlk olarak özel bir durum olan VE işlemi ($\gamma = 0$) incelenecektir. Gösterim ve işlem açısından kolaylık sağlaması için Çizelge 4.2’deki üyelik dereceleri sütun vektörü olarak düşünülürse (iki sütun

vektörü arasında yapılan işlem yalnızca aynı satır için geçerli olsun), VE işlemi için aşağıdaki gibi bir gösterim ortaya çıkmaktadır.

$$\beta_{VE} = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \\ 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \\ 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,8 \\ 0,8 \\ 0,8 \\ 0,2 \\ 0,2 \\ 0,2 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Denklem (4.12), bahsedilen koşul altında birleştirme operatörü olarak VE işlemi kullanıldığında sırasıyla her kuralın ateşleme çarpanlarını (β) içermektedir. VE işleminin bir özelliği olarak, herhangi bir girişin herhangi bir satırı 0 ise ilgili kural ateşlenmez. İşlem performansını ve süresini iyileştirmek için bu kuralın dahil olduğu tüm işlemlerde ateşleme çarpanı 0 olarak alınır. Denklem (4.12) bu açıdan incelendiğinde aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$\beta_{VE} = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,4 \\ \theta \\ 0,6 \\ 0,4 \\ \theta \\ 0,6 \\ 0,4 \\ \theta \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ \theta \\ 0,8 \\ 0,8 \\ \theta,8 \\ 0,2 \\ 0,2 \\ \theta,2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,48 \\ 0,32 \\ 0 \\ 0,12 \\ 0,08 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Denklem (4.13)'te görüldüğü gibi verilen koşullarda birleştirme operatörü olarak VE (diğer bir deyişle γ 'nın 0 seçildiği γ operatörü) kullanıldığında yalnızca 4 kural (4, 5, 7, 8 numaralı kurallar) ateşlenmektedir. Bunun sebebinin VE işleminin bir özelliği olarak herhangi bir satırda 0 olmasının ilgili satırın ve dolayısıyla ilgili kuralın ateşlenmemesi olduğu söylenmişti. Ateşlenen kurallar Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3: Ateşlenen kurallar.

$e \setminus de$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

$\gamma = 1$ (VEYA işlemi) seçildiğinde ise ateşleme çarpanları Denklem (4.14)'teki gibi hesaplanacaktır.

$$\beta_{VEYA} = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \\ 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \\ 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,8 \\ 0,8 \\ 0,8 \\ 0,2 \\ 0,2 \\ 0,2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \\ 0,92 \\ 0,88 \\ 0,8 \\ 0,68 \\ 0,52 \\ 0,2 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

VEYA işleminin de VE işlemi gibi γ operatörünün özel bir hali ($\gamma = 1$) olduğundan daha önce bahsedilmişti. VEYA işleminin bir özelliği olarak yalnızca her iki girişin aitlik derecelerinin 0 olduğu kurallar ateşlenmeyecektir. Verilen koşullar altında yalnızca 3 numaralı kuralın ateşlenmediği görülmektedir. Ateşlenen kurallar Çizelge 4.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.4: Ateşlenen kurallar.

$e \setminus de$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

Eğer γ , (0, 1) aralığında herhangi bir değer olarak seçilirse ateşlenen kural sayısı, VEYA işlemindeki ($\gamma = 1$) ile aynı olacaktır. Bu durumda, γ değeri ile birlikte yalnızca ateşleme çarpanlarının değeri değişecektir. Örneğin, $\gamma = 0,35$ seçildiğinde kuralların ateşleme çarpanları Denklem (4.15)'teki gibi hesaplanacaktır.

$$\beta_{\gamma=0,35} = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,4 \\ \theta \\ 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \\ 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \end{bmatrix} \gamma \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta \\ 0,8 \\ 0,8 \\ 0,8 \\ 0,2 \\ 0,2 \\ 0,2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,21 \\ 0,14 \\ 0 \\ 0,634 \\ 0,516 \\ 0,28 \\ 0,316 \\ 0,234 \\ 0,07 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Ateşlenen kurallar aynı olacağından dolayı γ 'nın (0, 1) aralığında seçilmesi Çizelge 4.4'ü değiştirmeyecektir. Denklem (4.14) ile Denklem (4.15) arasında yapısal bir farklılık bulunmazken, Denklem (4.13) farklı bir yapıya sahiptir.

Durum 2: İki girişin de en az sayıda üyelik fonksiyonlarının aktif olması

Durum 1'de kullanılan bulanık kontrolör yapısı aynı şekilde kullanılması koşuluyla, girişlerin değerleri her giriş için en az sayıda üyelik fonksiyonunun aktif olmasını sağlayacak şekilde seçilir. Örneğin, $e = 1$ ve $de = 0$ değerlerine sahip olsun. Bu durumda, girişlerin üyelik dereceleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} \mu_{e,N}(1) &= 0 \\ \mu_{e,Z}(1) &= 0 \\ \mu_{e,P}(1) &= 1 \\ \mu_{de,N}(0) &= 0 \\ \mu_{de,Z}(0) &= 1 \\ \mu_{de,P}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Hesaplanan aitlik dereceleri Çizelge 4.1'de girişlerin yerine konulursa aşağıdaki gibi bir tablo ortaya çıkar.

Çizelge 4.5: Tasarlanan örnek BKM için kural tablosu.

Kural	1.Giriş		2.Giriş		Çıkış
1.	0	⊗	0	⇒	y = N
2.	0	⊗	0	⇒	y = N
3.	1	⊗	0	⇒	y = Z
4.	0	⊗	1	⇒	y = N
5.	0	⊗	1	⇒	y = Z
6.	1	⊗	1	⇒	y = P
7.	0	⊗	0	⇒	y = Z
8.	0	⊗	0	⇒	y = P
9.	1	⊗	0	⇒	y = P

Durum 1’de anlatılanlara paralel olarak, ilk adımda VE operatörünün ($\gamma = 0$) seçilmesi sonucu kuralların nasıl etkilendiği incelenecektir. Denklem (4.17), bir önceki bölümdeki vektör gösterimini içeren VE işlemi adımlarını göstermektedir.

$$\beta_{VE} = \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ 1 \\ \theta \\ \theta \\ 1 \\ \theta \\ \theta \\ 1 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ 1 \\ 1 \\ \theta \\ 1 \\ \theta \\ \theta \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Girişlerin değerleri, en az kuralın ateşlenmesini sağlayacak şekilde seçilmişti. Ateşleme çarpanlarının vektörüne bakıldığında yalnızca 6. kuralın ateşlendiği görülmektedir. Çizelge 4.6, bu koşul için ateşlenen kuralı göstermektedir.

Çizelge 4.6: Ateşlenen kurallar.

$e \setminus de$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	B

γ operatörünün diğer bir özel hali olan VEYA işlemi ele alındığında ise çok daha fazla sayıda kuralın ateşlenmesi beklenmektedir. VEYA işleminde yalnızca

tüm girişlerin 0 olduğu kuralların ateşlenmediği hatırlanmalıdır. Denklem (4.18), verilen koşullarda VEYA işlemi ile ateşlenen kuralları göstermektedir.

$$\beta_{VEYA} = \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \theta \\ \theta \\ 1 \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \theta \\ \theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

VEYA işleminde beklendiği gibi daha fazla sayıda kural (3, 4, 5, 6 ve 9 numaralı kurallar) ateşlenmiştir. Ateşlenen kurallar, kural tablosu üzerinde Çizelge 4.7 aracılığıyla gösterilmektedir.

Çizelge 4.7: Ateşlenen kurallar.

$e \setminus de$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

Bir önceki koşulda, γ 'nın (0, 1] aralığında seçilmesinin aktif kural sayısını değiştirmeyeceğinden, yalnızca ateşleme çarpanlarının değerinin değişeceğinden ve $\gamma = 0$ seçildiğinde en düşük aktif kural sayısına erişileceğinden bahsedilmişti. Bu durum için de aynı çıkarımlar geçerli olmakla beraber, ateşleme çarpanlarının değerlerinin değişimini izlemek için $\gamma = 0,35$ seçilerek Denklem (4.19) elde edilir. Ateşlenen kurallar ise Çizelge 4.7'deki ile aynı olmaktadır.

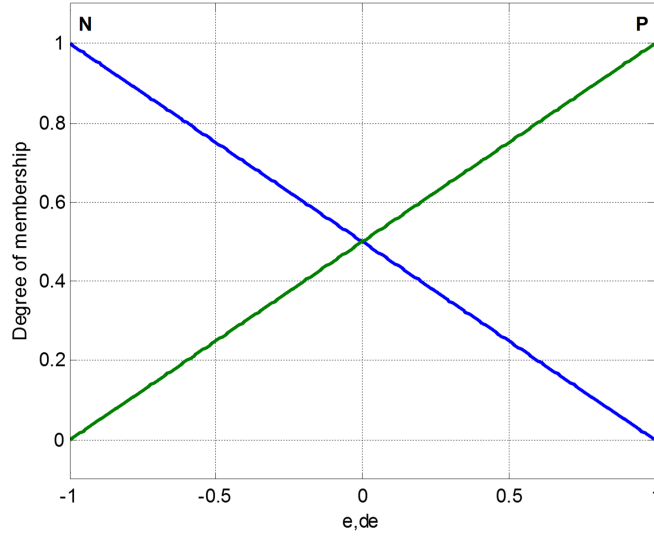
$$\beta_{\gamma=0,35} = \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \theta \\ \theta \\ 1 \end{bmatrix} \gamma \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \theta \\ \theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,35 \\ 0,35 \\ 0,35 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0,35 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Yakından incelenen iki durum için bazı çıkarımlar yapmak mümkündür. Aslında durumların sayısını arttırmak mümkündür. Herhangi bir girişin en az, diğerinin en fazla üyelik fonksiyonunun aktif olduğu birbiri ile eş iki durum daha vardır. Ancak, esas amaç uç noktalardaki durumları incelemek olduğunda dolayı diğer iki durum dikkate alınmamıştır. En fazla ya da en az kuralın ateşlenmesi durumları aslında VE işlemi düşünülerek belirlenmiştir. VE işlemi, γ operatörü için en özel haldir. $\gamma = 0$ olması, kuralların ateşlenmesi açısından çok seçici bir işlemdir. Herhangi bir kurala ait herhangi bir girişin 0 aitlik derecesine sahip olması demek VE işlemi için ilgili kuralın ateşlenmeyeceği anlamına gelmektedir. γ 'nın diğer bir özel hali ise VEYA işlemidir. Ancak hangi kuralların ateşlendiği γ 'nın $(0, 1]$ aralığında değişmemekle beraber, ilgili kuralların yalnızca ateşleme çarpanlarının değerleri değişmektedir. VEYA işleminin ($\gamma = 1$) bir getirisi ise işlem performansını olumlu yönde etkileyen sade bir forma sahip olmasıdır.

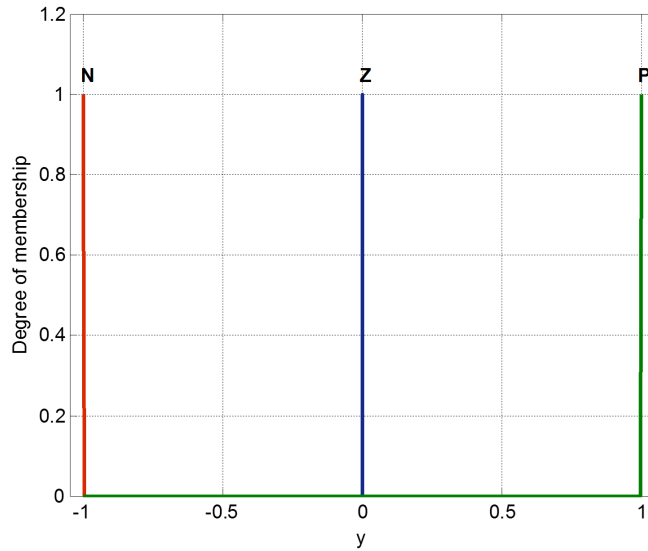
Şu ana kadar, γ operatörünün %50 çakışık üyelik fonksiyonlarına sahip bir bulanık kontrolörün kurallarının ateşlenmesine etkisi incelenmiştir. $\gamma = 0$ iken ateşlenen kuralların en az sayıda, $(0, 1]$ aralığında iken en fazla sayıda olduğu çıkarımı yapılmıştır. Bulanık kontrolörün hangi girişlerde nasıl bir davranış sergileyeceğini ateşleme çarpanlarından ziyade kontrol yüzeyleri daha iyi göstermektedir. Bu yüzden, farklı γ değerleri ile farklı kural sayılarına sahip bulanık kontrolörlerin nasıl bir davranış sergilediği incelenecektir. Sırasıyla 4, 25 ve 49 kurallı, iki girişli (hata ve hatanın türevi (e,de)), %50 çakışık üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık kontrolörler ele alınacaktır.

4.1.2 4 Kurallı Bulanık Kontrolör

Hata (e) ve hatanın türevine (de) ait üyelik fonksiyonları Şekil 4.5'te, çıkışa ait üyelik fonksiyonları ise Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.5: Hata ve hatanın türevi için tanımlanan üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.6: Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.

Tasarlanan bulanık kontrolöre ilişkin kural tablosu Çizelge 4.8'de verilmektedir.

Çizelge 4.8: 4 kurallı bulanık kontrolör için kural tablosu.

Kural		1.Giriş	İşlem	2.Giriş		Çıkış
1.	Eğer	e = N	$\otimes$	de = N	ise o halde	y = N
2.	Eğer	e = P	$\otimes$	de = N	ise o halde	y = Z
3.	Eğer	e = N	$\otimes$	de = P	ise o halde	y = Z
4.	Eğer	e = P	$\otimes$	de = P	ise o halde	y = P

Herhangi giriş değerleri altında, bulanık kontrolörün verdiği çıkışın bulunması ilk adımda üyelik derecelerinin hesaplanması ile mümkündür. Böylece Çizelge 4.9 oluşmaktadır.

Çizelge 4.9: 4 kurallı bulanık kontrolör için kural tablosu (aitlik dereceleri gösterimi).

Kural	1.Giriş	İşlem	2.Giriş		Çıkış
1.	μ_{11}	$\otimes$	μ_{21}	$\Rightarrow$	y_1
2.	μ_{12}	$\otimes$	μ_{21}	$\Rightarrow$	y_2
3.	μ_{11}	$\otimes$	μ_{22}	$\Rightarrow$	y_3
4.	μ_{12}	$\otimes$	μ_{22}	$\Rightarrow$	y_4

Her kurala ait ateşleme çarpanları, Denklem (4.20)'deki gibi gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= \mu_{11} \otimes \mu_{21} \\
 \beta_2 &= \mu_{12} \otimes \mu_{21} \\
 \beta_3 &= \mu_{11} \otimes \mu_{22} \\
 \beta_4 &= \mu_{12} \otimes \mu_{22}
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Bulanık kontrolörün verdiği çıkış değeri ağırlıklı ortalama ile hesaplanabilir. Denklem (4.21), bu hesabı içermektedir.

$$u = \frac{\sum_{n=1}^4 \beta_n \cdot y_n}{\sum_{n=1}^4 \beta_n} \tag{4.21}$$

Kurallara ait ateşleme çarpanları, ilgili kurallardaki girişlerin üyelik derecelerinin birleştirme operatöründen geçirilmesi ile hesaplanır. Böylece Denklem (4.21) daha açık bir şekilde yazılabilir.

$$u = \frac{\mu_{11} \otimes \mu_{21} \cdot y_1 + \mu_{12} \otimes \mu_{21} \cdot y_2 + \mu_{11} \otimes \mu_{22} \cdot y_3 + \mu_{12} \otimes \mu_{22} \cdot y_4}{\mu_{11} \otimes \mu_{21} + \mu_{12} \otimes \mu_{21} + \mu_{11} \otimes \mu_{22} + \mu_{12} \otimes \mu_{22}} \quad (4.22)$$

Daha önceki incelemelerde $\otimes$ işlemi yerine γ operatörü konulup sırasıyla $\gamma = 0$ (VE işlemi), $\gamma = 1$ (VEYA işlemi) ve $\gamma \in (0, 1)$ değerleri kullanılmıştı. Kontrol yüzeyleri incelenirken yine aynı adımlar izlenecektir. Denklem (4.22)'de $\otimes$ işlemi yerine VE operatörünün kullanıldığı düşünülürse Denklem (4.23) ortaya çıkar.

$$u = \frac{\mu_{11} \cdot \mu_{21} \cdot y_1 + \mu_{12} \cdot \mu_{21} \cdot y_2 + \mu_{11} \cdot \mu_{22} \cdot y_3 + \mu_{12} \cdot \mu_{22} \cdot y_4}{\mu_{11} \cdot \mu_{21} + \mu_{12} \cdot \mu_{21} + \mu_{11} \cdot \mu_{22} + \mu_{12} \cdot \mu_{22}} \quad (4.23)$$

Eğer $\gamma (0, 1]$ aralığında seçilirse, Denklem (4.22) daha uzun ve karmaşık olacaktır. Bu karışıklığı önlemek amacıyla, Denklem (4.22), Denklem (4.21) gibi daha kapalı biçimde yazılabilir.

$$u = \frac{\beta_1 \cdot y_1 + \beta_2 \cdot y_2 + \beta_3 \cdot y_3 + \beta_4 \cdot y_4}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4} \quad (4.24)$$

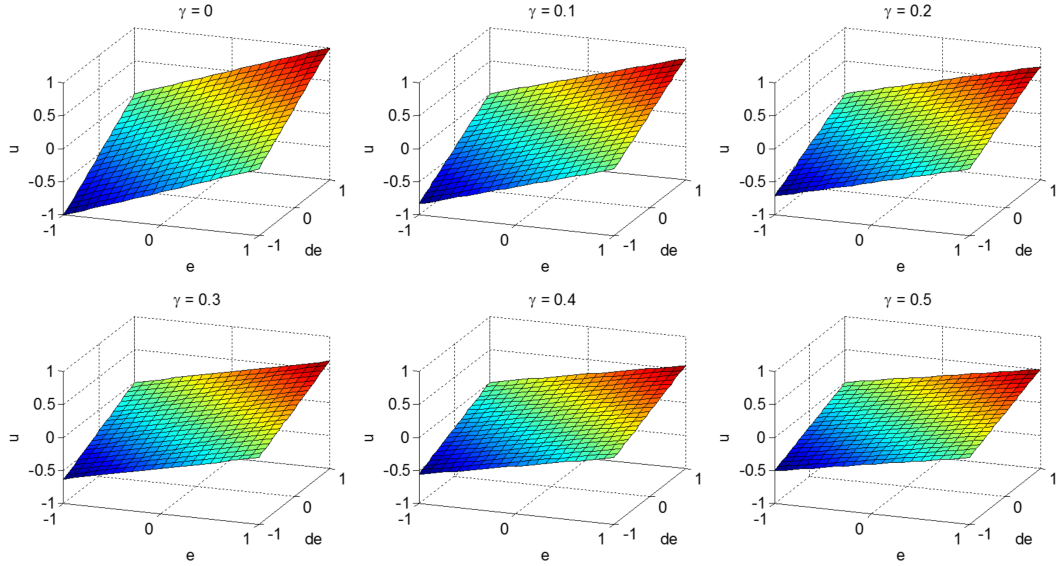
İncelemeleri doğrudan ateşleme çarpanlarının ifadeleri üzerinden yapmak, sadelik açısından oldukça isabetli olacaktır. VEYA işlemi kullanıldığında, ateşleme çarpanlarının ifadeleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \mu_{11} + \mu_{21} - \mu_{11} \cdot \mu_{21} \\ \beta_2 &= \mu_{12} + \mu_{21} - \mu_{12} \cdot \mu_{21} \\ \beta_3 &= \mu_{11} + \mu_{22} - \mu_{11} \cdot \mu_{22} \\ \beta_4 &= \mu_{12} + \mu_{22} - \mu_{12} \cdot \mu_{22} \end{aligned} \quad (4.25)$$

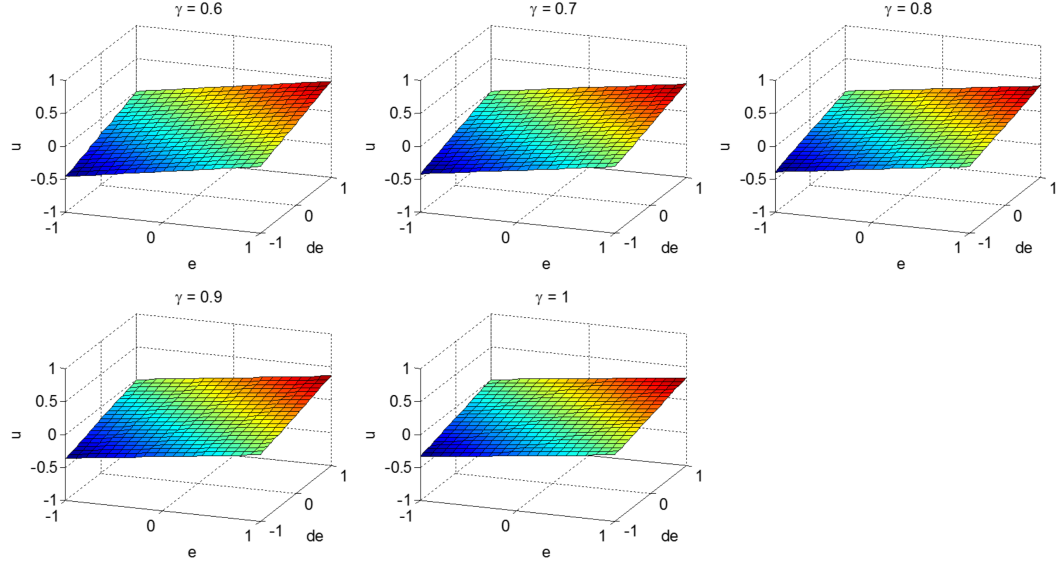
Benzer biçimde, γ değerinin $(0, 1)$ aralığında seçilmesi fonksiyonun daha karmaşık bir almasına neden olur. Örneğin, $\gamma = 0,35$ seçilmiş olsun.

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0,65 \cdot \mu_{11} \cdot \mu_{21} + 0,35 \cdot (\mu_{11} + \mu_{21} - \mu_{11} \cdot \mu_{21}) \\ \beta_2 &= 0,65 \cdot \mu_{12} \cdot \mu_{21} + 0,35 \cdot (\mu_{12} + \mu_{21} - \mu_{12} \cdot \mu_{21}) \\ \beta_3 &= 0,65 \cdot \mu_{11} \cdot \mu_{22} + 0,35 \cdot (\mu_{11} + \mu_{22} - \mu_{11} \cdot \mu_{22}) \\ \beta_4 &= 0,65 \cdot \mu_{12} \cdot \mu_{22} + 0,35 \cdot (\mu_{12} + \mu_{22} - \mu_{12} \cdot \mu_{22}) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Üç farklı γ değeri için ateşleme çarpanlarının değerlerinin değiştiği ve bu değişimin de kontrol yüzeylerinin farklılaşmasıyla sonuçlanacağı açıktır. γ değerinin $[0, 1]$ aralığında 0,1 adımlarla değiştirilmesi ile elde edilen kontrol yüzeyleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki gibi olmaktadır.



Şekil 4.7: 4 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0, 0,1, \dots, 0,5$).



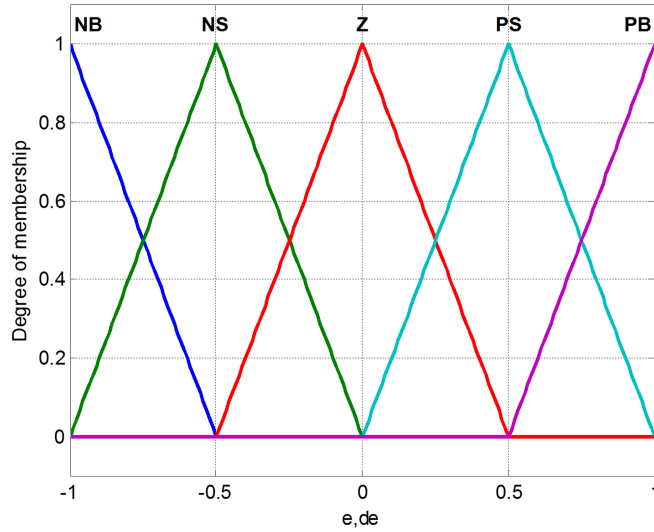
Şekil 4.8: 4 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0,6, 0,7, \dots, 1$).

Bir önceki bölümde, γ değişiminin ateşleme çarpanları üzerindeki etkisi incelenirken girişlerin durumuna bağlı olarak kuralların ateşlenmesi veya ateşlenmemesi üzerine dikkate alınmıştı. 2 girişli, 4 kurallı, %50 çakışık üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık kontrolör için Şekil 4.5 göz önüne alındığında herhangi giriş kombinasyonu için 4 kuralın da ateşlendiği görülmektedir. Diğer bir deyişle, bu örnekte her zaman 4 kural

ateşlenmektedir. Her giriş için aynı sayıda kuralın ateşlendiği böyle bir tasarımda ise γ 'nın değişiminin etkin kural sayısına etkisinden ziyade kontrol yüzeyi üzerindeki değişimlerinin çözümü önemli bir noktadır.

4.1.3 25 Kurallı Bulanık Kontrolör

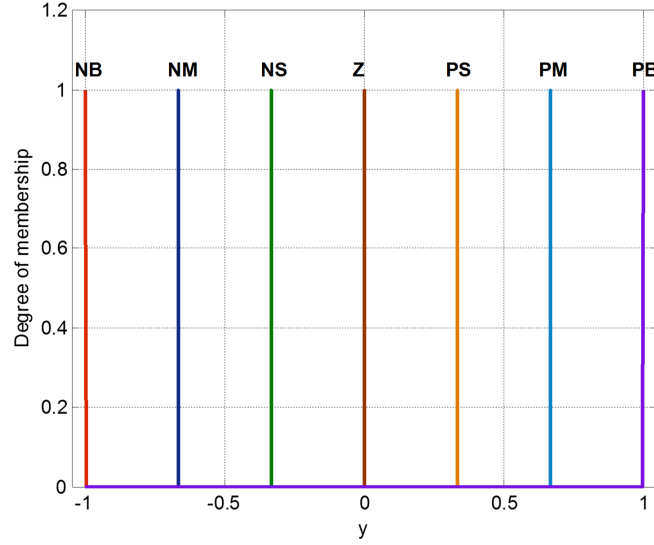
4 kurallı bulanık kontrolörde girişler ne olursa olsun tüm kuralların ateşlendiği söylenmişti. Bu durumda γ 'nın ateşlenen kural sayısı üzerindeki etkisi için bir yorum yapılamaz. Tüm kuralların ateşlendiği bulanık kontrolör yerine, farklı girişler altında farklı sayıda kuralın ateşlenebileceği biraz daha karmaşık bir bulanık kontrolör tasarımı incelenecektir. Bu yüzden, iki girişli ve girişlerine ait üyelik fonksiyonlarının aynı (5 tane, %50 çakışık üçgen üyelik fonksiyonu), çıkışa ait üyelik fonksiyonlarının 7 tane ancak tekil değer olduğu 25 kurallı bir bulanık kontrolör tasarlanmıştır. Hata (e) ve hatanın türevine (de) ait üyelik fonksiyonları Şekil 4.9'da, çıkışa ait üyelik fonksiyonları ise Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.9: Hata ve hatanın türevi için tanımlanan üyelik fonksiyonları.

Tasarlanan bulanık kontrolöre ilişkin kural tablosu Çizelge 4.10'da verilmektedir.

Eğer herhangi giriş koşulu altında bulanık kontrolörün çıkışı hesaplanmak istenirse Çizelge 4.9'un örnek alınması gerekmektedir. Ancak, bu tasarımda 25 kural olduğundan ve tüm kurallardaki girişlerin ayrı ayrı üyelik derecelerinin yazılması uzun olacağından dolayı bazı noktalarda yalnızca sözel ifadeler kullanılacaktır. Tüm



Şekil 4.10: Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.

Çizelge 4.10: 25 kurallı bulanık kontrolör için kural tablosu.

$e \setminus de$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NS	Z
NS	NB	NM	NS	Z	PS
Z	NM	NS	Z	PS	PM
PS	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB

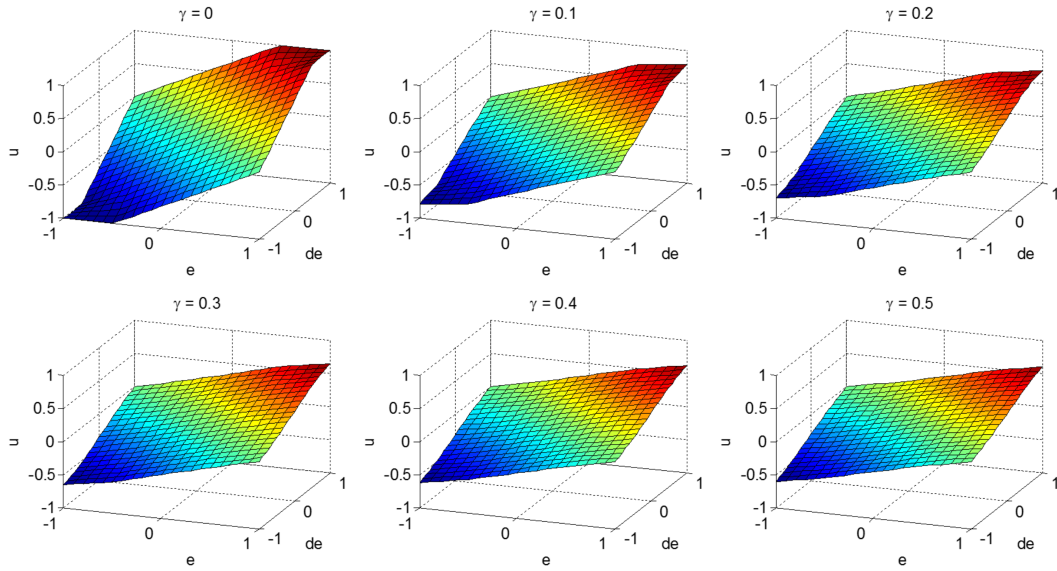
kurallardaki girişlerin üyelik derecelerinin hesaplandığı ve kurallara ait ateşleme çarpanlarının aşağıdaki genel biçimde yazıldığı varsayılın.

$$\beta_n = f(\mu_{n,1}, \mu_{n,2}, \gamma) \quad (4.27)$$

Denklem (4.27)'deki değişkenler ise sırasıyla şu şekilde tanımlanmaktadır: n , kural sayısı; $(n,1)$ ya da $(n,2)$, n . kuralın 1. ya da 2. girişi; f , birleştirme operatörü (γ fonksiyonu); γ , operatörün parametresi. γ 'nın farklı değerlerde seçilmesiyle, birleştirme işleminin aşağıdaki genel biçimlerden birine dönüşebileceği daha önce söylenmişti.

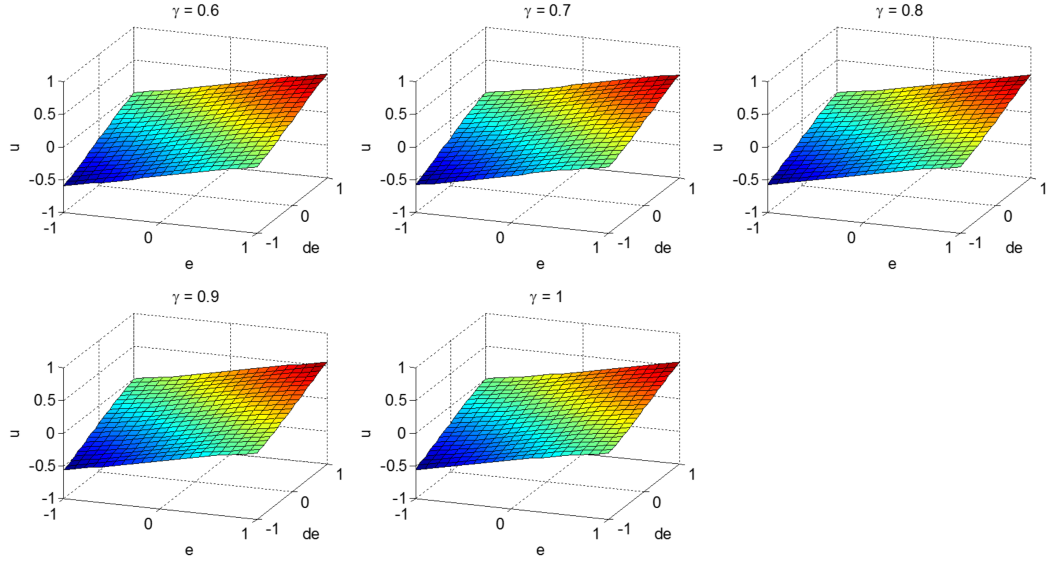
$$\begin{aligned}
\beta_n &= \mu_{n,1} \cdot \mu_{n,2} \quad (\gamma = 0) \\
\beta_n &= \mu_{n,1} + \mu_{n,2} - \mu_{n,1} \cdot \mu_{n,2} \quad (\gamma = 1) \\
\beta_n &= (1 - \gamma) \cdot \mu_{n,1} \cdot \mu_{n,2} + \gamma \cdot (\mu_{n,1} + \mu_{n,2} - \mu_{n,1} \cdot \mu_{n,2}) \quad (\gamma \in (0, 1)) \quad (4.28)
\end{aligned}$$

Denklem (4.21), Çizelge 4.10 ve Denklem (4.28) ile kullanılarak bulanık kontrolörün ürettiği çıkış hesaplanır. Eğer, her iki girişin üyelik dereceleri $[0, 1]$ uzayının tamamı taranacak şekilde, bu girişlere karşılık gelen çıkışlar elde edilirse kontrol yüzeyi elde edilmiş olur. Tasarlanan 25 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri Şekil 4.11’de ve Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.11: 25 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0, 0,1, \dots, 0,5$).

25 kurallı bulanık kontrolörün kontrol yüzeylerinin değişen γ değerleri ile birlikte, 4 kurallı bulanık kontrolörün kontrol yüzeylerine göre daha farklı bir davranış sergilediği açıktır. Daha fazla kurala sahip bir tasarımın da davranışlarının incelenmesi, yapılacak yorumlara büyük katkı sağlayacaktır. Bu yüzden, 49 kurallı bir bulanık kontrolörün de incelenmesi faydalı olacaktır.



Şekil 4.12: 25 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0,6 , 0,7 , \dots , 1$).

4.1.4 49 Kurallı Bulanık Kontrolör

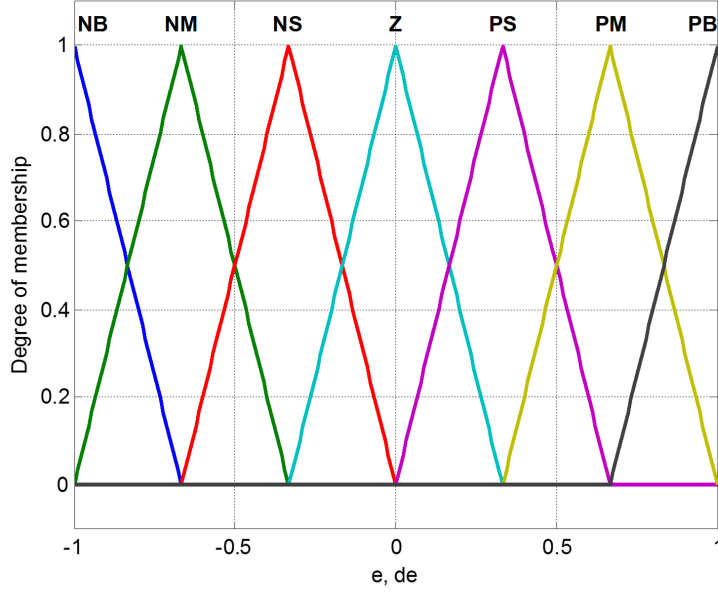
Bir önceki tasarıma göre biraz daha karmaşık bir yapıya ait bulanık kontrolörün incelenmesinin, γ değişiminin kontrol yüzeylerine etkisinin çözümlemesine yardımcı olacaktır. Bu yüzden, iki girişli ve girişlerine ait üyelik fonksiyonlarının aynı (7 tane, %50 çakışık üçgen üyelik fonksiyonu), çıkışa ait üyelik fonksiyonlarının da yine 7 tane ancak tekil değer olduğu 49 kurallı bir bulanık kontrolör tasarlanmıştır. Hata (e) ve hatanın türevine (de) ait üyelik fonksiyonları Şekil 4.13'te, çıkışa ait üyelik fonksiyonları ise Şekil 4.14'te görülmektedir.

Tasarlanan bulanık kontrolöre ilişkin kural tablosu Çizelge 4.11'de verilmektedir.

Çizelge 4.11: 49 kurallı bulanık kontrolör için kural tablosu.

$e \setminus de$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

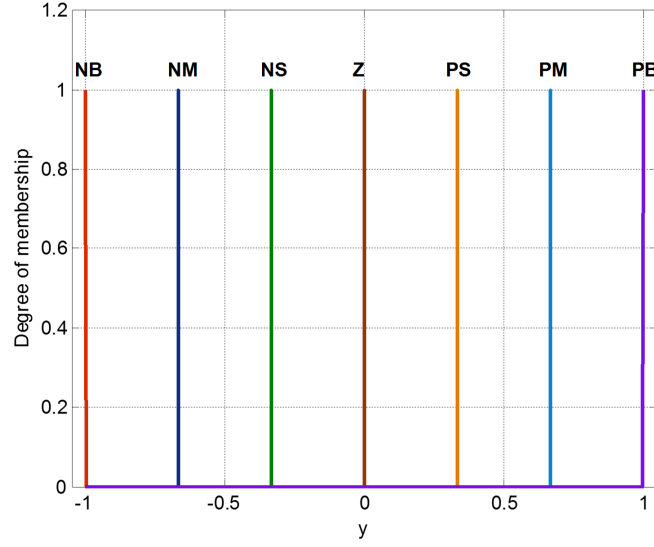
Eğer herhangi giriş koşulu altında bulanık kontrolörün çıkışı hesaplanmak istenirse, bir önceki tasarımda geliştirilmiş olan Denklem (4.27) ve Denklem (4.28) kullanılır.



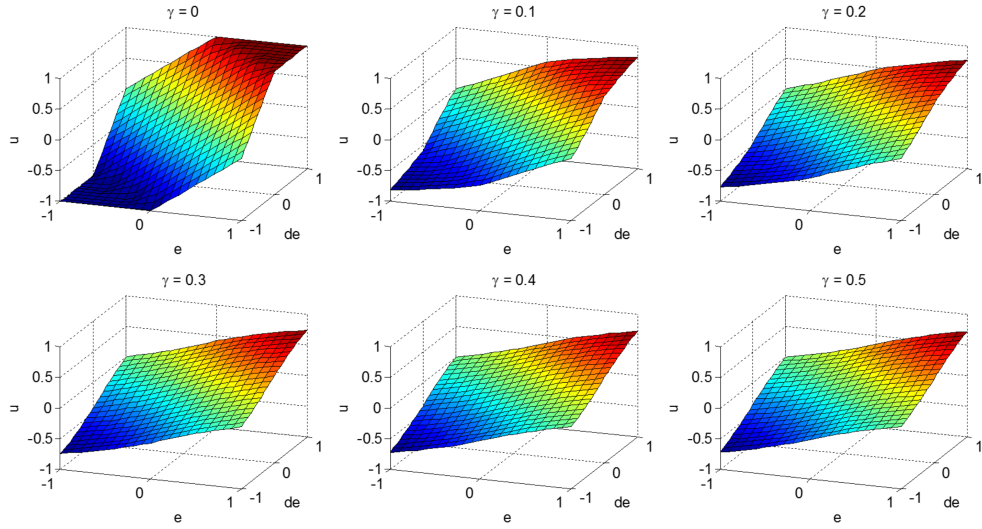
Şekil 4.13: Hata ve hatanın türevi için tanımlanan üyelik fonksiyonları.

γ 'nın seçimi keyfi olabileceği gibi tasarıma özgü seçilebilir. γ değişkeninin dışında, her iki girişin üyelik dereceleri $[0, 1]$ uzayının tamamı taranacak şekilde, bu girişlere karşılık gelen çıkışlar elde edilirse kontrol yüzeyi elde edilmiş olur. Tasarlanan 49 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri Şekil 4.15'te ve Şekil 4.16'da görülmektedir.

49 kurallı bulanık kontrolörün kontrol yüzeylerinin değişen γ değerleri ile birlikte, 25 kurallı bulanık kontrolörün kontrol yüzeylerine benzer bir davranış sergilediği açıktır. Gerek 25 kurallı bulanık kontrolör, gerekse 49 kurallı bulanık kontrolör yeterince karmaşık bir yapıya sahiptir. İlk etapta, 2 girişli, girişlerinin üyelik fonksiyonları aynı ve %50 çakışık 3'er tane olduğu, 9 kurallı örnek bir bulanık kontrolör tasarımı kullanılmıştır. Birleştirme operatörü olarak VE işlemi, VEYA işlemi, $\gamma = 0,35$ seçilen γ işlemi kullanılmıştır. Bu noktada, VE ile VEYA işlemlerinin de aslında sırasıyla $\gamma = 0$ ve $\gamma = 1$ olduğu unutulmamalıdır. Bu tasarım için iki farklı senaryo üretilmiştir: VE işlemine göre en az ve en fazla sayıda kural ateşlenmesini sağlayan giriş durumları. Bu senaryoların VE işlemine göre üretilmesinin temel sebebi ise VE işleminin, γ operatörünün oldukça özel bir hali olmasıdır. VE işlemi, herhangi bir kuraldaki bir girişin aitlik derecesinin 0 olmasından dolayı o kuralı ateşlemeyeceğinden dolayı ateşlenebilecek kural sayısı önemli ölçüde azalmaktadır. Bu sayının en az durumunu ise VE işlemi belirlemektedir. Öyle ki giriş kombinasyonları vardır, VE işleminin en



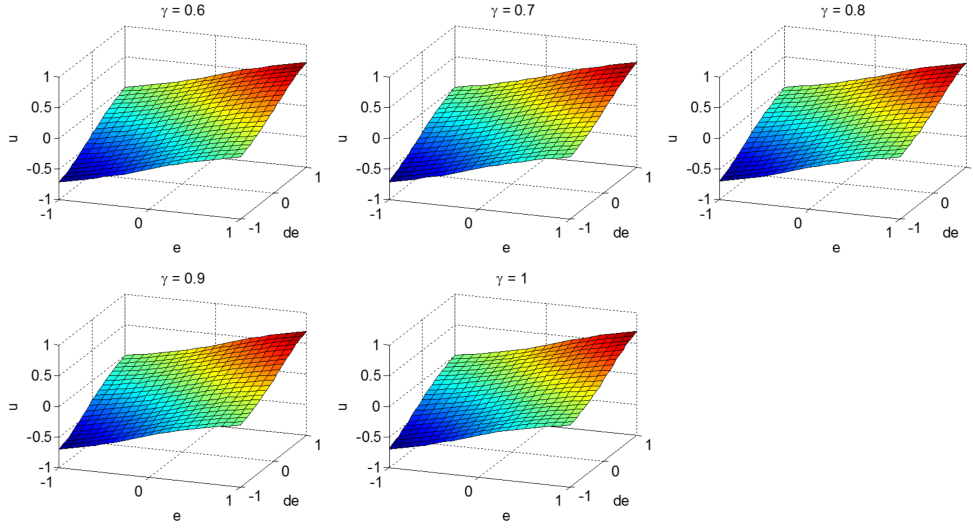
Şekil 4.14: Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.15: 49 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0, 0,1, \dots, 0,5$).

az ve en fazla sayıda kural ateşlemesi sağlanabilir. γ 'nın $(0, 1]$ aralığında seçilmesi ise her seferinde ateşlenebilecek en fazla kuralı ateşleyecektir. Bu aralıktaki γ değişimi yalnızca ateşleme çarpanlarının değerini değiştirecektir. Sonuç olarak, $\gamma = 0$ dışında γ operatörünün ateşlenecek kural sayısı üzerine bir etkisi bulunmamaktadır.

İkinci etapta ise üç farklı kural sayısına sahip benzer tasarlanmış bulanık kontrolörler kullanılmıştır. Farklı γ değerlerinde, girişlerinin üyelik dereceleri $[0, 1]$ aralığında taranarak kontrolörlerin üreteceği çıkışlar elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, $\gamma \in [0, 1]$ için kontrol yüzeyleri elde edilmiştir. Ayrıca, 4 kurallı bulanık kontrolörün diğer ikisine göre farklı bir özelliği bulunmaktadır. Giriş kombinasyonu ne olursa



Şekil 4.16: 49 kurallı bulanık kontrolör için kontrol yüzeyleri ($\gamma = 0,6 , 0,7 , \dots , 1$).

olsun, üyelik fonksiyonları %50 çakışık olduğu için sürekli 4 kural da ateşlenecektir. Ateşlenen kural sayısının sabit kaldığı bir durumda γ değişiminin, kontrol yüzeyine etkisi daha açık bir biçimde incelenmiştir. Diğer iki tasarım ise 4 kurallı tasarıma göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve böylece γ değişiminin farklı sayıda ateşlenebilecek kurallara sahip bulanık kontrolörler üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sonuç olarak, 4 kurallı kontrolörde değişen γ ile birlikte kontrol yüzeyinin yalnızca eğimi değişmektedir. Zaten bunların öncesinde yapılan, ön incelemeler de bu sonuçları vermektedir. 25 ve 49 kurallı kontrolörlerin kontrol yüzeyleri için γ değerinin değişimi benzer etkilere sebep olmaktadır. Ancak bu benzerliğin bir sebebinin de bu iki kontrolörün kural tablolarının benzerliğinden dolayı olabileceği unutulmamalıdır. Diğer açıdan bakıldığında ise γ değerinin değişmesi kontrol yüzeylerinde doğrusal olmayan bir değişime sebep olmaktadır. γ arttıkça kontrol yüzeyi düzlemsel bir yapıya geçmektedir. Ancak, $\gamma = 1$ değerinde bile tam düzlemsel bir şekile sahip olmamaktadır.

Bu temel iki adım, γ operatörünün farklı açılardan incelenmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen bilgiler ışığında, bir sonraki bölümde γ operatörünün bir kontrol sistemi üzerindeki etkileri incelenecektir.

5. ÖZ-AYARLAMALI BULANIK PID KONTROLÖRÜ TASARIMI

Bir önceki bölümde, iki girişe sahip ve girişlerine bağlı üyelik fonksiyonlarının %50 çakışık olduğu bulanık kontrol mekanizmasında birleştirme operatörü olarak γ işlemi kullanılarak, farklı γ değerlerinde kuralların ateşlenmesi, kontrol yüzeylerinin durumu gibi farklı noktalar ele alınmıştı.

Bu bölümde ise bir önceki bölümün üzerine, γ operatörünün kontrol sistemi üzerindeki etkiler incelenecektir. Öncelikle, günümüzde endüstride çok baskın bir oranla kullanılan; kurulumu, kullanımı kolay ve ucuz olan kontrolör, PID kontrolörleri kısaca ele alınacaktır. Ardından, PID kontrolörlerinin avantajlarını bulanık mantık ile birleştiren bulanık PID kontrolörleri üzerinde durulacaktır. Önerilen yöntem, bulanık PID kontrolöründe birleştirme işlemi olarak γ operatörünün kullanılmasını içermektedir. Bu esnada kontrol edilecek sistemin seçimi, bulanık kontrol mekanizmasına ait ölçekleme çarpanlarının belirlenmesi, γ değişiminin kapalı çevrim sistem cevabı üzerindeki etkilerin incelenmesi, γ değerinin çevrimiçi olarak ayarlanması gibi alt başlıklar detaylı olarak irdelenecektir.

5.1 Geleneksel PID Kontrolörleri

Bugün Dünya üzerinde gerek günlük hayatta kullanılan cihazlarda gerekse endüstriyel süreçlerde uygulanan en yaygın kontrolör tipidir. Ucuz ve kurulumunun kolay olması PID tipi kontrolörlerinin yaygınlaşmasındaki en büyük etmenlerdir.

Bir PID kontrolörü temelde üç ana bileşenden oluşur: oransal eleman(P), integral elemanı(I) ve türev elemanı (D). Giriş olarak kapalı çevrim sistemin hatasını aldığı göz önünde bulundurulursa, bir PID kontrolörü hatanın geçmişini, şimdiki durumunu ve geleceğini hesaba katmaktadır. PID kontrolörün transfer fonksiyonu kontrol işareti ve kapalı çevrim sistemin hatası ilişkisini içermektedir.

$$F(s) = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (5.1)$$

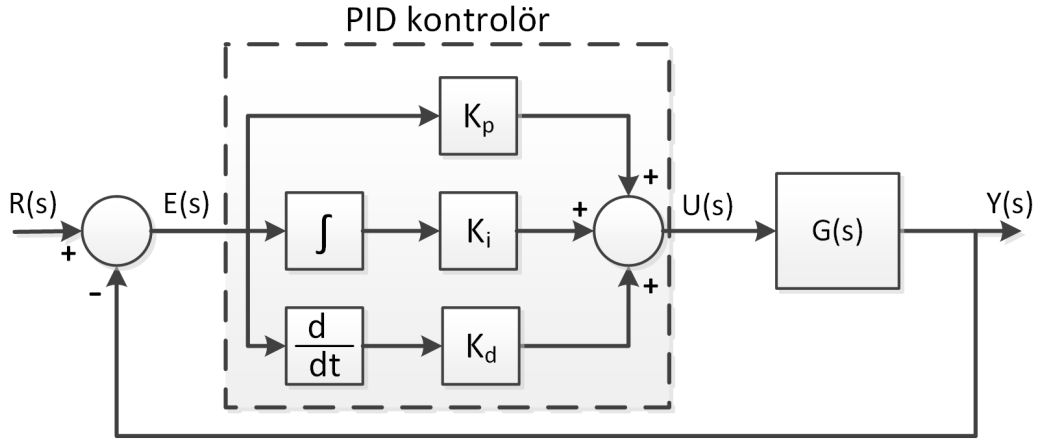
Denklem (5.1)'de, $U(s)$ kontrol işaretini; $E(s)$ ise hata işaretini göstermektedir. Geleneksel PID kontrolörünün en genel biçimi aşağıda gösterildiği gibidir.

$$F(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (5.2)$$

Denklem (5.2)'de, K_p oransal terimin katsayısını, K_i integral teriminin katsayısını ve K_d türev teriminin katsayısını göstermektedir. Eğer Denklem (5.1), Denklem (5.2) ile birleştirilirse PID kontrolör tarafından üretilen kontrol işaretinin ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$U(s) = E(s) \cdot K_p + E(s) \cdot K_i \frac{1}{s} + E(s) \cdot K_d s \quad (5.3)$$

Denklem (5.3), hata işaretinin şimdiki durumunun, geçmiş durumunun ve gelecek durumunun katsayılarla (sırasıyla K_p , K_i ve K_d) ağırlıklandırıldığını söylemektedir. Ağırlıklandırılan bu terimler (P, I, D) toplanarak kontrolör çıkışı elde edilmektedir. PID kontrolöre ait blok diyagramı, kapalı çevrim sistem ile birlikte Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



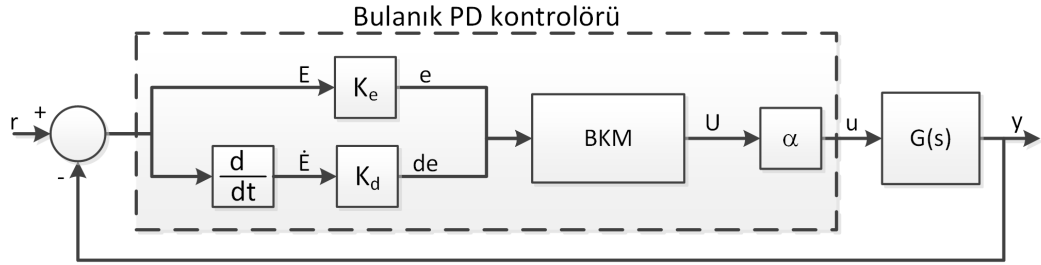
Şekil 5.1: Geleneksel PID kontrolörlü kapalı çevrim sistem.

5.2 Bulanık PID Kontrolörleri

Geleneksel PID kontrolörlerinden daha farklı bir yapıları bulunmaktadır. Bir bulanık PID kontrolör, geleneksel PID kontrolörün yerini tutabileceği gibi daha yüksek performanslar da gösterebilir.

[36] ve [37]'te belirtildiği üzere bulanık PID kontrolörleri üç ana kategori altında toplanabilir: doğrudan tip, bulanık kazanç ayarlamalı ve melez tip. Dahası, doğrudan tip bulanık PID kontrolörler de girişlerinin sayısına göre üç alt gruba ayrılabilir: tek giriş, çift giriş ve üç giriş. Bu çalışmada çift giriş-doğrudan tip bulanık PID kontrolör kullanılmaktadır.

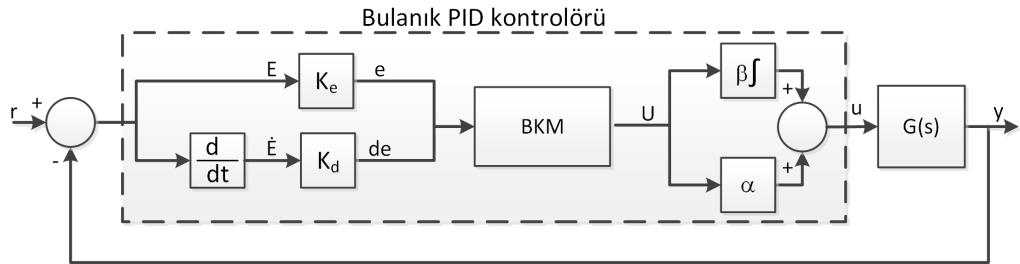
Bulanık PID kontrolörlerinin girişleri şu şekildedir: kapalı çevrim sistemin hatası ve bu hata işaretinin türevi. Eğer kontrol işareti doğrudan bu iki girişin bulanık kontrol mekanizmasında geçirilmesi ile elde ediliyorsa bahsi geçen kontrolör yapısı **bulanık PD kontrolördür**. Bir bulanık PD kontrolörüne ilişkin genel blok diyagramı Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2: Bulanık PD kontrolörlü kapalı çevrim sistem.

Şekil 5.2'de K_e , K_d ve α sırasıyla girişlere ve çıkışa ait ölçekleme çarpanlarını; BKM, bulanık kontrol mekanizmasını; u, sisteme uygulanan kontrol işaretini göstermektedir. Ölçekleme çarpanlarının seçimi ve etkisi ilerleyen kısımlarda anlatılacaktır.

Eğer bir bulanık PD kontrolörünün çıkışının integrali alınıp başka bir katsayı (β) ölçeklendirildikten sonra sisteme uygulanan kontrol işaretine eklenirse, bu yapı içerdiği integral elemanından dolayı **bulanık PID kontrolörü** olmaktadır. Bir bulanık PID kontrolörüne ilişkin genel blok diyagramı Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3: Bulanık PID kontrolörlü kapalı çevrim sistem.

Bulanık PID kontrolörlü kapalı çevrim sistemde, kontrol edilen sisteme uygulanan kontrol işareti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u = \alpha U + \beta \int U dt \quad (5.4)$$

Bir bulanık PID kontrolör tasarımında, çıkarım mekanizmasının değişkenlerinin seçiminin yanı sıra ölçekleme çarpanlarının belirlenmesi de önemli bir rol oynamaktadır. Bulanık kontrol mekanizmasının girişlerine ait üyelik fonksiyonlarının tanım uzayına göre giriş ölçekleme çarpanları ayarlanmalıdır. Bir bulanık PID kontrolör yapısı düşünülecek olursa, girişlerine ait üyelik fonksiyonları $[-1, 1]$ aralığında tanımlanmış olsun. Bu durumda, kapalı çevrim sistemin hatası ve türevini her koşulda $[-1, 1]$ aralığına düşürecek ölçekleme çarpanlarının belirlenmesi gerekmektedir. Ölçekleme çarpanlarının belirlenmesi üzerine farklı çalışmalar bulunmaktadır. Hata girişine ait ölçekleme çarpanı, referans işaretindeki genlik değişimine oranla bulunabilir. Ayrıca, hatanın türevine ait ölçekleme çarpanının hata girişinin ölçekleme çarpanıyla belli oranda olacağını söylemektedir. Denklem (5.5)'te matematiksel tanımlamalar gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} K_e &= \frac{1}{\Delta |R(s)|} \\ K_d &= \eta K_e \end{aligned} \quad (5.5)$$

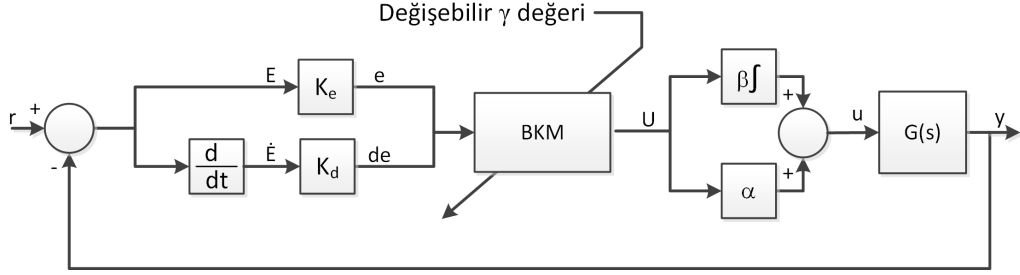
Denklem (5.5)'te $R(s)$ bir basamak işareti olarak düşünülecek olursa, işaretin genliğinin t anında h_1 değerinden h_2 değerine çıktığı varsayalım. Bu durumda, $\Delta |R(s)|$ ifadesi aslında Denklem (5.6)'daki gibi olmaktadır.

$$\Delta |R(s)| = h_2 - h_1 \quad (5.6)$$

Ayrıca, Denklem (5.5)'te görünün η katsayısı, K_d çarpanının K_e çarpanına oranla değişebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, ilk olarak γ değişiminin kapalı çevrim sistem cevabı üzerindeki etkisinin incelenmesi için önerilen ölçekleme çarpanları ve ardından Büyük Patlama-Büyük Çöküş eniyileme yöntemi [38] ile belirli bir amaç fonksiyonu doğrultusunda bulunmuş olan katsayılar kullanılacaktır.

5.3 Bulanık PID Kontrolör Tasarımı

Bulanık PID kontrolör yapısında birleştirme operatörü olarak γ işleminin ve dolayısıyla değişebilen γ değerlerinin kullanılabilir hale getirilmesi için Şekil 5.3'te bir değişiklik yapılacaktır. Şekil 5.4, bir iç parametresi dışarıdan değiştirilebilir hale getirilmiş bulanık PID kontrolörünün kapalı çevrim sistemde gösterimini içermektedir.



Şekil 5.4: Parametresi ayarlanabilir bulanık PID kontrolörlü kapalı çevrim sistem.

Bir önceki bölümde γ değerinin değişmesinin bulanık kontrolörün iç yapısındaki etkileri incelenmişti. Bu bölümde ise γ değişiminin kapalı çevrim sistem cevabı üzerindeki etkilerinin inceleneceğinden bahsedilmiştir. Şekil 5.4'teki yapı Matlab/Simulink üzerinde benzetimler için oluşturulmuştur. Kontrol edilecek sistemin seçimi, bulanık kontrolöre ait bir çok parametrenin ayarlanması ve ölçekleme çarpanlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılacak olan sistem, başka bir çalışmada kullanmış olan ölü zamanlı, doğrusal olmayan bir sistemdir [7]. Bahsi geçen sisteme ait diferansiyel denklemler Denklem (5.7)'de verilmektedir.

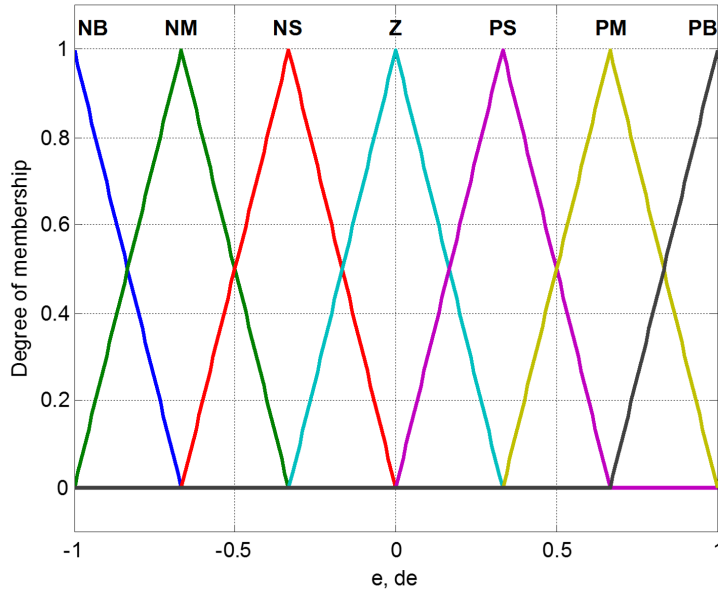
$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + 0,25y^2 = u(t - L) \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)'de verilen doğrusal olmayan süreç modelinde $L=0,5$ sn olmakla beraber bu sürecin kontrolü için bulanık PID kontrolörün ölçekleme çarpanları Denklem (5.8)'deki gibi önerilmiştir [7].

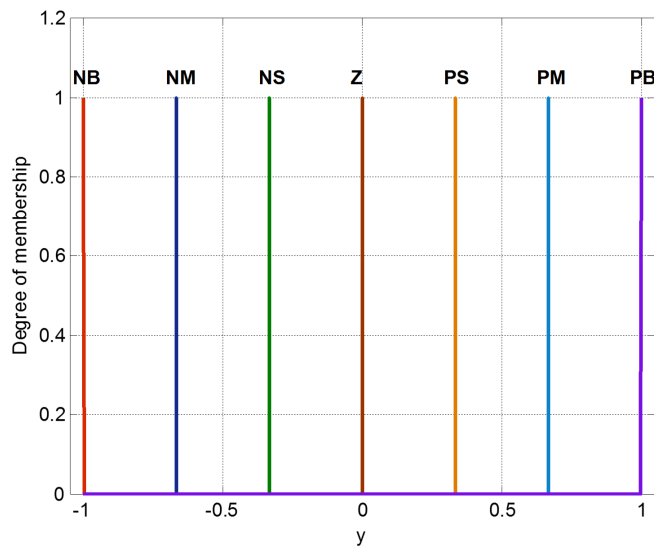
$$K_e = 0,9, K_d = 11, \beta = 0,018, \alpha = 0 \quad (5.8)$$

Denklem (5.8)'de verilen ölçekleme çarpanları, kontrol edilen sürecin kapalı çevrim yanıtının makul bir seviyede hızlı olmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.

Bulanık kontrol mekanizması ise Takagi-Sugeno tipinde; girişlerine ait üyelik fonksiyonları üçgen şeklinde, 7 tane %50 çakışık ve iki giriş için de aynı; çıkışına ait 7 tane tekil üyelik fonksiyonu olan; 49 kurallı bir yapı olarak tasarlanmıştır. Gerek girişler için gerekse çıkış için belirlenen 7 dilsel değişken şu şekildedir: NB (negatif-büyük), NM (negatif-orta), NS (negatif-küçük), Z (sıfır), PS (pozitif-küçük), PM (pozitif-orta), PB (pozitif-büyük). Girişlere ve çıkışa ait üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da görülebilir.



Şekil 5.5: Hata ve hatanın türevi için tanımlanan üyelik fonksiyonları.



Şekil 5.6: Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.

Bulanık kontrolöre ait kural tablosu Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

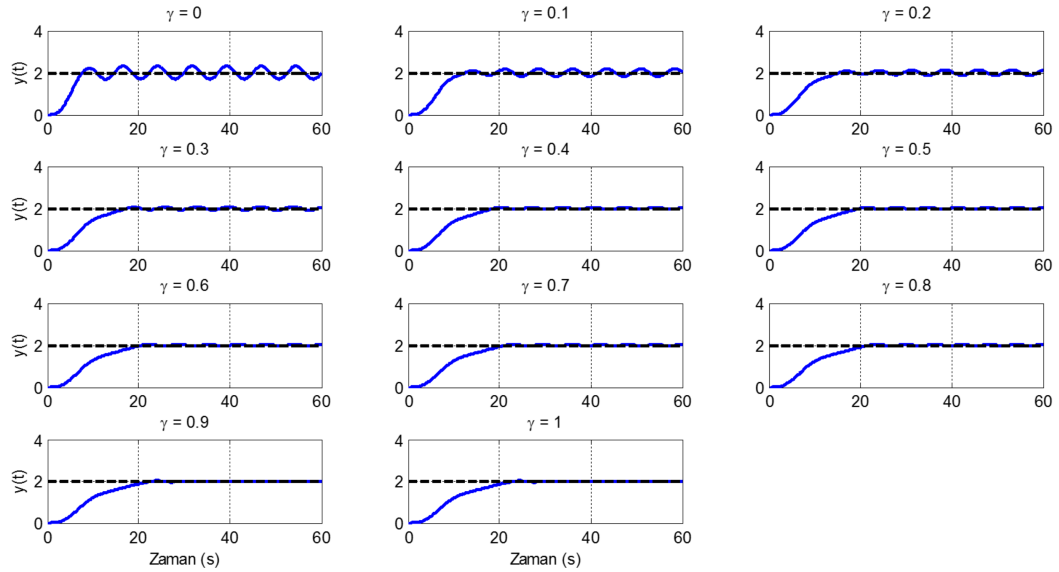
Çizelge 5.1: Tasarlanan kural tablosu.

$e \setminus de$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

5.3.1 Birleştirme işleminde γ operatörünün kullanılması

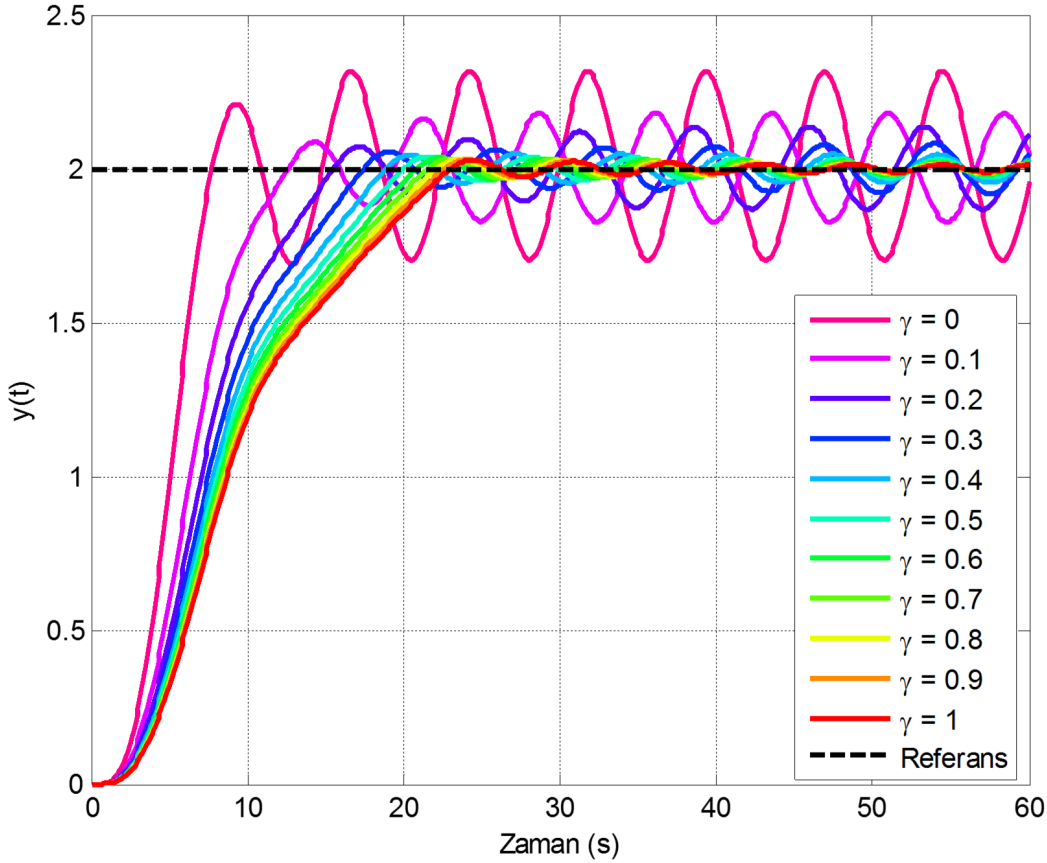
Tasarlanan bulanık kontrolör yapısı, bir önceki bölümdeki incelemelerde kullanılmıştı. Bir önceki bölümden hatırlamak gerekirse, değişen γ ile birlikte bulanık kontrolörün kontrol yüzeyleri sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’daki gibi değişecektir.

Şekil 5.4’teki yapının; seçilen örnek sistem, ayarlanan örnek ölçekleme çarpanları, tasarlanan bulanık kontrolör yapısı ile Matlab/Simulink ortamında oluşturulduğu söylenmişti. Bu noktada, γ değeri $[0, 1]$ aralığında 0,1 adımlarla değiştirilerek benzetimler yapılacaktır. Böylece, γ değişiminin kapalı çevrim sistem cevabı üzerindeki etkisi görselleştirilecektir. Şekil 5.9’da, değişen γ değerine göre sistem cevabının değişimi görülmektedir.



Şekil 5.7: γ değişimiyle beraber sistem cevabının değişmesi.

Şekil 5.7'ye göre γ değerinin değişimi sistem yanıtında bazı önemli değişikliklere sebep olmaktadır. Düşük γ değerlerinde kapalı çevrim sistem daha hızlı bir davranış sergilerken, γ değeri arttıkça sistem yanıtı yavaşlamaktadır. Her ne kadar, Şekil 5.7'de basamak cevapları ayrı ayrı gösterildiği için $\gamma = 0,3$ değerinden itibaren sistem yanıtları arasında çok fazla bir fark yokmuş gibi gözükse de benzetimler sonucunda elde edilen tüm yanıtların bir arada incelenmesi daha uygun bir altyapı sağlayacaktır. Şekil 5.7'deki sistem cevapları tek bir grafikte toplanarak Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.8: γ değişimine karşılık gelen sistem yanıtları.

γ değerinin $[0, 1]$ aralığında 0,1 adımlarla değiştirilmesi sonucu her benzetimde elde edilen sistem cevaplarının incelenmesi sonucu, γ - sistem cevabı ilişkisi için bazı çıkarımlar yapılabilir.

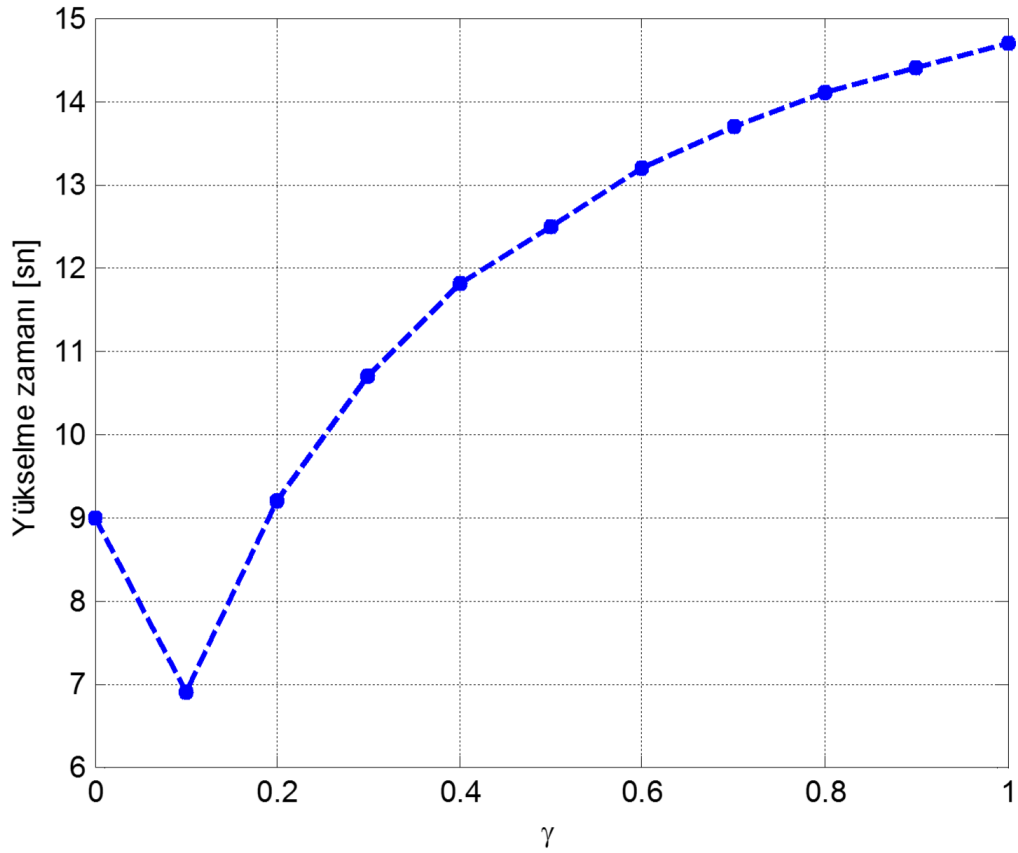
γ değişiminin,

- Geçici hal üzerinde etkisi vardır. Düşük γ değerleri yükselme zamanını düşürmektedir. Ancak, γ değeri arttıkça yükselme zamanı artarak, sistem cevabı aşırı sönümlü hale gelmektedir. Literatürde yükselme zamanı hesabı için farklı

ifadeler bulunmaktadır. Bunlardan yaygın olanı ise sistem yanıtının ulaştığı son değerin %10'u ile %90'ı arasında kalan zaman değeridir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$t_r = t|_{y=0.9y_f} - t|_{y=0.1y_f} \quad (5.9)$$

Denklem (5.9)'da y_f , sistem cevabının ulaştığı son değeri; y , sistem yanıtının değerlerini; t_r ise yükselme zamanını göstermektedir. Şekil 5.9'da γ değerlerinin değişimine karşılık yükselme zamanları gösterilmektedir.

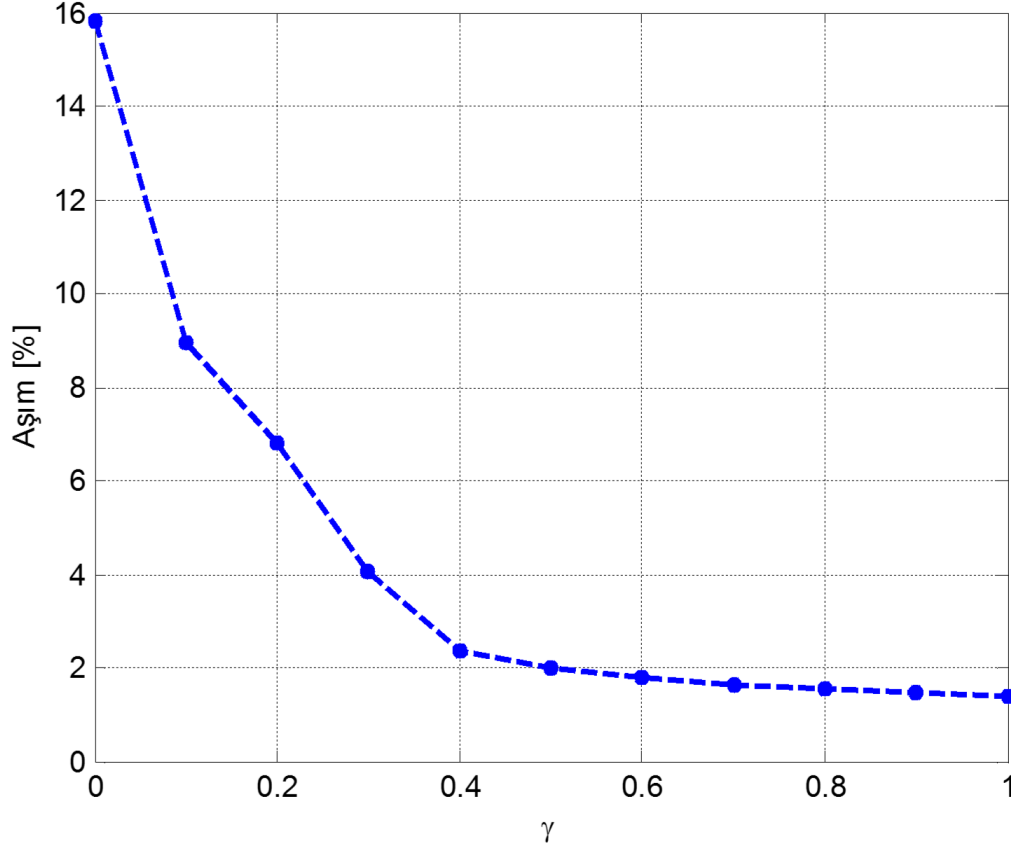


Şekil 5.9: γ değişimine karşılık gelen yükselme zamanları.

Yükselme zamanına ek olarak, aşım için de benzer bir çıkarım söz konusudur. γ değeri arttıkça sistem yanıtı daha düşük aşımına sahip olmaktadır. Aşım değeri Denklem (5.10) gösterildiği hesaplanmaktadır.

$$\% OS = \frac{y_m - y_f}{y_f - y_i} \quad (5.10)$$

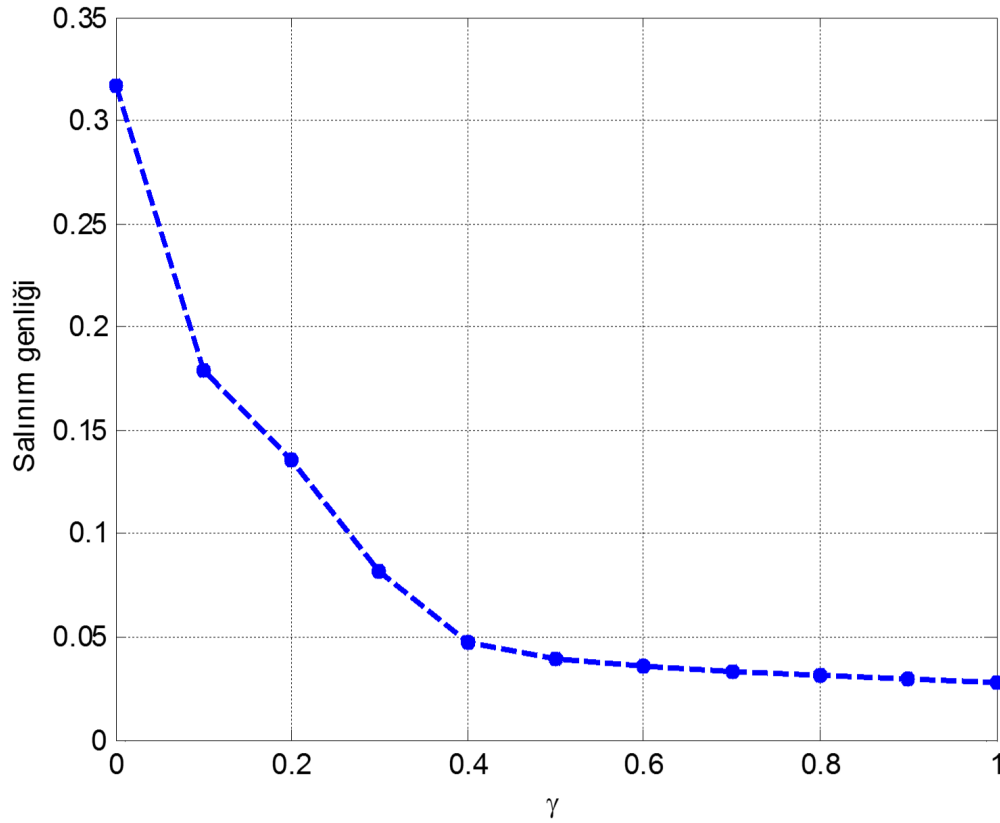
Denklem (5.10)'da y_m , sistem yanıtının tepe yaptığı değeri; y_f , sistem yanıtının son değerini; y_i ise sistem yanıtının başlangıç değerini göstermektedir. Benzetimlerde kullanılan tüm γ değerleri için elde edilen sistem cevaplarının yaptığı aşım lar da hesaplanmıştır. Şekil 5.10'da γ değerlerinin değişimine karşılık aşım değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.10: γ değişimine karşılık gelen aşım değerleri.

- Sürekli hal üzerinde etkisi vardır. γ değerinin artması sürekli haldeki salınımlı davranışın bastırılmasına neden olur. Geçici hal yanıtına olan etkisindeki gibi sürekli halde de daha ağır bir davranış elde edilir. Sürekli halde salınımlı bir cevap görüldüğü için değişen γ değerlerine karşılık elde edilen salınım değerleri, Şekil 5.10 ile benzerlik göstermektedir. Şekil 5.11, γ değerlerinin değişimi ile elde edilen salınımlı sürekli yanıtlarının salınım değerlerini göstermektedir.

Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'e göre γ değerinin değişmesi gerek geçici hal yanıtını gerekse sürekli hal yanıtını etkilemektedir. Bu çıkarımlar kullanılarak, γ değerinin değiştirilmesi ile sistem yanıtı hem geçici halde hem de sürekli halde iyileştirilebilir. Elde edilen inceleme sonuçları hatırlanacak olursa, düşük γ değerleri



Şekil 5.11: γ değişimine karşılık gelen sürekli haldeki salınım değerleri.

sistem cevabını hızlandırıp daha agresif bir davranış sergilemesini sağlarken; yüksek γ değerleri sistem davranışını ağırlaştırarak cevabın daha yavaş olmasını sağlar. Bunlara göre γ değerinin çevrimiçi olarak ayarlanabildiği varsayımı altında yükselme zamanını en aza indiren ve aşırı bir cevap elde edilmesini sağlayan bir bulanık PID kontrolör tasarımı yapılabilir.

Elde edilen çıkarımlara göre bir γ ayar mekanizması ile yeterince hızlı ve aşırı sistem cevabı elde etmek mümkündür. Bu örnek uygulama için öncelikle tasarımın kapsamı düşünülmelidir. Kontrolörden istenenlerin karşılanması için ayar mekanizması tasarımında, benzetimler sonucunda elde edilen çıkarımların verimli bir biçimde kullanılması ve ölçekleme çarpanlarının dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. İnceleme sonuçlarına göre γ ayarlama mekanizmasının tasarımının yapılması bazı temel adımları içermelidir.

5.3.2 Ölçekleme çarpanlarının seçimi

Benzetimlerde kullanılan ölçekleme çarpanları, [7] çalışmasında verilmiş olup yine aynı çalışmada kullanılan doğrusal olmayan sistem için makul ölçüde hızlı cevap

vermesini sağlayacak şekilde ayarlandığı belirtilmiştir. Bahsi geçen ölçekleme çarpanları, benzetimler için yeterli olsa da amaçlanan kontrol sistemi tasarımı için yetersiz ve dayanaksız olacaktır. Bu yüzden bazı tasarım noktalarının belirlenmesi ve bu doğrultuda ölçekleme çarpanlarının bulunması gerekmektedir.

Ölçekleme çarpanları hesabı için pek çok farklı yöntem mevcuttur. Yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri de belli bir amaç fonksiyonu doğrultusunda eniyilime metodlarından birinin kullanılması ve böylece bir çalışma noktası için ölçekleme çarpanlarının elde edilmesidir.

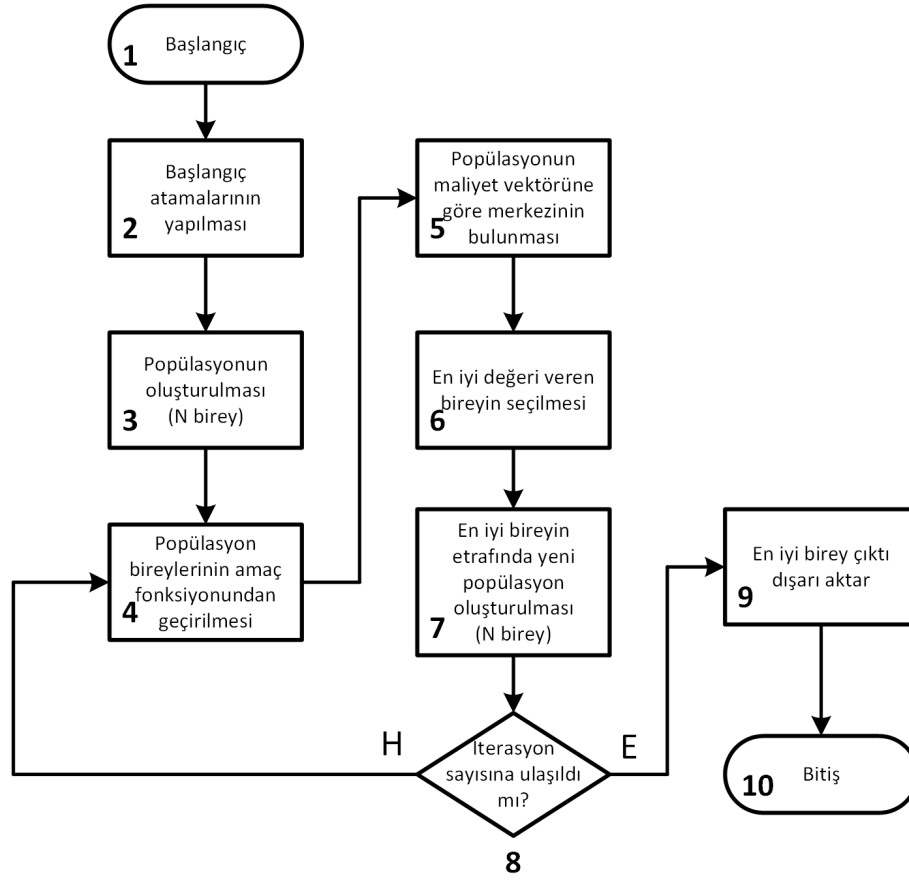
Bu çalışmada, Erol ve Eksin tarafından 2006 yılında önerilmiş olan Büyük Patlama-Büyük Çöküş eniyileme yöntemi [38] kullanılarak bir çalışma noktası etrafında ölçekleme çarpanları bulunmaktadır.

Büyük Patlama-Büyük Çöküş eniyileme algoritmasının en önemli özelliği yüksek yakınsama hızının yanında düşük hesaplama zamanıdır. Bu evrimsel yöntemin çalışma mantığı, yakınsayan çözümün, yeni çözüm kümesinden oluşan kaotik bir duruma dönüştürülmesi olarak belirtilmiştir [38]. Büyük Patlama-Büyük Çöküş optimizasyon algoritması ilk olarak bulanık model çıkış parametrelerinin çevrimiçi uyarlanması kullanılmıştır [39].

Büyük Patlama-Büyük Çöküş algoritması genel olarak iki ana fazdan oluşmaktadır. İlk faz büyük patlama olarak adlandırılmaktadır. Bu fazda bireyler (aday çözümler) diğer evrimsel yöntemlerde de rastlandığı gibi arama uzayında normal dağılım ile oluşturulur. Büyük çöküş olarak adlandırılan ikinci fazda popülasyonun ağırlık merkezi veya en uygun bireyi hesaplanır. Tüm büyük patlamalar büyük çöküş fazında bulunan nokta etrafında olmaktadır.

Şekil 5.12’de Büyük Patlama-Büyük Çöküş algoritmasının akış diyagramı gösterilmektedir. Aynı zamanda Şekil 5.12’deki adımlar Çizelge 5.2’de ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır.

Büyük patlamadan sonraki büyük çöküş fazında ağırlık merkezi olan X_C , X_i i. bireyin konumu, f_i i. bireyin amaç fonksiyonu değeri ve X_i popülasyondaki birey sayısı olmak üzere Denklem (5.11)’deki formül kullanılarak hesaplanır ya da amaç fonksiyonu en küçük olan birey, en iyi birey olarak belirlenir ve büyük patlama noktasına karar verilir.



Şekil 5.12: Büyük Patlama-Büyük Çöküş eniyileme algoritmasının akış diyagramı.

$$X_C = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} X_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i}} \quad (5.11)$$

Büyük patlama fazında yeni bireyler (aday çözümler) olan X_i^{yeni} , X_C ağırlık merkezi veya en iyi birey, σ standart normal dağılımın standart sapması olmak üzere Denklem (5.12) kullanılarak oluşturulur.

$$X_i^{yeni} = X_C + \sigma \quad (5.12)$$

r normal dağılım ile belirlenen rastgele sayı, k iterasyon sayısı, X_{maks} arama uzayı üst sınırı, X_{min} arama uzayı alt sınırı ve s arama uzayı daraltma katsayısı olmak üzere, standart sapma değeri olan σ iterasyon sayısı arttıkça Denklem (5.13)'teki formüle göre azalmaktadır.

Çizelge 5.2: Büyük patlama-büyük çöküş algoritmasının detaylı adımları.

Adım No.	Açıklama
1	Algoritmanın ilk adımı
2	Popülasyon büyüklüğünün (N), iterasyon sayısının, amaç fonksiyonunun, arama uzayı daraltma faktörünün atanması
3	Normal dağılıma sahip N tane bireyin rastgele oluşturulması ve popülasyon olarak bir araya getirilmesi
4	Popülasyonun her bireyinin amaç fonksiyonundan geçirilerek, her bireyin maliyetin hesaplanması
5	Tüm bireylere ait maliyet değerlerinden oluşan vektörün en iyi elemanının bulunması. En iyi eleman en küçük maliyet değeridir. En küçük maliyet değerini veren birey, popülasyonun merkezini göstermektedir.
6	En iyi birey, en küçük maliyet değerini veren elemandır.
7	En iyi birey etrafında yeni popülasyon oluşturulur. Yeni bireyler, normal dağılıma göre rastgele olarak en iyi birey etrafında üretilir. Arama uzayının dışına düşen bireyler, uzayın sınırına taşınır. Bu işlemler esnasında, arama uzayı daraltma faktörü de hesaba katılmaktadır.
8	Başta atanmış olan iterasyon sayısına ulaşmadıysa Adım 4-7 tekrarlanmaya devam edilir. Eğer iterasyon sayısına ulaşıldıysa, döngüden çıkılır.
9	En son iterasyonda elde edilen popülasyonun en iyi bireyi dışarı aktarılır
10	Algoritma sonu

$$\sigma = \frac{0,5 \cdot r(X_{maks} - X_{min})}{1 + \frac{k}{s}} \quad (5.13)$$

Denklem (5.12), Denklem (5.13) kullanılarak tekrardan yazılacak olursa yeni bireylerin oluşturulması için gerekli formülün açık hali Denklem (5.14)'teki gibi elde edilir.

$$X_i^{yeni} = X_C + \frac{0,5 \cdot r(X_{maks} - X_{min})}{1 + \frac{k}{s}} \quad (5.14)$$

Normal dağılımdaki sayılar ± 1 aralığında olsalar bile popülasyonun belirtilen sınırlar içinde tutulması gerekmektedir.

Bir optimizasyon yöntemi optimum bir noktaya yakınsamalıdır fakat yöntemin aynı zamanda global yöntem olarak sınıflandırılabilmesi için arama uzayında azalan olasılıkla farklı noktalar içermesi gereklidir. Yani biraz daha açıklamak gerekirse yeni oluşturulan bireylerin çoğu, optimum nokta etrafında olmalıdır ancak az bir kısmı da

uzayın geri kalan bölgesine yayılmalıdır. İterasyon sayısı arttıkça optimum noktanın uzağında oluşturulan bireylerin sayısı azalmalıdır.

Büyük Patlama-Büyük Çöküş algoritması hakkında verilen detaylı bilgilerden sonra bu çalışmaya yönelik atamalar ve ayarlamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Çizelge 5.3: Büyük patlama-büyük çöküş algoritmasının ayarlanan değişkenleri.

Değişken	Değer
İterasyon sayısı	100
Populasyon sayısı	20
Arama uzayı daraltma faktörü	10
Amaç fonksiyonu	Yükselme zamanı minimizasyonu

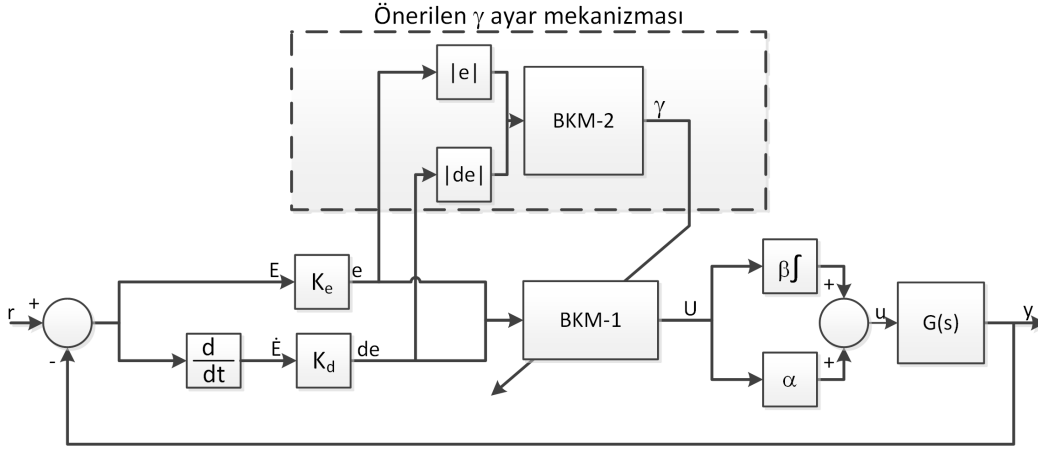
Kapalı çevrim sistemin Matlab/Simulink ortamında kurulduğundan daha önce bahsedilmişti. Büyük patlama-büyük çöküş algoritması da Matlab üzerinde kullanılarak, Çizelge 5.3'te gösterilen ayarlamalara göre en iyi ölçekleme çarpanları bulunmuştur. Yapılan bu benzetimlerde γ değeri yalnızca 0'a ayarlanmıştır. Yükselme zamanının $\gamma = 0$ iken düşük olduğu hatırlanmalıdır. Benzetim ve hesaplama sonuçlarına göre elde edilen ölçekleme çarpanları aşağıdaki gibi çıkmıştır.

$$K_e = 1,0 , K_d = 0,3219 , \beta = 0,9357 , \alpha = 0,5431 \quad (5.15)$$

Bu çalışmanın geri kalan kısmında, Denklem (5.15)'te verilen çarpanlar bulanık PID kontrolörün ölçekleme çarpanları olarak kullanılacaktır. Bu bölümde, üzerinde çalışılacak sistem seçildi, bulanık PID kontrolör tasarımı yapıldı, değişen γ değerleri ile kapalı çevrim sistem cevapları incelendi, önerilen yöntemde kullanılmak üzere Büyük Patlama-Büyük Çöküş eniyileme yöntemi ile yükselme zamanını ($\gamma = 0$ iken) en aza indiren ölçekleme çarpanları bulundu. Bir sonraki bölümde ise bulanık PID kontrolörün çevrimiçi değişen γ değerleri ile verdiği yanıtlar incelenip, γ değerinin çevrimiçi olarak özayarlanmasını sağlayacak yapı tasarımı üzerinde durulacaktır.

6. GAMA OPERATÖRÜNE BAĞLI YENİ BİR ÖZ-AYARLAMA YÖNTEMİ

Bir önceki bölümde, γ değeri dışarıdan çevrimdışı olarak değiştirilebilen bulanık PID kontrolör tasarımı yapılmıştır. Bu bölümde ise γ 'nın çevrimiçi ve otomatik bir biçimde ayarlanması üzerinde durulacaktır. Bunun için öncelikle özayarlama mekanizmasının nasıl bir yapıya sahip olacağı düşünülmelidir. γ değeri değiştirilerek sistem yanıtının iyileştirilmesi hedeflenmektedir ve γ ayar mekanizması da sistem yanıtının durumu bilgisine sahip olması için giriş olarak kapalı çevrim sistemin hatasını almalıdır. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmalar sonucu düşük γ değerlerinin daha kısa sürede, yüksek γ değerlerinin ise daha uzun sürede etki gösterdiği çıkarımları elde edilmiştir. Bu açıdan düşünüldüğünde γ ayar mekanizmasının girişinin sadece hataya bağlı olmadığı aynı zamanda hatanın değişimine (türevine) de bağlı olduğu görülmektedir. Ayar mekanizması tarafından üretilmesi gereken γ değerleri $[0, 1]$ aralığında olmalıdır. Yapılmış olan pek çok benzetim sonucunda belirtilen aralıkta γ üretilmesi için ve hata ile hatanın türevi girişlerinin işaretinin önemi olmadığı görüldüğünden γ ayar mekanizmasının girişlerindeki hata ve hatanın türevi işaretlerinin mutlak değeri alınması gerekmektedir. Bu iki giriş ile üretilmesi gereken γ değeri arasındaki ilişki farklı şekillerde kurulabilir. Bunlardan biri, ilişkinin analitik olarak yazılabilmesidir. Ancak, bu şekilde bir ifadeyi yazmak için hem çok fazla sayıda hem de çok geniş kapsamlı deneylerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca, analitik ifade yeterince esnek olmayacağı için farklı çalışma noktaları için verimsiz ya da istenmeyen davranışlar sergileyebilir. Yaklaşımlardan bir diğeri ise bulanık sistem ya da yapay sinir ağı gibi esnek ve dinamik bir yapı kullanılmasıdır. Bulanık PID kontrolörün içindeki bir değişkenin başka bir bulanık karar mekanizması ile ayarlanması fikri oldukça uygun durmaktadır. Girişlerine hata ve hatanın türevinin mutlak değerlerini alan, bu girişlere ait dilsel değişkenleri ve kuralları olan bir mekanizma ile γ değerlerinin çevrimiçi olarak ayarlanması pek mümkün durmaktadır. γ ayar mekanizması ile birlikte kapalı çevrim sistem Şekil 6.1'deki gibi olacaktır.

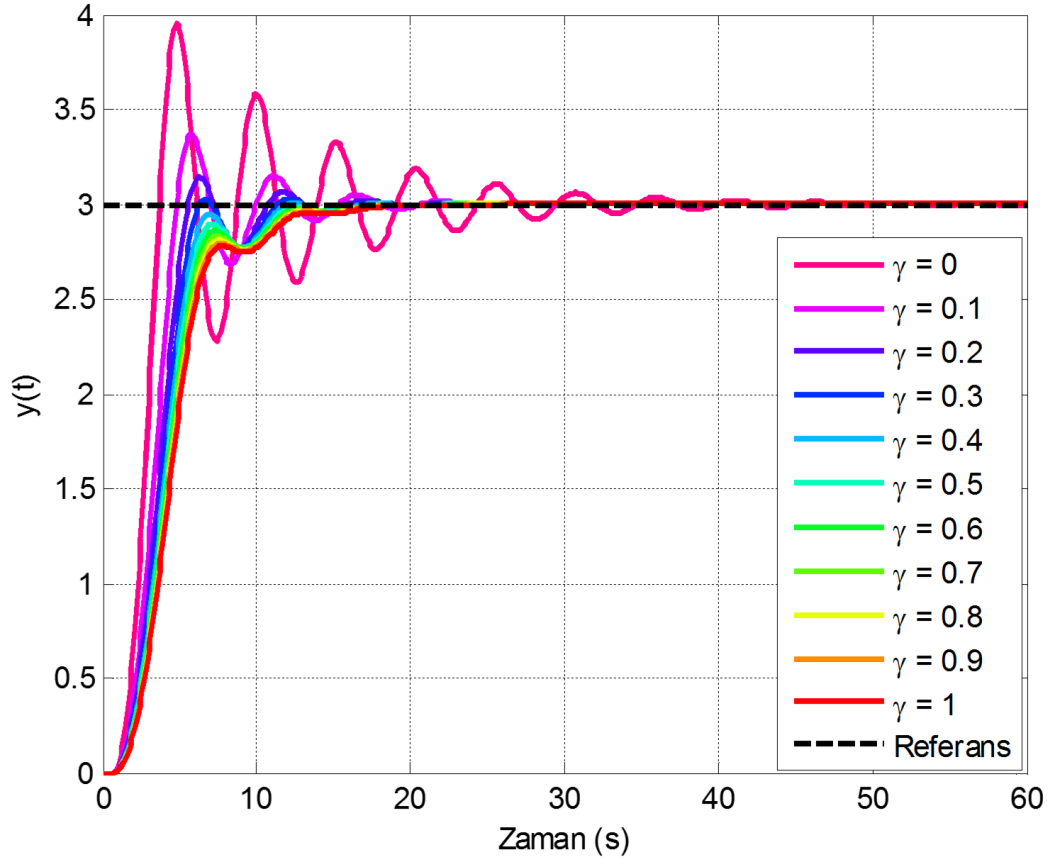


Şekil 6.1: Öz-ayarlamalı bulanık PID kontrolörlü kapalı çevrim sistem.

Şekil 6.1, önceki bölümde verilen kapalı çevrim sistemin üzerine dinamik ayar mekanizmasının eklenmiş halidir. Burada BKM-1, kapalı çevrim sistemdeki bulanık PID kontrolörün merkezini oluşturan bulanık kontrol mekanizmasını; BKM-2 ise önerilen yöntemdeki γ özayar yapısının merkezini oluşturan bulanık kontrol mekanizmasını göstermektedir. Amaçlanan yapı oluşturulduktan sonra sıra BKM-2 yapısının iç tasarımına gelmektedir. Bu nokta, önerilen yöntem için en önemli nokta olmakla beraber, γ değişiminin kontrol yüzeyi ve sistem yanıtı üzerine etkileri göz önünde tutularak iç tasarımın yapılması gerekmektedir. γ seçiminin etkisi aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir.

- Yüksek γ seçildiğinde sistem cevabı geçici halde ağır bir davranış sergilerken, bu durum sürekli halde cevabın düzeltilmesi için kullanılabilir. Bunun tam tersi olarak, düşük γ seçildiğinde sistem cevabı geçici halde hızlı hareket ederek geçici hal yanıtının hızlandırılması için kullanılabilir. γ 'nın yeterince etkin kullanılması sistem cevabındaki salınımları, yüksek aşırımları, aşırı sönümlü olma, yüksek yerleşme zamanına sahip olma gibi istenmeyen sonuçları bastırabilir. Doğru bir tasarım ile hem geçici hal yanıtı hem de sürekli hal yanıtı iyileştirilebilir. Bunun için; cevabın yükselme zamanı oldukça düşük, aşırımsız ya da az aşım yapan bir davranışa sahip olması gerekmektedir.

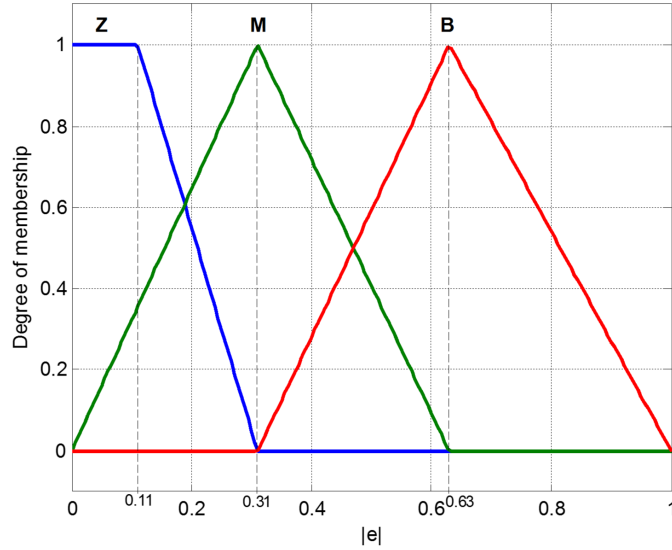
Bir önceki bölümde elde edilen ölçekleme çarpanlarının değişen γ değerleri ile kullanılarak elde edilen sistem yanıtları, γ seçiminin öneminin vurgulayacak ve üst paragrafta özetlenen çıkarımı kanıtlayacak biçimde Şekil 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.2: γ değişimine karşılık gelen sistem yanıtları.

Ayar mekanizmasının ölçekleme çarpanları dışında kalan değişkenleri tasarlanmalıdır. Ölçekleme çarpanları olarak halihazırda bulanık PID kontrolör için bulunmuş çarpanlar kullanılmaktadır. Ayar mekanizmasının $[0, 1]$ uzayına düşürülmüş iki adet girişi bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucu bu aralığın üç dilsel değişken (Z , M , B) ile ifade tanımlanmasına karar verilmiştir. Ancak, bulanık PID kontrolördeki gibi iki girişin de üyelik fonksiyonları birbiri ile aynı olmayacaktır. Hatanın mutlak değeri ile hatanın türevinin mutlak değerinin γ seçimi üzerinde farklı şekilde etkileri bulunmaktadır. Bu yüzden, hatanın mutlak değeri girişine ait üyelik fonksiyonları Şekil 6.3'te, hatanın türevinin mutlak değeri girişine ait üyelik fonksiyonları ise Şekil 6.4'te görülmektedir.

Tasarlanan yapı Takagi-Sugeno tipindedir ve bu yüzden çıkışa ait üyelik fonksiyonları tekildir. Yapılan deneysel çalışmalar ve çıkarımlar sonucunda ayar mekanizmasının çıkışı için 5 üyelik fonksiyonu belirlenmiştir. Çıkışa ait üyelik fonksiyonları Şekil 6.5'te yer almaktadır.



Şekil 6.3: Hatanın mutlak değeri girişine ait üyelik fonksiyonları.

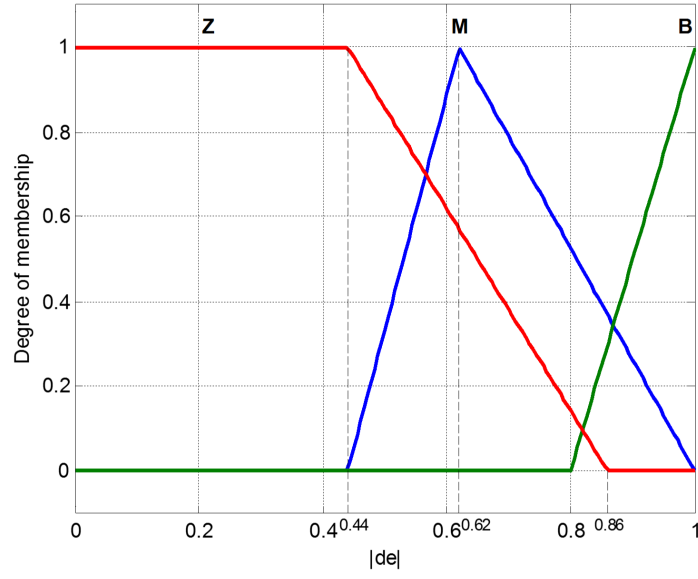
Giriş-çıkış üyelik fonksiyonları tanımlandıktan sonra kural tablosunun oluşturulması gerekmektedir. Benzer şekilde, yapılan tüm çalışmalar ve çözümlemeler sonunda kural tablosu aşağıdaki gibi düşünülmüştür.

Çizelge 6.1: γ ayar mekanizması için kural tablosu.

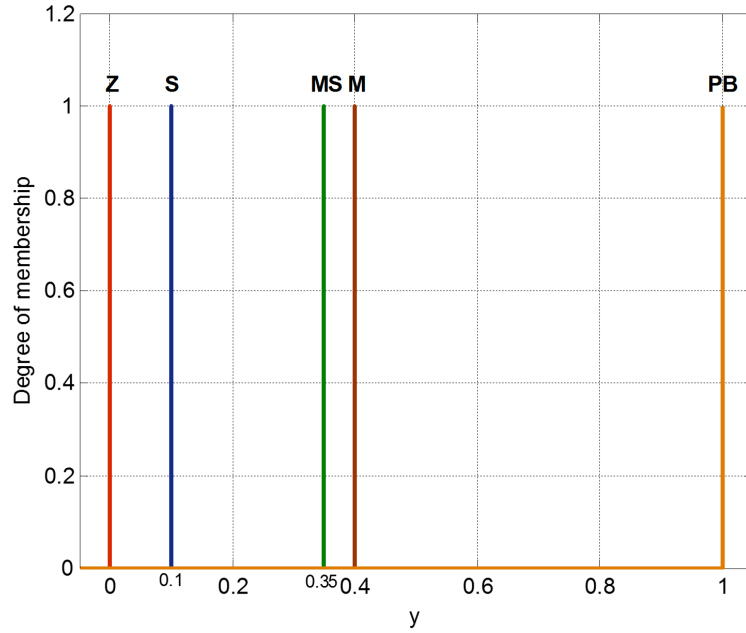
$ e \setminus de $	Z	M	B
Z	PB	S	S
M	S	MS	M
B	MS	M	PB

Tasarlanan bulanık karar mekanizmasının kontrol yüzeyi, farklı üyelik derecelerinde sistemin nasıl davranacağı konusunda bilgi vermektedir. Ayar yüzeyi Şekil 6.6'da gösterilmektedir.

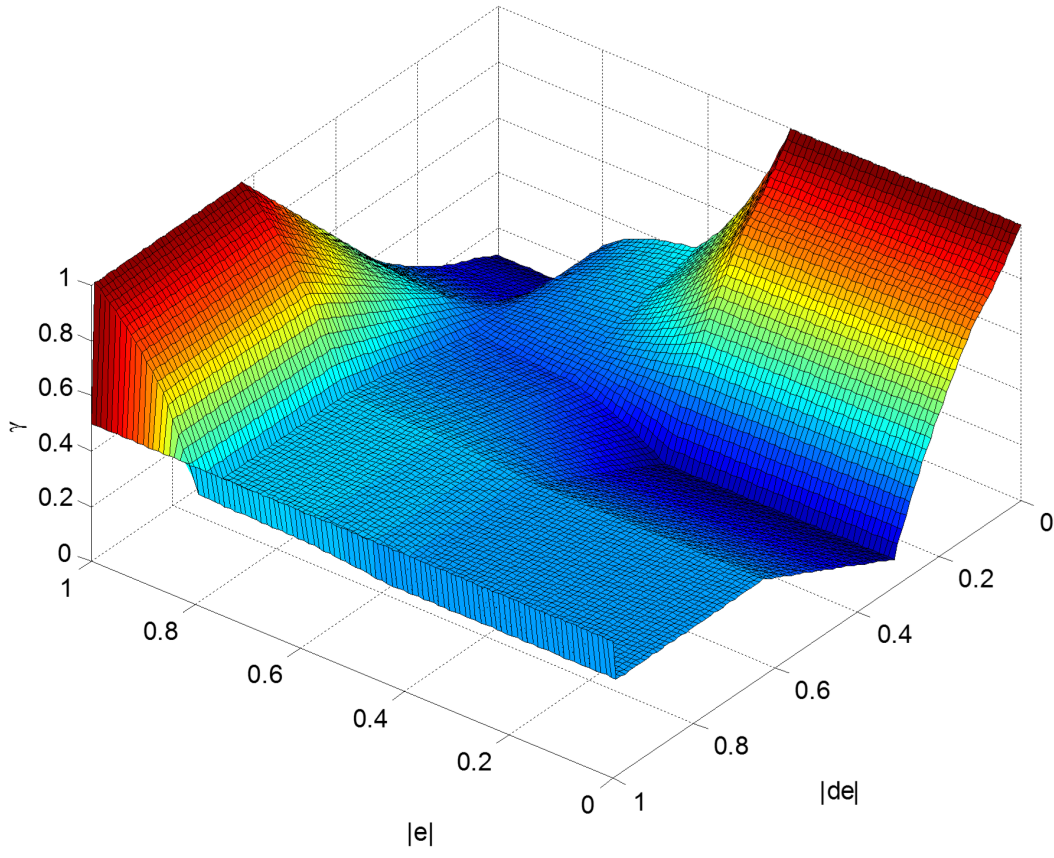
Bu noktaya kadar, bulanık PID kontrolör tasarımı yapıp üzerine γ özayarlama mekanizması eklende. Ayar mekanizmasının tüm iç değişkenleri ayarlandı. Sonraki bölümde özayarlama kontrol sisteminin benzetim çalışmaları yapılacaktır. Böylece, seçilen sistem için istenen geliştirmelerin γ değerlerinin çevrimiçi olarak bazı kurallara göre değiştirilmesiyle yapılabilirliği incelenecektir.



Şekil 6.4: Hatanın türevinin mutlak değeri girişine ait üyelik fonksiyonları.



Şekil 6.5: Ayar mekanizmasının çıkışına ait üyelik fonksiyonları.



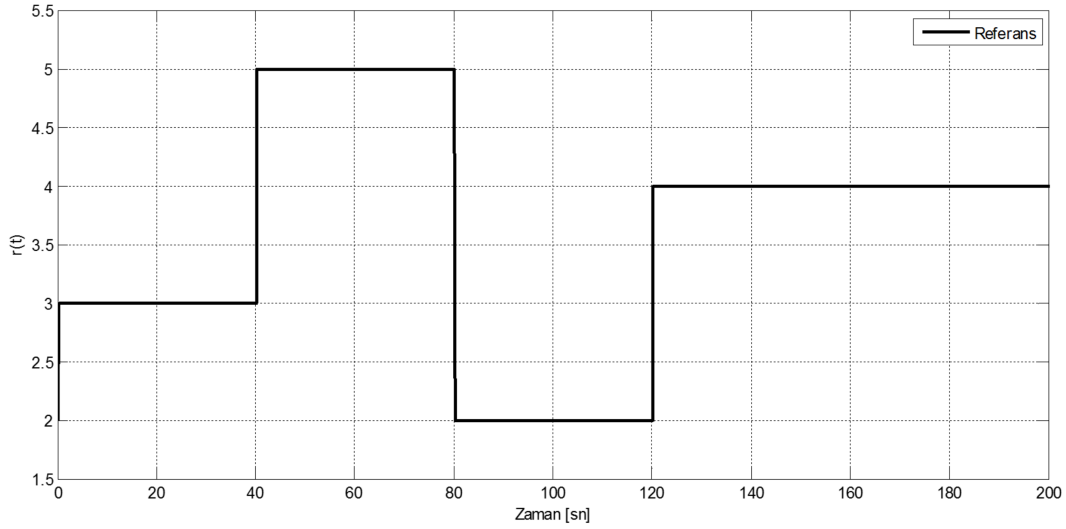
Şekil 6.6: Ayar mekanizmasına ait ayar yüzeyi.

7. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Şekil 6.1’de görülen yapı Matlab/Simulink ortamında kurulmuştur. Bu bölümde, tasarlanan bulanık yapının başarımı incelenecektir. Bulanık PID kontrolör tasarımlarında sıkça kullanılan VE ($\gamma = 0$) birleştirme operatörü, değişken γ değerlerine göre en hızlı cevabın elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yüzden, bir önceki bölümde ölçekleme çarpanları $\gamma = 0$ değerine göre bulunup; bozucuların hızlı bastırılmasını, sistem cevabının hızlı ve aşısız (ya da çok aşımli) sağlayan öz-ayarlamalı bulanık PID kontrolör yapısı uygulanmıştır. Bu kontrolörün birleştirme operatörünün parametresi (γ), başka bir bulanık yapı ile ayarlanmaktadır. Bahsi geçen tüm yapı Şekil 6.1’de verilmiştir.

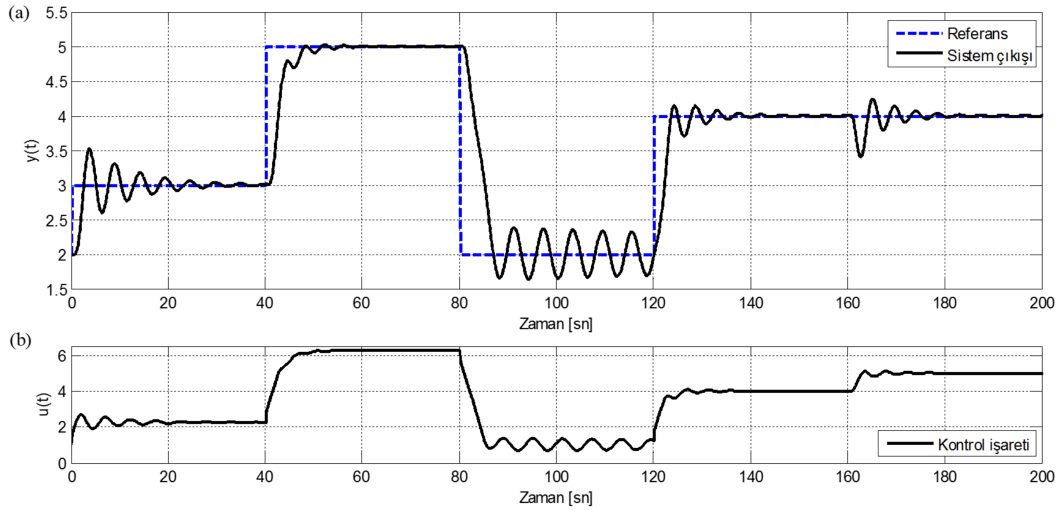
7.1 Benzetimlerin Uygulanması

Benzetim çalışmaları, yaygın olarak kullanılan VE işlemi ile çevrimiçi olarak ayarlanan γ işlemini içermektedir. Aynı kapalı çevrim sistem aynı giriş koşulları altında bulanık PID kontrolörün birleştirme işleminde yalnızca VE operatörü ve değişebilen γ değerine sahip γ operatörü kullanılarak kontrol edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarda kontrol işaretleri, sistem cevaplarının istenen koşulları ne kadar sağladığı ve kullanılan γ değerleri incelenmiştir. Benzetimlerde kullanılan referans işareti bir dizi basamak işaretinden meydana gelmektedir. Böylece, farklı çalışma noktalarında klasik ve önerilen yapıların verimleri de görülmüş olacaktır. Benzetim çalışmalarında uygulanan refans işareti aşağıda gösterilmektedir.



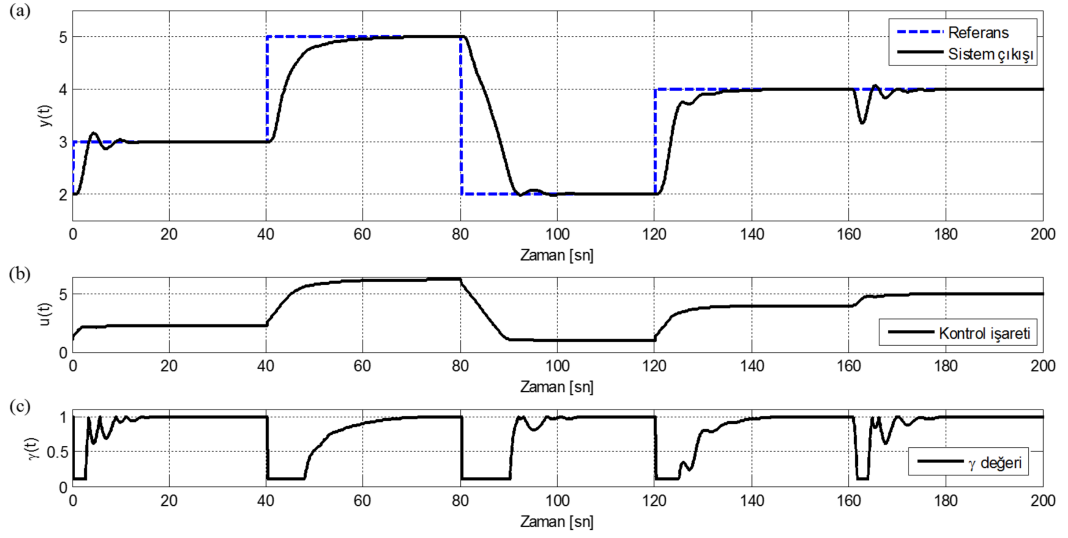
Şekil 7.1: Benzetim çalışmalarında uygulanan referans işareti.

Bahsedilen deneysel koşullar ilk etapta klasik VE işlemi için uygulanmıştır. Sistem çıkışı ve kontrol işareti Şekil 7.2’de görülmektedir.



Şekil 7.2: Birleştirme işlemi VE operatörü ($\gamma = 0$) olan bulanık PID kontrolörlü sistemin çıkışı (a) ve kontrol işareti (b).

İkinci etapta ise birleştirme işlemi γ operatörü olan ve γ değerinin tasarlanan bulanık karar verme mekanizması ile çevrimiçi olarak değiştirildiği kapalı çevrim sisteme Şekil 7.1’de verilen referans işareti uygulanmıştır. Sistem çıkışı, kontrol işareti ve bulanık kontrolöre uygulanan γ değerleri Şekil 7.3’te görülmektedir.



Şekil 7.3: Birleştirme işlemi γ operatörü olan önerilen yöntemin uygulandığı bulanık PID kontrolörlü sistemin çıkışı (a), kontrol işareti (b), belirlenen γ değerleri (c).

7.2 Benzetim Sonuçlarının Yorumlanması

Önerilen yapının başarımının incelenmesi ve klasik bir yapı ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Klasik yapı olarak sabit $\gamma = 0$ (diğer bir deyişle VE işlemi) kullanan bulanık PID kontrolör ile sistem kontrol edilmiştir. Benzetimlerde 4 farklı basamak girişi senaryosu bir dizi halinde kullanılmıştır. Bu dizi, genliğin artması, genliğin azalması ve artma-azalmanın farklı değerlerde ve miktarlarda yapılmasını içermektedir. Her referans girişi için iki benzetimin de yükselme zamanları, aşım değerleri, yerleşme zamanları ve ITAE (hatanın mutlak değerinin zamanla çarpımının integrali) değerleri hesaplanarak karşılaştırma için kullanılacaktır. Belirtilen değerler Çizelge 7.1 üzerinde gösterilmektedir. Ayrıca, ITAE fonksiyonu aşağıda gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$ITAE = \int t \cdot |e(t)| dt \quad (7.1)$$

Çizelge 7.1: Çeşitli kriterlere göre $\gamma = 0$ ile önerilen yöntemin performanslarının karşılaştırılması.

	Ref: 2 $\rightarrow$ 3				Ref: 3 $\rightarrow$ 5				Ref: 5 $\rightarrow$ 2				Ref: 2 $\rightarrow$ 4			
	$t_r[sn]$	% Aşım	$t_s[sn]$	ITAE	$t_r[sn]$	% Aşım	$t_s[sn]$	ITAE	$t_r[sn]$	% Aşım	$t_s[sn]$	ITAE	$t_r[sn]$	% Aşım	$t_s[sn]$	ITAE
$\gamma = 0$	1,2	3,5	35,7	41,8	5,3	5,0	11,3	18,7	5,1	3,4	—	187,2	2,8	4.1	16,0	20,1
Önerilen yöntem	1,7	3,1	13,2	8,7	8,0	5,0	20,1	48,8	8,1	3,01	16,3	84,3	6,7	4,0	14,9	30,7

Önerilen yöntem ile klasik yöntemin referans takibinin karşılaştırılmasının yanı sıra 160. saniyede sisteme giren -0,5 genlikli bozucu için bozucu bastırma performansları da incelenecektir. Performans ölçümü için ise IAE (hatanın mutlak değerinin integrali), ITAE (hatanın mutlak değerinin zamanla çarpımının integrali), ISE (hatanın karesinin integrali), ITSE (hatanın karesinin zamanla çarpımının integrali) kriterleri kullanılmıştır. Karşılaştırma tablosu Çizelge 7.2’de görülebilir. ITAE fonksiyonunun tanımı Denklem (7.1)’de verilmiştir. Diğer kriterlerin matematiksel tanımları ise aşağıda sırasıyla gösterilmektedir.

$$IAE = \int |e(t)|dt \quad (7.2)$$

$$ISE = \int e^2(t)dt \quad (7.3)$$

$$ITSE = \int t \cdot e^2(t)dt \quad (7.4)$$

Çizelge 7.2: Çeşitli kriterlere göre $\gamma = 0$ ile önerilen yöntemin bozucu bastırma performanslarının karşılaştırılması.

	Bozucu			
	IAE	ITAE	ISE	ITSE
$\gamma = 0$	2,4	16,1	0,69	2,71
Önerilen yöntem	2,0	10,1	0,76	2,6

Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 incelendiğinde bazı sonuçlara görsel olarak ulaşmak mümkündür. Önerilen yöntemin geçici halde sistem yanıtını yeterince hızlı şekilde referansa çıkartırken, bir yandan da salınım yapmasını bastırarak olabildiğince düz bir biçimde referans takibi yapması açıkça görülmektedir. Diğer bir yandan, VE işlemi kullanan kontrol sistemi hızlı bir cevaba sahip olmasına rağmen salınımlar yapmaktadır. Bozucunun sisteme etkidiği zaman da ise önerilen yöntemin klasik yönteme göre daha az salınımlı bir davranış sergilediği ortadadır. Şekil 7.3 (c)’de ise benzetim boyunca önerilen yapının üretmiş olduğu γ değerleri yer almaktadır. Burada da γ değerlerinin amaçlanan biçimde üretildiği ve sisteme katıldığı görülmektedir.

Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2 ise sayısal karşılaştırmalar için yeterli bilgiyi içermektedir. Çizelge 7.1’de kullanılan 4 kriterden 3 tanesi geçici hal performansı kriteridir, geri kalan kriter ise kapalı çevrim sistem hatasının zamana bağlı durumunu göstermektedir. Çizelge 7.1’e bakıldığında önerilen yöntemin özellikle aşım ve yerleşme zamanı kriterleri açısından önemli geliştirmeler yaptığı görülmektedir. Yükselme zamanı ise $\gamma = 0$ ’a yakın bir değerde (genellikle üstünde) olmaktadır. Burada bir ödünleşmeden bahsedilebilir. Önerilen yöntem, sistemi aşımsız ya da az aşımlı ve kısa sürede referansa ulaştırırken yükselme zamanı konusunda az da olsa kayıp yaşamaktadır. Çizelge 7.2’de 160. saniyede uygulanan bozucu girişine karşılık sistemelerin vermiş olduğu tepkiler karşılaştırılmaktadır. ISE ve ITSE kriterleri açısından önerilen yöntem ile $\gamma = 0$ oldukça yakın performans sergilemiştir. Ancak, IAE ve ITAE kriterleri açısından bakıldığında önerilen yöntemin çok daha yüksek başarıma sahip olduğu söylenebilir.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bulanık PID kontrolörleri için birleştirme operatörüne dayalı yeni bir öz-ayarlama yöntemi önerilmiştir. Literatürde bulanık karar mekanizmalarında birleştirme operatörü olarak kullanılan pek çok operatör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları serbest parametrelere sahipken, bazıları parametresizdir. Serbest parametreye sahip bir matematiksel operatörün davranışı, parametrenin durumuna göre değişeceğinden dolayı bulanık bir kontrolörde böylesine bir değişimin avantajlarının olması muhtemeldir. Bulanık sistemlerde serbest parametrelili birleştirme operatörünün uygulandığı farklı alanlardaki çalışmalar mevcuttur. Ancak, henüz kontrol literatüründe parametreye bağlı birleştirme operatörünün bir bulanık kontrolörde kullanılması fikrine dayanan bir çalışma bulunmamaktadır. Parametreye bağlı operatörler için ise bir çok örnek verilebilir. Bunların arasından γ operatörü gerek hem doğrusal hem de üstel forma sahip olduğu için gerekse yapısında t-norm ve t-conorm bulunduran ikili bir operatör olduğu için oldukça dikkat çekicidir. γ operatörünün davranışının incelenmesi için öncelikle bulanık mantık temellerinden başlanması gerekmektedir. Ardından bulanık sistemler ve bulanık kontrolörler de incelenmelidir. Bunlar göz önünde bulundurularak, bulanık PID kontrolörler yapısal ve ayarlama parametreleri olmak üzere iki ana tasarım grubuna sahiptir. Yapısal parametreler giriş/çıkış birimlerini, dilsel değişkenlerle tanımlanmış üyelik fonksiyonlarını, kuralları, bulanık çıkarım ve durulaştırma mekanizmalarını içerir. Ayarlama parametreleri ise giriş/çıkış ölçekleme çarpanlarından ve üyelik fonksiyonu parametrelerinden oluşmaktadır. Yapısal birimde yer alan birleştirme operatörü değişken hale getirilerek aslında ayarlama parametresi olarak kullanılabileceği bu çalışmada gösterilmektedir. γ değerinin değişiminin bulanık mekanizmanın iç yapısında nasıl bir etkiye sahip olduğu görülmesi için farklı giriş senaryolarına ve farklı kural sayılarına sahip bulanık kontrolör tasarımları kullanılmıştır. Böylece, $\gamma = 0$ değerinin (VE işleminin) γ operatörünün özel bir hali olduğu ve ateşlenecek kural sayısını belirlediği; $(0, 1]$ aralığında kalan γ değerlerinde ise en fazla kural sayısının ateşlendiği; γ değişiminin her koşulda ateşleme çarpanlarının değerini etkilediği

sonuçlarına varılmıştır. Bu aşamadan sonra, γ değerlerinin değişiminin bulanık mekanizma dışında, herhangi bir kontrol sistemi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için öncelikle Mudi ve Pal'in bir çalışmasında kullanmış oldukları ölü zamanlı doğrusal olmayan bir süreç ve bulanık kontrolör için önermiş oldukları ölçekleme [7] çarpanları seçilmiştir. Bulanık PID kontrolörlü kapalı çevrim sistemin [0, 1] aralığındaki γ değerleri ile verdiği basamak cevapları toplanarak bazı çıkarımlar yapılmıştır. Düşük γ değerlerinin hızlı cevap, agresif davranış ve salınım; yüksek γ değerlerinin ise yavaş cevap ve ağır davranış gibi özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

Önerilecek bir γ öz-ayarlar yapısı ile sistem yanıtı en hızlı şekilde aşısız (ya da az aşım) olarak referans takibine sahip olması tasarım kriteri olarak belirlenmiştir. İlk adım olarak ölçekleme çarpanları, Büyük Patlama-Büyük Çöküş eniyileme algoritması kullanılarak yükselme zamanını minimize edecek şekilde belirlenmiştir. Bu aşamada, VE işleminde sistem cevabı hızlı olduğu için $\gamma = 0$ sabit tutulmuştur. Ayar mekanizması tasarımı için farklı açılardan deneysel çalışmalar yapılmıştır ve elde edilen deneyime göre ayar mekanizmasının girişleri kapalı çevrim hatasının mutlak değeri ve hatanın türevinin mutlak değeri olması gerektiğine karar verilmiştir. Bu girişlere göre γ üretecek 9 kurallı bulanık karar mekanizması tasarlanmıştır. Böylece, γ değeri çevrimiçi olarak hata ve hatanın türevine bağlı kurallara göre üretilip bulanık PID kontrolöre gönderilecektir.

Yapılan benzetimlerde VE işlemine ($\gamma = 0$) sahip bulanık PID kontrolör ve aynı bulanık PID kontrolörün üzerine γ öz-ayarlar mekanizması eklenmiş hali kapalı çevrim kontrol sisteminde kullanılmıştır. Giriş işareti olarak, genliği pozitif ve negatif olarak değişen basamak işaretleri dizisi verilmiştir. Böylece farklı çalışma noktaları için de kontrolörlerin performansları incelenmektedir. Elde edilen sistem cevapları, yükselme zamanı, yerleşme zamanı, aşım ve ITAE gibi kriterlere göre karşılaştırılmaktadır. Aynı zamanda, sisteme etkiyen basamak şeklindeki bozucu için bozucu bastırma performansları IAE, ITAE, ISE, ITSE kriterleri kullanılarak incelenmektedir.

Benzetim sonuçlarına göre önerilen yöntemin aşım, yerleşme zamanı ve salınım kriterlerinde kayda değer geliştirmeler yaptığı ancak yükselme zamanı kriterinde ise biraz gerilemeye sahip olduğu görülmekte ve bu ödünleşmenin mecburi olduğu söylenebilir. Bozucu bastırma performanslarına bakıldığında, önerilen yöntemin özellikle IAE ve ITAE kriterleri için yüksek başarıma sahip olduğu sonucuna

varılmıştır. Özetlemek gerekirse, önerilen yöntem geçici ve sürekli hal cevabında ve bozucu bastırma performansında gibi geliştirme sağlamıştır.

Diğer yandan, önerilen yöntemin farklı türdeki sistemler ile birlikte incelenmesi de gerekmektedir. Ölçekleme çarpanlarının seçiminde farklı kriterler seçilerek, önerilen yöntem ile ortak noktalar yaratılabilir. Özellikle doğrusal olmayan sistemler için çalışma noktasının büyük önemi vardır, çalışma noktasına göre çok daha esnek bir yapı haline getirilmesi mümkündür.

Gelecek çalışmalarda ise önerilen yöntemin gerçek dünyadaki sistemlerdeki başarımının incelenmesi için deneysel uygulamalar yapılacaktır. Benzetim ortamından farklı sonuçlar elde edilmesi muhtemeldir ve bu noktada önerilen yöntemin daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bulanık PID kontrolörlere uygulanmasında pratik yöntemler geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Fadaei, A. ve Salahsoor, K.** (2011). A Novel Real-time Fuzzy Adaptive Auto-tuning Scheme for Cascade PID Controllers, Int. J. of Control, Automation and Syst., **9**(5), 823–833.
- [2] **Potts, A., de Freitas, B. ve Amaro, J.** (2010). Fuzzy auto-tuning for a PID controller, Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on, s.1–5.
- [3] **Jingzhou, F., Xiuzhen, M. ve Yong, S.** (2010). The software of auto-tuning parameters of PID controller based on fuzzy genetic algorithm, Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE), 2010 Int. Conf., Wuhan, China, s.1–4.
- [4] **Huang, S.J. ve Lo, Y.H.** (2009). Metal Chamber Temperature Control by Using Fuzzy PID Gain Auto-tuning Strategy, WSEAS Trans. Sys. Ctrl., **4**(1), 1–10.
- [5] **De, R., Mudi, R. ve Pal, A.** (2012). A PD-type self-tuning FLC for second-order systems with dead-time, Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), 2012 IEEE International Conference on, s.409–413.
- [6] **Deng, H. ve Wang, Y.** (2005). An adaptive fuzzy logic controller with self-tuning scaling factors based on neural networks, Autonomous Decentralized Systems, 2005. ISADS 2005. Proceedings, s.392–396.
- [7] **Mudi, R. ve Pal, N.** (1999). A robust self-tuning scheme for PI- and PD-type fuzzy controllers, Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, **7**(1), 2–16.
- [8] **Woo, Z.W., Chung, H.Y. ve Lin, J.J.** (2000). A {PID} type fuzzy controller with self-tuning scaling factors, Fuzzy Sets and Systems, **115**(2), 321 – 326.
- [9] **Chopra, S., Mitra, R. ve Kumar, V.** (2008). Auto Tuning of Fuzzy PI Type Controller Using Fuzzy Logic, International Journal of Computational Cognition, **6**(1), 12–18.
- [10] **Karasakal, O., Guzelkaya, M., Eksin, I., Yesil, E. ve Kumbasar, T.** (2013). Online tuning of fuzzy {PID} controllers via rule weighing based on normalized acceleration, Engineering Applications of Artificial Intelligence, **26**(1), 184 – 197.
- [11] **Shimajima, K., Fukuda, T. ve Hasegawa, Y.** (1995). Self-tuning fuzzy modeling with adaptive membership function, rules, and hierarchical structure based on genetic algorithm, Fuzzy Sets and Systems, **71**(3), 295 – 309, fuzzy Neural Control.

- [12] **Domanski, P., Plamowski, S. ve Lesniewski, J.** (2003). An evolutionary algorithm for membership fuzzy function auto tuning, Intelligent Control, 2003 IEEE International Symposium on, s.985–989.
- [13] **Fang, G., Kwok, N.M. ve Ha, Q.** (2008). Automatic Fuzzy Membership Function Tuning Using the Particle Swarm Optimization, Computational Intelligence and Industrial Application, 2008. PACIIA '08. Pacific-Asia Workshop on, cilt 2, s.324–328.
- [14] **Mizumoto, M.** (1989). Pictorial Representations of Fuzzy Connectives, Part I: Cases of T-norms, T-conorms and Averaging Operators, Fuzzy Sets Syst., **31**(2), 217–242.
- [15] **Mizumoto, M.** (1989). Pictorial Representations of Fuzzy Connectives, Part II: Cases of Compensatory Operators and Self-dual Operators, Fuzzy Sets Syst., **32**(1), 45–79.
- [16] **Yang, J., Edwards, D.J. ve Love, P.E.** (2003). A computational intelligent fuzzy model approach for excavator cycle time simulation, Automation in Construction, **12**(6), 725 – 735, design e-ducation: Connecting the Real and the Virtual.
- [17] **Herrera, F., Márquez, F.A. ve Peregrín, A.** (2003). Genetic adaption of rule connectives and conjunction operators in fuzzy rule based systems: an experimental comparative study, EUSFLAT Conf., s.100–104.
- [18] **Jin, Y. ve von Seelen, W.** (1999). Evaluating flexible fuzzy controllers via evolution strategies, Fuzzy Sets and Systems, **108**(3), 243 – 252.
- [19] **Hawas, Y.** (2002). Calibrating Simulation Models for Advanced Traveler Information Systems/Advanced Traffic Management Systems Applications, Journal of Transportation Engineering, **128**(1), 80–88.
- [20] **Alesheikh, A., Soltani, M., Nouri, N. ve Khalilzadeh, M.** (2008). Land assessment for flood spreading site selection using geospatial information system, International Journal of Environmental Science & Technology, **5**(4), 455–462.
- [21] **Benedikt, J., Reinberg, S. ve Riedl, L.** (2002). A GIS Application to Enhance Cell-based Information Modeling, Inf. Sci. Inf. Comput. Sci., **142**(1), 151–160.
- [22] **Kaufmann, M.** (2006). Application of fuzzy classification to a data warehouse in e-health, Doktora Tezi, Dept. of Informatics, Univ. of Fribourg, Fribourg, Switzerland.
- [23] **Zimmermann, H.J. ve Zysno, P.** (1980). Latent connectives in human decision making, Fuzzy Sets and Systems, **4**(1), 37 – 51.
- [24] **Chaturvedi, D.K.**, (2008). Applications of Fuzzy Rule Based System, Soft Computing, cilt103 of Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin Heidelberg, s.295–362.

- [25] **von Altrock, C., Krause, B. ve Zimmerman, H.J.** (1992). Advanced fuzzy logic control of a model car in extreme situations, Fuzzy Sets and Systems, **48**(1), 41 – 52.
- [26] **Sivanandam, S.N., Sumathi, S. ve Deepa, S.N.** (2006). Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.
- [27] **Bulut, C.** (2009). Melez Kontrolör Tasarım ve Uygulamaları, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [28] **Lütkebohle, I.**, (24.01.2011), BWorld Robot Control Software, [http://en.wikipedia.org/wiki/Nanboku_Line_\(Sendai\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Nanboku_Line_(Sendai)), [Online; erişim 20-Nisan-2014].
- [29] **Self, K.** (1990). Designing with fuzzy logic, Spectrum, IEEE, **27**(11), 42–44.
- [30] **Zhang, H. ve Liu, D.** (2007). Fuzzy Modeling and Fuzzy Control, Control Engineering, Birkhäuser.
- [31] **Kecman, V.**, (2001), Learning and soft computing: Support vector machines, neural networks, and fuzzy logic models (complex adaptive systems).
- [32] **Mamdani, E.** (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, **121**(12), 1585–1588.
- [33] **Takagi, T. ve Sugeno, M.** (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, **SMC-15**(1), 116–132.
- [34] **Ross, T.** (2004). Fuzzy Logic with Engineering Applications, Wiley.
- [35] **Lee, S.** (2007). Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping, Environmental Geology, **52**(4), 615–623.
- [36] **Yesil, E., Guzelkaya, M. ve Eksin, I.** (2003). Fuzzy PID controllers: An overview, The Third Triennial ETAI International Conference on Applied Automatic Systems, Skopje, Macedonia, s.105–112.
- [37] **Akbıyık, B., Eksin, I., Güzelkaya, M. ve Yeşil, E.** (2005). Evaluation of the Performance of Various Fuzzy PID Controller Structures on Benchmark Systems, ELECO '2005, 4rd International Conf. on Electrical and Electronics Engineering.
- [38] **Erol, O. ve Eksin, I.** (2006). A new optimization method: Big Bang–Big Crunch, Advances in Engineering Software, **37**(2), 106 – 111.
- [39] **Kumbasar, T., Yesil, E., Eksin, I. ve Guzelkaya, M.** (2008). Inverse fuzzy Model Control with online adaptation via Big Bang-Big Crunch optimization, Communications, Control and Signal Processing, 2008. ISCCSP 2008. 3rd International Symposium on, s.697–702.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Çağrı Güzay

Doğum Yeri ve Tarihi: Kırklareli, 07.05.1989

Adres: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik - Elektronik Fakültesi, Kontrol Mühendisliği Bölümü

E-Posta: guzay@itu.edu.tr

Lisans: İTÜ Kontrol Mühendisliği

Y. Lisans: İTÜ Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller: İTÜ Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği bölümünde 1,5 yıldır araştırma görevliliği, ABD’de düzenlenen mikro uydu yarışmasında proje takımıyla 2011 Dünya 1.liği

Yayın ve Patent Listesi:

Ulusal yayınlar

1. **Yeşil, E., Sakallı, A. ve Güzay, Ç.** (2012). İkinci Mertebeden Ölü Zamanlı Sistemler İçin Bulanık Mantık Tabanlı PID Kontrolörü Tasarımı, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı —TOK 2012 , Niğde, Türkiye.

Uluslararası yayınlar

1. **Yesil, E., Savran, A.I. ve Guzay, C.** (2014). Load Frequency Controller Design Using New Big Bang - Big Crunch 2 Algorithm. 2014 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Application, Alberobello, Italy.
2. **Yesil, E., Dodurka, M. F., Sakalli, A., Ozturk, C., ve Guzay, C.** (2013). Self-tuning PI Controllers via Fuzzy Cognitive Maps. In Artificial Intelligence Applications and Innovations (pp. 567-576). Springer Berlin Heidelberg.
3. **Dodurka, M. F., Yesil, E., Ozturk, C., Sakalli, A., ve Guzay, C.** (2013). Concept by Concept Learning of Fuzzy Cognitive Maps. In Artificial Intelligence Applications and Innovations (pp. 577-586). Springer Berlin Heidelberg.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

1. **Yesil, E. ve Guzay, C.** (2014). A Self-tuning Fuzzy PID Controller Design Using Gamma Aggregation Operator, 2014 IEEE World Congress on Computational Intelligence —WCCI 2014, Beijing, China.