İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PID KONTROLÖRLERİNİN OPTİMAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ AMACIYLA BİR BULANIK MANTIK KARAR MEKANİZMASI TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berna AYAZ

Anabilim Dalı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PID KONTROLÖRLERİNİN OPTİMAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ AMACIYLA BİR BULANIK MANTIK KARAR MEKANİZMASI TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Berna AYAZ
(504081108)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Engin YEŞİL (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA (İTÜ)
Prof. Dr. Serhat ŞEKER (İTÜ)

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca bütün bilgi birikimiyle bana yardımcı olan, ilgi ve desteğini esirgemeyen başta tez danışmanım değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Engin YEŞİL, değerli hocalarım Prof. Dr. İbrahim EKSİN, Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA, Sayın Araş. Gör. Tufan KUMBASAR ve hayatımın her aşamasında bana olan destekleri ve güvenlerinden ötürü bütün yakınlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2011

Berna Ayaz

(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. BULANIK MANTIK **3**
2.1 Bulanık Sistemler 3
2.2 Bulanık Sistemlerin İç Yapıları 4
2.3 Bulanık Kural Tabanları 5
2.3.1 Mamdani tipi bulanık kurallar 5
2.3.2 Takagi-Sugeno tipi bulanık kurallar 6
3. GENETİK ALGORİTMALAR **7**
3.1 Genetik Algoritma Nedir 7
3.2 Genetik Algoritmaların Araştırma Yöntemleri İçerisindeki Yeri 8
3.3 Genetik Algoritmada Kullanılan Biyolojik Terimler 9
3.4 Genetik Algoritmaların Çalışma İlkesi 10
3.4.1 Başlangıç popülasyonunun oluşturulması 11
3.4.2 Amaç ve uygunluk fonksiyonunun seçilmesi 12
3.5 Seçim 13
3.6 Genetik Operatörler 14
3.6.1 Çaprazlama operatörü 14
3.6.2 Değişim operatörü 15
4. BİRİNCİ MERTEBEDEN ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMLER İÇİN PID KONTROLÖR TASARIM YÖNTEMLERİ **17**
4.1 Birinci Mertebeden Ölü Zamanlı Sistemler 17
4.2 Kontrolör Tasarımı ve PID Kontrolör 18
4.2.1 Tasarım ölçütleri 18
4.2.1.1 Referans değer takibi 19
4.2.2 PID kontrolör 20
4.3 PID Kontrolör Tasarım Yöntemleri 22
4.3.1 Özellik tabanlı yöntemler 22
4.3.1.1 Ziegler-Nichols basamak cevabı yöntemi 22
4.3.1.2 Ziegler-Nichols frekans cevabı yöntemi 23
4.3.1.3 Ziegler-Nichols yöntemlerinin modifikasyonları 24
4.3.1.4 AMIGO ayarlama yöntemi 24
4.3.2 Analitik yöntemler 25
4.3.2.1 Kutup yerleştirme 25

4.3.2.2 λ ayarlaması 25
4.3.2.3 İç model kontrolörü 26
4.3.2.4 Skogestad iç model kontrolörü 28
4.3.3 Optimizasyon tabanlı yöntemler 29
5. ÖNERİLEN YÖNTEM: BULANIK MANTIK KARAR MEKANİZMASI TASARIMI (BKM) 33
5.1 Giriş 33
5.2 Birinci Mertebeden Ölü Zamanlı Sistemler İçin Bulanık Mantık Karar Mekanizması Tasarımı 35
5.3 Benzetim Sonuçları 42
5.3.1 Birinci benzetim örneği 42
5.3.2 İkinci benzetim örneği 45
5.3.3 Üçüncü benzetim örneği 49
5.3.4 Dördüncü benzetim örneği 52
5.3.5 Beşinci benzetim örneği 55
5.3.6 Altıncı benzetim örneği 59
5.3.7 Yedinci benzetim örneği 62
5.3.8 Sekizinci benzetim örneği 65
5.4 Deneysel Uygulama 68
6. SONUÇ 75
KAYNAKLAR 77

KISALTMALAR

ANFIS : Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)
B : Büyük
BKM : Bulanık Mantık Karar Mekanizması
BM : Bulanık Mantık
ÇB : Çok Büyük
ÇÇB : Çok Çok Büyük
ÇÇK : Çok Çok Küçük
ÇK : Çok Küçük
FOPDT : Birinci Mertebeden Ölü Zamanlı (First Order Plus Delay Time)
GA : Genetik Algoritma
IAE : Mutlak Hatanın İntegrali (Integral of Absolute Error)
IMC : İç Model Kontrolü (Internal Model Control)
ISE : Hatanın Karesinin İntegrali (Integral of Squared Error)
ITAE : Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın İntegrali (Integral of Time multiply Absolute Error)
ITSE : Zamanın Karesi Ağırlıklı Hatanın Karesinin İntegrali (Integral of Time multiply Squared Error)
IT^2SE : Zamanın Karesi Ağırlıklı Hatanın Karesinin İntegrali (Integral of the Square Time multiplied Squared Error)
IT^3SE : Zamanın Kübü Ağırlıklı Hatanın Karesinin İntegrali (Integral of the Cube Time multiplied Squared Error)
K : Küçük
P : Proportional (Orantı)
PD : Proportional-Derivative (Orantı-Türev)
PI : Proportional-Integral (Orantı-İntegral)
PID : Proportional-Integral-Derivative (Orantı-İntegral-Türev)
ZA : Zhuang-Atherton ayarlama yöntemi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : PID parametrelerinin geçici hal parametrelerine etkisi. 22
Çizelge 5.1 : Ayar noktası değişimleri için PI ayarlama formülü. 33
Çizelge 5.2 : Ayar noktası değişimleri için PID ayarlama formülü. 34
Çizelge 5.3 : BKM'na ilişkin bulanık kuralların yapıları. 36
Çizelge 5.4 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait oran kazancı ve integral sabitine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları. 37
Çizelge 5.5 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait oran kazancı, integral sabiti ve türev sabitine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları. 38
Çizelge 5.6 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait oran kazancı ve integral sabitine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları. 40
Çizelge 5.7 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait oran kazancı, integral sabiti ve türev sabitine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları. 41
Çizelge 5.8 : $G_1(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 43
Çizelge 5.9 : $G_1(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 44
Çizelge 5.10 : $G_1(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 44
Çizelge 5.11 : $G_1(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 45
Çizelge 5.12 : $G_2(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 46
Çizelge 5.13 : $G_2(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 47
Çizelge 5.14 : $G_2(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 48
Çizelge 5.15 : $G_2(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 48
Çizelge 5.16 : $G_3(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 49
Çizelge 5.17 : $G_3(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 50
Çizelge 5.18 : $G_3(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 51
Çizelge 5.19 : $G_3(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 52

Çizelge 5.20 : $G_4(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 53
Çizelge 5.21 : $G_4(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 53
Çizelge 5.22 : $G_4(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 54
Çizelge 5.23 : $G_4(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 55
Çizelge 5.24 : $G_5(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 56
Çizelge 5.25 : $G_5(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 57
Çizelge 5.26 : $G_5(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 58
Çizelge 5.27 : $G_5(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 58
Çizelge 5.28 : $G_6(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 59
Çizelge 5.29 : $G_6(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 60
Çizelge 5.30 : $G_6(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 61
Çizelge 5.31 : $G_6(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 61
Çizelge 5.32 : $G_7(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 62
Çizelge 5.33 : $G_7(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 63
Çizelge 5.34 : $G_7(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 64
Çizelge 5.35 : $G_7(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 65
Çizelge 5.36 : $G_8(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 66
Çizelge 5.37 : $G_8(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 67
Çizelge 5.38 : $G_8(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 67
Çizelge 5.39 : $G_8(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 68
Çizelge 5.40 : $G(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 70
Çizelge 5.41 : $G(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri. 71

Çizelge 5.42 : $G(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri..... 72
Çizelge 5.43 : $G(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri..... 73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir bulanık sistemin iç yapısı. 4
Şekil 3.1 : GA'nın akış diyagramı. 11
Şekil 3.2 : Stokastik evrensel örnekleme. 14
Şekil 4.1 : Birinci mertebeden ölü zamanlı sistemin basamak cevabı. 18
Şekil 4.2 : Bir kontrol sisteminin birim basamak cevabı. 19
Şekil 4.3 : Geribeslemeli bir kontrol sistemi. 20
Şekil 4.4 : Röle geribeslemeli bir kontrol sistemi 23
Şekil 4.5 : Röle geribeslemeli sistem için röle (u) ve sistem (y) çıkışları. 24
Şekil 4.6 : IMC yapısı. 27
Şekil 4.7 : Bulanık Karar Mekanizması (BKM) ile PID kontrolör parametrelerinin çevrimdışı ayarlanmasına ilişkin blok diyagram. 32
Şekil 5.1 : L/T için 0.1 – 1.0 aralığındaki PID parametreleri. 34
Şekil 5.2 : Bulanık mantık karar mekanizması. 35
Şekil 5.3 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancına ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (b) integral sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu. 37
Şekil 5.4 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancı ilişkisi, (b) integral sabiti ilişkisi. 37
Şekil 5.5 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancına ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (b) integral sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (c) türev sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu. 38
Şekil 5.6 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancı ilişkisi, (b) integral sabiti ilişkisi, (c) türev sabiti ilişkisi. 39
Şekil 5.7 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancına ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (b) integral sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu. 39
Şekil 5.8 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancı ilişkisi, (b) integral sabiti ilişkisi. 40
Şekil 5.9 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancına ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (b) integral sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (c) türev sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu. 40
Şekil 5.10 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancı ilişkisi, (b) integral sabiti ilişkisi, (c) türev sabiti ilişkisi. 41
Şekil 5.11 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_1(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 43
Şekil 5.12 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_1(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 43
Şekil 5.13 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_1(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 44

Şekil 5.14 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_1(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 45
Şekil 5.15 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_2(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 46
Şekil 5.16 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_2(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 46
Şekil 5.17 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_2(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 47
Şekil 5.18 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_2(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 48
Şekil 5.19 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_3(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 49
Şekil 5.20 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_3(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 50
Şekil 5.21 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_3(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 51
Şekil 5.22 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_3(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 51
Şekil 5.23 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_4(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 52
Şekil 5.24 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_4(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 53
Şekil 5.25 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_4(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 54
Şekil 5.26 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_4(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 55
Şekil 5.27 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_5(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 56
Şekil 5.28 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_5(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 56
Şekil 5.29 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_5(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 57
Şekil 5.30 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_5(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 58
Şekil 5.31 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_6(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 59
Şekil 5.32 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_6(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 60
Şekil 5.33 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_6(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 60
Şekil 5.34 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_6(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 61
Şekil 5.35 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_7(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 62

Şekil 5.36 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_7(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 63
Şekil 5.37 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_7(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 64
Şekil 5.38 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_7(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 64
Şekil 5.39 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_8(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 65
Şekil 5.40 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_8(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 66
Şekil 5.41 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_8(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 67
Şekil 5.42 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_8(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 68
Şekil 5.43 : PCS 327 süreç kontrol simülatör deney seti. 69
Şekil 5.44 : PI-ISE amaç ölçütü için $G(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 70
Şekil 5.45 : PID-ISE amaç ölçütü için $G(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 71
Şekil 5.46 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 72
Şekil 5.47 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti. 72

PID KONTROLÖRLERİNİN OPTİMAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ AMACIYLA BİR BULANIK MANTIK KARAR MEKANİZMASI TASARIMI

ÖZET

Modern kontrol yöntemlerinde son yıllarda görülen büyük gelişmelere rağmen PID kontrolörler basit ve kararlı yapılarından dolayı endüstriyel süreçlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Etkili bir kontrol için sisteme uygun PID kontrolörün belirlenmesinde orantı, integral ve türev sabiti olarak adlandırılan üç parametre vardır. Bu parametrelerin belirlenmesi amacıyla literatürde farklı yöntemler önerilmiştir. Önerilen bu klasik yöntemlerin dışında bulanık mantığa dayalı yöntemlerin kullanılması, parametrelerin belirlenmesinde hızlı ve etkili çözümler sağlamaktadır. Bu çalışmada da PI ve PID kontrolörleri için bulanık mantık tabanlı karar mekanizmasına dayalı bir ayar yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Klasik mantıktaki kesin ifadelerin bulanık mantıkta yerini "büyük, orta, küçük" gibi kesin olmayan dilsel ifadeler almaktadır. Kesin olmayan bu türden dilsel ifadeler kullanılarak doğal ilişkileri belirleyebilmek amacıyla bulanık kurallar oluşturulabilir. Bu bulanık kural tabanı esnek yapısı sayesinde bilgi kolaylıkla ifade edilebilir.

Süreç kontrol sistemleri çoğunlukla yüksek mertebeden ve önemli bir ölü zaman değerine sahip olabilmektedirler. Diğer yandan bu süreçlerin çok büyük bir bölümü uygun yaklaşımlarla birinci mertebeden ölü zamanlı sistemler olarak modellenebilmektedir. Süreç kontrol sistemleri için yapılan PID kontrolörü tasarımında temelde iki beklenti vardır. Bunlardan ilki referans değer takibi ve ikincisi de bozucularının bastırılmasıdır.

Bu çalışmada birinci mertebeden ölü zamanlı olarak modellenebilen sistemler için sistem hatasını minimize edecek şekilde hem PI hem de PID kontrolör parametrelerini belirleyen bulanık mantık karar mekanizmaları tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında amaç olarak iyi bir referans değeri takibi belirlenmiştir. Bu amaçla birçok mertebeden ölü zamanlı sistem ele alınmış ve bu süreçleri eniyileyecek PI ve PID kontrolörlerinin parametreleri bir global optimizasyon yöntemi olan genetik algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan çok sayıda benzetim sonrasında zengin bir veri tabanı oluşturulmuştur. Elde edilen veriler, süreç modelindeki parametreler ile PID kontrolörü parametreleri arasındaki bulanık ilişkileri belirleyebilmek amacıyla kullanılmıştır. Bu amaçla, bulanık karar mekanizmaları ANFIS yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Yapılan benzetim çalışmalarında MATLAB programı ve bu programın alt araçları olan Simulink, Genetik Algoritma ve ANFIS araçları kullanılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Zhuang ve Atherton (ZA) tarafından önerilen bir başka yöntem ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma amacıyla birçok benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında hem ölü zamanı baskın hem de ölü zamanı baskın olmayan farklı süreçler seçilmiştir. Ayrıca yüksek mertebeden süreçler ele alınmış ve bu süreçler için birinci mertebeden ölü zamanlı modeller

zamanı baskın olmayan farklı süreçler seçilmiştir. Ayrıca yüksek mertebeden süreçler ele alınmış ve bu süreçler için birinci mertebeden ölü zamanlı modeller elde edilmiştir. Modelleme hatasının oluştuğu bu durumlar için de önerilen bulanık karar mekanizmaların performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Son olarak süreç kontrol simulatörü (PCS 327) kullanılarak üçüncü mertebeli bir sistem oluşturulmuş ve gerçek sistem üzerinde önerilen yöntemin performansı incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde benzetim sonuçları ile paralel şekilde, tasarlanan bulanık karar mekanizmasının ZA ayarlama yöntemine göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

DESIGN OF A FUZZY DECISION MAKING MECHANISM TO DETERMINE OPTIMUM PARAMETERS OF PID CONTROLLERS

SUMMARY

Due to their simple and robust structure, PID controllers have a wide range of use in many industrial processes despite the enormous interests that modern control methods have developed during the last decades. To implement a PID controller suiting to a system for an effective control, there are three parameters called such as proportional gain, integral gain and derivative gain. To determine these parameters, different methods have been suggested in literature. Except for these classical methods, using methods based on fuzzy logic provide fast and effective solutions in determination of the PID parameters. In this thesis, a tuning method based on fuzzy decision making mechanism is studied for PI and PID controllers. Crisp definitions in classical logic are displaced by non-crisp linguistic terms as “big, medium, small” in fuzzy logic. By using non-crisp type linguistic terms fuzzy rule bases can be built in order to identify natural relations. Because of the flexible structure of fuzzy rule base knowledge can be easily expressed.

Process control systems are mostly higher order systems and may have a considerable dead time. On the other hand, a really big part of these processes can be modeled as first order plus dead time systems by appropriate approximations. There are two common types of expectations in design of PID controllers for process control systems: First one is set point following and the second one is disturbances rejection.

In this study, fuzzy decision making mechanisms for determining the parameters of PI controller and also PID controller are designed in order to minimize the system error for processes that can be modeled as first order plus dead time systems. In the design phase a good reference following performance is chosen as the goal. For this reason, many first order plus dead time systems are used and for those processes the optimum PI and PID controller parameters are determined by using genetic algorithm which is a global optimization method. A rich data base is obtained after many simulations. The data obtained is used to specify fuzzy relations between process model parameters and PID controller parameters. For this purpose, fuzzy decision making mechanisms have been obtained by ANFIS method. In the simulation study MATLAB and its toolboxes such Simulink, Genetic Algorithm and ANFIS, are used.

The results of this study have been compared to another method, which is proposed by Zhuang and Atherton (ZA). For comparison many simulations are performed. In the simulation study both dead time dominant and non-dead time dominant processes are picked. In addition, higher order systems are discussed and first order plus dead time models are obtained for these processes. For these cases where modelling errors occur proposed fuzzy decision making mechanism performance is also analized with comparations. Finally, a third order system is set on a process control simulator (PCS

327) and the performance of proposed method is analized on a real time system. When the obtained experimental results are examined it has been seen that designed fuzzy decision mechanism is more sucessful than the ZA tuning method parallel to the results obtained in the simulation.

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstride gerçeklenmiş olan süreç kontrol sistemlerinin neredeyse tamamı ölü zamanlı sistemlerdir. Bu tür süreçlerin çok büyük bir kısmı uygun yaklaşımlarla birinci mertebeden ölü zamanlı sistem olarak modellenebilir [1].

Kontrol kuramı ise son 50 yılda büyük gelişim göstermiştir ve bu süre içerisinde PID kontrolörler endüstride en yaygın olarak kullanılan kontrolörler olmuşlardır. Bunun sebebi PID kontrolörlerin basit ve kararlı yapılarıdır. Bu kontrolörler için son dönemde hesaplanması kolay birçok parametre ayar yöntemi geliştirilmiştir ve yöntemlerin çoğu önceden belirlenmiş ölçütleri sağlayacak şekilde sistem için en iyi olan PID parametrelerinin belirlenmesini sağlamaktadır.

Son yıllarda PID ayarlamasını iyileştirmek için Åström-Hägglund faz payına dayalı ayarlama yöntemi [2] ve iyileştirilmiş Ziegler-Nichols yöntemi [3] gibi birkaç yaklaşım önerilmiştir. PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde ITSE performans ölçütünün kullanılması ile daha az aşım ve daha kısa yerleşme zamanı elde edilmesi sağlanmaktadır [4]. Aynı yazarlar tarafından önerilen başka bir yöntem ile farklı sistem yapıları için en iyi PID kontrolör parametreleri elde edilmiştir [5].

Literatürdeki PID ayarlama yöntemleri incelendiğinde mevcut ayarlama yöntemleriyle sistemlerin ölü zaman büyüklüğünün zaman sabitine baskınlığı göz önünde bulundurulmadan kontrolör tasarımına gidildiği görülmüştür. Endüstriyel uygulamalarda ölü zamanı sistem zaman sabitinden oldukça büyük süreçler de mevcuttur. Bu türden süreçler için PID tasarım yöntemleri sınırlıdır. Bu çalışmada birinci mertebeden ölü zamanlı olarak modellenebilen sistemler için sistem hatasını minimize edecek şekilde hem PI hem de PID kontrolör parametrelerini belirleyen bulanık mantık karar mekanizmaları normalize ölü zaman bilgisine dayalı olarak tasarlanmıştır.

Çalışma içerisindeki bölümler şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci ve üçüncü bölümde sırasıyla Bulanık Mantık ve Genetik Algoritma anlatılmıştır. Genetik algoritma tasarım aşamasında seçilen sistemler için ISE ve ITSE amaç fonksiyonlarını

minimize edecek PI ve PID parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Dördüncü bölümde birinci mertebeden ölü zamanlı sistemler, PID kontrolör ve bu kontrolöre ait tasarım yöntemlerinin anlatımına yer verilmiştir. PID parametrelerinin belirlenmesinde Zhuang ve Atherton (1993) tarafından önerilen optimal ayarlama yöntemini [5] geliştirmeyi öneren bir bulanık yöntem beşinci bölümde verilmektedir. Elde edilen benzetim sonuçları, literatürden seçilen sistemler için ZA ayarlama yöntemi ile karşılaştırılmaktadır. Ayrıca son olarak, süreç kontrol simülatörü (PCS 327) kullanılarak üçüncü mertebeli bir sistem oluşturulmuş ve gerçek sistem üzerinde önerilen yöntemin performansı incelenmiştir.

2. BULANIK MANTIK

Gelişen teknoloji ile daha karmaşık sistemleri kontrol altına almak mümkün olmaktadır. Dünyadaki sistemleri tanımlamak ve kontrol etmek için kesin yargılar çoğu zaman yetersiz kalmaktadır çünkü sistemler çoğu kez belirsizlikler ve doğrusal olmayan yapılar içerir.

Bu nedenle, California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi Zadeh 1965 yılında klasik Aristo mantığına alternatif olarak Bulanık mantık (*Fuzzy logic*) teorisini tanımlamıştır [6]. Önerilen bu yeni yaklaşımın temeli bulanık küme ve alt kümelere dayanır. Klasik yaklaşımda bir varlık ya kümenin elemanıdır ya da değildir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde varlık küme ile olan üyelik ilişkisi bakımından kümenin elemanı olduğunda (1) kümenin elemanı olmadığı zaman (0) değerini alır. Bu yüzden bu yaklaşımla karmaşık sistemleri modellemek veya kontrol etmek zordur, çünkü veriler tam olmalıdır. Bulanık mantık kişiyi bu zorunluluktan kurtarır ve daha niteliksel bir tanımlama olanağı sağlar. Bulanık mantık, mantık kurallarının esnek ve bulanık bir şekilde uygulanmasıdır ya da başka bir deyişle klasik küme gösteriminin genişletilmesidir. Klasik mantıkta bildiğiniz gibi, "doğru" ve "yanlış" ya da "1" ve "0"lar vardır, oysa bulanık mantıkta, ikisinin arasında bir yerde olan önermeler ve ifadeler vardır. Gerçek hayattaki önermelerin genelde kısmen doğru veya belli bir olasılıkla doğru olarak tanımlandığını görmekteyiz. Bulanık mantığa da zaten klasik mantığın gerçek dünya problemleri için yeterli olmadığı durumlar dolayısıyla ihtiyaç duyulmaktadır.Önerilen bu yaklaşım şu şekilde ifade edilebilir. Bir ifade tamamen yanlış ise klasik mantıkta olduğu gibi 0 değerindedir, yok eğer tamamen doğru ise 1 değerindedir. Bunların dışında tüm ifadeler 0'dan büyük 1 den küçük reel değerler alırlar. Yani değeri 0.50 olan bir ifadenin anlamı %50 doğru %50 yanlış demektir.

2.1 Bulanık Sistemler

Bulanık kümeler ve bunlarla ilişkili olan matematiksel yapıyı içeren, statik veya dinamik sistemlere genel olarak "bulanık sistem" denir. Bir sistem içerisinde bulanık

kümelerin varlığı birçok şekilde yer alabilir:

1. Sistemin tanımlanmasında: Bir sistem, bulanıklık içeren EĞER-O HALDE kuralları ile veya bulanık bağıntılarla tanımlanabilir.
2. Sistem parametrelerinin belirtilmesinde: Sistem cebirsel veya diferansiyel denklemlerle ifade edilebilir ve bu denklemlerde parametreler reel sayılar yerine bulanık sayılar olabilir.
3. Giriş, çıkış veya sistem durumlarında: Bulanık girişler güvenilmez algılayıcılardan (gürültülü veri) elde ediliyor veya insan sezgileriyle ilişkili miktarlarla (güzel, rahat vs.) ifade ediliyor olabilir. Klasik sistemlerde karşılaşılmayan bu durumlar, bulanık sistemler tarafından işlenilebilecek verilerdir. Bulanık sistemler, yukarıda ifade edilen durumların bazıların aynı anda içerebilir [7].

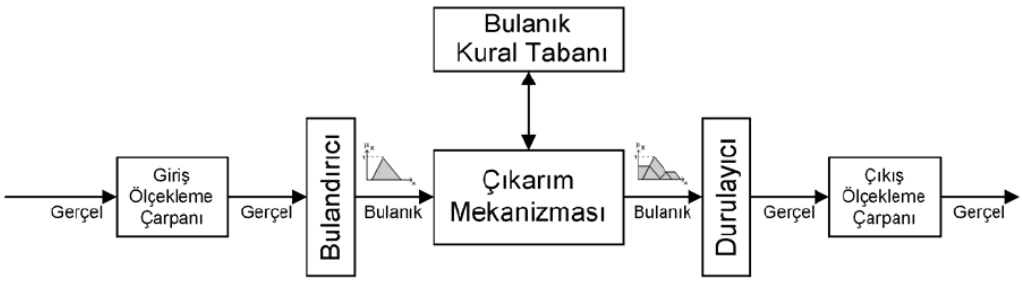
2.2 Bulanık Sistemlerin İç Yapıları

Bulanık sistemlerin çok büyük kısmı, EĞER-O HALDE kuralları aracılığıyla tanımlanmıştır. Bu tür sistemler, "kural tabanlı bulanık sistemler" olarak adlandırılır.

En basit bulanık sistemin ana yapıları bulanık kural tabanı ve çıkarım mekanizmasıdır.

Kural tabanında, bulanık EĞER-O HALDE kuralları bulunur. Kural tabanı ve çıkarım mekanizmasından oluşan temel bulanık sistem yapısı bulandırıcı ve durulayıcı adı verilen iki birim daha içerir.

Bulandırıcı, reel değerli sistem girişini bulanık kümelere dönüştürürken, durulayıcı, tersine, çıkarım mekanizmasının ürettiği bulanık kümeleri reel değerli sistem çıkışına dönüştürür. Bu tür bulanık sistemlere ilişkin blok şema Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Bir bulanık sistemin iç yapısı.

2.3 Bulanık Kural Tabanları

Bulanık sistemlerde değişkenler arasındaki ilişkiler bulanık EĞER öncül (*antecedent*) önerme O HALDE sonuç (*consequent*) önerme şeklindeki "EĞER-O HALDE" bulanık kurallar ile ifade edilir. Öncül önerme, her zaman "x=A ise" şeklinde bir bulanık önermedir. Burada x bir dilsel değişken ve A ise bir dilsel terimdir. Önermenin doğruluk değeri sıfır ile bir arasında bir reel sayıdır ve bu değer ve A arasındaki uyumun (benzerliğin) derecesine bağlıdır.

Elde edilen bulanık model, bulanık kuralların türüne göre adlandırılır. Bulanık önermedeki sonuç ifadesinin yapısına göre bulanık kural tabanı dört farklı yapı oluşturulur:

i. Mamdani tipi bulanık kurallar

ii. Tekli (*singleton*) tip bulanık kurallar

iii. Takagi-Sugeno tipi bulanık kurallar

iv. Tsukamoto tipi bulanık kurallar

Bu çalışmada sadece Mamdani tipi kural yapısı ve Takagi-Sugeno tipi bulanık kural yapısı incelenecektir.

2.3.1 Mamdani tipi bulanık kurallar

Bu tip "EĞER-O HALDE" bulanık kurallar bilgiyi yarı-niteliksel olarak içeririler. Bu kurallar

K_i: EĞER $\tilde{x}$ A_i ise **O HALDE** $\tilde{y}$ B_i'dir

şeklindedir.

Burada, $\tilde{x}$ giriş (öncül) dilsel değişken ve A_i'ler ise öncül dilsel terimlerdir. Benzer şekilde $\tilde{y}$ çıkış (sonuç) dilsel değişken ve B_i'ler ise sonuç dilsel terimleridir. Kurallarda yer alan $\tilde{x}$ ($/\tilde{y}$) dilsel değişkenlerinin değerleri ve A_i ($/B_i$) dilsel terimleri kendi tanım bölgelerinde tanımlı bulanık kümelerdir: $x \in X \subset R_p$ ve $y \in Y \subset R_q$

Öncül (/sonuç) bulanık kümelerine ilişkin üyelik fonksiyonları

$$\mu(x) : X \to [0,1], \mu(y) : Y \to [0,1]$$

şeklinde dönüşümleridir. A_i bulanık kümeleri, ilişkili sonuç önermelerinin geçerli

olduğu öncül uzaydaki bulanık bölgelerdir. A_i ve B_i dilsel değişkenleri genellikle daha önceden tanımlanmış KÜÇÜK, ORTA, BÜYÜK, NEGATİF, POZİTİF gibi terimlerden seçilir. Bu kümeler, A ve B ile gösterilirse A_i ve B_i'ler, A_i A ve B_i B şeklinde ifade edilebilir.

2.3.2 Takagi-Sugeno tipi bulanık kurallar

Mamdani tipi bulanık EĞER-O HALDE kurallarındaki öncül ve sonuç kısımlar bulanık önermeler ile sistemi ifade etmektedir. Oysa ki Takagi-Sugeno bulanık modelinin sonuç kısmında, bir kesin (belirgin) fonksiyon vardır. Dolayısıyla bu model hem matematiksel hem de dilsel ifadelerle oluşturulan bir model olarak görülebilir. Öncül kısım, sonuç kısmındaki fonksiyonların varolduğu, giriş uzayının bulanık bölgelerini ifade eder.

K_i: EĞER $\tilde{x}$ A_i ise **O HALDE** $\tilde{y} = f_i(x)$

Genelde, her kuraldaki $f_i(x)$ fonksiyonu aynı yapıdadır, yalnızca parametreler değişiktir. Basitlik ve pratiklik açısından genelde $f_i(x) = a_i^T x + b_i$ şeklinde fonksiyonlar seçilir. Burada a_i parametre vektörü, b_i ise bir skalerdir. Dikkat edilecek olursa, kurallardaki tüm a_i'ler sıfır vektörü olarak alındığında tekli tip bulanık kuralla elde edilir [8].

3. GENETİK ALGORİTMALAR

3.1 Genetik Algoritma Nedir

Genetik algoritmalar doğal biyolojik evrim mekanizmasını örnek alarak oluşturulan stokastik bir arama metodudur. İlk defa Charles Darwin tarafından ortaya atılmıştır ve "doğal sistemde güçlülerin hayatta kalması" diye özetlenebilecek doğal seçme ve doğal genetik mekanizmasına (genetiğin evrim tezine dayandırılan) dayanır.

GA'lar, problemin olası çözümlerinin oluşturduğu bir popülasyon üzerinde işlem yapar ve çözüm için en uygun bireyleri bir sonraki nesle taşıyarak bu bireylerin daha ileriki nesillerde çözüme daha da yakın bireyleri oluşturacağı ilkesini esas alır.

Bu yöntem sayesinde, klasik yöntemlerle çözülmesi çok zor kimi zaman da imkânsız olan problemler çözülebilmektedir.

Bu konuda ilk çalışmayı Michigan Üniversitesi'nden psikoloji ve bilgisayar bilimi uzmanı John Holland yapmıştır. Makine öğrenmesi (*machine learning*) konusunda çalışan Holland, Darwin'in evrim kuramından etkilenerek canlılarda yaşanan genetik süreci bilgisayar ortamında gerçekleştirmeyi düşündü. Tek bir mekanik yapının öğrenme yeteneğini geliştirmek yerine böyle yapılardan oluşan bir topluluğun çoğalma, çiftleşme, mutasyon vb. genetik operatörlerden geçerek başarılı yeni bireyler oluşturabildiğini gördü. Çalışmalarının sonucunu açıkladığı "Adaptation in Natural and Artificial Systems" adlı çalışmasını 1975'te yayımlamasından sonra, geliştirdiği yöntemin adı Genetik Algoritmalar (GA) olarak yerleşti. Ancak Holland'ın öğrencisi David E. Goldberg adlı inşaat mühendisi 1989'da konusunda bir klasik sayılan "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning " adlı kitabını yayımlayana dek genetik algoritmaların kullanımı yaygın değildi. Goldberg'in gaz boru hatlarının denetimi üzerine 1983 yılında yaptığı doktora tezi ona 1985 "National Science Foundation" Genç Araştırmacı ödülünü kazandırdı ve genetik algoritmaların pratik kullanımının da olabilirliğini kanıtladı.

3.2 Genetik Algoritmaların Araştırma Yöntemleri İçerisindeki Yeri

Bir problemin çözümü için kullanılan araştırma yöntemleri üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar:

1. Hesaba dayalı yöntemler
2. Birebir sayma yöntemi
3. Rastgele araştırma yöntemleri

Hesaba dayalı yöntemlerden ilki, amaç fonksiyonunun gradyanının sıfıra eşit alınması sonucu çıkan nonlineer denklem takımının çözülmesi esasına dayanır. Arama her yöndeki türevi sıfır olan tepe veya çukur olması muhtemel noktalar civarında yapılır. Diğer bir yöntem ise tepe tırmanma (*hill climbing*) denilen, maksimum nokta hakkında bir tahminde bulunduktan sonra buna yakın herhangi bir noktanın gradyanı veya tersi yönde hareket edilerek arama yapılan yöntemdir. Yerel en iyi noktayı bulmak için mümkün olan en dik eğimli yönde yürünür. Ancak çok sayıda dönme noktası içeren bir fonksiyonda çok sayıda tepe oluşur. Hangi tepenin en iyi çözüm olduğu bilinemez.

Hesaba dayalı yöntemlerin en önemli eksikliği aramaya başlanacak noktanın çözüm için çok önemli olmasıdır. Birden çok tepe noktasına sahip arama uzaylarında çözüm lokal tepe noktasında kalabilir. Diğer bir eksiklik ise amaç fonksiyonun türevlerinin var olmasının gerekliliğidir. Teorik olarak hesabı kolay kuadratik amaç fonksiyonları bulunabilmesine karşın gerçek hayatta karşılaşılanlar teoriden uzaktır. Parça parça süreksizlikler içerebileceği gibi, gürültülü ortamlardan elde edildikleri için pek çok tepe noktalı olabilirler. Genel olarak hesaba dayalı yöntemler ancak sınırlı sayıda uygulamalar için kullanışlıdır.

Birebir sayma yönteminde ise amaç, sürekli olan reel sayı aralıklarını belirli sayıda parçalara bölerek parçaların amaç fonksiyon değerlerine bakıp yeni parçaların denenmesidir. Bu tip araştırma yöntemlerinin dezavantajı ise arama uzayının geniş olması ve çözüm için aynı anda bir noktadan başlayarak ilgili olan her bir nokta için araştırmanın yapılmasıdır.

Rastgele araştırma yöntemleri, diğer araştırma yöntemlerinin zayıf yönlerinden dolayı artan bir ilgiyle incelenmektedir.

3.3 Genetik Algoritmada Kullanılan Biyolojik Terimler

Yaşayan bütün organizmalarda bilginin esas ünitesi gendir. Genlerin oluşturduğu diziye "kromozom" adı verilir. GA'da problemin çözümüne, bir başlangıç çözüm uzayının oluşturulmasıyla başlanır. Bu çözüm kümesine "popülasyon", bu çözümlerden her birine ise "birey" adı verilir. Kromozom organizmanın bütün genetik bilgisini taşıdığından, her bir kromozom bir bireyi ifade eder. Gen ise kromozomun tek bir karaktere etki eden ve onu belirleyen (örneğin göz rengi) parçası olarak tanımlanır.

Kromozomların her biri probleme bir çözüm sunar. Her çözüme, popülasyon içindeki diğer çözümler ile karşılaştırıldığında ne kadar başarılı bir çözüm olduğunu gösteren bir uygunluk değeri (*fitness value*) atanır. Bu değer, doğadaki bir organizmanın yaşayabilmek için mücadele ederken ne kadar başarılı olduğunu belirlenmesine karşılık gelir. Bu değer, amaç fonksiyonu (*objective function*) vasıtasıyla hesaplanır. Bir bireyin uygunluk değeri ne kadar büyükse üreme için seçilme şansı o kadar fazla olur. Aynı şekilde uygunluk değeri diğerlerine göre az olan bireylerin seçilme şansları daha azdır. Mevcut kuşağın en iyi bireylerini seçip, yeni bireyler elde etmek için bunları eşleyerek, olası çözümlerden oluşan yeni bir popülasyon yaratılır. Yeni nesil bireyler, önceki neslin iyi bireylerinin sahip olduğu özelliklerin ileriki nesillere dağılmasını sağlar. Bu işlem belirli bir kriter sağlanana kadar veya önceden belirlenen bir nesil sayısı boyunca devam ettirilir.

Yeniden üretim işlemi, popülasyondaki kromozomları amaç fonksiyonu değerlerine bağlı olarak yeni oluşturulacak popülasyon içine taşıma işlemidir.

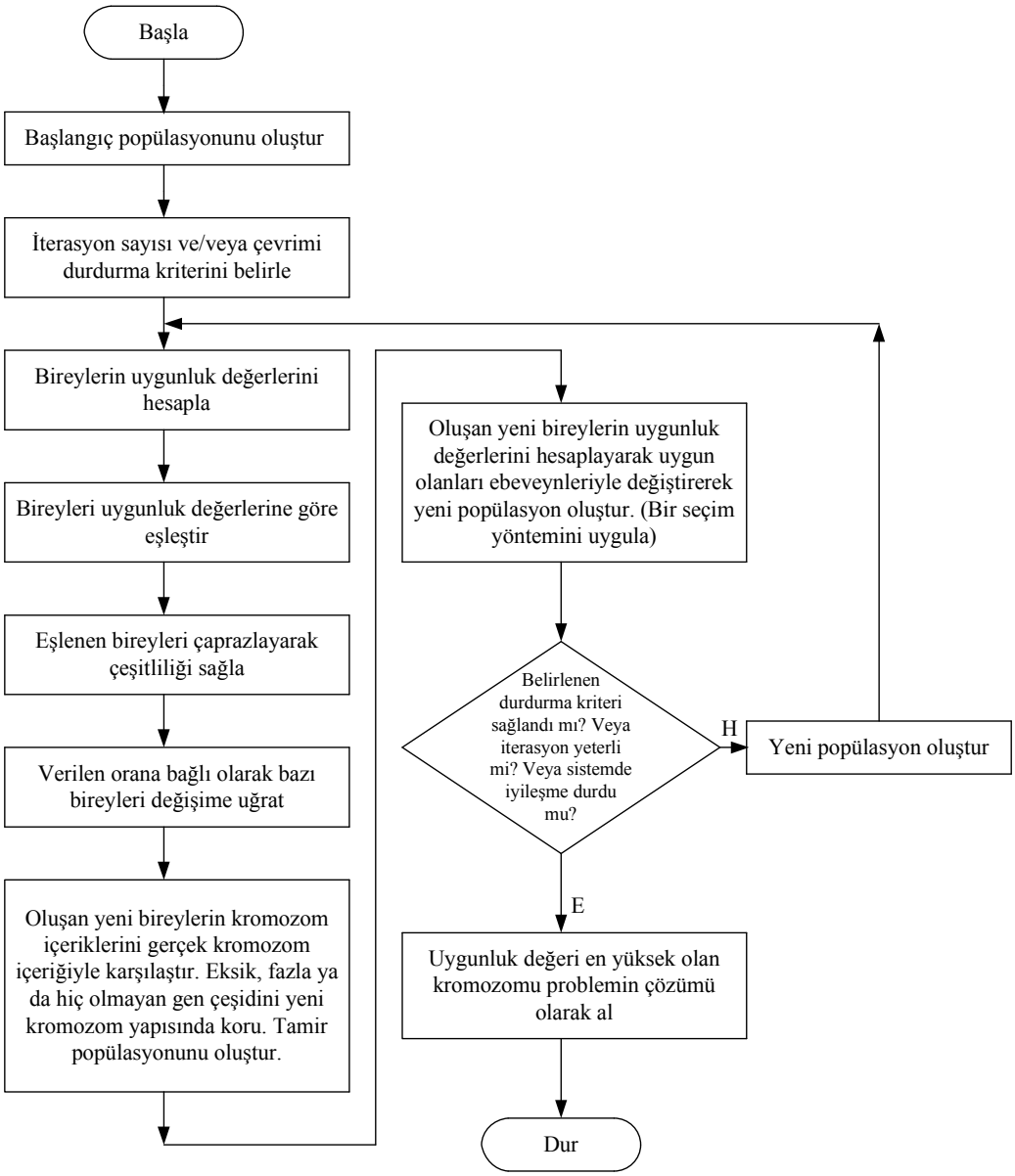
Amaç fonksiyon değeri ise maksimize veya minimize edilecek fonksiyonun o noktadaki değeridir. Bir diziyi amaç fonksiyonuna göre kopyalamak demek, maksimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonu değeri yüksek ve yüksek uygunluk değerli bireyleri sonraki nesillere kopyalamak demektir. Minimizasyon problemlerinde ise yüksek uygunluk değerine sahip bireyler, amaç fonksiyon değeri düşük olan bireyler olduğundan seçim işleminde bu bireyler sonraki nesillere daha yüksek bir oranda kopyalanır. Seçim işleminden çıkan bireyler işlem havuzunu oluşturur. İşlem havuzunda bu bireylere çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanır [9].

3.4 Genetik Algoritmaların Çalışma İlkesi

GA ile çözüme gidilirken takip edilmesi gereken adımlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Toplumda bulunacak birey sayısını belirleyerek başlanır, yani bir çözüm grubu oluşturulur. Çözüm grubunun büyüklüğü de önemli bir faktördür.
2. Dizilerin (kromozomun) ne kadar başarılı olduğunu hesaplayan fonksiyona uygunluk fonksiyonu denir. Bu fonksiyon uygunluk değerini, problemin minimizasyon veya maksimizasyon problemi olmasına göre amaç fonksiyonu değerini kullanarak hesaplar. Amaç fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonun seçimi genetik algoritmanın başarısını etkileyen en önemli unsurlardır. Genetik algoritmada probleme özel çalışan tek kısım burasıdır.
3. Dizilerin eşlenmesi, dizilerin uygunluk değerine göre yapılır. Bu seçimi yapmak için rulet tekerliği seçimi (*roulette wheel selection*), turnava seçimi (*tournament selection*) gibi seçme yöntemleri kullanılır.
4. GA'nın yürütücüsü olarak kabul edilen çaprazlama ve değişim operatörleri uygulanır.
5. Bundan sonraki adımda artık dizi yapılarının içerdikleri bilginin ilk nesildeki bilgileriyle aynı olması gerekmektedir. Yani, çaprazlama ve değişim operatörlerinin uygulanmasından sonra GA'nın uygulandığı problem tipine göre diziye tamir operatörü uygulama ihtiyacı doğabilir. Tamir operatörü uygulanarak mevcut dizi bilgilerinin korunması sağlanır. Aksi takdirde GA çözüm uzayından çok uzaklaşarak sistem çözümünün imkânsızlaştırılmasına neden olur.
6. Eski diziler çıkartılarak sabit büyüklükte yeni bir popülasyon sağlanır.
7. O andaki çözüm kümesindeki en iyi birey bir sonraki popülasyona aktarılır (*elitism*).
8. Tüm diziler yeniden hesaplanarak yeni popülasyonun başarısı bulunur.
9. GA, belirlenen döngü sayısı veya durdurma kriterleri sağlanana kadar defalarca çalıştırılır.
10. GA'nın işleyişinin sonucunda en iyi birey (dizi, kromozom) çözüm olarak alınır.

GA'nın temel işleyişini gösteren akış diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 : GA'nın akış diyagramı.

3.4.1 Başlangıç popülasyonunun oluşturulması

GA'nın uygulanmasında ilk adım, bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıdır. Kısıtlı optimizasyon (*constrained optimization*) problemleri hariç popülasyon genelde rastgele olarak oluşturulur.

GA'nın uygulanmasında popülasyon büyüklüğünün (N) belirlenmesi gerekir. Büyük popülasyonlarda çözüm uzayı iyi örneklendiği için aramanın etkinliği artar ancak makul bir sürede yüksek kalitede bir çözüme ulaşmayabilir. Küçük popülasyonlar ise çözüm uzayını yeterli bir biçimde örnekleyememe riskini taşır ve erken yakınsama

(*premature convergence*) görülebilir. Popülasyon genişliği genelde 30-100 arasında seçilir.

3.4.2 Amaç ve uygunluk fonksiyonunun seçilmesi

Uygunluk değeri, yeni popülasyona taşınacak dizilerin belirlenmesinde kullanılan bir araçtır. Bu nedenle, algoritmanın her çevriminde, popülasyondaki dizilerin bir değerlendirme fonksiyonu yardımıyla uygunluk değeri hesaplanır. GA'da kullanılan değerlendirme fonksiyonu, problemin amaç fonksiyonudur.

Amaç fonksiyonu, bireylerin problemin çözümü konusunda gösterdikleri başarımı ifade eden bir göstergedir. Minimizasyon problemlerinde en uygun bireyler amaç fonksiyonu değeri en küçük olan bireylerdir. Uygunluk fonksiyonu bu değeri kullanarak bireylerin popülasyon içindeki başarımlarını hesaplar.

$$F(x) = g(f(x)) \tag{3.1}$$

f: amaç fonksiyonu

g: amaç fonksiyonu değerlerini negatif olmayan sayılara dönüştüren fonksiyon

F: bağıl uygunluk (*relative fitness*) değerleri

Oransal uygunluk değeri atanması yönteminde her bir bireyin uygunluk değeri $F(x_i)$, bireylerin amaç fonksiyonu değerlerinin $(f(x_i))$, amaç fonksiyonu değerlerinin toplamına bölünmesiyle bulunur.

$$F(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} f(x_i)} \tag{3.2}$$

N_{ind} : Popülasyon büyüklüğü

Minimizasyon problemlerinde ise bu yöntem, çıkan uygunluk değerlerinin çarpmaya göre tersi alınarak kullanılabilir.

Bu yöntem, bu haliyle amaç fonksiyonu değeri negatif sayılar çıkan bireylerin bulunduğu popülasyonlarda kullanılamaz. Bunun için $F(x) = af(x) + b$ türünde linner bir dönüşüm uygulanır. *a* değeri problem minimizasyon problemi ise negatif seçilmelidir, *b* sayısı ise sonucun pozitif bir sayı olmasını sağlamaya yöneliktir. Bu yöntemin dezavanatajı yüksek uygunluk değerine sahip birkaç bireyin popülasyonda

baskın hale gelip çözümün lokal minimum noktaya takılma ihtimalinin olmasıdır. Bu sorundan kaçınmak için sıralı (*ranking*) uygunluk ataması yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde her bireyin uygunluk değerine belirli bir sınır getirilmektedir. Bireyler öncelikle amaç fonksiyon değerlerine göre sıralandıktan sonra sahip oldukları sıra numarasına göre bir uygunluk değeri atanır. Girilen "max" değeri en uygun bireye atanacak değerdir ve seçici baskı *(selective pressure*) olarak isimlendirilir.

3.5 Seçim

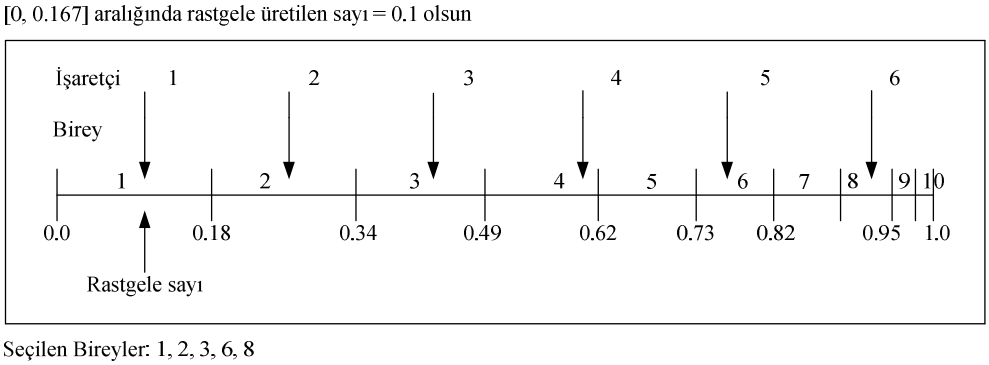
Kodlama yöntemi belirlenip başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra, yeni popülasyona geçebilmek için seçimin nasıl yapılacağı belirlenmelidir. Seçim (*selection*), bireylerin üreme için seçildiği bir işlemdir. Seçim operatörünün yüksek uyuma sahip bireylerin sonraki kuşağa kopyalanma olasılığını artırması istenir. Böylece seçim, arama uzayının başarılı olunacağı umulan bölgelerinde yoğunlaşır. Sonraki kuşak için üremeye katılacak bireylerin popülasyondan nasıl seçileceği ve her bir bireyin kaçar tane döle sahip olacağı seçim yöntemleri ile sağlanır.

GA'da kullanılan seçim yöntemleri şunlardır:

a. Orantılı seçim yöntemi
    i. Yerine koyarak stokastik örnekleme
    ii. Yerine koymadan stokastik örnekleme
    iii. Kalanı stokastik örnekleme
    iv. Stokastik evrensel örnekleme
b. Sıralı seçim yöntemi
c. Turnuva seçim yöntemi
d. Kararlı durum seçim yöntemi

Bu çalışmada GA'nın çalıştırılması aşamasında "stokastik evrensel örnekleme" seçim yöntemi kullanılmıştır. James Baker (1987) tarafından önerilen bu yöntemde rulet tekerleği seçim yöntemine benzer yaklaşımla, bireyler bir doğru üzerine yerleştirilir. Seçilecek birey sayısına eşit sayıda işaretçinin (*NPointer*), doğru üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmesiyle örnekleme yapılır. Örneğin, seçilecek birey sayısı $NPointer = 6$ olduğunda, örnekleme periyodu $1/NPointer = 0.167$ olur ve ilk

işaretçinin yeri, [0, 1/*NPointer*] aralığında rastgele üretilen bir sayı ile tayin edilir.



Şekil 3.2 : Stokastik evrensel örnekleme.

3.6 Genetik Operatörler

GA'da çözüm popülasyonu incelenirken belirli noktalardan sonra nesil çeşitliliği olmadığı için çözüme gidilememektedir. Nesil çeşitliliğini sağlayarak çözüm uzayında algoritma istenen kısıtları sağlayacak olan çözüm popülasyonuna ulaşabilir. Bunun için dizilere çaprazlama (*crossover*) ve değişim (*mutation*) operatörleri belirli yüzdelik oranlarıyla uygulanarak nesil çeşitliliği sağlanır. Böylelikle sistemin belirli noktalara gelip takılması önlemiş olur. Aşağıda bu genetik operatörlerin çeşitleri ve uygulanışları anlatılmıştır.

3.6.1 Çaprazlama operatörü

GA'da yeni kromozomlar oluşturmak için kullanılan temel operatör çaprazlamadır. Çaprazlama, farklı çözümler arasında bilgi değişimini sağlayarak, arama uzayının benzer ancak araştırılmamış bölgelerine ulaşılmasını sağlayan bir arama operatörüdür. Çaprazlamanın bireylerdeki iyi özellikleri birleştirerek daha iyi çözümler üretmesi beklenir. Çaprazlanarak gen (bilgi) değişiminin yapılmasından önce dizilerin çaprazlamaya tutulma olasılığı belirlenmelidir ve çaprazlama bireyler arasında p_c olasılığıyla uygulanır. Bu oran %50 - %95 oran aralığındadır. Yüksek çaprazlama oranı, popülasyon değişkenliğini hızlı bir şekilde gerçekleştirir. Düşük çaprazlama oranı, aramanın çok yavaş gerçekleşmesine sebep olur.

GA'da en çok kullanılan çaprazlama operatörleri şunlardır:

a. Tek kesim noktalı çaprazlama (*Single-point crossover*)

b. Çok kesim noktalı çaprazlama (*Multi-point crossover*)

c. Düzgün çaprazlama (*Uniform crossover*)

Bunlardan "düzgün çaprazlama" operatörü, GA çalıştırılmasında seçilmiştir.

Düzgün çaprazlamada, kromozom üzerindeki her bir nokta olası bir çaprazlama noktasıdır. Bu yöntemde kromozom uzunluğuyla aynı uzunlukta bir çaprazlama maskesi (*crossover mask*) oluşturularak ve bu maskedeki bitlerin 0 veya 1 olmasına göre ebeveyn kromozomlar oluşacak yeni kromozomlara bilgiyi aktarırlar.

Örnek olarak:

P_1=**1011000111**

P_2=0001111000

M=0011001100 (çaprazlama maskesi)

olursa

O_1=00**11**11**01**00

O_2=**10**01**00**10**11**

bireyleri oluşur.

Örnekten de görüldüğü üzere, birinci döl maske bitlerinin 1 olduğu kısımlarda bilgiyi birinci ebeveyn bireyden, 0 olduğu kısımlarda ise bilgiyi ikinci ebeveyn bireyden almaktadır. İkinci döl ise maske bitlerinin 0 olduğu kısımlarda bilgiyi birinci ebeveyn bireyden, 1 olduğu kısımlarda ise bilgiyi ikinci ebeveyn bireyden almaktadır.

Düzgün çaprazlamada kesim noktası pozisyona bağlı olmadığından her bit çaprazlama operatörüyle değiştirilip etkinliği araştırılabilir fakat bu yöntem başarılı olan bireylerin fazla bir şekilde bozulmasına yol açarak aramanın etkinliğini azaltabilir.

3.6.2 Değişim operatörü

GA'da sistem belli döngü değerine geldikten sonra diziler birbirlerine gitgide benzemektedir. Bu da çözüm uzayının daralmasına neden olmaktadır. Dizilere ne kadar çaprazlama operatörü uygulansa da ilerleyen nesillerde dizi çeşitliliği sağlanamamaktadır. Bu durumda dizinin kendi içindeki genler rastgele yer değiştirilir. Böylelikle dizi çeşitliliğinin devamı sağlanmış olur. Ancak değişim

operatörünün uygulanma oranı doğru belirlenmelidir. Değişim oranının yüksek olması çözüm uzayını çok genişleterek sistem çözümünün yanlış yerlerde olmasına neden olur. Bu nedenle, değişim operatörünün uygulanma olasılığı %0.5 - %15 arasında değişmektedir.

Özellikle, GA'nın ilerleyen nesillerinde değişimin etkinliği artmaktadır. Çünkü ilerleyen nesillerde popülasyon iyi çözümlere yakınsadığından, kromozomlar birbirine çok benzemektedir. Bu durum ise çaprazlama operatörünün aramasını kısıtlar. Nitekim çaprazlama sonucu elde edilen kromozomlar da birbirine benzer olacaktır. Bu aşamada değişim operatörü, popülasyondaki değişkenliği gerçekleştirerek arama uzayında yeni çözüm noktalarının elde edilmesini sağlamaktadır [10].

4. BİRİNCİ MERTEBEDEN ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMLER İÇİN PID KONTROLÖR TASARIM YÖNTEMLERİ

4.1 Birinci Mertebeden Ölü Zamanlı Sistemler

İntegratörü veya rezonans kutupları olmayan bir sürecin açık çevrim basamak cevabı genellikle statik kazanç (K), zaman sabiti (T) ve ölü zaman (L) olarak adlandırılan üç parametre ile tanımlanmaktadır. Bu model tanımı da PID kontrolör ayarlanmasında en çok kullanılan birinci mertebeden ölü zamanlı sistem (FOPDT) modelidir:

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \tag{4.1}$$

Modelin basamak cevabının (Şekil 4.1) tanım bölgesi fonksiyonu,

$$y(t) = K(1 - e^{-(t-L)/T}) \tag{4.2}$$

ile verilir. Bu eşitlikten sistemin ortalama yerleşme zamanını hesaplarsak,

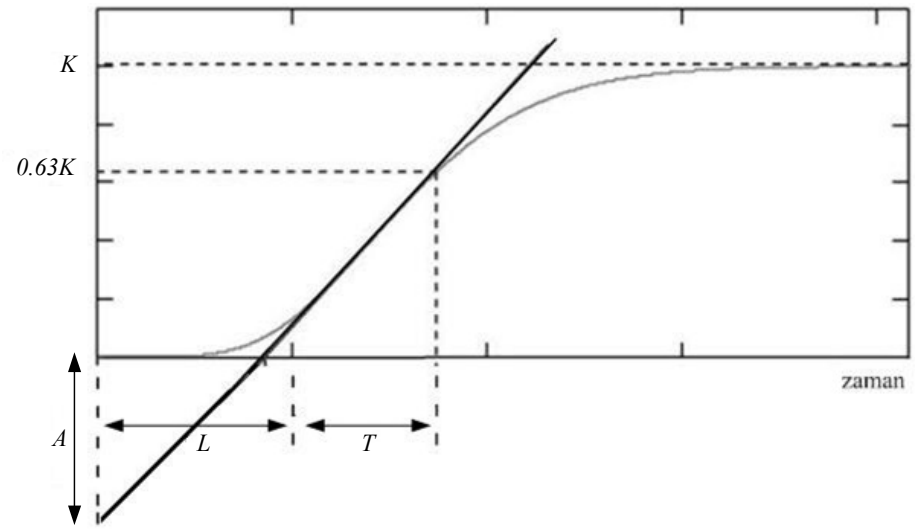
$$T_{ar} = \frac{\int_0^{\infty} (y(\infty) - y(t))dt}{K} = L + T \tag{4.3}$$

$0 \le \tau \le 1$ özelliğine sahip

$$\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{L}{T_{ar}} \tag{4.4}$$

bu oran ise *normalize ölü zaman* olarak adlandırılır.

Bu nicelik, bir sürecin kontrol edilebilirliğinin kolaylığını ya da zorluğunu tanımlamak için kullanılabilir. Buna aynı zamanda *kontrol edilebilirlik oranı* da denilir. Kabaca söyleyecek olursak, küçük τ değerine sahip süreçlerin kontrol edilmesinin kolay olduğu ve τ arttıkça sistemin kontrolündeki zorluğun arttığı bulunmuştur. Saf ölü zamanlı süreçlere karşılık gelen $\tau = 1$ olan sistemlerin iyi bir şekilde kontrol edilmesi gerçekten zordur.



Şekil 4.1 : Birinci mertebeden ölü zamanlı sistemin basamak cevabı.

Endüstride gerçeklenmiş olan kontrol sistemlerinin tamamına yakınında algılanması gereken cevabın doğrudan ölçülememesi belli bir zaman gecikmesine sebep olur. Şekil 4.1'den de görülebileceği gibi sistemde var olan e^{-Ls} terimi sistemin, belli bir L gecikmesinden sonra cevap vermesini sağlamaktadır. (4.1) bağıntısı ile verilen $G_p(s)$ sistemi, bir kontrolör ile kontrol edilmek istenirse, sistemdeki bu gecikmeden dolayı kontrolör eski verileri değerlendirerek karar verip hatalı kontrol işaretleri üretmesi önemli sorunlar doğurabilir.

4.2 Kontrolör Tasarımı ve PID Kontrolör

Kontrol sistem tasarımı aşağıdaki üç adımdan oluşur:

i. Sistemin ne yapması ve nasıl yapması gerektiğinin belirlenmesi (tasarım ölçütleri).

ii. Kontrolör ya da kompanzatör yapısının kontrol edilen sisteme nasıl bağlanacağının belirlenmesi.

iii. Kontrolör parametrelerinin tasarım hedeflerine göre belirlenmesi [11].

Bu tasarım hedeflerinden tasarım ölçütleri aşağıda verilmektedir.

4.2.1 Tasarım ölçütleri

Tasarım ölçütleri genellikle sistemin ne yapması gerektiğini belirtmek ve nasıl yaptığını değerlendirmek için kullanılır. Bir kontrol problemini çözerken gerekli olan

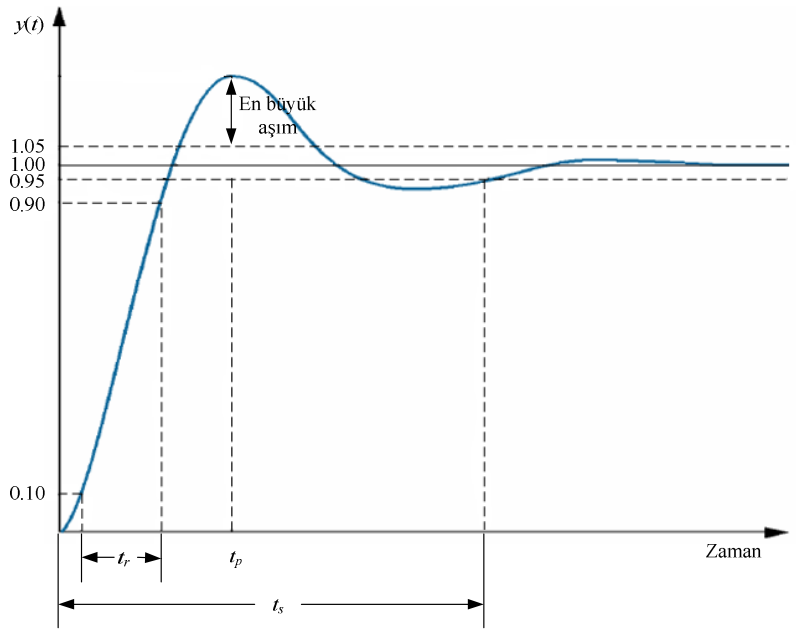
da kontrolün birincil amacının kestirilmesidir. Referans değeri (*set point*) takip etmek ve bozucularını bastırmak da en yaygın iki kontrol problem türüdür. Bir kontrol sisteminden göstermesi beklenen özellikler aşağıdaki gibi sıralanır[12].

- Yük bozucularını bastırma
- Ölçüm gürültülerine duyarlılık
- Model belirsizliğine dayanıklılık
- Referans değer takibi

Bu ölçütler her bir uygulamaya özgü farklıdır. Bu tez çalışmasında kontrolör tasarımı yapılırken referans değerinin değişimi için ayarlama yapıldığından referans değer noktası takibini ele alacağız.

4.2.1.1 Referans değer takibi

Referans değer takibi üzerine tanımlamalar, referans değer noktasındaki basamak değişiklikleri için yükselme zamanı, yerleşme zamanı, sönüm oranı, en büyük aşım ve sürekli hal sapmasında olacak koşulları içerir. Şekil 4.2'de görülen bu nicelikler farklı şekillerde tanımlanır ve aynı zamanda farklı standartlar da söz konusudur.



Şekil 4.2 : Bir kontrol sisteminin birim basamak cevabı.

- Yükselme zamanı t_r, basamak cevabının son değerin yüzde 10 değerinden yüzde 90 değerine ulaşma zamanı olarak tanımlanır. Yükselme zamanının ayrıca, son değerin yüzde 50 değerinde basamak cevabı teğetinin tersi olarak

ifade edildiği, başka bir tanımı da vardır.

- Yerleşme zamanı t_s, basamak cevabı son değerinin belirli bir yüzdesine kadar azalması ve bu değerin altında kalması için geçmesi gereken zaman olarak tanımlanır. Yüzde 2 veya 5 çok sık kullanılan bir değerdir.
- En büyük aşım, $y(t)$ birim basamak cevabı olmak üzere $y(t)$'nin en büyük değeri y_p ve sürekli hal değeri y_{ss} ile belirlenmiş olsun ($y_p \geq y_{ss}$). $y(t)$'nin en büyük aşımı

$$\text{en büyük aşım} = y_p - y_{ss} \tag{4.5}$$

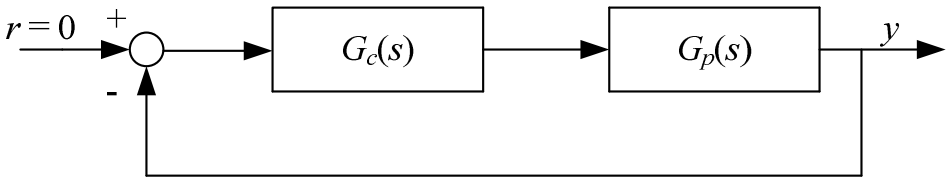
olarak tanımlanır. En büyük aşım genellikle basamak cevabı son değerinin yüzdesi ile ifade edilir:

$$\text{yüzde en büyük aşım} = \frac{\text{en büyük aşım}}{y_{ss}} \times \%100 \tag{4.6}$$

En büyük aşım genellikle bir kontrol sisteminin göreli kararlılığını değerlendirme ölçüsü olarak kullanılır. Genellikle sistemde aşımın büyük olması istenmez. Tasarımda en büyük aşım bir zaman tanım bölgesi ölçüsü olarak verilir. Şekil 4.2'deki birim basamak cevabında en büyük aşımın birinci aşımda gerçekleştiği görülür. Bazı sistemlerde en büyük aşım sonraki tepelerde oluşabilir ve özellikle sistemin sağ yarı *s*-düzleminde tek sayıda sıfırı mevcut ise negatif aşım bile görülür [11].

4.2.2 PID kontrolör

Hiç şüphesiz geri beslemeli kontrolör dendiğinde ilk olarak PID kontrolör akla gelir. Günümüzde gelişmiş birçok kontrol algoritması üzerinde sayısız araştırmalar yapılmasına rağmen PID kontrolörler endüstriyel kontrol uygulamalarının %95'ten fazlasında kullanılmaktadır.



Şekil 4.3 : Geribeslemeli bir kontrol sistemi.

PID kontrol algoritması çok basit bir yapıya sahip olmasından dolayı kullanıcılar tarafından çok rahat anlaşılmaktadır. Her çeşit uygulamada tatmin edici sonuçlar vermiştir. Maliyet/fayda oranı çok düşüktür. Ayrıca tek başına bir sistem olarak da piyasada bulunabildiği gibi rahatlıkla gömülü sistemlere algoritma olarak da entegre edilebilmektedir.

PID kontrolörü, oransal (*proportional*) terim, integral terimi ve türev (*derivative*) terimi olmak üzere üç terimden oluşmaktadır. Kontrol sinyali de bu üç terimin toplamı olarak ifade edilir. PID kontrolörüne ilişkin algoritma şu şekilde verilir:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \qquad \textbf{(4.7)}$$

$u(t)$: Kontrol sinyali

$e(t)$: Kontrol hatası (sistem cevabının olması istenilen değeri ile sistem çıkışı arasındaki fark)

K_p : Oransal kazanç,

T_I : İntegral zamanı,

T_D : Türev zamanı,

} Kontrolör parametreleri

Denklem (4.7) ile belirtilen PID algoritmasının laplace dönüşümü alındığında kontrolöre ait transfer fonksiyonu denklem (4.8)' deki gibi olmaktadır:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \qquad \textbf{(4.8)}$$

Bir PID tipi kontrolörün başarımı, kontrolöre ait K_p orantı parametresi, T_I integral parametresi ve T_D türev parametresi tarafından belirlenir. Oransal kontrol parametresi, sistem cevabını hızlandırır fakat düşük değerleri sistemi kararsızlığa götürür. İntegral kontrol parametresi, sistem yanıtındaki sürekli hal hatasını ortadan kaldırır fakat yüksek değerleri aşımı ve osilasyonu artırır. Türev kontrol parametresi ise sistem yanıtının sönümünü artırarak, aşım ve osilasyonu azaltır bu da geçici hal cevabında iyileşme sağlar. Dolayısıyla PID kontrolör parametreleri doğru şekilde seçilirse yükselme ve yerleşme zamanı düşük, az aşımlı ve kalıcı hal hatası olmayan ideal cevaplar elde edilir [12]. PID parametrelerinin geçici hal parametrelerine etkisi

Çizelge 4.1'de verilmiştir ve bu endüstrideki çoğu sistem için geçerlidir..

Çizelge 4.1 : PID parametrelerinin geçici hal parametrelerine etkisi.

Parametre	Yükselme Zamanı	Sistem Ani Tepkisi	Oturma Zamanı	Kararlı Hal Hatası
K_p **artarsa**	Azalır	Artar	Çok az etkilenir	Azalır
T_I **azalırsa**	Azalır	Artar	Artar	Yok olur
T_D **artarsa**	Çok az etkilenir	Azalır	Azalır	Çok az etkilenir

4.3 PID Kontrolör Tasarım Yöntemleri

Bu altbölümde bir girişli bir çıkışlı sistemler için PID kontrolör tasarım yöntemleri literatür taraması olacak gözden geçirilecektir. Sistemlerin performanslarını değerlendirmek üzere önerilen yöntem ile karşılaştırmaları ele alınmamaktadır.

Bilindiği gibi, PID kontrol etkisi altındaki sistemlerde istenilen amaca uygun olan güvenilir bir kontrol sağlayabilmek için, kontrolör yapısındaki orantı sabiti (K_p), integral sabiti (T_I) ve türev sabiti (T_D) parametreleri dikkatlice belirlenmelidir.

PID kontrolör parametrelerinin uygun şekilde elde edilebilmesinde yaygın olarak kullanılan bazı yöntemler vardır. Bu tasarım yöntemleri üç kategoriye ayrılır: (1) özellik tabanlı yöntemler, (2) analitik yöntemler ve (3) optimizasyon tabanlı yöntemler.

4.3.1 Özellik tabanlı yöntemler

4.3.1.1 Ziegler-Nichols basamak cevabı yöntemi

Ziegler-Nichols basamak cevabı yöntemi bir deneysel açık çevrim ayarlama yöntemidir ve sadece açık çevrim *kararlı* sistemlere uygulanabilir. Bu yöntem, sistemi, öncelikle kendi basamak cevabından elde edilen *K*, *T* ve *L* parametreleri ile tanımlar. *K*, *T* ve *L* parametreleri de Şekil 4.1'de gösterilen sistem basamak cevabının ölçümünden grafiksel olarak belirlenir. PID kontrolör parametreleri artık aşağıda verilen formüller ile *K*, *T* ve *L* cinsinden verilir. Bu kontrolör parametreleri formülleri, birinci salınımdan sonraki ilk üst aşımı orijinal değerinin $1/4$'üne indiren 0.25'lik bir genlik sönüm oranı elde edecek şekilde seçilmiştir. Yoğun denemeler de göstermiştir ki bu ölçüt küçük bir yerleşim zamanı vermektedir.

$$K_p = \frac{1.2T}{KL}$$
$$T_I = 2L \qquad \textbf{(4.9)}$$
$$T_D = 0.5L$$

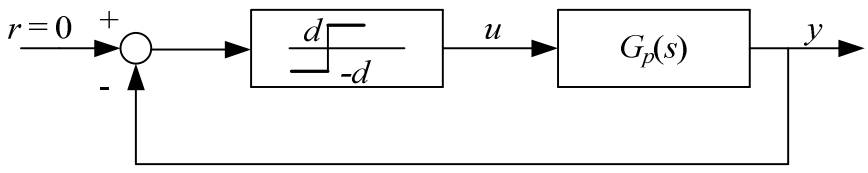
4.3.1.2 Ziegler-Nichols frekans cevabı yöntemi

Ziegler-Nichols frekans cevabı yöntemi bir kapalı çevrim ayarlama yöntemidir. Bu yöntem öncelikle $G_p(s)$ sisteminin Nyquist eğrisinin negatif reel ekseni kestiği noktayı belirler. Bu da şu şekilde deneysel olarak elde edilir: Kontrolör oransal kontrole alınarak, oransal kazanç K_p sistemde salınım yapıncaya kadar arttırılır. Sistemin salınım yaptığı andaki oransal kazanç K_{cr} ve salınım periyodu da T_{cr} ise, kontrolörün parametreleri aşağıdaki basit formüller verir:

$$K_p = 0.6K_{cr}$$
$$T_I = 0.5T_{cr} \qquad \textbf{(4.10)}$$
$$T_D = 0.125T_{cr}$$

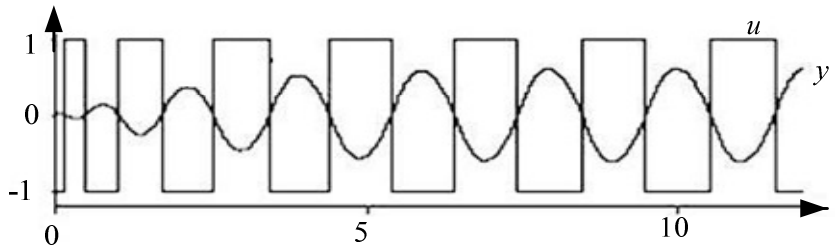
Ziegler - Nichols frekans cevabı yöntemi yardımıyla PID parametreleri ayarlanmaya çalışılırken sistemi salınıma sokmak için, operatörün sistem üzerinde çok fazla deneme yapması gerekebilir. Ayrıca sistemi salınım eşiğine getirmeye çalışırken sistem kararsız hale gelerek tehlikeli şekilde salınımlar yapabilir. Bu sakıncalar göz önüne alınarak Åström ve Hägglund tarafından röle yöntemi önerilmiştir.

Röle ayarlama yönteminde sistemin blok diyagramı Şekil 4.4'te verildiği gibi kurulur.



Şekil 4.4 : Röle geribeslemeli bir kontrol sistemi.

Anahtar önce röle konumuna getirilerek sistemin Şekil 4.4'te görüldüğü gibi salınım yapması sağlanır. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi yaklaşık 3 röle periyodunun ardından, geçici rejimlerin etkisinin azaldığı ve sistemin sabit frekans ve genlikte salınım yapmaya başladığı gözlemlenmektedir. Düzenli salınımların başladığı andan itibaren sistemi, girişine kare dalga uygulanan bir alçak geçiren filtre olarak da düşünebiliriz.



Şekil 4.5 : Röle geribeslemeli sistem için röle (u) ve sistem (y) çıkışları.

Sistemin transfer fonksiyonu alçak geçiren filtre yapısında olduğu için kare dalganın birinci harmoniği dışındaki tüm harmoniklerini süzerek sadece birinci harmoniğini bırakacaktır. Çıkıştaki salınımların frekansı ω_{cr}, rölenin genliği d, çıkıştaki salınımların genliği α olmak üzere, kritik kazanç katsayısı K_{cr},

$$K_{cr} = \left|G(i\omega_{cr})\right| = \frac{\alpha\pi}{4d} \qquad \textbf{(4.11)}$$

denklemi ile verilir. Salınımların periyodu ise T_{cr} olmak üzere K_{cr} ve T_{cr} değerlerine göre PID parametreleri Ziegler - Nichols frekans cevabı yöntemindeki parametreler kullanılarak hesaplanabilir [13].

4.3.1.3 Ziegler-Nichols yöntemlerinin modifikasyonları

Ziegler-Nichols yöntemleri yeterli kontrolü vermez. Bundan dolayı, Z-N yönteminin birçok modifikasyonu yapılmıştır. Bunun da nedeni, çok az sönümlü kapalı çevrimli sistemler vermeleridir.

Tasarım ölçütü "0.25 genlikli sönüm oranı" birçok uygulama için artık çok küçük değer olan $\zeta \approx 0.2$ sönümüne karşılık gelir. Elde edilen kapalı çevrimli sistemlerin parametre değişikliklerine çok duyarlı anlamına gelen maksimum duyarlılık da çok fazla büyüktür.

Ayrıca Z-N yöntemlerinin kullanım açısından çok kolay olma avantajı vardır. Bundan dolayı, Z-N yöntemlerinin basitliğinde fakat daha iyi dayanıklılık gösteren ayarlama yöntemlerini elde etmede birçok çaba gösterilmektedir.

4.3.1.4 AMIGO ayarlama yöntemi

Sistem dinamikleri iki yerine üç parametre ile tanımlanırsa önemli ölçüde daha iyi ayarlama kuralları elde edilebilir. (4.1) ile verilen süreci kabul eden Cohen ve Coon tarafından bu yönde ilk adım atılmıştır ve tasarımları da çok duyarlı sistemler

vermiştir.

AMIGO (Yaklaşık M-kısıtlı İntegral Kazanç Optimizasyonu) şöyle türetilmiştir: PI ve PID kontrolörleri 134 modelden oluşan geniş bir test yığını için tasarlanmıştır. Tasarımın amacı, maksimum duyarlılıklarla (MIGO) açıklanan dayanıklılık kıstaslarına bağlı olarak kontrolör integral kazancını büyütmektir. Bunun için süreç modellerinin basit modellerle yaklaşımı yapılmış ve model parametreleri ile kontrolör parametreleri arasındaki bağıntılar türetilmiştir. Bu bağıntılar da AMIGO (yaklaşık MIGO) ayarlama kurallarını oluşturur. Basamak cevabı yöntemi ve frekans cevabı yöntemi olmak üzere iki şekli mevcuttur.

Bu yönteme göre kontrolör parametreleri, birinci mertebeden ölü zamanlı sistem parametreleri cinsinden,

$$K_p = \frac{1}{K}\left(0.2 + 0.45\frac{T}{L}\right)$$

$$T_I = \frac{0.4L + 0.8T}{L + 0.1T}L \qquad \textbf{(4.12)}$$

$$T_D = \frac{0.5LT}{0.3L + T}$$

şeklinde verilir.

4.3.2 Analitik yöntemler

Süreç basit bir model ile iyi bir şekilde tanımlanabilirse kontrolör parametreleri doğrudan hesap ile elde edilebilir.

4.3.2.1 Kutup yerleştirme

Süreç, düşük dereceden bir transfer fonksiyonu ile tanımlanırsa tam bir kutup yerleşimi tasarımı gerçekleştirilebilir. Bu tasarım yöntem ile istenilen kapalı çevrim kutuplarını veren bir kontrolörü bulmak üzere basit bir ayarlama yapılmaktadır. Bir PI kontrolörün iki parametresi olduğundan iki kutup yerleştirilebilir ve bu taktirde bir PID kontrolör de üç kutup yerleştirebilir. Ayar noktası ağırlıklandırmasının kullanılmasıyla sıfırlar etkilenebilir.

4.3.2.2 λ ayarlaması

G_p ve G_c sırasıyla süreç ve kontrolör transfer fonksiyonlarıdır. Hata geri beslemeliyle elde edilen kapalı çevrim transfer fonksiyonu,

$$G_{cl} = \frac{G_p G_c}{1 + G_p G_c} \tag{4.13}$$

G_c için, bu eşitliğin çözümü

$$G_c = \frac{1}{G_p} \frac{G_{cl}}{1 - G_{cl}} \tag{4.14}$$

verir.

Bu yöntem, büyük ölü zamanlı süreçler için geliştirilmiştir. λ ayar parametresi olmak üzere, FOPDT sistem modeline ait istenilen kapalı çevrim transfer fonksiyonunun aşağıdaki gibi belirtildiğini varsayalım.

$$G_{cl} = \frac{e^{-Ls}}{1 + s\lambda T} \tag{4.15}$$

$\lambda = 1$ olduğunda açık ve kapalı çevrimli sistemlerin zaman sabitleri aynıdır. $\lambda < 1$ ise kapalı çevrimli sistemler açık çevrimli sistemlerden daha hızlı cevap verirler; $\lambda > 1$ ise daha yavaş cevap verirler. (4.15), (4.14)'te yerine yerleştirilirse, kontrolör transfer fonksiyonu,

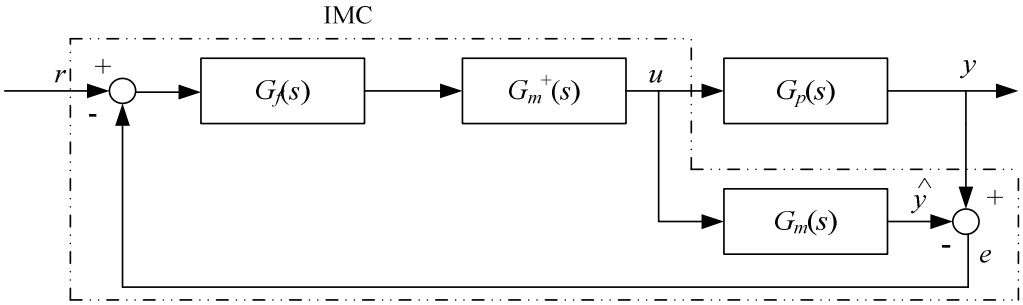
$$G_c = \frac{1 + sT}{K_p(1 + \lambda sT - e^{-Ls})} \tag{4.16}$$

olur. $L = 0$ olduğunda bu $K_p = 1/(\lambda K)$ kazançlı ve $T_I = T$ integral zamanlı bir PI kontrolör olmaktadır.

4.3.2.3 İç model kontrolörü

İç model kontrolü yöntemi 1980'li yıllarda ortaya konulmuş bir yöntem olup endüstriyel ortamda yaygınlıkla kabul görmüştür. Kontrolörün sistem açık modelini içerdiği bu yapı, açık çevrimli kararlı sistemlerde kontrolör tasarımı ve yerleşimi için özellikle uygundur. Şekil 4.6'da bir $G_p(s)$ kararlı sistemi için IMC yapısı görülmektedir. Sürece etki eden bütün bozucular, süreç çıkışında bir eşdeğer *d* bozucusuna indirgenir. IMC kontrolörü, genellikle iç model olarak bilinen sisteme paralel bağlanan $G_m(s)$ sistem modeli ve sabit bir $G_m^+(s)$ iç model kontrol

parametresinden oluşmaktadır. $G_f(s)$, modelleme hatalarına karşı dayanıklılık arttırmak ve tüm $G_m^+(s)G_f(s)$ iç model kontrol parametresini uygun hâle getirmek üzere seçilen alçak geçiren filtredir.



Şekil 4.6 : IMC yapısı.

$$G_c(s) = \frac{G_f(s)G_m^+(s)}{1 - G_f(s)G_m^+(s)G_m(s)} \tag{4.17}$$

$G_c(s)$, geri besleme kontrolörünü eşitliğine göre, bu tip kontrolörler sistem kutup ve sıfırlarını silerler. Kontrolörler genellikle yüksek derecelidir. Ayrıca PI ve PID kontrolörlerin basit modellerle elde edilmesi mümkündür. Kontrol edilecek sistemin bir FOPDT modeli olduğunu farz edersek, ölü zamanın birinci dereceden Padé yaklaşımı $e^{-Ls} \cong (1 - Ls/2)/(1 + Ls/2)$ için,

$$G_m^+(s) = \frac{1 + Ts}{K} \tag{4.18}$$

ifadesi elde edilir. Bu $G_m^+(s)$ seçimi uygun değilse, $G_f(s) = \frac{1}{1 + \lambda s}$, $\lambda > 0$ ve küçük bir değer olarak seçilir.

Geri besleme kontrolörüne ait eşitlik,

$$G_c(s) = \frac{G_f(s)G_m^+(s)}{1 - G_f(s)G_m^+(s)G_m(s)} = \frac{(1+Ts)\left(1 + \frac{L}{2}s\right)}{Ks\left(L + \lambda + \frac{L\lambda}{2}s\right)} \cong \frac{(1+Ts)\left(1 + \frac{L}{2}s\right)}{Ks(L+\lambda)} \tag{4.19}$$

elde edilir.

(4.16)'dan, standart bir PID kontrolör için aşağıdaki parametreler elde edilebilir:

$$K_p = \frac{2T + L}{2K(L + \lambda)}$$

$$T_I = \frac{L}{2} + T \qquad \textbf{(4.20)}$$

$$T_D = \frac{TL}{2\left(\frac{L}{2} + T\right)}$$

4.3.2.4 Skogestad iç model kontrolörü

Skogestad, FOPDT sistemler için iç model kontrolüne dayalı basit bir ayarlama yöntemi geliştirmiştir. Kapalı çevrim transfer fonksiyonu,

$$G_{cl} = \frac{1}{1 + sT_{cl}} e^{-Ls} \qquad \textbf{(4.21)}$$

olarak tanımlanır.

(4.19)'daki kontrolör transfer fonksiyonu, üstel fonksiyonun Taylor serisi açılımı kullanarak tahmin edilmesiyle, FOPDT sistemler için,

$$G_c(s) = \frac{1 + sT}{K(1 + sT_{cl} - e^{-Ls})} \approx \frac{1 + sT}{sK(T_{cl} + L)} \qquad \textbf{(4.22)}$$

şeklinde yazılır. Kapalı çevrim cevap zamanı, ölü zamanla (L) orantılı olarak belirlenir ve integral zamanı (T_I), PI kontrolör için olan aşağıdaki ayarlama kuralına göre geri faz bastırmalı (*lag-dominated*) süreçler için düzenlenir.

$$K_p = \frac{T}{2KL}$$

$$T_I = \min(T, 8L) \qquad \textbf{(4.23)}$$

Oransal kazanç, Ziegler – Nichols kuralı için olanla aynı biçimdedir ancak bu kazanç daha küçüktür.

Aynı parametreler seri haldeki PID kontrolör için kullanılır ve türev zamanı en küçük zaman sabiti olarak seçilir.

4.3.3 Optimizasyon tabanlı yöntemler

Optimizasyon, kontrolör tasarımı için yetkili bir araçtır ve kontrolör yapısı ve parametreleri verildiği yerler olan PID kontrolörleri için yöntem hayli uygundur. Sistemden beklenenler, parametre fonksiyon eşitsizlikleri olarak ifade edilir ve bunlar da optimizasyonu yapılacak fonksiyon olarak seçilir. Optimizasyon kullanılırken bazı gizli tehlikeler vardır. Ölçüt formüle edilirken tedbirler alınmalıdır; yoksa ihmal edilmiş bir kısıttan dolayı ölçüt gerçekten optimal olurken kontrolör hâlâ uygun olmayabilir. Diğer sorun da ağırlık fonksiyonunun birçok yerel minimuma sahip olmasıdır. Üçüncüsü de gereken hesaplamalar haddinden fazla olabilir. Aynı zamanda nümerik problemler ortaya çıkabilir. Bununla beraber, optimizasyon PID kontrolör tasarımında başarıyla kullanılan iyi bir araçtır [14].

Performans indeksi olarak adlandırılan fonksiyonun tanımı parametrik optimizasyonun da kullanılmasıyla kontrolör tasarım işlemi için genellikle mümkündür. Performans indeksi sistemi gerçeklemeye çalışan bazı performans karakteristikleri içerir. Bu fonksiyon kontrolör parametrelerine dayanmaktadır ve nümerik olarak optimize edilir. Bu işlem istenilen sistem cevabı için en uygun kontrolör parametreleri vermektedir. Performans indeksi sistem parametrelerine göre en küçük değere ayarlanırsa sisteme optimal kontrolör sistemi adı verilir. Performans indeksi daima pozitif ya da sıfırdır. Yani, ideal sistem bu indeksi minimize eden bir sistem olarak tanımlanır. Genellikle kontrolörün, kontrol edilen çıkış $y(t)$ ve referans $r(t)$ arasındaki fark olan hata işaretini minimize etmesi ($e(t) \to 0 \quad t \geq 0$) gerekir. Böylece bir sistemin zaman cevabını tanımlayan uygun ölçüt genellikle hatanın integrali ve ağırlıklı çarpımları olarak verilir.

$$J = \int_0^\infty \Phi[e(t), t]dt \tag{4.24}$$

Bundan dolayı, bir optimum dinamik performans, J fonksiyonun minimum değerini veren zaman cevabı olarak alınabilir. İntegral performans ölçütü değişik şekillerde açıklanabilir ve seçilen performans indeksi değişen kontrolör parametreleri ile minimize ediliyorsa böylece bu kontrol sisteminin optimal olduğu düşünülür. Optimal parametreler doğrudan seçilen ölçüte dayalı olduğundan bazı iyi bilinen integral performans ölçütlerini yeniden incelemek önemlidir. 40 yıldan fazla bir zamandır sistem optimum geçici hal cevabının tasarım ölçütünü geliştirmek için

birçok yaklaşım kullanılmaktadır. 1953'te Graham ve Lathrop tarafından önerilen hatanın karesinin integrali (ISE) ve hatanın mutlak değerinin integrali (IAE) ölçütleri en sık kullanılan iki performans ölçütüdür.

$$J_{ISE} = \int_0^\infty e^2(t)\,dt$$

$$J_{IAE} = \int_0^\infty \left|e(t)\right| dt \qquad \textbf{(4.25)}$$

Fakat bu ölçütler zaman faktörü içermediğinden, tüm hataları eşit bir şekilde değerlendirerek salınımlı basamak cevabı vermektedir. Bu dezavantajı gidermek için, ilk anlardaki hatalara karşı daha toleranslı olup, zamanın ilerlemesiyle doğru orantılı olarak hatanın daha fazla dikkate alındığı yöntemler geliştirilerek hatanın optimal bir şekilde minimize edilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla ISE ve IAE ölçütlerine, zamanın uygun bir ağırlık faktörü olarak eklenmesiyle zaman ağırlıklı hatanın karesinin integrali (ITSE), zaman ağırlıklı hatanın mutlak değerinin integrali (ITAE), zamanın karesi ağırlıklı hatanın karesinin integrali (IT^2SE) gibi performans ölçütleri elde edilmiştir.

θ değişken parametreleri göstermek üzere, yukarıdaki iki performans ölçütünün daha genel gösterimleri sırasıyla aşağıdaki gibidir [15]:

$$J_n(\theta) = \int_0^\infty t^n e^2(\theta,t)\,dt$$

$$J_n^{'}(\theta) = \int_0^\infty t^n \left|e(\theta,t)\right| dt \qquad \textbf{(4.26)}$$

Bu bahsedilen yöntemlerle beraber aynı zamanda birçok diğer yöntem de literatürde mevcuttur. Bu bölümde bütün bu yöntemlerin hepsinden bahsedilmesi mümkün değil ancak bunların bazıları şöyledir: Chen [16], Lee [17] ve Shen [18] parametre optimizasyonu yapmak üzere bulanık sinirsel ağlar kullanmıştır. Shen [19] yeni ayarlama kurallarına varmak için genetik algoritma kullanmıştır. Schädel [20] kaskat sönüm oranları prensibine dayalı bir PID kontrolör tasarlamıştır. Wang [21] yumuşak referans noktası takibi yapabilen bir istenilen kontrol sinyali cevabı belirtmiştir. Munro [22] PID parametrelerinin kabul edilebilir bölgelerini göstermeyi hesaba

katan Nyquist crossing'i kullanmıştır. Bu yaklaşımlar içinde özellikle genetik algoritmaların ve bulanık mantığa dayalı yöntemlerin ön plana çıktığı görülmektedir.

- ❖ PID parametrelerinin ayarlanmasında genetik algoritmalar:

GA'lar kontrol sistemlerin tasarımında hızla genişleyen bir alandır. Bir genetik ayarlama algoritması genellikle doğru çözüm bilgisi olmadan başlar ve kabul edilebilir sonuç veren cevaplara dayanmaktadır. PID parametrelerinin ayarlanabilmesi için bir uygunluk fonksiyonu seçilerek minimize edilmesi gerekmektedir. Bu uygunluk fonksiyonu çoğunlukla kapalı çevrim PID kontrol sisteminin performans ölçütleri arasından seçilir.

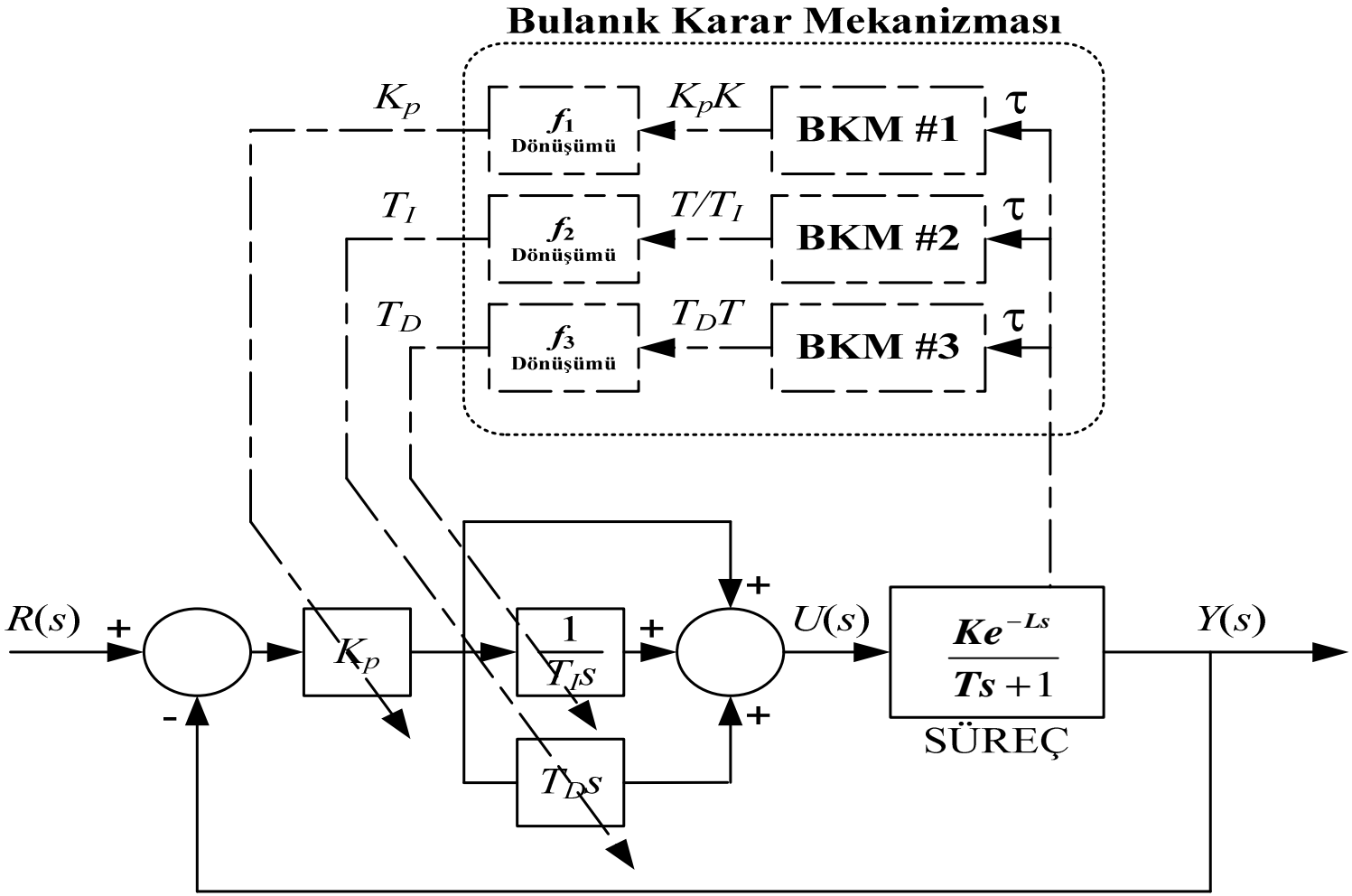
GA'lar K_p, T_I, T_D parametrelerinin ayarının yanı sıra PID kontrol performansını arttırabilmek için başka şekillerde de kullanılmaktadır. Örneğin, Visoli PID kontrolörün referans değeri ağırlıklandırma işlemini bulanık kümeler üzerinden yaparak IAE performans parametresini minimize edecek şekilde bulanık kümelerin şeklinin ve giriş katsayılarının GA yardımı ile ayarlanabileceğini göstermiştir [23]. Ayrıca aynı yazar yine [24] de literatürde bahsedilen değişik kontrol yapılarının optimum parametrelerinin GA'lar yardımıyla ayarlanabileceğini göstermiş ve benzetim sonuçlarını karşılaştırmalı olarak vermiştir.

- ❖ PID parametrelerinin ayarlanmasında bulanık mantığa dayalı yöntemler:

Literatürde bulanık PID ve kontrolörler için pek çok yapı tanımlanmıştır. Bulanık PID kontrolörlerin sınıflandırılması şu şekildedir [25]:

1. Doğrudan bulanık PID kontrolör
    i. Tek girişli bulanık PID kontrolör
    ii. İki girişli bulanık PID kontrolör
    iii. Üç girişli bulanık PID kontrolör
2. Bulanık kazanç ayarlamalı PID kontrolör
3. Melez PID kontrolör

Bu tez çalışmasında tasarımı yapılan bulanık karar mekanizması yukarıdaki sınıflandırmaya göre ikinci sınıfa bir örnek teşkil edebilir. Klasik bir PID kontrolörün parametreleri Şekil 4.7'den de görüldüğü üzere bir BKM tarafından çevrimdışı (*offline*) olarak ayarlanmaktadır.



Şekil 4.7 : Bulanık Karar Mekanizması (BKM) ile PID kontrolör parametrelerinin çevrimdışı ayarlanmasına ilişkin blok diyagram.

5. ÖNERİLEN YÖNTEM: BULANIK MANTIK KARAR MEKANİZMASI TASARIMI (BKM)

5.1 Giriş

PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi için geliştirilen yöntemler, bir önceki bölümde kısaca açıklanmıştır. Ancak, basit ayarlama kuralları kullanan bu yöntemler bazı durumlarda istenilen kapalı çevrim cevabını veremeyebilirler.

Zhuang ve Atherton (1993) tarafından "birinci dereceden ölü zamanlı sistemler" için sistem hatasını minimize eden hem PI hem de PID kontrolör parametrelerini verecek basit ayarlama formülleri önerilmiştir [5]. Bunun için bir 3/3 dereceden Padé yaklaşımı kullanılarak normalize edilmiş farklı *L/T* oranları için optimizasyon yöntemleri uygulanmıştır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen basit ayarlama formülleri ise aşağıda verilmiştir:

$$K_p = \frac{a_1}{K}\left(\frac{\tau}{T}\right)^{b1}$$

$$T_I = \frac{T}{a_2 + b_2(\tau/T)} \qquad \textbf{(5.1)}$$

$$T_D = a_3 T\left(\frac{\tau}{T}\right)^{b3}$$

L/T'nin 0.1-1.0 ve 1.1-2.0 aralıkları boyunca PI ve PID kontrolörleri için bu formüllerin (a,b) katsayıları da sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de listelenmiştir.

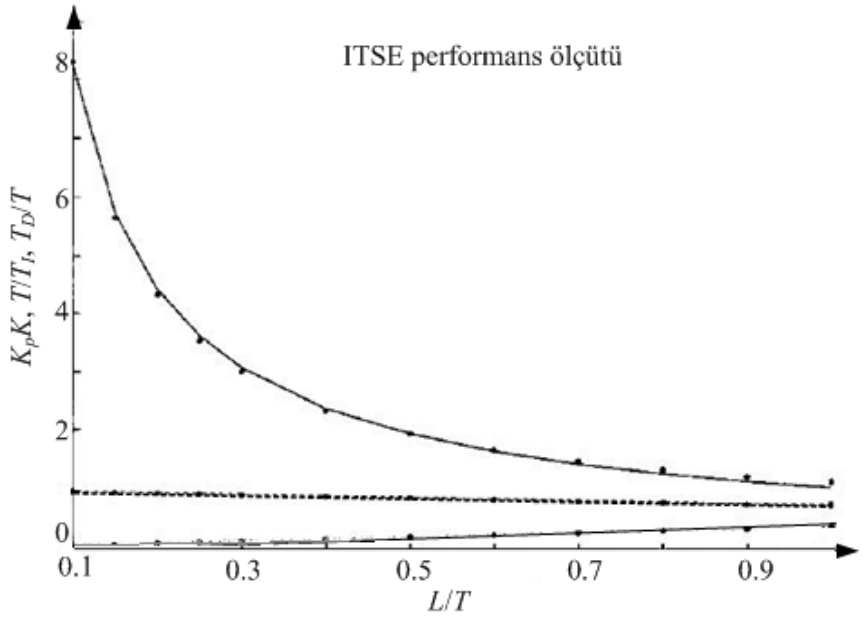
Çizelge 5.1 : Ayar noktası değişimleri için PI ayarlama formülü.

L/T	0.1 – 1.0			1.1 – 2.0		
Ölçüt	**ISE**	**ITSE**	**IT^{2}SE**	**ISE**	**ITSE**	**IT^{2}SE**
a_1	0.980	0.712	0.569	1.072	0.786	0.628
b_1	-0.892	-0.921	-0.951	-0.560	-0.559	-0.583
a_2	0.690	0.968	1.023	0.648	0.883	1.007
b_2	-0.155	-0.247	-0.179	-0.114	-0.158	-0.167

Çizelge 5.2 : Ayar noktası değişimleri için PID ayarlama formülü.

L/T	0.1 – 1.0			1.1 – 2.0		
Ölçüt	**ISE**	**ITSE**	**IT^{2}SE**	**ISE**	**ITSE**	**IT^{2}SE**
a_1	1.048	1.042	0.968	1.154	1.142	1.061
b_1	-0.897	-0.897	-0.904	-0.567	-0.579	-0.583
a_2	1.195	0.987	0.977	1.047	0.919	0.892
b_2	-0.368	-0.238	-0.253	-0.220	-0.172	-0.165
a_3	0.489	0.385	0.316	0.490	0.384	0.315
b_3	0.888	0.906	0.892	0.708	0.839	0.832

Şekil 5.1, L/T oranına göre ayar noktası değişimlerine karşılık ITSE performans ölçütü için PID kontrolör parametelerine ait 0.1-1.0 aralığındaki K_pK, T/T_I ve T_D/T ilişkilerini göstermektedir.

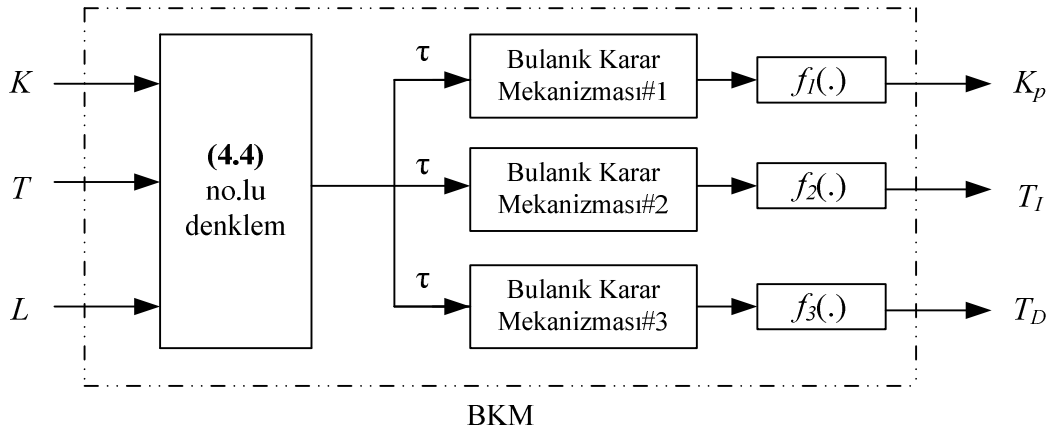


Şekil 5.1 : L/T için 0.1 – 1.0 aralığındaki PID parametreleri.

Bu bahsedilen yöntemde, PI ve PID kontrolör ayarlamaları ölü zamanın zaman sabitine oranının 0.1-1.0 ve 1.1-2.0 değer aralıkları için yapılmıştır. Bu aralıklar, küçük kontrol edilebilirlik oranlarına (τ) denk gelmektedir. Fakat $\tau = L/(L+T)$ eşitliğinden görüleceği üzere sürecin ölü zamanının zaman sabitine olan baskınlığı [0, 1] aralığında değişmektedir. Yukarıda verilen L/T aralıklarına göre τ 'nun değer aralıkları ise [0.0909, 0.5] ve [0.5238, 0.6667] olmaktadır. Ancak endüstriyel uygulamalarda ölü zaman sabiti, sistem zaman sabitinden oldukça büyük süreçler de bulunmaktadır. Bu yüzden bu süreçleri de göz önünde bulundurarak PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde yeni bir çalışma bölgesi gerekir. Ayrıca, ZA yönteminde L/T oranı saf ölü zamanlı sistemler için sonsuza kadar gideceğinden bu

büyüme sebebiyle bu yöntemin sınırlandırılma ihtiyacı duyulur. O halde bize belirli bir bölge için doğru bir çalışma imkânı sağlayacağından ZA tasarım yöntemini τ'ya göre düzenlemeye götürmek en iyi çözüm yoludur.

5.2 Birinci Mertebeden Ölü Zamanlı Sistemler İçin Bulanık Mantık Karar Mekanizması Tasarımı



Şekil 5.2 : Bulanık mantık karar mekanizması.

Şekil 5.2'deki bulanık mantık karar mekanizması, K_p, T_I ve T_D parametrelerini farklı olarak atayan üç ayrı bulanık kural tabanı ile oluşturulmuştur. Bu üç ayrı bulanık kural tabanları için giriş τ, çıkışlar da sırasıyla $K_p K$, T/T_I ve T_D/T'tir. Bu Takagi-Sugeno kural tabanlarının kesin (*crisp*) sonuç değerleri, (5.2) denklemi ile verilen sistem hatasını minimize eden optimal kontrolör parametre değerlerinin bulanıklaştırılmış halleridir.

$$J_n(K_p,T_I,T_D)=\int_0^\infty t^n e^2(K_p,T_I,T_D,t)dt, \qquad K_p,T_I,T_D>0 \tag{5.2}$$

Daha detaylı bahsetmek gerekirse, yukarıdaki denklem amaç fonksiyonu adını almaktadır. Bu amaç fonksiyonu çoğunlukla kapalı çevrim PID kontrol sisteminin performans ölçütleri arasından seçilmektedir. Sistem hatasını, kısaca, $e(K_p,T_I,T_D,t)=e(t)$ olarak ele alırsak, $e(t)=r(t)-y(t)$'dir. Burada $r(t)$, referans değer girişi ve $y(t)$ ise sistem çıkışını belirtir. Kontrolör parametrelerine dayalı olan bu fonksiyon optimize edilir. Böylece tasarım aşamasındaki istenilen sistem cevabı için en uygun kontrolör parametreleri elde edilmektedir.

Bulanık karar mekanizması tasarımı aşamasında birçok birinci mertebeden ölü zamanlı sistem ele alınmış ve bu süreçleri eniyileyecek PI ve PID kontrolörlerinin parametreleri bir global optimizasyon yöntemi olan genetik algoritma kullanılarak elde edilmiş ve yapılan çok sayıda benzetim sonrasında zengin bir veri tabanı oluşturulmuştur. Süreçlere ait K, T, L parametreleri rastgele üretilmişlerdir. GA parametreleri olan popülasyon büyüklüğü 200, nesil sayısı 50, çaprazlama operatörü 0.8 ve değişim operatörü 0.01 olarak alınmıştır.

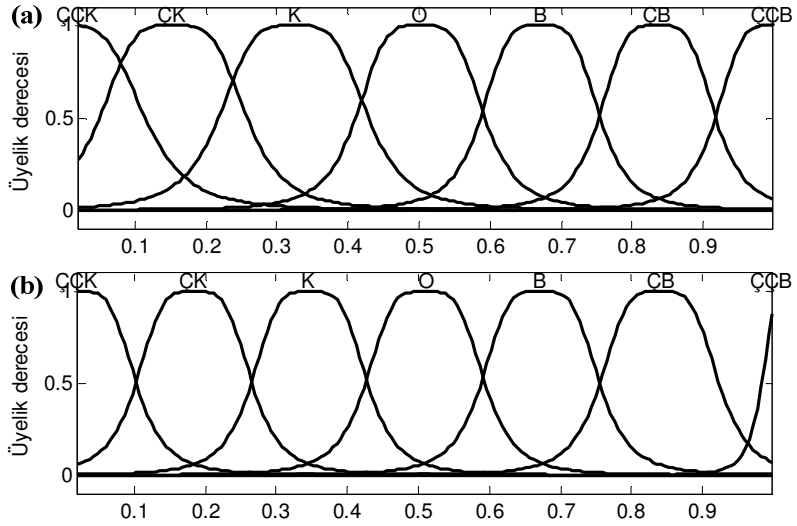
Süreç modelindeki parametreler ile PI ve PID kontrolörü parametreleri arasındaki bulanık ilişkileri belirleyebilmek amacıyla elde edilen bu veriler kullanılmıştır. ISE ve ITSE amaç ölçütleri kullanılarak oluşturulan veri tabanı her bir kontrolör için ortalama 50 adet veriden oluşmaktadır ve bu toplam verilerin ANFIS'te eğitilmesiyle kontrolörlerin her bir parametresi için 7 adet kural içeren bulanık karar mekanizmaları oluşturulmuştur. τ girişine sahip Takagi-Sugeno tipindeki bulanık kural tabanları için giriş üyelik fonksiyonları g-bell (A_i), çıkış üyelik fonksiyonları ise τ'ya bağlı bir doğrusal fonksiyon seçilmiştir. Böylece bulanık kural tabanındaki her bir kuralın çıkışı giriş değerlerinin doğrusal birleşimiyle bulunur. Keskin çıkış değerleri ise ağırlık ortalaması alınarak bulunur. Bulanık Karar Mekanizmasında, her bir kontrolör parametresi için bir adet bulanık kural tabanı vardır ve bu kurallara ait örnek kurallar Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 : BKM'na ilişkin bulanık kuralların yapıları.

BKM#1:	**EĞER** τ değeri A_{1i} ise **O HALDE** $K_pK=a_{1i}\tau+b_{1i}$
BKM#2:	**EĞER** τ değeri A_{2i} ise **O HALDE** $T/T_I=a_{2i}\tau+b_{2i}$
BKM#3:	**EĞER** τ değeri A_{3i} ise **O HALDE** $T_DT=a_{3i}\tau+b_{3i}$

Bulanık kural tabanlarının çıkışları sırasıyla K_pK, T/T_I ve T_D/T olmak üzere f_1, f_2 ve f_3 ile belirtilen gerekli dönüşümler yapılarak PI ve PID kontrolörlerinin parametreleri birbirinden ayrı kural tabanları ile bulanık olarak bulunmuş olur. Önerilen bulanık karar mekanizmaları sayesinde çevrimdışı olarak bir kez PI ve PID parametreleri belirlenir.

ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının PI kontrolör parametrelerine ilişkin giriş üyelik fonksiyonları Şekil 5.3'te, çıkış üyelik fonksiyonları ise Çizelge 5.4'te verilmiştir.

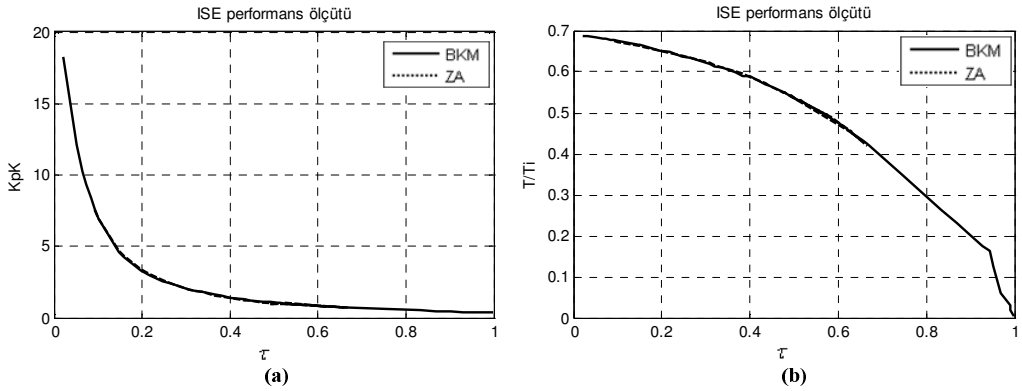


Şekil 5.3 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancına ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (b) integral sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu.

Çizelge 5.4 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait oran kazancı ve integral sabitine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları.

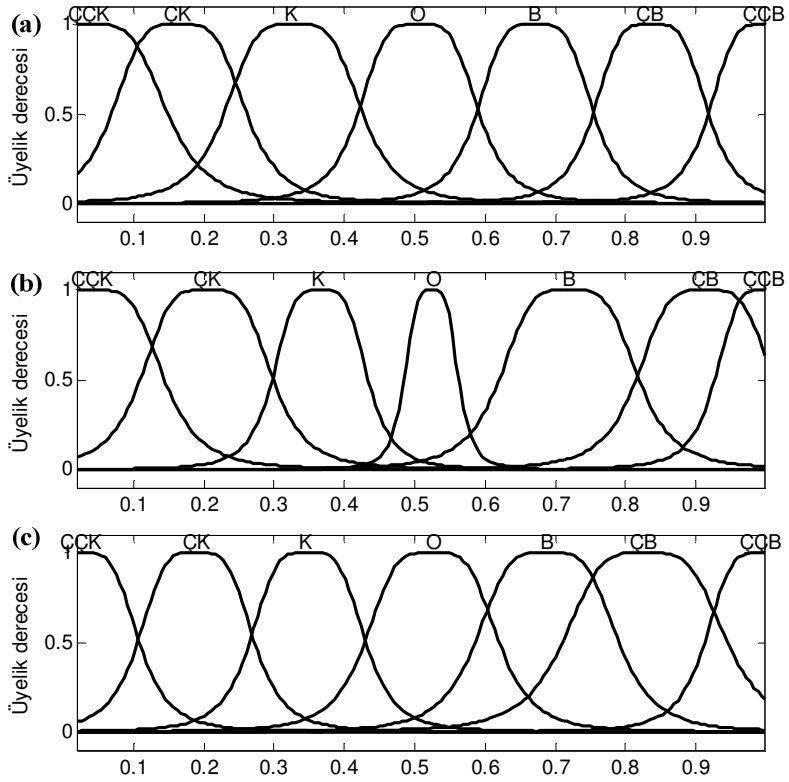
		ÇÇK	ÇK	K	O	B	ÇB	ÇÇB
K_p	a	-1.702	-3.191	-3.954	-7.417	-20.29	-70.72	-258.40
	b	2.152	3.350	3.610	5.365	10.10	19.91	23.78
T_i	a	-0.3803	-0.7508	-0.7329	-0.5296	-0.3446	-0.2665	-0.1189
	b	0.3780	0.8828	0.9128	0.7995	0.7238	0.7036	0.6879

Bulanık kural tabanındaki Takagi-Sugeno yapısındaki kuralların sonuç kısmında $f(x) = ax + b$ belirgin fonksiyonu vardır ve herbir bulanık kural tabanındaki bu *a* ve *b* değerleri yukarıdaki çizelgede verilmiştir. Şekil 5.4 referans değer takibi için ISE performans ölçütü için oluşturulan bulanık kural mekanizmalarından elde edilen $K_p K$ ve T/T_I çıkışlarının τ'ya değişimi göstermektedir.



Şekil 5.4 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancı ilişkisi, (b) integral sabiti ilişkisi.

ISE performans ölçütü için tasarımı yapılan bulanık mantık karar mekanizmasının PID kontrolör parametrelerine ilişkin giriş üyelik fonksiyonları Şekil 5.5'te verilmiştir.



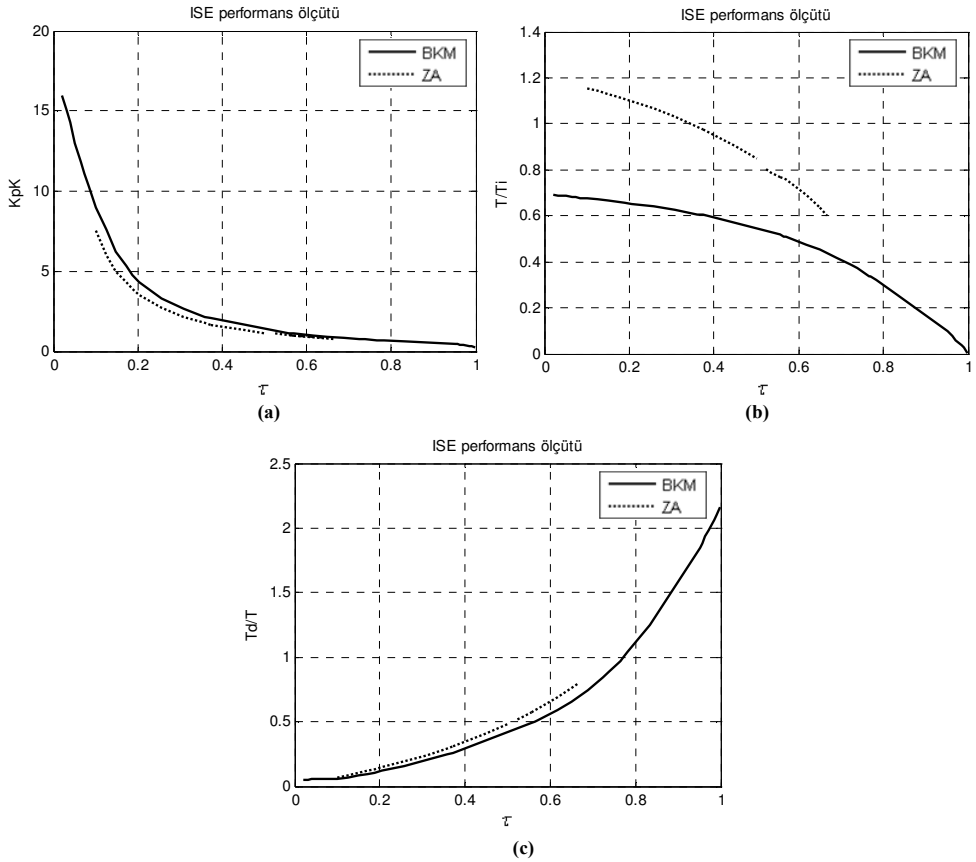
Şekil 5.5 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancına ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (b) integral sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (c) türev sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu.

Bu bulanık mantık karar mekanizmasına ait PID kontrolör parametrelerine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları da Çizelge 5.5'te listelenmiştir.

Çizelge 5.5 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait oran kazancı, integral sabiti ve türev sabitine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları.

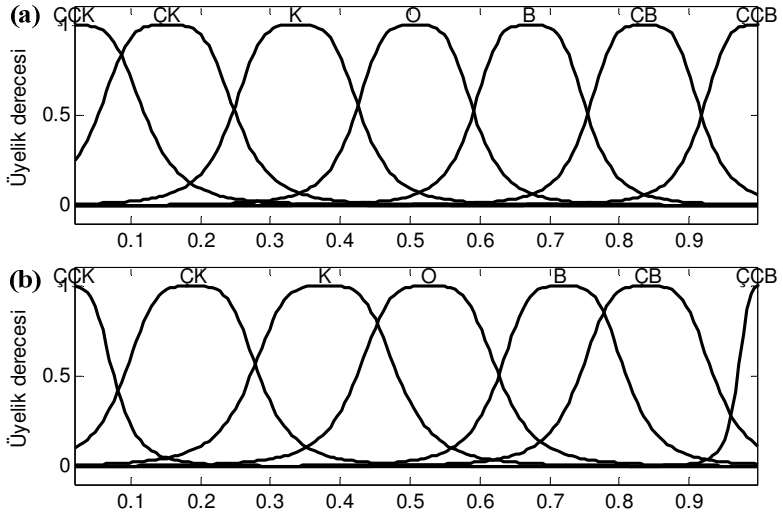
τ		ÇÇK	ÇK	K	O	B	ÇB	ÇÇB
K_p	a	-3.777	-1.5050	-1.8980	-1.1390	-6.0840	-7.2050	-63.2100
	b	4.067	1.8760	2.1520	1.8380	4.4580	5.8740	19.1700
T_i	a	-1.428	0.3206	-0.8074	-1.0900	-0.3773	-0.2830	-0.2274
	b	1.249	-0.0297	0.9828	1.1280	0.7439	0.7115	0.6957
T_d	a	5.047	1.3260	-0.2526	0.0027	0.6331	0.6686	0.2254
	b	-2.762	0.2728	0.8017	0.4311	-0.0055	-0.0210	0.0487

Şekil 5.6 referans değer takibi için ISE performans ölçütü için oluşturulan bulanık kural mekanizmalarından elde edilen $K_p K$, T/T_I ve T_D/T çıkışlarının τ'ya değişimi göstermektedir.



Şekil 5.6 : ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancı ilişkisi, (b) integral sabiti ilişkisi, (c) türev sabiti ilişkisi.

ITSE performans ölçütü için tasarımı yapılan bulanık mantık karar mekanizmasının PI kontrolör parametrelerine ilişkin giriş üyelik fonksiyonları ise Şekil 5.7'de, çıkış üyelik fonksiyonları da Çizelge 5.6'da verilmiştir.

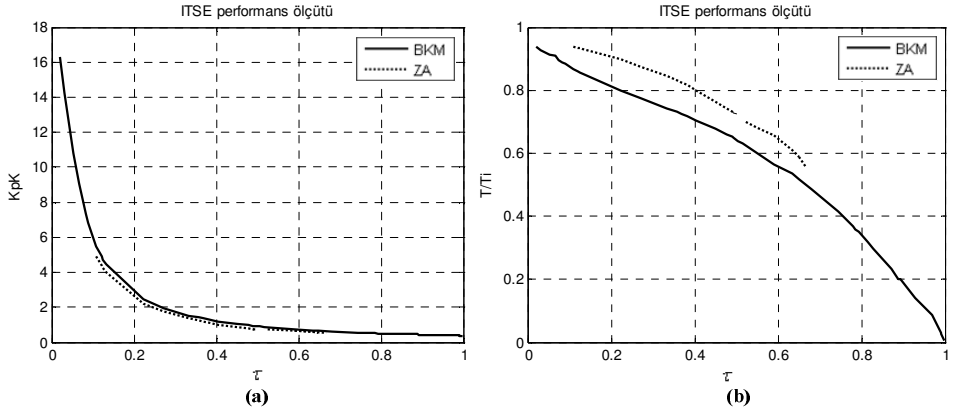


Şekil 5.7 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancına ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (b) integral sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu.

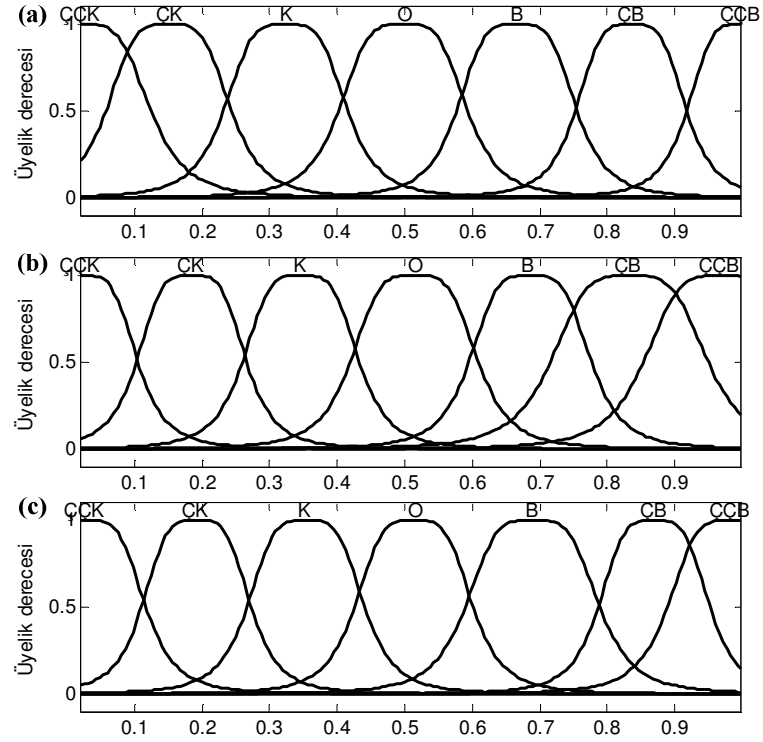
Çizelge 5.6 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait oran kazancı ve integral sabitine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları.

τ		ÇÇK	ÇK	K	O	B	ÇB	ÇÇB
K_p	a	-1.124	-1.264	-2.401	-5.502	-15.06	-64.05	-232
	b	1.539	1.608	2.393	4.045	7.614	18.63	20.92
T_i	a	-3.159	-1.679	-1.318	-1.03	-0.6942	-0.5846	-0.6221
	b	3.155	1.692	1.381	1.161	0.9711	0.9253	0.9505

Şekil 5.8, referans değer takibi için ITSE performans ölçütü için oluşturulan BKM'larından elde edilen K_pK ve T/T_I çıkışlarının τ'ya değişimi göstermektedir.



Şekil 5.8 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancı ilişkisi, (b) integral sabiti ilişkisi.



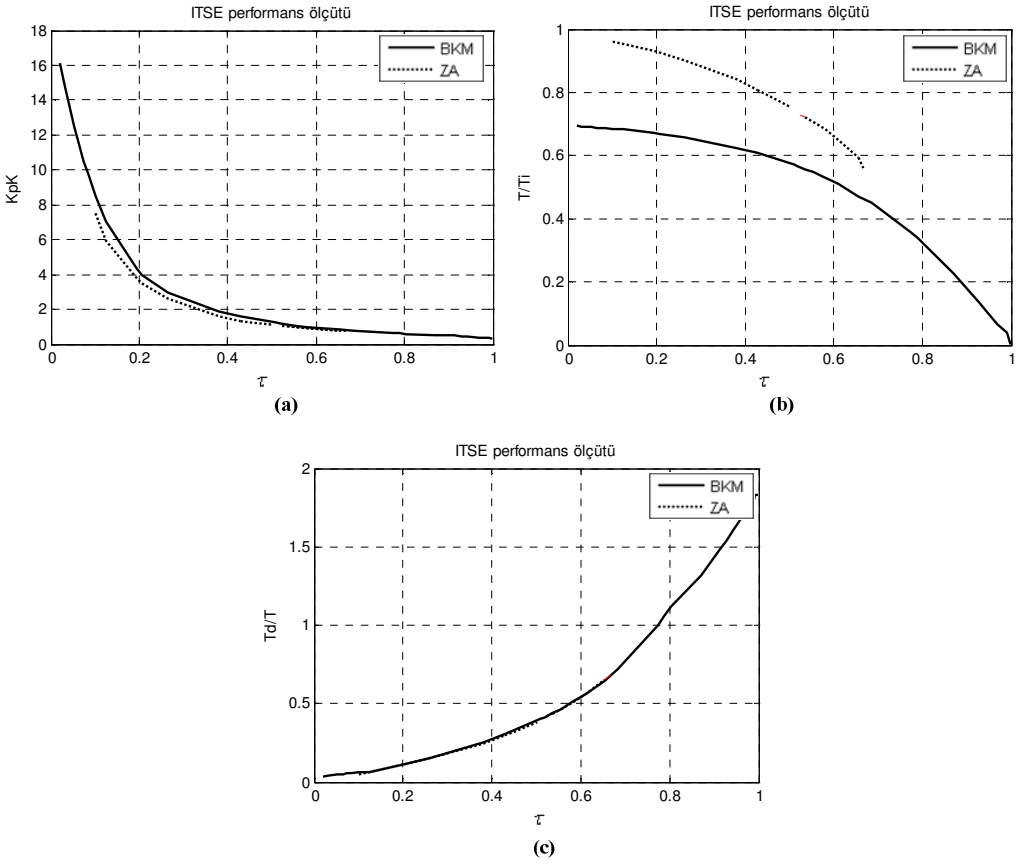
Şekil 5.9 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancına ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (b) integral sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu, (c) türev sabitine ilişkin giriş üyelik fonksiyonu.

ITSE amaç ölçütüne dayalı olarak tasarımı yapılan bulanık mantık karar mekanizmasının PID kontrolör parametrelerine ilişkin giriş üyelik fonksiyonları Şekil 5.9'da, çıkış üyelik fonksiyonları ise Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait oran kazancı, integral sabiti ve türev sabitine ilişkin çıkış üyelik fonksiyonları.

τ		ÇÇK	ÇK	K	O	B	ÇB	ÇÇB
K_p	a	-2.642	-1.9450	-3.6710	-6.6160	-16.6700	-51.9000	-127
	b	2.985	2.2500	3.3780	4.8150	8.4900	15.4500	19.24
T_i	a	-2.521	-2.1820	-0.8773	-0.4895	-0.2826	-0.1621	-0.1305
	b	2.564	2.0280	1.0120	0.8097	0.7277	0.7005	0.6944
T_d	a	1.586	0.5419	2.0250	1.4770	1.0910	0.8549	0.0358
	b	0.346	0.7356	-0.6829	-0.3478	-0.1510	-0.0557	1.8320

Referans değer takibi için ISE performans ölçütü için oluşturulan bulanık kural mekanizmalarından elde edilen K_pK, T/T_I ve T_D/T çıkışlarının τ'ya değişimi Şekil 5.10'da görüldüğü gibidir.



Şekil 5.10 : ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na ait: (a) oran kazancı ilişkisi, (b) integral sabiti ilişkisi, (c) türev sabiti ilişkisi.

Şekillerden görüleceği üzere benzetim çalışmaları sonucu τ'nun değişim aralığı [0.0213, 0.999] olarak elde edilmiştir. Böylece ölü zamanı sistem zaman sabitinden

oldukça büyük sistemler için de istenilen çalışma bölgesine ulaşılmış ve saf integratörlü sistem yapısına da çok iyi bir derecede yaklaşılmıştır. Şekillerde dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise Zhuang ve Atherton [5] tarafından önerilen analitik yöntemi τ'ya göre düzenlediğimizde, bazı τ değer aralıkları için ZA ayarlama yöntemi PI ve PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılamamaktadır. Önerilen bulanık karar mekanizması tasarımı (BKM) ile bu dezavantaj giderilmektedir.

5.3 Benzetim Sonuçları

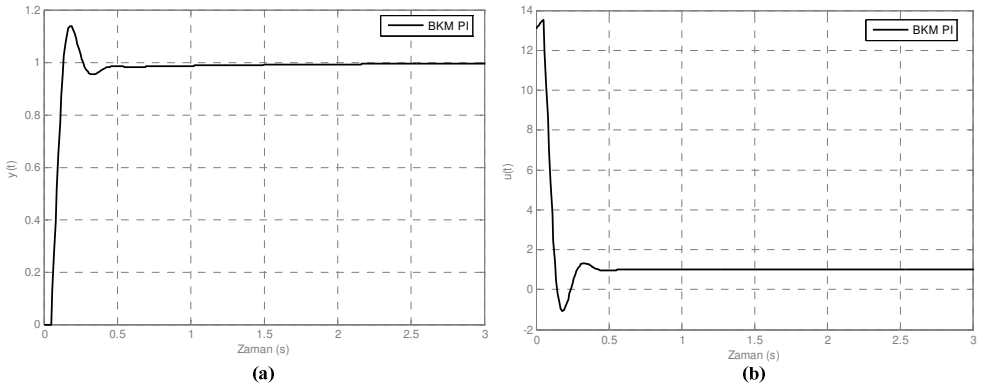
Önerilen yöntemin performansı literatürden seçilen farklı sistemler için MATLAB/Simulink ortamında sınanmış ve benzetim sonuçları olumlu olmuştur. Birinci benzetimde örnekleme periyodu 0.01 saniye, diğer benzetimlerde ise örnekleme periyodu 0.1 saniye alınmıştır. Yöntemin etkinliği, sistem hatasını minimize etme açısından ele alınmıştır. Bu amaçla yapılan benzetimler [5]'te verilen analitik yöntem ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, önce ISE daha sonra ITSE performans ölçütlerine göre PI ve PID kontrolörlü sistemler için sıralanmıştır. Benzetimlerde, sisteme birim basamak referans işareti uygulanmış ve elde edilen ISE ve/veya ITSE değerleri bulunmuştur. Ayrıca sistem cevaplarından yüzde aşım ($M_p(\%)$), yükselme zamanı (t_r), yerleşme zamanı (t_s) değerleri hesaplanmıştır.

5.3.1 Birinci benzetim örneği

İlk örnek olarak (5.3) denklemi ile ifade verilen birinci mertebeden ölü zamanlı sistem ele alınmıştır [26]. Burada sistem kazancı 1, zaman sabiti 1, ölü zaman sabiti ise zaman sabitinden oldukça küçük olacak şekilde 0.05'tir.

$$G_1(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.05s} \qquad \textbf{(5.3)}$$

Bu transfer fonksiyonuna sahip sistem için ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık karar mekanizmasının verdiği PI kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ile sisteme ait değerler Şekil 5.11 ve Çizelge 5.8'de, aynı amaç ölçütüne dayalı oluşturulan diğer bulanık karar mekanizmasının verdiği PID kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ile sisteme ait değerler Şekil 5.12 ve Çizelge 5.9'da sırasıyla verilmektedir.

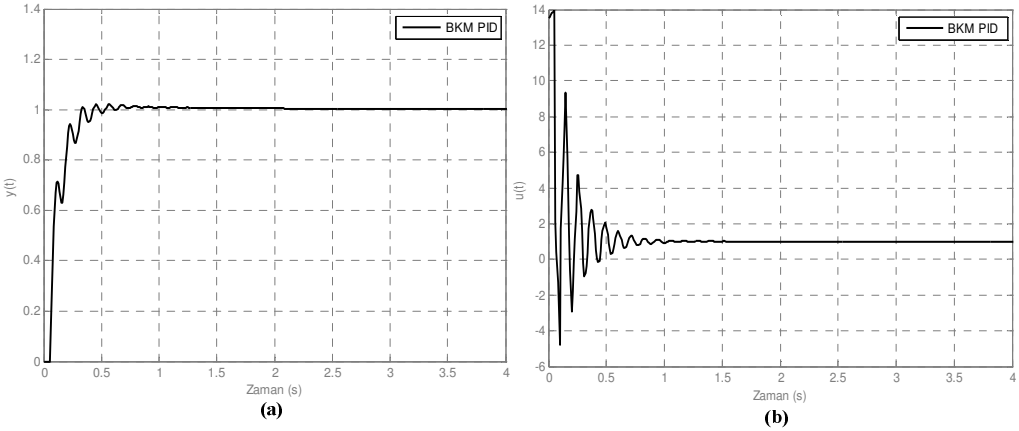


Şekil 5.11 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_1(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.8 : $G_1(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.05	0.0476	13.08	1.463
ZA			-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	13.9216	0.0656	0.4274	0.0744
ZA	-	-	-	-



Şekil 5.12 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_1(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

$G_1(s)$ sistemi için L/T oranı ZA analitik yönteminde belirtilen en alt sınır değerin de altında olduğundan ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık karar mekanizması ile elde edilen performans değerlerinin analitik yöntem sonuçları ile

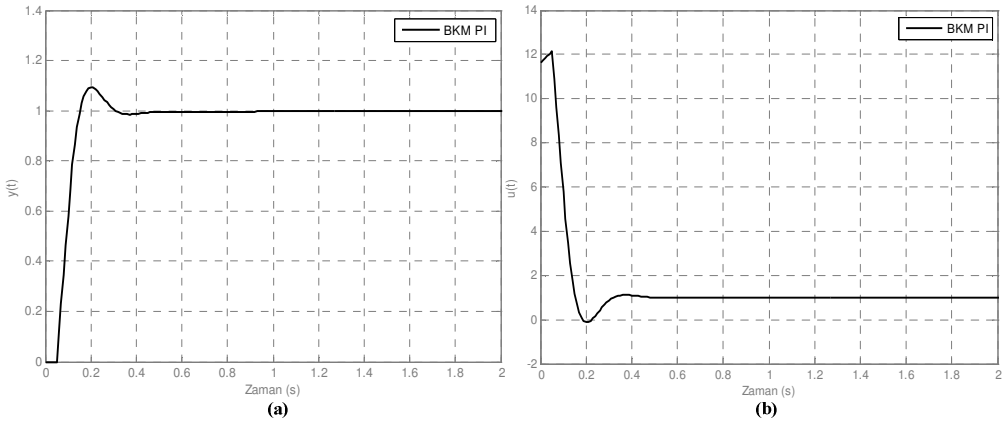
karşılaştırılması olmamaktadır.

Çizelge 5.9 : $G_1(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.05	0.0476	13.51	1.457	0.0555
ZA			-	-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	2.1993	0.1511	0.5718	0.0847
ZA	-	-	-	-

Aynı sistemin bu kez ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık karar mekanizmasının verdiği PI ve PID parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ile sisteme ait değerler Şekil 5.13, 5.14 ve Çizelge 5.10, 5.11'de sırasıyla verilmektedir.

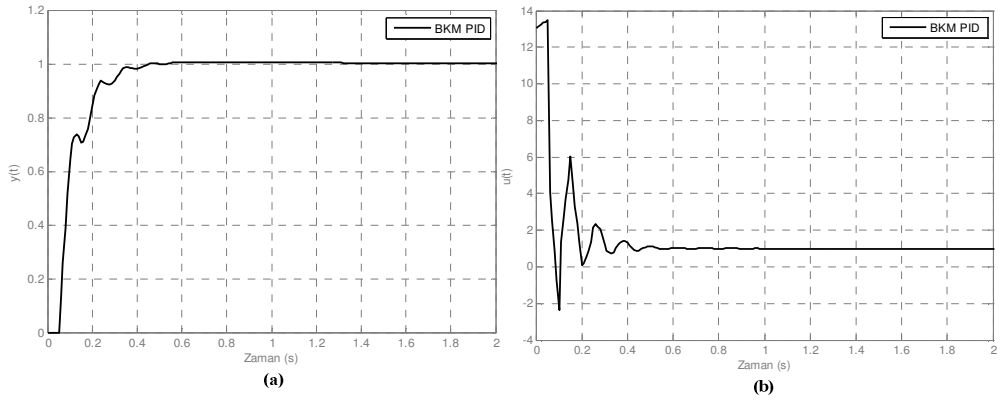


Şekil 5.13 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_1(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.10 : $G_1(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.05	0.0476	11.61	1.09
ZA			-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	9.3970	0.0765	0.2826	0.0035
ZA	-	-	-	-



Şekil 5.14 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_1(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.11 : $G_1(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.05	0.0476	13.05	1.449	0.0459
ZA			-	-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	0.6103	0.1580	0.9114	0.0042
ZA	-	-	-	-

$G_1(s)$ sistemi için L/T oranı ZA analitik yönteminde belirtilen en alt sınır değerin de altında olduğundan ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık karar mekanizması ile elde edilen performans değerlerinin analitik yöntem sonuçları ile karşılaştırılması olmamaktadır.

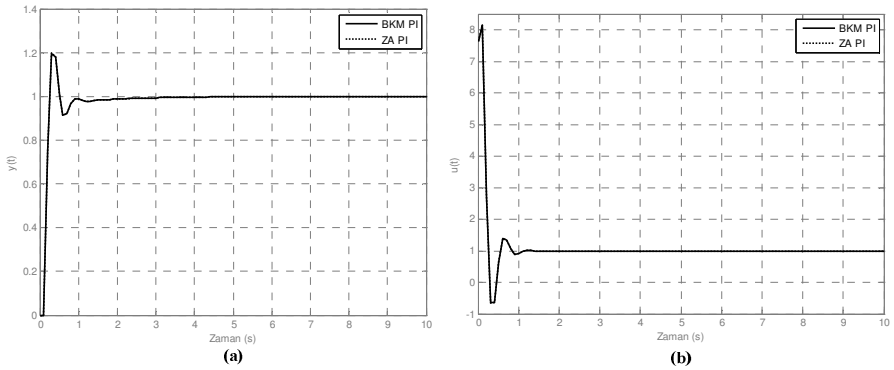
5.3.2 İkinci benzetim örneği

İkinci örnek olarak (5.4) denklemi ile ifade verilen birinci mertebeden ölü zamanlı başka bir sistem ele alınmıştır [27]. Burada sistem kazancı 1, zaman sabiti 1, ölü zaman sabiti ise zaman sabitinden küçük olacak şekilde 0.1'dir.

$$G_2(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.1s} \qquad \textbf{(5.4)}$$

Bu transfer fonksiyonuna sahip sistem için ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının verdiği PI ve PID parametrelerine göre elde edilen sistem cevapları ve kontrol işaretlerinin ZA ayarlama yöntemi ile

karşılaştırılması Şekil 5.15 ve 5.16'da sırasıyla verilmektedir.



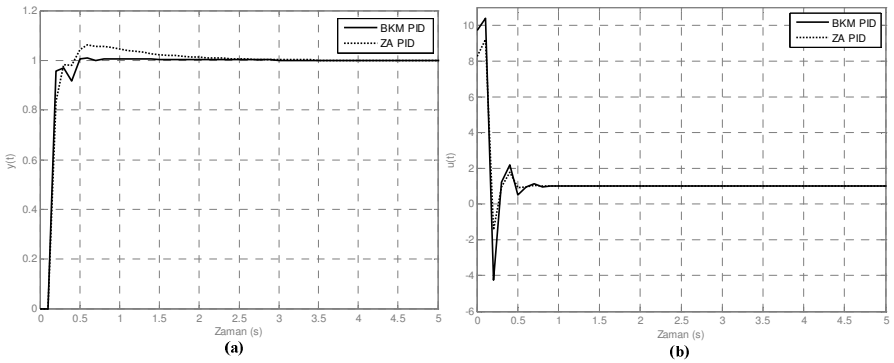
Şekil 5.15 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_2(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.12 : $G_2(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.1	0.0909	7.6208	1.4744
ZA			7.6423	1.4826

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	19.5439	0.1203	1.3434	0.1518
ZA	19.7569	0.1199	1.3499	0.1518

Önerilen yöntemden ve ZA ayarlama yönteminden bulunan PI kontrolörü parametrelerine göre yapılan benzetimde elde edilen performans değerleri Çizelge 5.12'de verilmektedir. $G_2(s)$ sistemi için BKM ve ZA ile aynı ISE değerine sahip olunmaktadır. Fakat yüzde en büyük aşım ve yerleşme zamanı değerleri az da olsa daha küçüktür.



Şekil 5.16 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_2(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

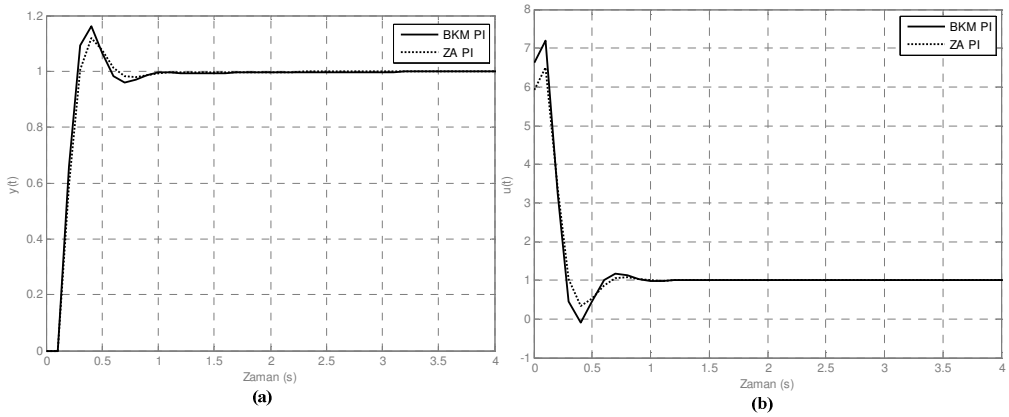
Çizelge 5.13 : $G_2(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.1	0.0909	9.7141	1.4751	0.0611
ZA			8.2673	0.8634	0.0633

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	1.0627	0.0837	0.4714	0.1356
ZA	6.2284	0.1327	1.6657	0.1433

Önerilen yöntemden ve ZA ayarlama yönteminden bulunan PID kontrolörü parametrelerine göre yapılan benzetimde elde edilen performans değerleri Çizelge 5.13'te verilmektedir. $G_2(s)$ sistemi, BKM ile ZA'dan biraz az ISE değerine sahiptir. Şekil 5.16'dan da görüleceği üzere yüzde en büyük aşım %6'nın oldukça aşağısına inmiş, yükselme zamanı ile yerleşme zamanı değerleri de azalmıştır. $G_2(s)$ sistemi için iyi bir iyileşme sağlanmıştır.

Aynı sistemin bu kez ITSE performans ölçütüne dayalı olarak oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının verdiği PI kontrolörünün parametrelerine göre elde edilen ZA ayarlama yöntemi ile karşılaştırmalı sistem cevabı ve kontrol işareti Şekil 5.17'de verilmektedir.



Şekil 5.17 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_2(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

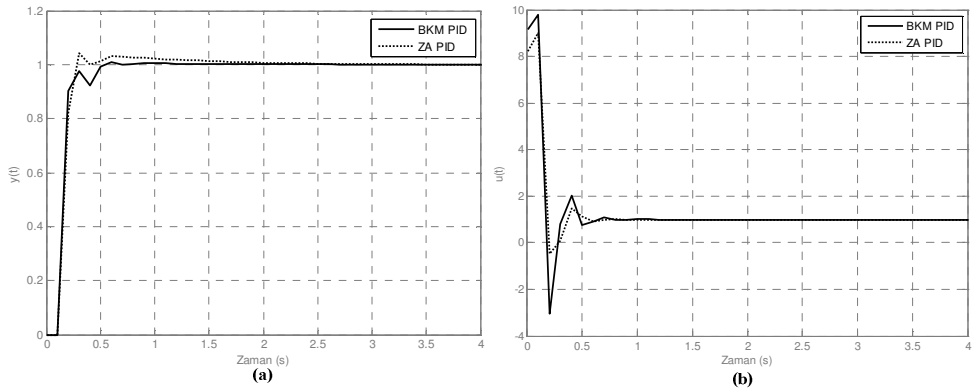
Bulunan PI kontrolörü parametrelerine göre yapılan benzetimde elde edilen performans değerleri Çizelge 5.14'te verilmiştir. BKM'na göre $G_2(s)$ sistemi ZA'dakinden biraz daha az ITSE değerine sahip olmaktadır ancak yüzde en büyük aşımı yüksektir. Yükselme zamanı biraz azalmıştır ama yerleşme zamanı artmıştır.

Çizelge 5.14 : $G_2(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.1	0.0909	6.6160	1.1336
ZA			5.9358	1.0601

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	16.2809	0.1406	0.8498	0.0138
ZA	11.9644	0.1576	0.5918	0.0142

Sistemin ITSE performans ölçütüne dayalı olarak oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının verdiği PID kontrolörünün parametrelerine göre elde edilen ZA ayarlama yöntemi ile karşılaştırmalı sistem cevabı ve kontrol işareti ise Şekil 5.18'de verilmektedir.



Şekil 5.18 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_2(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.15 : $G_2(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.1	0.0909	9.1693	1.4591	0.0591
ZA			8.2199	1.0382	0.0478

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	0.9280	0.0886	0.4799	0.0100
ZA	4.3280	0.1235	1.1554	0.0112

Çizelge 5.15'teki karşılaştırılan yöntemlerin kontrolör parametrelerinin performans değerleri verilmektedir. BKM ile $G_2(s)$ sistemi için ZA'dan biraz daha az ITSE

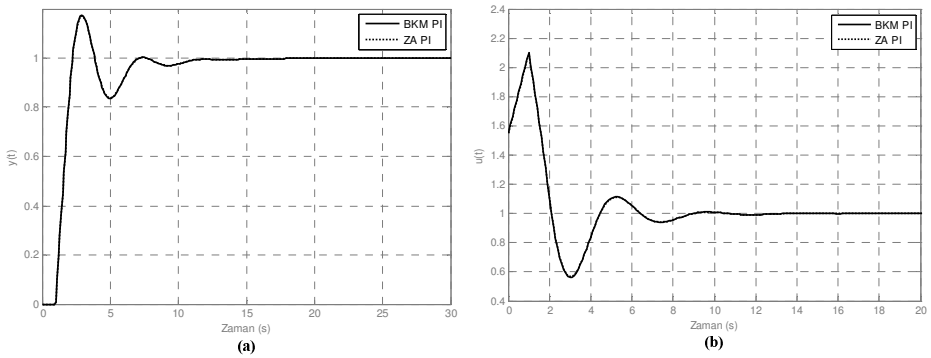
değerine sahip olunmaktadır. Şekil 5.18'den görüldüğü üzere BKM tasarımı ile yüzde en büyük aşım ZA ayarlama yönteminin verdiği %4'lük aşımın oldukça aşağısına inilmesi sağlanmış, yükselme zamanı ile yerleşme zamanı değerleri de azalmıştır. BKM tasarımı iyi bir performans göstermiştir.

5.3.3 Üçüncü benzetim örneği

Bu örnekte asıl referans alınan makalede verilen birinci mertebeden ölü zamanlı sistem ele alınmıştır [5]. Burada sistem kazancı 1, zaman sabiti 1.65, ölü zaman sabiti ise 0.99'dur.

$$G_3(s) = \frac{1}{1.65s+1} e^{-0.99s} \tag{5.5}$$

Bu transfer fonksiyonuna sahip sistem için ISE performans ölçütünün bulanık mantık karar mekanizmasının verdiği PI parametrelerine göre elde edilen sistem cevapları ve kontrol işaretlerinin ZA ayarlama yöntemi ile karşılaştırılması Şekil 5.19'da verilmektedir.



Şekil 5.19 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_3(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

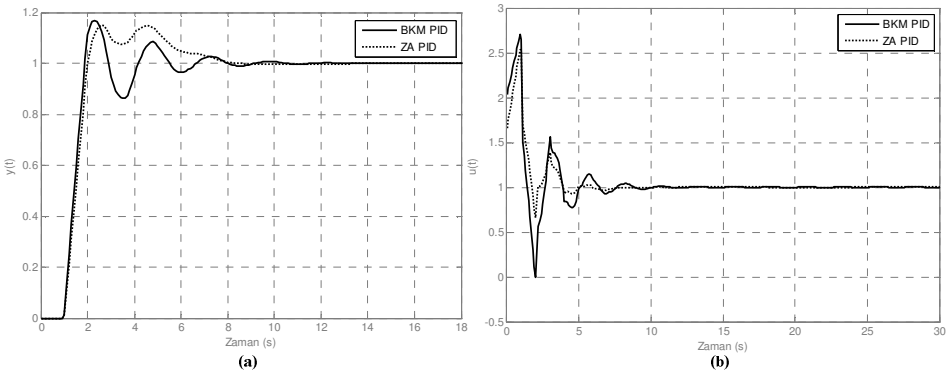
Çizelge 5.16 : $G_3(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.6	0.375	1.5520	2.7688
ZA			1.5457	2.7638

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	17.4198	0.9696	10.2467	1.431
ZA	17.1168	0.9743	10.2468	1.431

PI kontrolörünün performans değerleri her iki yöntem için Çizelge 5.16'da verilmektedir. $G_3(s)$ sistemi, BKM için ZA ile aynı ISE değerine sahiptir. Fakat yüzde en büyük aşım biraz yüksek ve yükselme zamanı ile yerleşme zamanı değerleri az da olsa daha küçüktür.

Sistem için ISE performans ölçütünün bulanık mantık karar mekanizmasının verdiği PID parametrelerine göre elde edilen sistem cevapları ve kontrol işaretlerinin ZA ayarlama yöntemi ile karşılaştırılması da Şekil 5.20'de verilmektedir.



Şekil 5.20 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_3(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.17 : $G_3(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

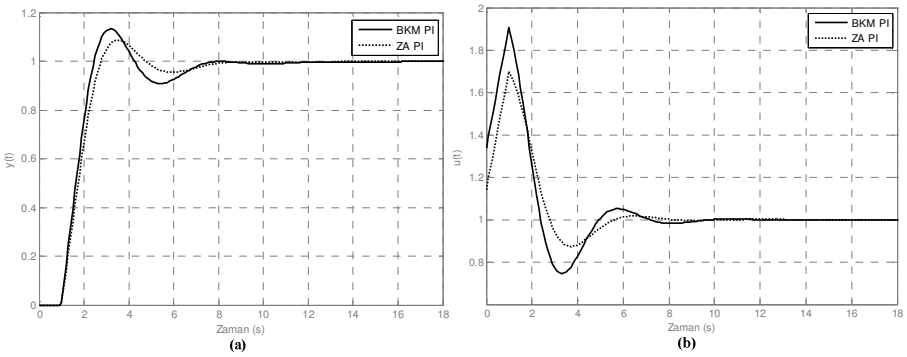
Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.6	0.375	2.0334	2.7355	0.4324
ZA			1.6571	1.6937	0.5126

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	16.9321	0.7134	7.5958	1.309
ZA	15.0935	0.8019	7.4539	1.373

ZA ayarlama yöntemine ve ISE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM tasarımına göre elde edilen PID kontrolörü performans değerleri ise Çizelge 5.17'de verilemktedir. $G_3(s)$ sistemi, BKM ile ZA ayarlama yöntemine göre biraz daha az ISE değerine sahiptir. Ancak yüzde en büyük aşım ve yerleşme zamanı biraz yüksektir ve yükselme zamanı değeri ise azalmıştır.

Aynı sistemin ITSE amaç ölçütüne dayalı oluşturulan BKM tasarımının verdiği PI ve PID kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işaretinin

ZA ayarlama yöntemi ile karşılaştırılması Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'te sırasıyla verilmektedir.



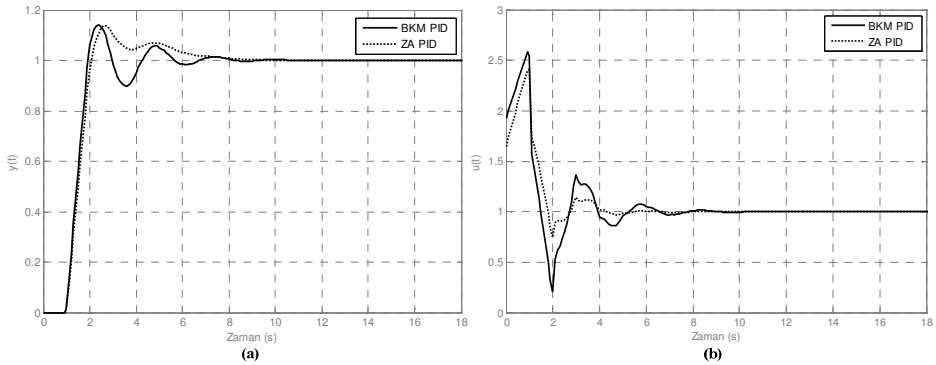
Şekil 5.21 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_3(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.18 : $G_3(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.6	0.375	1.3350	2.2895
ZA			1.1397	2.0127

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	13.2687	1.1166	7.0393	1.184
ZA	8.6891	1.3250	7.2897	1.228

BKM ve ZA ayarlama yöntemleri için performans değerleri Çizelge 5.18'de verilmektedir. $G_3(s)$ sistemi, BKM için ZA'ya göre biraz daha az ITSE değerine sahiptir ancak yüzde en büyük aşım yüksektir. Yükselme zamanı ile yerleşme zamanı değerleri ise ZA ayarlama yöntemine göre biraz azalmıştır.



Şekil 5.22 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_3(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.19 : $G_3(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.6	0.375	1.9252	2.6338	0.4147
ZA			1.6477	1.9545	0.3999

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	13.9869	0.7525	5.4504	0.919
ZA	13.9085	0.8366	6.6512	0.998

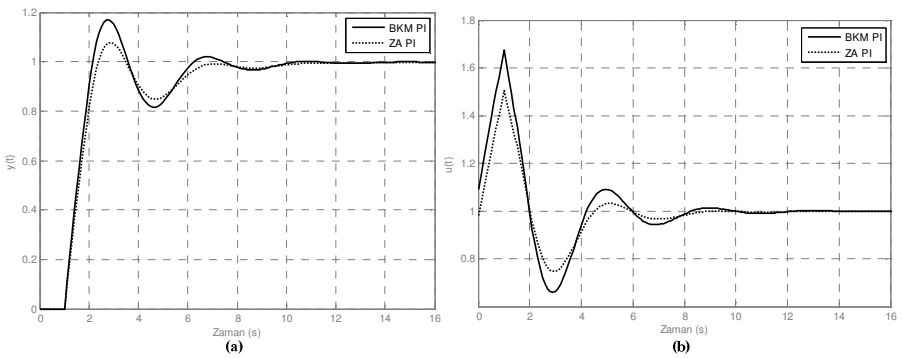
Çizelge 5.19, ZA ayarlama yöntemi ve PID-ITSE ölçütüne dayalı oluşturulan BKM tasarımına göre performans değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. BKM ile $G_3(s)$ sistemi için ZA'dan biraz daha az ITSE değerine sahip olunmaktadır. Şekil 5.22'den de görüldüğü üzere yüzde en büyük aşım yüksektir ancak yükselme zamanı ile yerleşme zamanı değerleri ise azalmıştır. Buna göre BKM, ZA ayarlama yöntemine göre iyi bir başarım göstermiştir.

5.3.4 Dördüncü benzetim örneği

Bu örnekte ise sistem kazancı 1 ve zaman sabiti ile ölü zaman sabiti eşit ve 1 olacak şekilde birinci mertebeden ölü zamanlı bir sistem ele alınmıştır [28, 29].

$$G_4(s) = \frac{1}{s+1} e^{-s} \tag{5.6}$$

Bu transfer fonksiyonuna sahip ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan BKM'na göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ZA ayarlama yöntemi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te sırasıyla verilmektedir.



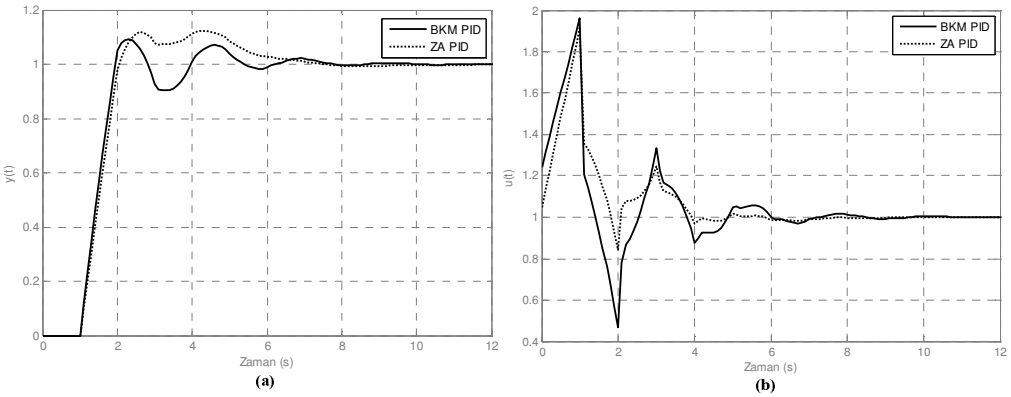
Şekil 5.23 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_4(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.20 : $G_4(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	1	0.5	1.0920	1.8640
ZA			0.9800	1.8692

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	17.0649	0.8988	9.3949	1.403
ZA	7.9089	1.0397	9.3448	1.420

Çizelge 5.20'de bu iki yöntemden bulunan PI kontrolörün performans değerleri verilmektedir. $G_4(s)$ sistemi, BKM ile ZA'dan biraz daha az ISE değerine sahiptir ancak yüzde en büyük aşım ve yerleşme zamanı yüksektir. Bunun yanında yükselme zamanı değeri ise biraz azalmıştır.



Şekil 5.24 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_4(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.21 : $G_4(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

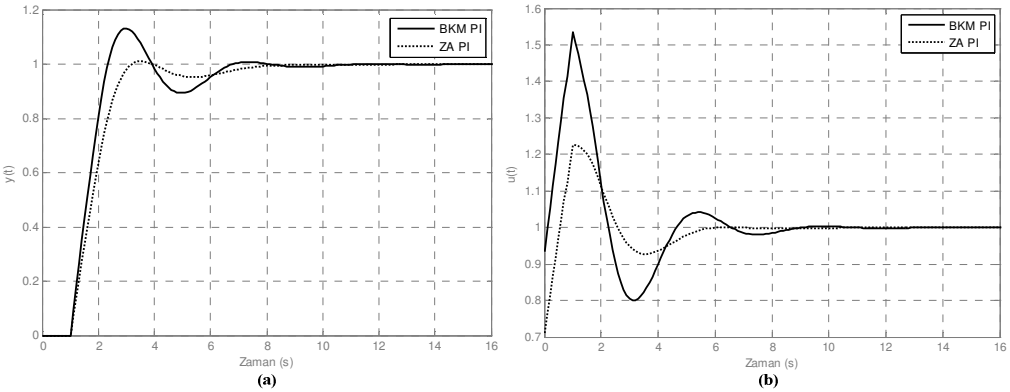
Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	1	0.5	1.2430	1.7244	0.4465
ZA			1.0480	1.2092	0.4890

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	9.2601	0.7556	7.0818	1.306
ZA	12.3048	0.8170	6.4855	1.363

PID-ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizması ve ZA ayarlama yönteminin verdiği performans değerleri Çizelge 5.21'de

verilmektedir. BKM, $G_4(s)$ sistemi için ZA'ya göre biraz daha az ISE değeri vermektedir. Önerilen yöntem ile yerleşme zamanı yükselmiş, yükselme zamanı değeri ise biraz azalmıştır. Yüzde üst aşım değeri ise Şekil 5.24'ten de görüleceği üzere %12'nin altına inmiş, iyi bir iyileşme sağlanmıştır.

Aynı sistemin ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasından ve ZA ayarlama yönteminden elde edilen PI kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti Şekil 5.25'te verilmektedir.



Şekil 5.25 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_4(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

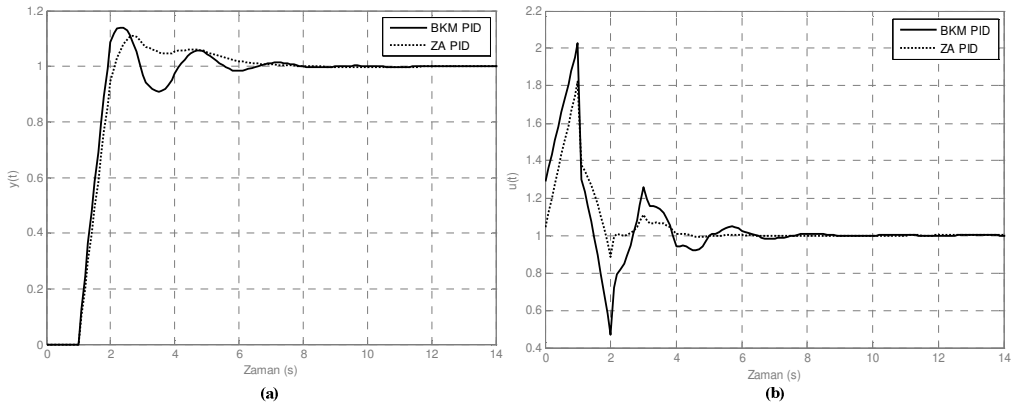
Çizelge 5.22 : $G_4(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	1	0.5	0.9334	1.5550
ZA			0.7120	1.3870

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	13.2147	1.0279	6.3895	1.127
ZA	1.1355	1.4663	6.9557	1.250

Her iki yöntemin PI kontrolörü için performans değerleri Çizelge 5.22'de verilmektedir. BKM ile $G_4(s)$ sistemi ZA'ya göre biraz daha az ITSE değerine sahiptir ancak yüzde üst aşım değeri oldukça yüksektir. Yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerleri ise biraz daha azalmıştır.

Aynı sistem için BKM ve ZA'dan bulunan PID kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti Şekil 5.26'da verilmektedir.



Şekil 5.26 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_4(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.23 : $G_4(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	1	0.5	1.2880	1.7410	0.3893
ZA			1.0420	1.3351	0.3850

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	14.1452	0.7274	5.3113	0.9011
ZA	10.9277	0.8509	5.9233	0.9775

Her iki yöntemin PID kontrolörü için performans değerleri Çizelge 5.23'de verilmektedir. BKM, $G_4(s)$ sistemi için ZA'ya göre biraz daha az ITSE değeri vermektedir fakat yüzde üst aşım değeri yüksektir. Ayrıca yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerleri ise biraz daha azalmıştır.

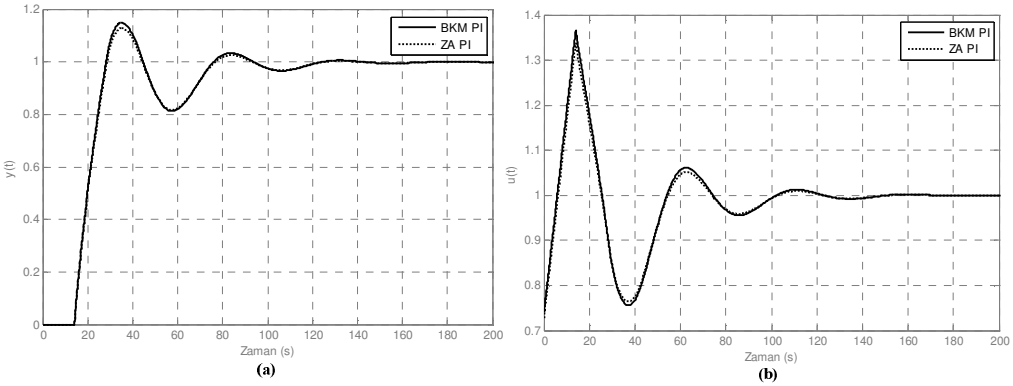
5.3.5 Beşinci benzetim örneği

Bu örnekte (5.7) denklemi ile verilen birinci mertebeden ölü zamanı baskın sistem kullanılmıştır [30]. Burada sistem kazancı 1, zaman sabiti 7 ve ölü zaman ise zaman sabitinin 2 katıdır.

$$G_5(s) = \frac{1}{7s+1} e^{-14s} \tag{5.7}$$

Bu transfer fonksiyonuna sahip sistem için ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasına göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ZA ayarlama yöntemi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.27 ve 5.28'de

sırasıyla verilmektedir.



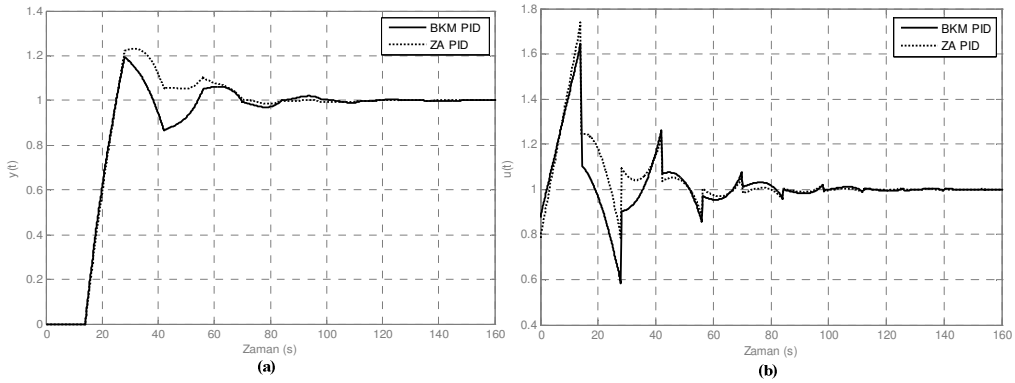
Şekil 5.27 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_5(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.24 : $G_5(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	2	0.6667	0.7392	16.5058
ZA			0.7271	16.6667

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	15.0755	11.2456	114.8539	18.61
ZA	12.9408	11.5538	114.5363	18.62

PI kontrolörünün performans değerleri Çizelge 5.24'te verilmektedir. $G_5(s)$ sistemi için ZA ve BKM'ya göre aynı ISE değerine sahip olunmaktadır denilebilir. BKM'nın verdiği yüzde üst aşım ve yerleşme zamanı değerleri yüksektir ve yükselme zamanı ise biraz daha azalmıştır.



Şekil 5.28 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_5(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

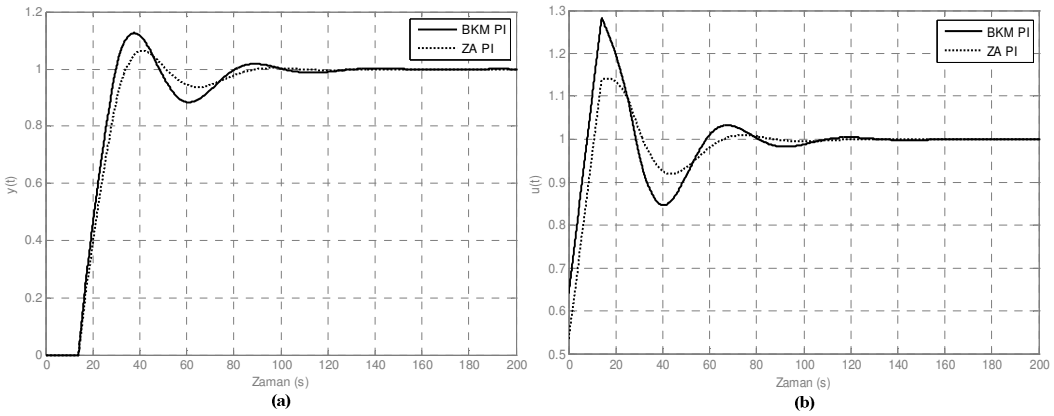
Çizelge 5.25 : $G_5(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	2	0.6667	0.8775	15.9967	4.8362
ZA			0.7857	11.5321	5.6030

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	19.4944	8.8447	81.9090	17.53
ZA	23.1110	8.8816	69.0072	18.05

PID kontrolörünün performans değerleri ise Çizelge 5.25'de verilmektedir. BKM ile $G_5(s)$ sistemi için ZA'dan az ISE değerine sahip olunmuş, yüzde üst aşım değeri de Şekil 5.28'den görüldüğü üzere %23'ün altına inmiş, böylece iyi bir iyileşme sağlanmıştır. Yükselme zamanı biraz daha azalmıştır, ancak yerleşme zamanı artmıştır.

Aynı sistem için ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizması ve ZA ayarlama yönteminden bulunan PI kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti Şekil 5.29'da verilmektedir.



Şekil 5.29 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_5(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

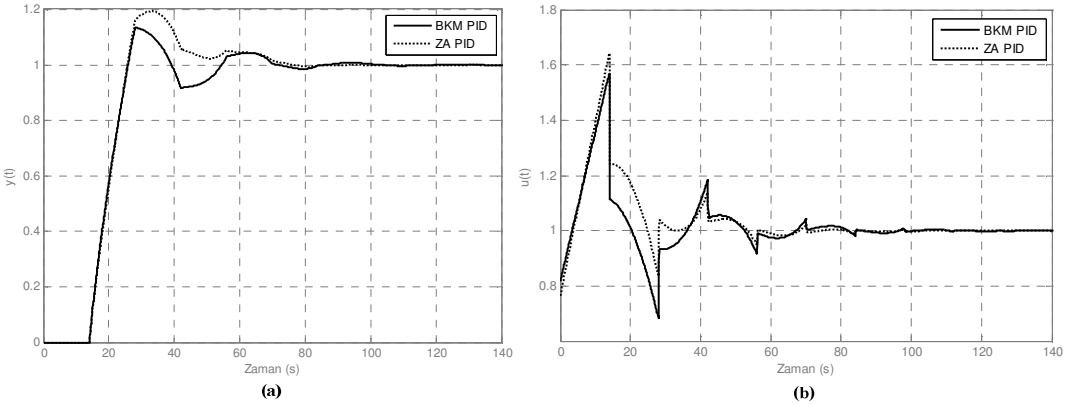
PI kontrolörün performans değerleri Çizelge 5.26'da verildiği gibidir. BKM ile $G_5(s)$ sistemi için ZA'dan az ITSE değerine sahip olunmaktadır. Yüzde üst aşım değeri artmıştır. Ancak yükselme zamanı ve yerleşme zamanları azaldığından BKM ile iyi bir performans sağlanmıştır.

Çizelge 5.26 : $G_5(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	2	0.6667	0.6401	13.9308
ZA			0.5335	12.3457

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	12.6295	12.5045	77.2681	194.7
ZA	6.4	14.9671	80.8890	200.4

Bu sistem için ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizması ve ZA ayarlama yönteminden bulunan PID kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti Şekil 5.30'da verilmektedir.



Şekil 5.30 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_5(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.27 : $G_5(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	2	0.6667	0.8169	15.1602	4.7509
ZA			0.7645	12.1739	4.8083

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	13.5480	9.5048	68.6974	162.3
ZA	19.4905	9.3978	69.5214	172.7

PID kontrolörüne ait performans değerleri Çizelge 5.27'de verilmektedir. BKM ile $G_5(s)$ sistemi için ZA'dan az ITSE değerine sahip olunmaktadır. Yükselme zamanı

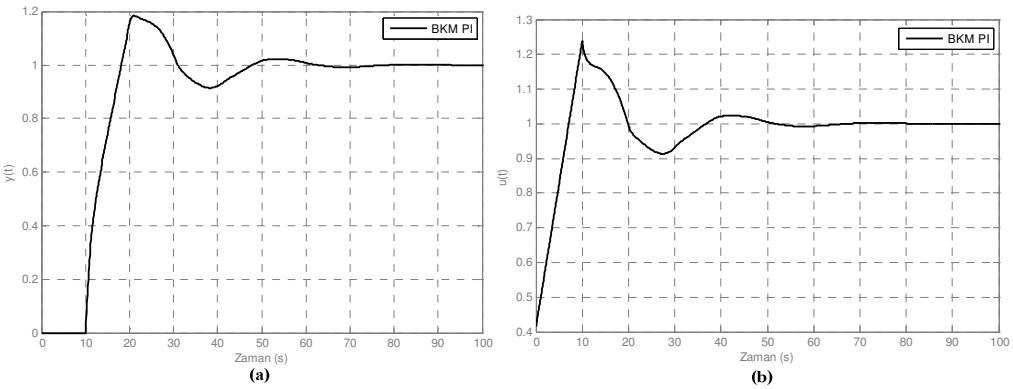
biraz artarken yerleşme zamanı değeri ise azalmıştır. Şekil 5.30'dan da görüldüğü üzere yüzde üst aşım değeri de %19'un altına inerek BKM ile iyi bir iyileşme görülmüştür.

5.3.6 Altıncı benzetim örneği

Bu örnekte (5.8) denklemi ile verilen birinci mertebeden ölü zamanı baskın sistem kullanılmıştır [31]. Burada sistem kazancı ve zaman sabiti 1, ölü zamanı ise zaman sabitinin 10 katıdır ve büyük τ değerinden dolayı sistemin kontrolü zordur.

$$G_6(s) = \frac{1}{s+1} e^{-10s} \tag{5.8}$$

Bu transfer fonksiyonuna sahip sistem için ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının ve ZA ayarlama yönteminin verdiği PI ve PID kontrolörlerinin parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti karşılaştırılması Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de sırasıyla verilmektedir.

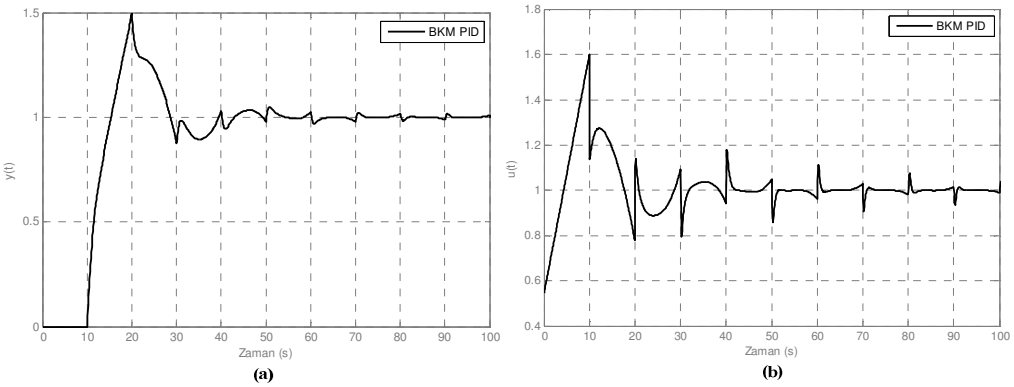


Şekil 5.31 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_6(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.28 : $G_6(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	10	0.9091	0.4148	5.0425
ZA			-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	18.4786	6.6336	56.3486	11.94
ZA	-	-	-	-



Şekil 5.32 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_6(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

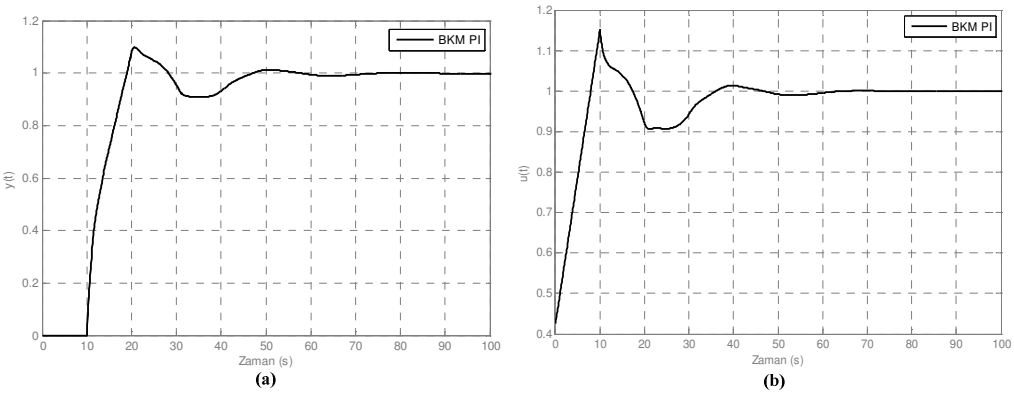
Çizelge 5.29 : $G_6(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	10	0.9091	0.5445	5.1498	1.5657
ZA			-	-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	50.4444	4.1701	90.7589	12.04
ZA	-	-	-	-

Çizelge 5.28 ve 5.29'dan görüldüğü üzere $G_6(s)$ sisteminin L/T oranı ZA analitik yönteminde belirtilen en üst sınır değerin çok üstünde olduğundan PI ve PID kontrolörleri için ISE amaç ölçütüne göre ZA ile karşılaştırma yapılamamaktadır.

Aynı sistemin bulunan PI kontrolör parametrelerinin ITSE performans ölçütüne göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti Şekil 5.33'te verilmektedir.



Şekil 5.33 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_6(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

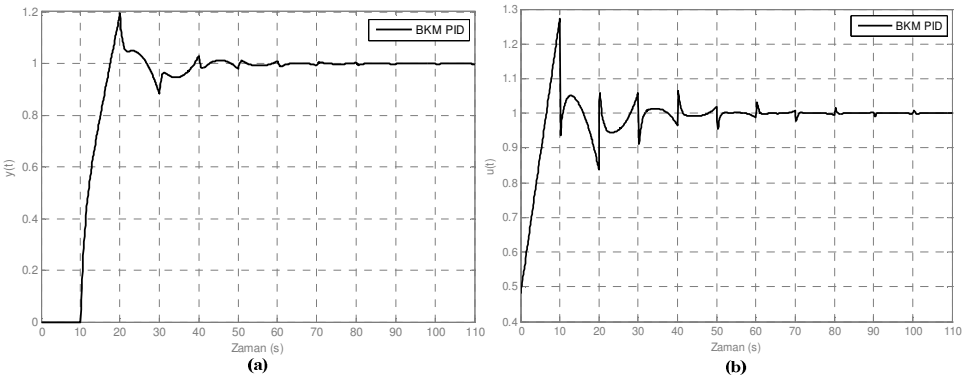
$G_6(s)$ sisteminin L/T oranı ZA analitik yönteminde belirtilen en üst sınır değerin çok üstünde olduğundan bulanık mantık karar mekanizması ile elde edilen performans değerlerinin analitik yöntem ile karşılaştırılması PI kontrolör için ITSE performans ölçütüne göre olmamaktadır.

Çizelge 5.30 : $G_6(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	10	0.9091	0.4266	5.8839
ZA			-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	9.8894	7.2720	44.2046	73.97
ZA	-	-	-	-

Bu sistemin bulunan PID kontrolör parametrelerinin ITSE performans ölçütüne göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti Şekil 5.34'te verilmektedir.



Şekil 5.34 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_6(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.31 : $G_6(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	10	0.9091	0.4804	6.0538	1.4627
ZA			-	-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	19.5624	6.0581	40.1462	68.31
ZA	-	-	-	-

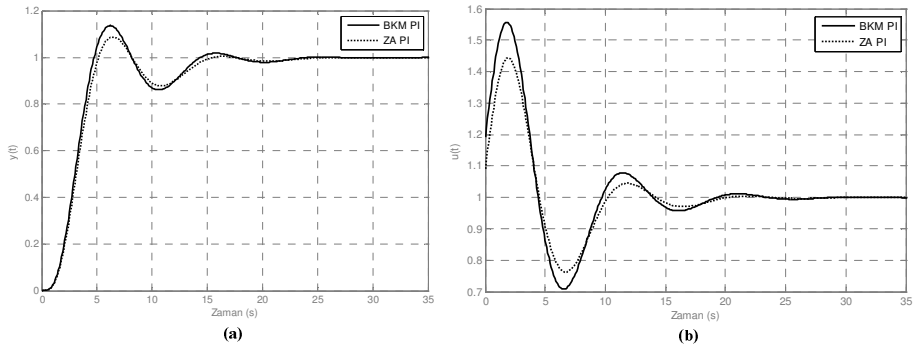
$G_6(s)$ sisteminin L/T oranı ZA analitik yönteminde belirtilen en üst sınır değerin çok üstünde olduğundan bulanık mantık karar mekanizması ile elde edilen performans değerlerinin analitik yöntem ile karşılaştırılması PID kontrolör için ITSE performans ölçütüne göre olmamaktadır.

5.3.7 Yedinci benzetim örneği

Bu örnekte dört adet katlı kutbu olan yüksek mertebeden bir sistem ele alınmış ve bu sistemin birinci dereceden ölü zamanlı sistem modeli aşağıdaki gibi elde edilmiştir [32]. Burada sistem kazancı 1, zaman sabiti 2.12 ve ölü zamanı ise 1.88'dir.

$$G_7(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \;\rightarrow\; \tilde{G}_7(s) = \frac{1}{2.12s+1} e^{-1.88s} \qquad \textbf{(5.9)}$$

Bu transfer fonksiyonuna sahip sistem için ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının ve ZA ayarlama yönteminin verdiği PI ve PID kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti karşılaştırmalı olarak Şekil 5.35 ve 5.36'da sırasıyla verilmektedir.



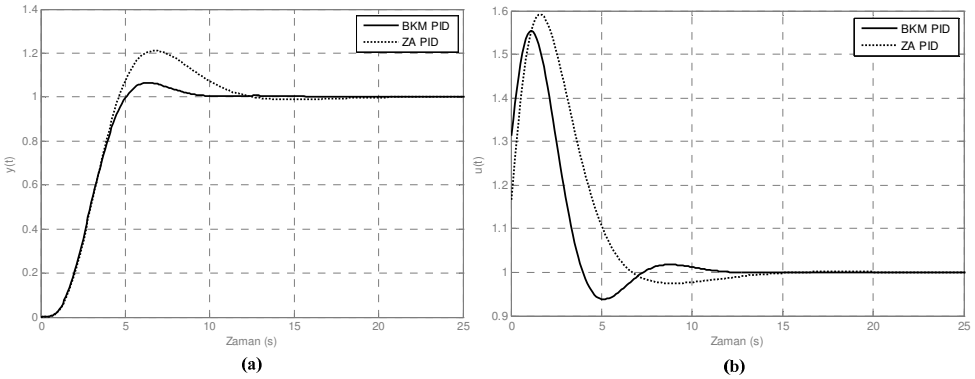
Şekil 5.35 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_7(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.32 : $G_7(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.8868	0.47	1.1900	3.8349
ZA			1.0909	3.8368

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	13.7258	2.7120	20.4966	2.479
ZA	8.8721	2.9480	14.3660	2.548

Çizelge 5.32'de PI kontrolörün performans değerleri her iki yöntem için verilmektedir. BKM ile $G_7(s)$ sistemi için ZA'dan az ISE değerine sahip olunmaktadır. Yerleşme zamanı artarken yükselme zamanı değeri ise azaltılmıştır. Yüzde üst aşım değeri ise Şekil 5.35'ten de görüldüğü üzere artmıştır.



Şekil 5.36 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_7(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.33 : $G_7(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

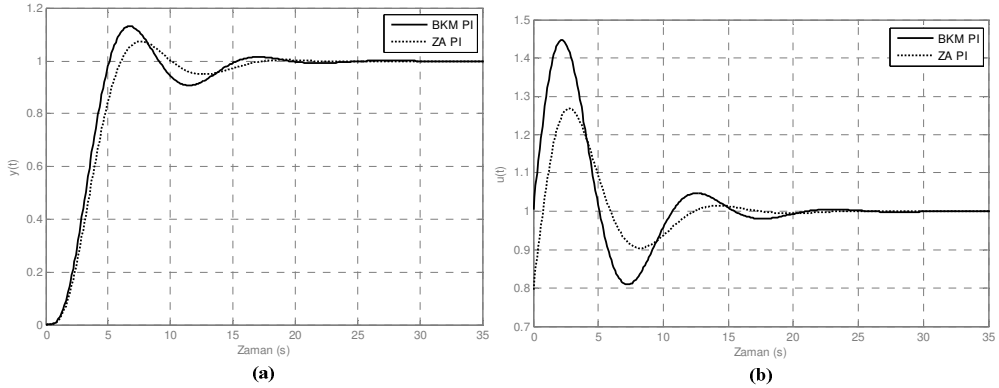
Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.8868	0.47	1.3136	3.5797	0.8992
ZA			1.1673	2.4405	0.9318

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	6.4919	2.8535	8.5736	2.349
ZA	21.1023	2.6457	11.5260	2.501

Çizelge 5.33'de PID kontrolörü için performans değerleri her iki yöntem için verilmektedir. BKM ile $G_7(s)$ sistemi için ZA'dan az ISE değerine sahip olunmaktadır. Yükselme zamanı yüksektir, yerleşme zamanı değeri ise azalmıştır. Şekil 5.36'dan da görüldüğü gibi yüzde üst aşım değeri %21'in oldukça altına inmiştir. Böylece PID kontrolör için çok iyi bir iyileşme sağlanmıştır.

Aynı sistem için ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizması ve ZA ayarlama yönteminin verdiği PI kontrolörünün parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti karşılaştırmalı olarak Şekil 5.37'de verilmektedir. Çizelge 5.34'te ise PI kontrolörün performans değerleri her iki yöntem için verilmektedir. BKM'de $G_7(s)$ sistemi ZA'dan az ITSE değerine sahiptir ve de

yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerleri azalmıştır. Yüzde üst aşım değeri oldukça yükselmiştir.



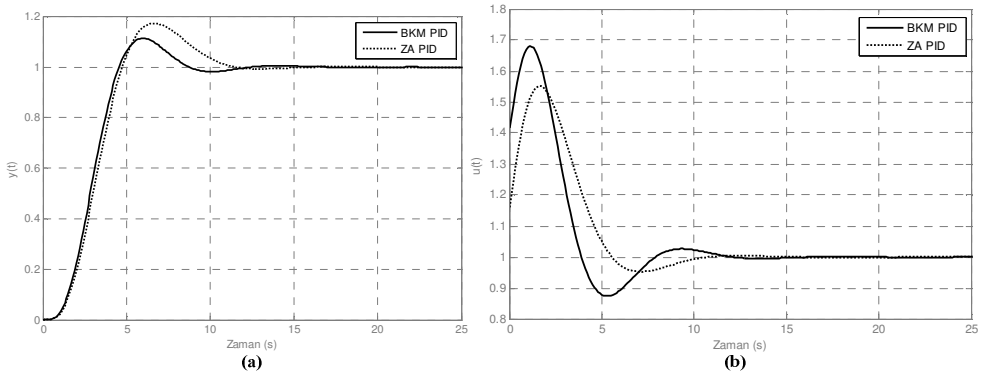
Şekil 5.37 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_7(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.34 : $G_7(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.8868	0.47	1.0055	3.1844
ZA			0.7953	2.8306

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	13.1113	2.9468	14.5229	4.178
ZA	7.4521	3.4984	15.5315	4.663

Sistem için ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan BKM ve ZA ayarlama yönteminin verdiği PID kontrolörünün parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ise karşılaştırmalı olarak Şekil 5.38'de verildiği gibidir.



Şekil 5.38 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_7(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.35'te ise PID kontrolörün performans değerleri verilmektedir. BKM'na göre $G_7(s)$ sistemi için ZA'dan az ITSE değerine sahip olunmuştur. Şekil 5.38'den görüldüğü üzere yüzde üst aşım değeri %17'nin altına inmiş, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerleri azalmıştır. Böylece PID kontrolörü için BKM çok iyi bir iyileşme göstermiştir.

Çizelge 5.35 : $G_7(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

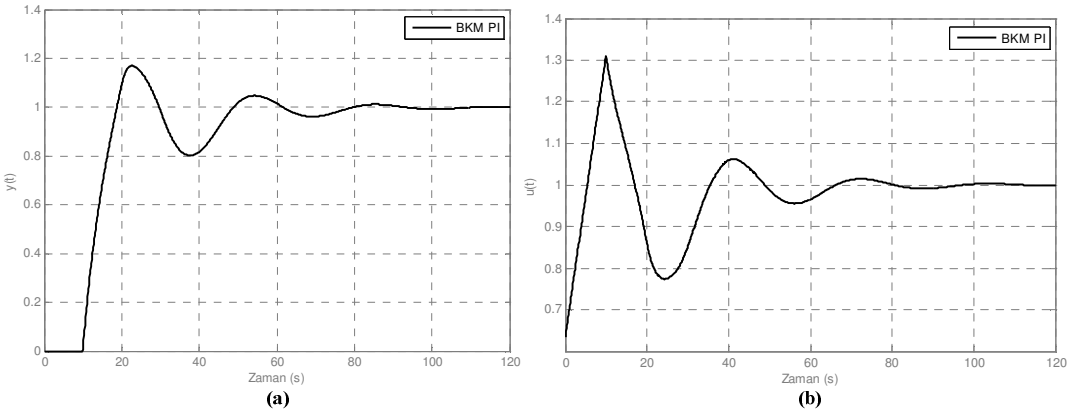
Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.8868	0.47	1.4148	3.6018	0.7384
ZA			1.1606	2.7322	0.7320

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	11.3505	2.5914	8.2009	3.025
ZA	17.3521	2.7159	10.4577	3.786

5.3.8 Sekizinci benzetim örneği

Son örnek olarak (5.10) denklemi ile ifade edilen yüksek mertebeden ölü zamanlı bir sistem ele alınmış ve bu sisteme ait model birinci dereceden ölü zamanlı olarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir [33]. Burada sistem kazancı 1, zaman sabiti 3.04 ve ölü zamanı ise zaman sabitinden oldukça büyük olacak şekilde 9.97'dir.

$$G_8(s) = \frac{1}{(s+1)^8} e^{-5s} \;\rightarrow\; \tilde{G}_8(s) = \frac{1}{3.04s+1} e^{-9.97s} \qquad \textbf{(5.10)}$$



Şekil 5.39 : PI-ISE amaç ölçütü için $G_8(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

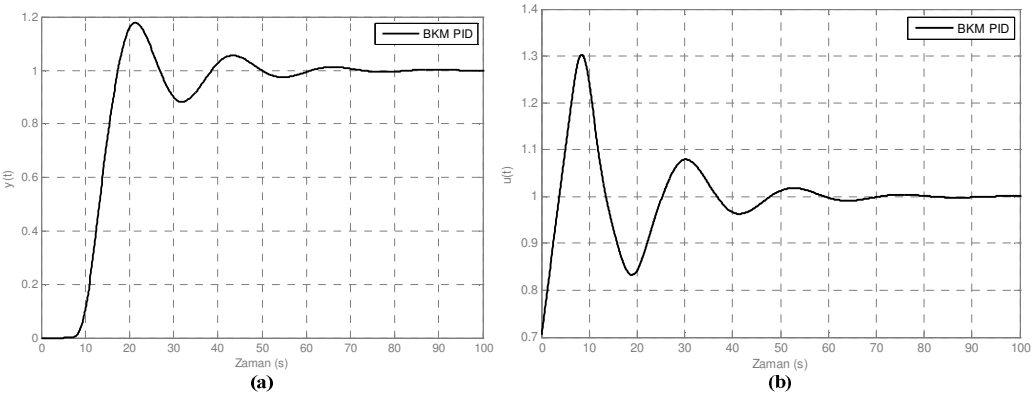
Bu transfer fonksiyonuna sahip sistem için ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının verdiği PI kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ile performans değerleri Şekil 5.39 ve Çizelge 5.36'da sırasıyla verilmektedir.

Çizelge 5.36 : $G_8(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	3.2796	0.7663	0.6347	9.3607
ZA			-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	16.7968	7.0066	75.7048	12.7
ZA	-	-	-	-

Bu sistem için ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının verdiği PID kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ile performans değerleri Şekil 5.40 ve Çizelge 5.37'de sırasıyla verilmektedir.



Şekil 5.40 : PID-ISE amaç ölçütü için $G_8(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.36 ve 5.37'den görüldüğü üzere, $G_8(s)$ sisteminin L/T oranı ZA analitik yönteminde belirtilen en üst sınır değerin üstünde olduğundan PI ve PID parametrelerini belirlemek üzere ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık karar mekanizmaları ile elde edilen performans değerlerinin analitik yöntem ile

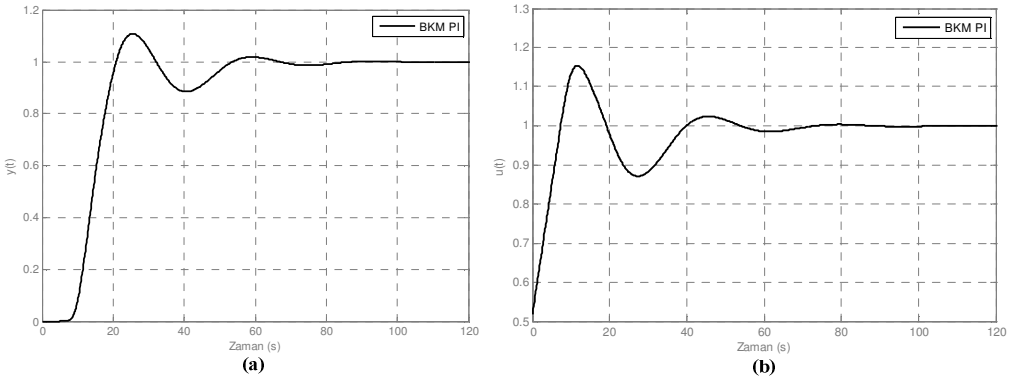
karşılaştırılması olmamaktadır.

Çizelge 5.37 : $G_8(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	3.2796	0.7663	0.7050	8.9246	2.9749
ZA			-	-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	17.7989	6.4017	57.2914	12.04
ZA	-	-	-	-

Aynı sistem için ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizmasının verdiği PI ve PID kontrolör parametrelerine göre elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti ile performans değerleri Şekil 5.41, 5.42 ve Çizelge 5.38, 5.39'da sırasıyla verilmektedir.

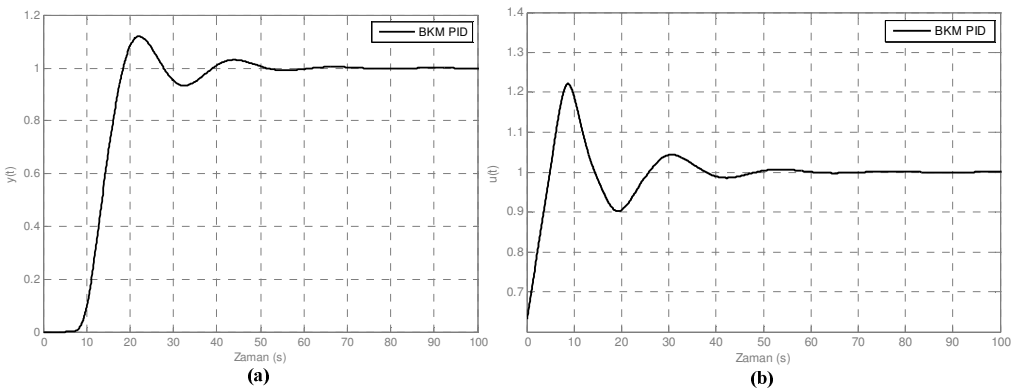


Şekil 5.41 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G_8(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.38 : $G_8(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	3.2796	0.7663	0.5182	7.8708
ZA				

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	10.7992	8.7746	51.3408	90.99
ZA	-	-	-	-



Şekil 5.42 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G_8(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

$G_8(s)$ sisteminin L/T oranı ZA analitik yönteminde belirtilen en üst sınır değerin üstünde olduğundan ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık karar mekanizması ile elde edilen performans değerlerinin analitik yöntem ile karşılaştırılması Çizelge 5.38 ve 5.39'dan görüldüğü üzere olmamaktadır.

Çizelge 5.39 : $G_8(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	3.2796	0.7663	0.6309	8.2784	2.9334
ZA			-	-	-

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	12.0672	7.0644	47.6088	77.71
ZA	-	-	-	-

5.4 Deneysel Uygulama

Bu bölümde, önerilen yöntemin deneysel sonuçları sunulmaktadır. Uygulamada önerilen yöntemin analitik yönteme üstünlüğünü göstermek üzere Şekil 5.43'te verilen Süreç Kontrol Simülatör (Process Control Simulator, PCS 327) Deney Seti kullanılmıştır. Bu simülatör özel amaçla hazırlanmış bir analog simülatördür ve süreç kontrol yöntemlerine ait temel prensiplerin denenmesine uygun şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan bu deney seti ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir:

i. Referans ve referans bozucu girişleri ± 10V arasında değişen referans işareti ve referans üzerinden etkiyen bozucuları gösteren bozucu girişinden oluşur.

ii. Kontrolör: Çıkış ve referansın toplanacağı bir karşılaştırma elemanı ve sürekli bir kontrolörden ibarettir.

iii. Doğrusal olmayan birim: Beş ayrı doğrusal olmayan eleman ideal şekilde oluşturulabilir. Uygulamada doğrusal birim kullanılmıştır.

iv. Süreç: Süreç dört bağımsız elemandan oluşmaktadır:

a. Herbirinin transfer fonksiyonu $1/Ts$ integral veya $1/(Ts+1)$ lag olabilen ve T zaman sabitleri ortak bir anahtarla 10 ms ya da 1 s seçilebilen 2 ayrı blok,

b. Transfer fonksiyonu $1/(Ts+1)$ olan ve T zaman sabiti yukarıda adı geçen anahtarla 10 ms ya da 1 s seçilen blok,

c. Transfer fonksiyonu e^{-Ls} olan uzaklık-hız gecikmesi (ölü zaman) ve T zaman sabiti yukarıdakinden farklı bir anahtarla 10 ms ya da 1 s seçebilen blok,

d. Girişine uygulanan işareti eviren bir blok (*inverter*).



Şekil 5.43 : PCS 327 süreç kontrol simülatör deney seti.

PCS 327 deney seti üzerinde çalışılan sisteme ait transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3} \qquad \textbf{(5.11)}$$

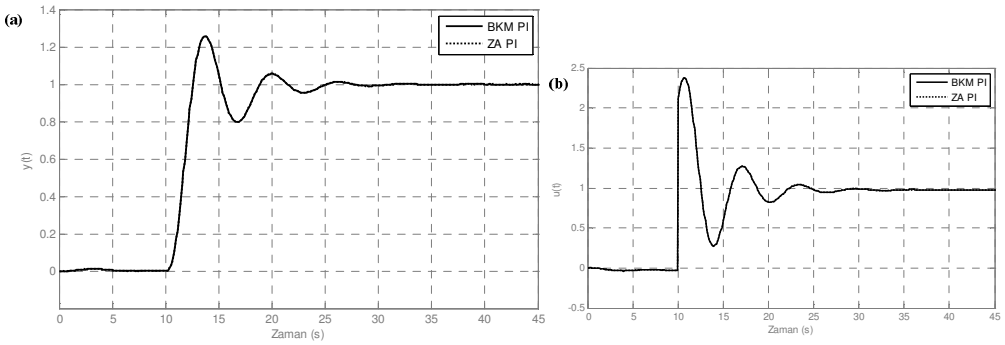
Şekil 5.43'te verilen deney düzeneği oluşturulduktan sonra sisteme ilk olarak basamak işareti uygulanarak veriler toplanmış ve aşağıda transfer fonksiyonu verilen

FOPDT modeli elde edilmiştir:

$$\tilde{G}(s) = \frac{1}{2.3s+1} e^{-0.95s} \qquad \textbf{(5.12)}$$

➢ Gerçek sistem için elde edilen model kullanılarak ISE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizması ve ZA ayarlama yöntemine göre PI ve PID kontrolörlerinin parametreleri belirlenmiştir. Sonrasında da deneyde bu kontrolör parametreleri kullanarak gerçek sistemin kontrolü yapılmıştır. Gerçek sisteme 10. saniyede birim basamak işareti uygulanmıştır.

Deney sonrasında elde edilen sistem cevapları, kontrol işaretleri karşılaştırmaları Şekil 5.44'te PI parametrelerinin belirlenmesi durumu için gösterilmiştir.



Şekil 5.44 : PI-ISE amaç ölçütü için $G(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

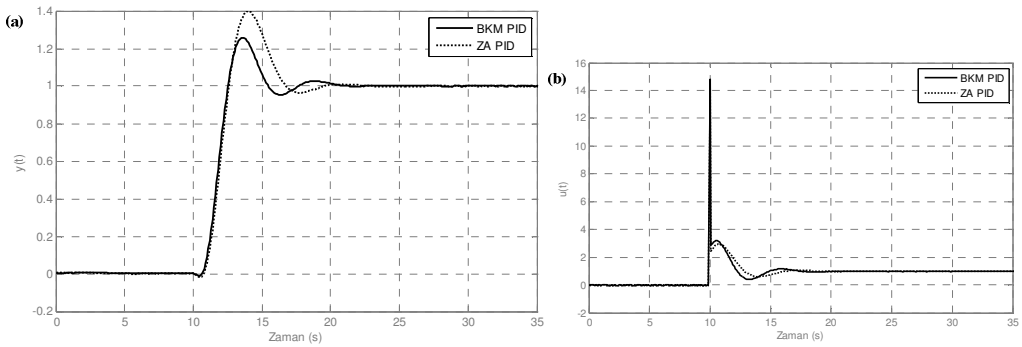
PI kontrolörünün performans değerleri Çizelge 5.40'ta verildiği gibidir. BKM ile, $G(s)$ sistemi için ZA ayarlama yöntemi ile aynı toplam sistem hata değerine sahip olunmuş denilebilir. Yüzde üst aşım ve yükselme zamanı değerleri biraz yüksektir. Ancak yerleşme zamanı azalmıştır. BKM tasarımı ile iyi bir başarım yakalanmıştır.

Çizelge 5.40 : $G(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.413	0.2923	2.1193	3.6830
ZA			2.1565	3.6742

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	25.7516	1.5710	24.3408	1.494
ZA	25.6783	1.5684	24.3628	1.495

PID parametrelerinin belirlenmesi durumu için elde edilen grafikler Şekil 5.45'te verilmektedir.



Şekil 5.45 : PID-ISE amaç ölçütü için $G(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.41 : $G(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ISE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

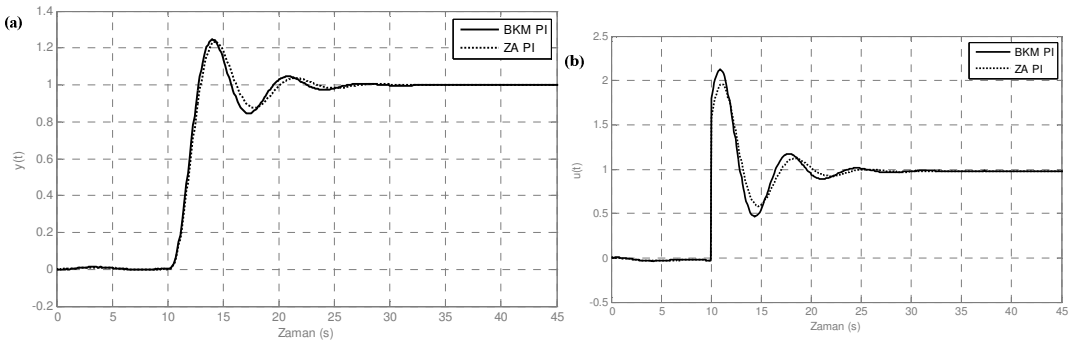
Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.413	0.2923	2.8049	3.6453	0.4292
ZA			2.3164	2.2052	0.5129

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ISE
BKM	25.6375	1.3125	19.5780	1.574
ZA	39.6508	1.2894	18.6911	1.874

Çizelge 5.41'de verilen performans değerleri değerlendirildiğinde bulanık mantık karar mekanizması aracılığıyla bulunan optimal PID parametreleri ile ZA ayarlama yöntemine kıyasla toplam hata değeri istenildiği gibi minimum değerde elde edilmiştir. Şekil 4.45'ten de görüleceği üzere yüzde üst aşım değeri de %39'dan %25'e düşmüştür. Yükselme ve yerleşme zaman değerleri ise biraz artmıştır ancak iyi bir BKM tasarımı yapılmıştır.

- Gerçek sistem için elde edilen model kullanılarak ITSE performans ölçütüne dayalı oluşturulan bulanık mantık karar mekanizması ve ZA ayarlama yöntemine göre PI ve PID kontrolörlerinin parametreleri de belirlenmiştir. Sonrasında da uygulamada bu kontrolör parametrelerini kullanarak gerçek sistemin kontrolü yapılmıştır. Gerçek sisteme 10. saniyede birim basamak işareti uygulanmıştır.

Deney sonrasında elde edilen sistem cevapları, kontrol işaretleri karşılaştırmaları Şekil 5.46'da PI parametrelerinin belirlenmesi durumu için gösterilmiştir.



Şekil 5.46 : PI-ITSE amaç ölçütü için $G(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

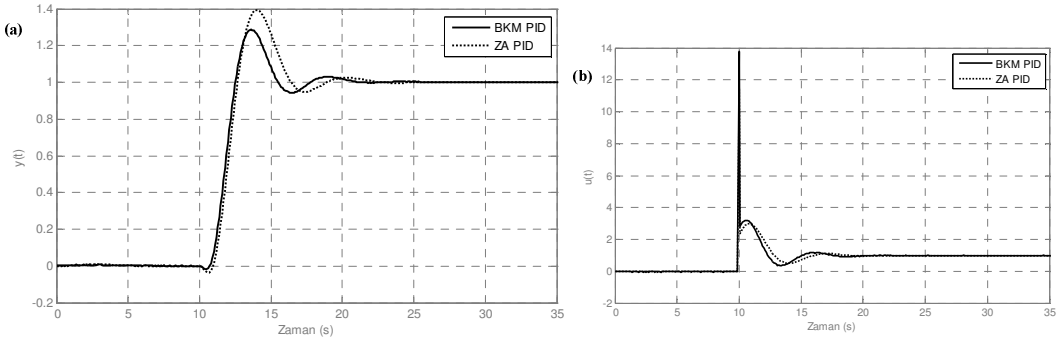
Çizelge 5.42 : $G(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PI kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri	
	L/T	τ	K_p	T_I
BKM	0.413	0.2923	1.8266	2.9997
ZA			1.6075	2.6560

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	24.5990	1.7086	24.8844	17.40
ZA	23.5605	1.8049	22.6160	18.06

Çizelge 5.42'de verilen PI kontrolörün performans değerleri değerlendirilirse, BKM tasarımında yüzde üst aşım ve yerleşme zamanı değerlerinin biraz yüksek olmasına karşın toplam hata değeri istenildiği gibi minimum değerdedir. Yükselme zamanı ise biraz düşmüştür.

PID parametrelerinin belirlenmesi durumu için elde edilen sistem cevabı ve kontrol işareti Şekil 5.47a ve Şekil 5.47b'de verilmektedir.



Şekil 5.47 : PID-ITSE amaç ölçütü için $G(s)$ sistemi (a) birim basamak giriş için sistem cevabı, (b) kontrol işareti.

Çizelge 5.43 : $G(s)$ sistemine ilişkin parametreler, ITSE ölçütüne dayalı PID kontrolörü parametreleri ve performans değerleri.

Yöntemler	Sistem Parametreleri		Kontrolör Parametreleri		
	L/T	τ	K_p	T_I	T_D
BKM	0.413	0.2923	2.7749	3.5385	0.3972
ZA			2.3031	2.2881	0.3974

Yöntemler	Geçici Hal Kriterleri			Performans Ölçütü
	$M_p(\%)$	t_r	t_s	ITSE
BKM	28.6601	1.2735	19.8471	18.11
ZA	39.3649	1.2529	21.0510	22.56

Çizelge 5.43'te verilen performans değerlerinden görüldüğü üzere bulanık mantık karar mekanizması aracılığıyla kontrolör parametreleri ile ZA ayarlama yöntemine kıyasla toplam hata değeri istenildiği gibi minimum değerde elde edilir. Şekil 5.47'den de görüleceği üzere yüzde üst aşım değeri de %39'dan %28'e düşmüş ve yükselme zamanı biraz artarken yerleşme zamanı azalmıştır. Böylece BKM tasarımı ile iyi bir başarım elde edilmiştir.

6. SONUÇ

Süreç kontrol alanındaki pratik süreçlerin çoğu yüksek mertebeden sistemlerdir ve önemli bir ölü zaman değerine sahip olabilirler. Tasarım aşamasında bu yüksek mertebeden sistemler uygun yaklaşımlarla daha basit şekilde ifade edebilmek amacıyla birinci mertebeden ölü zamanlı sistemler olarak modellenebilmektedirler.

Bu tez çalışmasında birinci mertebeden ölü zamanlı sistemler için sistem hatasını minimize edecek PI ve PID kontrolör parametrelerini belirlemek üzere bulanık mantık karar mekanizması tasarımı üzerine çalışılmıştır. Literatürdeki PID ayarlama yöntemleri incelendiğinde mevcut ayarlama yöntemleriyle sistemlerin ölü zaman büyüklüğünün zaman sabitine baskınlığı göz önünde bulundurulmadan kontrolör tasarımına gidildiği görülmüştür. Endüstriyel uygulamalarda ölü zamanı sistem zaman sabitinden oldukça büyük birinci mertebeden ölü zamanlı sistemler de bulunması sebebiyle ölü zamanın ölü zaman ile model zaman sabitinin toplamına oranı olarak tanımlanan normalize ölü zaman (τ) bilgisine dayalı bir PID kontrolör tasarımına ihtiyaç duyulmuştur. Çalışmada önerilen yöntem, Zhuang ve Atherton tarafından önerilen bir başka yöntem ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılan yöntemde ölü zaman ile sistem zaman sabiti oranı kullanılmıştır. Ancak Zhuang ve Atherton tarafından önerilen yöntem kullanılan oranın ölü zaman artmasıyla (saf ölü zamanlı sistemler için sonsuza kadar gideceğinden) sebebiyle belirli bir aralık için kullanılabilmektedir. Bu çalışmada normalize ölü zamanı (τ) kullanılarak bu sıkıntı aşılmış, birinci mertebeden ölü zamanlı olarak modellenebilen tüm süreçler için genel PI ve PID kontrolörleri ayar yöntemi önerilmiştir. Önerilen bulanık mantık karar mekanizmaları sayesinde çevrimdışı olarak bir kez PID parametreleri belirlenmektedir.

Çalışmanın son kısmında, önerilen yöntemin Zhuang ve Atherton tarafından önerilen analitik yöntemle karşılaştırılması benzetim yapılarak literatürde geçen farklı sistemler üzerinden yapılmış, sonrasında PCS 327 deney seti kullanarak üçüncü mertebeden bir sistem ele alarak gerçek sistem için çalışmalar sürdürülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde benzetim sonuçları ile paralel sonuçlar

gözlenmiş, tasarlanan bulanık mantık karar mekanizmasının ZA ayarlama yöntemine göre daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Smith, A.C. and Corripio**, **B.A.,** 1985. Principles and practice of automatic process control, John Wiley & Sons.

[2] **Åström, K.J. and Hägglund, T.,** 1984. Automatic tuning of simple regulators with specification on phase and amplitude margins, *Automatica*, 25, 645-651.

[3] **Hang, C.C., Åström, K.J. and Ho, W.K.,** 1991. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula, *IEE Proceedings-D*: *Control Theory Appl.,* 138, (2), 111-118.

[4] **Zhuang, M. and Atherton, D.P.,** 1991. Tuning PID controllers with Integral Peformance Criteria, *Proc of IEE Conference on Control,* Vol. **1**, No. 332, 481-486.

[5] **Zhuang, M. and Atherton, D.P.,** 1993. Automatic tuning of optimum PID controllers, *IEE Proceedings-D*: *Control Theory Appl.,* Vol. **140**, No. 3, 216-224.

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

[7] **Kumbasar, T.,** 2008. Bulanık Model Ters Alma Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

[8] **Takagi, T. and Sugeno, M.,** 1985. Fuzzy Identification of systems and its applications to modelling and control, *IEEE Trans Systems, Man, Cybern.,* **SCM-15,** 116-132.

[9] **Karaoğlan, Ö.G.,** 2007. Kontrol sistemleri için bulanık PID kontrolörlerin genetik algoritmalar yardımıyla ayarlanması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü.

[10] **Elmas, Ç.,** 2007. Yapay Zekâ Uygulamaları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 379-401.

[11] **Kuo, B.C.,** 1999. Otomatik Kontrol Sistemleri, Literatür Yayınclılık, 407-408, 688.

[12] **Åström, K.J. and Hägglund T.,** 1995. PID Controllers, Instrument Society of America, 59-70.

[13] **Silva, G.J., Data, A. and Bhattacharyya, S.P.,** 2005. PID Controllers for Time-Delay Systems, Birkhäuser, 7-15.

[14] **Åström, K.J. and Hägglund T.,** Automatic tuning of PID controllers, In Levine, Ed., The Control Handbook, pp. 817–826. CRC Press and IEEE Pres, 1996.

[15] **Boz, A.F. and Sarı, Y.,** 2009. Generalized optimal controller design for all pole systems using standard forms, *Academic Journals*, Scientific Research and Essay Vol. **4(3)**, 167-174.

[16] **Chen, G. R.,** 1996. Conventional and Fuzzy PID controllers: An Overview, *Int. J. of Intelligent Control Systems,* 235-46.

[17] **Lee C.H. and Teng C.C.,** 2001. Tuning of PID controllers for stable and unstable processes based on gain and phase margin specifications, *International Journal of Fuzzy Systems,* Vol. **3**, No. 1, 346-355.

[18] **Shen, J.C.,** 2001. Fuzzy neural networks for tuning PID controller for plants with under-damped responses*, IEEE Trans. On Fuzzy Systems,* Vol. **9**, No. 2*,* 333-342.

[19] **Shen, J.C.,** 2001. New tuning method for PID controller, *Proceedings of the 2001 IEEE Intemational, Conference on Control Applications,* 459-464.

[20] **Schadel, H.M.,** 1997. A new method of direct PID controller design based on the principle of cascaded damping ratios, *Proceedings European Control Conference,* Briissel.

[21] **Wang, L.,** 1995. A new frequency domain design method for PID controllers. *IEE Proc.-Control Theory and Applications,* Vol.**142**, No.4, 265-27 1.

[22] **Munro, N.,** 2000. The systematic design of PID controllers, *Proc.UlOlCC Control 2000 Conference.*

[23] **Visioli, A.,** 1999. Fuzzy logic based set-point weighting for PID controllers, *IEEE Trans. Syst. Man*, Cybern. - Pt. A, **29**, pp.587-592.

[24] **Visioli, A.,** 2001. Tuning of PID controllers with fuzzy logic, *IEE Proc.-Control Theory Appl*., Vol. **148**, No. 1.

[25] **Yesil, E., Güzelkaya, M., Eksin, İ.,** 2003. Fuzzy PID Controllers: An overview, *The third Triennial ETI International Conference on Applied Automatic Systems*, Macedonia, 17-21 September.

[26] **Genç, H.M., Yeşil, E., Eksin, İ., Güzelkaya, M., Tekin, Ö.A.,** 2009. A rule base modification scheme in fuzzy controllers for time-delay systems, *Expert Systems With Applications*, **36 (4)**, 8476-8486.

[27] **Duan, X.G., Li, H.X. and Deng, H.,** 2008. Effective Tuning Method for Fuzzy PID with Internal Model Control, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47**, 8317-8323.

[28] **Fedele, G.,** 2009. A new method to estimate a first-order plus time delay model from step response, *Journal of the Franklin Institue,* **346**, 1-9.

[29] **Bi, Q., Cai, W.J., Lee, E.L., Wang, Q.G., Hang, C.C. and Zhang, Y.,** 1999. Robust identification of first-order plus dead-time model from step response, *Control Engineering Practice,* 71-77.

[30] **Madhuranthakam, C.R., Elkamel, A. and Bumdan, H.,** 2008. Optimal tuning of PID controllers for FOPTD, SOPTD and SOPTD with lead processes, *Chemical Engineering and Processing,* **47**, 251-264.

[31] **Hägglund T.,** 1992. A Predictive PI Controller for Processes with Long Dead Times, *IEEE Control Syst. Mag*., **12**, 57–60.

[32] **Yesil, E., Güzelkaya, M., Eksin, İ.,** 2003. Online tuning of set-point regulator with a blending mechanism using PI controller, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **16 (2)**, 143-154.

[33] **Visioli, A., Piazzi, A.**, 2003. Improving set-point-following performance of industrial controllers with a fast dynamic inversion algorithm, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **42**, 1357-1362.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Berna AYAZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Bakırköy / 21 Şubat 1986

Adres: Bağcılar / İSTANBUL

Lisans Üniversite: Yıldız Teknik Üniversitesi