

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMLERDE PID KONTROLÖR KATSAYILARININ SİSTEM
PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Taner SAYIM**

Anabilim Dalı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

HAZİRAN 2011

**ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMLERDE PID KONTROLÖR KATSAYILARININ SİSTEM
PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Taner SAYIM
504091122

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim EKSİN
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA
Prof. Dr. Serhat ŞEKER

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Bu güncel tezin hazırlanmasında değerli zamanını bana ayıran, sahip olduğu bilgi birikimini benimle paylaşan, sürekli yönlendiren değerli hocam Sn.Prof.Dr.İbrahim Eksin'e, çalışmam sırasında destek ve yorumlarıyla katkıda bulunan değerli hocam Sn.Prof Dr. Müjde Güzelkaya'ya, ayrıca, manevi desteğini her zaman hissettiğim aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2011

Taner SAYIM

Elektrik-Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. PID KONTROLÖR YAPILARI	3
2.1 Giriş	3
2.2. PID Kontrolörlerin Yapıları ve Temel Özellikleri	3
2.3 Ölü Zamanlı Sistemler İçin Önerilen PID Kontrolör Yöntemleri.....	6
2.3.1 Optimal olarak PID katsayılarının belirlenmesi.....	6
2.3.2 PID kontrolör katsayılarının basit bir metotla belirlenmesi.....	8
2.3.3 Doğrudan sentezleme yöntemiyle PID katsayılarının belirlenmesi	10
2.3.4 Zeigler - Nichols Tasarım Metodu	13
2.3.5 Skogestad içsel model kontrol (SIMC)	14
3. ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMLERDE PID KONTROLÖR	
KATSAYILARININ SİSTEM PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK	
BELİRLENMESİ.....	15
3.1 Giriş	15
3.2 İntegral ve Ölü Zaman Etkili Sistemler	16
3.2.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi.....	16
3.2.2 Bozuculu sistem cevabın incelenmesi	19
3.2.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabının birlikte incelenmesi	22
3.3 Birinci Dereceden Kararsız ve Ölü Zaman Etkili Sistemler	27
3.3.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi.....	27
3.3.2 Bozuculu sistem cevabın incelenmesi	31
3.3.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabın birlikte incelenmesi	36
3.4 Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemler	42
3.4.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi.....	42
3.4.2 Bozuculu sistem cevabının incelenmesi	44
3.4.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabının birlikte incelenmesi	46
3.5 Çift katlı İntegral ve Ölü Zaman Etkili Sistemler	51
3.5.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi.....	51
3.5.2 Bozuculu sistem cevabının incelenmesi	52
3.5.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabının birlikte incelenmesi	55
3.6 İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemler..	60
3.6.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi.....	60
3.6.2 Bozuculu sistem cevabının incelenmesi	61

3.6.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabının birlikte incelenmesi.....	63
4. SONUÇLAR	69
KAYNAKLAR.....	71
EKLER	73
ÖZGEÇMİŞ.....	83

KISALTMALAR

PID	: Proportional Integral Derivative
ISE	: Integral Square Error
ITSE	: Integral Time Square Error
ISTE	: Integral Square Time Error
SIMC	: Simple or Skogestad Internal Model Control

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : PID parametrelerinin artırımıyla kapalı çevrim sistem yanıtında oluşan değişiklikler	5
Çizelge 2.2 : İntegral etkili ve ölü zamanlı sistemlerde optimal basamak cevabı için önerilen PID katsayıları	6
Çizelge 2.3 : İntegral etkili ve ölü zamanlı sistemlerde optimal basamak cevabı için önerilen PID katsayıları.....	7
Çizelge 2.4 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemlerde optimal basamak cevabı için önerilen PID katsayıları.....	7
Çizelge 2.5 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemlerde optimal basamak cevabı için önerilen PID katsayıları.	7
Çizelge 2.6 : Zeigler – Nichols metodu için P, PI, PID kontrolör katsayıları.....	14
Çizelge 2.7 : Bazı sistemler için SIMC-PID kontrolör parametreleri.	14
Çizelge 3.1 : İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin basamak yanıtında sabit k, değişen L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.	16
Çizelge 3.2 : İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin basamak yanıtında sabit L, değişen k değerleri için optimal K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.	17
Çizelge 3.3 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı için önerilen PD katsayılarının Visioli (2001) ile karşılaştırılması.	19
Çizelge 3.4 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında sabit k, değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.	19
Çizelge 3.5 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında sabit L, değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.	19
Çizelge 3.6 : İntegra ve ölü zamanlı sistemlerin bozuculu yanıtı için önerilen PID katsayılarının Visioli(2001) ile karşılaştırılması.	21
Çizelge 3.7 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında sabit k, değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.	22
Çizelge 3.8 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında sabit L, değişken k değerleri için K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.	22
Çizelge 3.9 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozuculu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.	24
Çizelge 3.10 : G(s) sisteminin PID katsayıları ve ISE değerleri.....	26

Çizelge 3.11 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının sabit T ve L , değişken k değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	27
Çizelge 3.12 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının sabit T ve k , değişken L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	27
Çizelge 3.13 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının sabit k ve L iken değişken T değeri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	28
Çizelge 3.14 : Önerilen PID katsayılarının Visioli ile karşılaştırılması.....	30
Çizelge 3.15 : G_p sistemi basamak cevabı için bulunan PİD parametreleri ve ISE değerleri.....	31
Çizelge 3.16 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının sabit T ve L , farklı k değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	32
Çizelge 3.17 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının sabit T ve k , farklı L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	32
Çizelge 3.18 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının sabit T ve k , farklı L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değeri.....	32
Çizelge 3.19 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için önerilen PİD katsayılarının Visioli(2001) ile karşılaştırılması.....	35
Çizelge 3.20 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının sabit T ve L , farklı k değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	36
Çizelge 3.21 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının sabit T ve k , farklı L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	36
Çizelge 3.22 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının sabit T ve k , farklı L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	37
Çizelge 3.23 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozuculu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.....	39
Çizelge 3.24 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili örnek sistemin bulunan PID katsayıları ve ISE değerleri.....	41
Çizelge 3.25 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozuculu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.....	48
Çizelge 3.26 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistem için örnek verilen sistemin PID katsayıları ve ISE değerleri.....	50
Çizelge 3.27 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozuculu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.....	57
Çizelge 3.28 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili örnek sistemin PID katsayıları ve ISE değerleri.....	59

Çizelge 3.29 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozuculu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.....	65
Çizelge 3.30 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili örnek verilen sistemin PID katsayıları ve ISE değerleri.....	67
Çizelge A.1 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $T=1$, $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	74
Çizelge A.2 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $T=1$, $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	74
Çizelge A.3: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $L=1$, $k=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	74
Çizelge A.4 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $L=1$, $T=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	75
Çizelge A.5 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $k=1$, $T=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	75
Çizelge A.6 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $k=1$, $L=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	75
Çizelge A.7: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $T=1$, $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	76
Çizelge A.8 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $T=1$, $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	76
Çizelge A.9 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $L=1$, $k=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri i.....	76
Çizelge A.10 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	77
Çizelge A.11 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	77
Çizelge A.12 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	77
Çizelge A.13 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	78
Çizelge A.14 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	78

Çizelge A.15 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	78
Çizelge A.16 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $L=1$, $T=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.	79
Çizelge A.17 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $k=1$, $T=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.	79
Çizelge A.18 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $k=1$, $L=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.	79
Çizelge A.19 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $T=1$, $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri... ..	80
Çizelge A.20 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $T=1$, $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.	80
Çizelge A.21 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $L=1$, $k=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri	80
Çizelge A.22 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $L=1$, $T=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.....	81
Çizelge A.23 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $k=1$, $T=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri	81
Çizelge A.24 : İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $k=1$, $L=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : PID kontrolörün blok şeması.....	4
Şekil 3.1 : Birim geri beslemeli kontrol sistemi.....	15
Şekil 3.2 : İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin basamak yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda K_p değişimleri.....	18
Şekil 3.3 : İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin basamak yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda T_d değişimi.....	18
Şekil 3.4 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda K_p değişimleri.....	20
Şekil 3.5 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda T_i değişimleri.....	20
Şekil 3.6 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda T_d değişimleri.....	21
Şekil 3.7 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda K_p değişimleri.....	23
Şekil 3.8 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında k ve L sistem parametrelerine bağlı T_i değişimleri.....	23
Şekil 3.9 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında k ve L sistem parametrelerine bağlı T_d değişimleri.....	24
Şekil 3.10 : $k=0.5$ ve $L=2$ için sistem cevapları.....	25
Şekil 3.11 : İntegral ve ölü zaman etkili $G(s)$ sistem cevaplarının karşılaştırılması.....	26
Şekil 3.12 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri.....	29
Şekil 3.13 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri.....	29
Şekil 3.14 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri.....	30
Şekil 3.15 : G_p sisteminin basamak cevaplarının karşılaştırılması.....	31
Şekil 3.16 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri.....	33
Şekil 3.17 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri.....	34
Şekil 3.18 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri.....	34
Şekil 3.19 : G_p sisteminin bozucu etkili cevaplarının karşılaştırılması.....	35
Şekil 3.20 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri.....	38

Şekil 3.21 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri..	38
Şekil 3.22 : İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında k ve L sistem parametrelerine bağlı T_i değişimleri.	39
Şekil 3.23 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili G_p sisteminin bulunan farklı kontrolörler için sistem cevapları.	40
Şekil 3.24 : Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili örnek sistem cevaplarının karşılaştırılması.	41
Şekil 3.25 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri	43
Şekil 3.26 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri.	43
Şekil 3.27 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri.	44
Şekil 3.28 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri.	45
Şekil 3.29 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri.	45
Şekil 3.30 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri.	46
Şekil 3.31 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri.	47
Şekil 3.32 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri.	47
Şekil 3.33 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri.	48
Şekil 3.34 : G_s sisteminin bulunan farklı kontrolörler için sistem cevapları karşılaştırılması.	49
Şekil 3.35 : Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili örnek sistem cevaplarının karşılaştırılması.	50
Şekil 3.36 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı için k ve L' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri.	52
Şekil 3.37 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı için k ve L' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri	52
Şekil 3.38 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtı için k ve L' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri	53
Şekil 3.39 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtı için k ve L' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri.	54
Şekil 3.40 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtı için k ve L' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri	54
Şekil 3.41 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k ve L' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri	56
Şekil 3.42 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k ve L' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri	56
Şekil 3.43 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k ve L' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri	57

Şekil 3.44 : Gs sisteminin bulunan farklı kontrolörler için sistem cevapları karşılaştırılması.	58
Şekil 3.45 : Çift katlı integral ve ölü zaman etkili örnek sistem cevaplarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 3.46 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri	61
Şekil 3.47 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri	61
Şekil 3.48 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri.	62
Şekil 3.49 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri	63
Şekil 3.50 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_d değişimleri.....	63
Şekil 3.51 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak K_p değişimleri..	64
Şekil 3.52 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri	64
Şekil 3.53 : İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k , L ve T' 'ye bağlı olarak T_i değişimleri.	65
Şekil 3.54 : G_1 sisteminin bulunan farklı kontrolörler için sistem cevapları	66
Şekil 3.55 : Birinci dereceden integral ve ölü zaman etkili örnek sistem cevaplarının karşılaştırılması.....	67

ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMLERDE PID KONTROLÖR KATSAYILARININ SİSTEM PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK BELİRLENMESİ

ÖZET

Endüstriyel sistemlerinin çoğu kontrol döngüsü içinde ölü-zamana sahiptirler. PID kontrolörler, bu tür sistemleri kontrol etmek için anlaşılması ve kullanılması kolay bir yapısı olduğundan çok sık kullanılmaktadırlar. Çeşitli yapılarla sahip ölü zamanlı sistemler için PID katsayılarının belirlenmesi ve ayarlanması ile ilgili birçok araştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, ölü zamanlı sistemler için sistem parametrelerine bağlı olarak PID kontrolör katsayılarının belirlenmesi önerilmiştir. Bu işlevlerin belirlenmesi yollarından biri olan performans kriterlerine dayalı ayarlama algoritması ve optimizasyon arama yöntemi kullanılmıştır. Bu amaç için, değişik yapılardaki ölü zamanlı sistemlerin basamak cevapları ISE kriterine göre incelenmiş ve sistem parametrelerine bağlı olarak optimum PID katsayıları belirlenmiştir. Ancak, basamak cevabı için bulunan optimum PID katsayıları bu sistemlerin bozuculu yanıtına uygulandığında tatmin edici geçici sistem performansını sağlayamamıştır. Bu nedenle, optimum PID kontrolör katsayıları bozucu etkisi için de belirlenmesi gerekir. Böylece hem basamak sistem cevabı için hem de bozuculu sistem cevabı için kriterimiz olan minimum ISE değerini veren sistem parametrelerine bağlı olarak ayrı ayrı PID kontrolörler katsayıları belirlenmiştir. Ayrı ayrı bulunan bu katsayılar çeşitli tasarım amaçları için yeterli olarak harmanlanmıştır. Ayrıca, sistemlerin hem basamak hem de bozuculu yanıtları aynı anda incelenmiş ve çeşitli yapılardaki ölü zamanlı sistemler için optimum PID katsayıları belirlenmiştir. Bu önerilen tasarım yöntemi değişik ölü zamanlı sistemler için uygulanmış ve örnek sistemler üzerinde başarımı gösterilmiştir.

DETERMINATION OF PID CONTROLLER COEFFICIENTS AS FUNCTIONS OF SYSTEM PARAMETERS FOR DEAD TIME PROCESSES

SUMMARY

Most of the systems in industry possess dead-time within the control loop. PID controllers, which are well-known and easy to implement, are commonly used to control these types of systems. Many researches are done on the determination and tuning of PID coefficients for processes with various structures possessing dead time.

In this study, determination of PID controller coefficients as functions of system parameters for dead time processes are investigated. One of the ways of determining these functions is to use a fitting algorithm based on a performance criteria and an optimization search method. For this purpose, step responses of dead time processes with various structures is analyzed according to the ISE performance criterion and optimal PID controller coefficients as functions of system parameters is determined. However, disturbance responses of these systems that are designed to act optimally for step system inputs do not provide satisfactory transient system performance. For this reason, optimal PID controller coefficients should also have to be determined for disturbance rejection aspect. Thus, PID controller coefficients as functions of system parameters are determined separately for both step response and disturbance response to give minimum ISE criterion. These separately determined coefficients are blended adequately for various design purposes. Besides, both step and disturbance responses of the system are analyzed at the same time and optimal PID controller coefficients are determined for processes with various structures possessing dead time. These proposed design methods have been applied to different kind of dead time processes and the performance of the controller has been verified via computer simulations.

1. GİRİŞ

Endüstriyel sistemlerin çoğunun yapısında ölü zaman olarak da bilinen zaman gecikmesi bulunmaktadır. Kontrol kuramında bu tür sistemlerin kontrolü için genellikle PID kontrolörler kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni yapısının basit olması, uygulama kolaylığı ve geniş bir çalışma alanı için dayanıklı davranışa sahip olmasıdır. Endüstride çok sayıda uygulama alanı olan PID kontrolörlerin, süreç kontrolünde kullanılan kontrol yapılarında %90 dan fazla bir kullanım oranına sahiptir. Bu yüzden üzerinde pek çok araştırmalar yapılmış, eksiklikleri giderilmeye çalışılmıştır. Pek çok eksik yönünün bilinmesine rağmen alternatifi olmadığı için PID kontrol yapıları günümüzde de kullanılmaya devam etmektedir.

Kontrol edilecek sistem için PID kontrolör katsayılarının doğru olarak belirlenmesi önemlidir. PID kontrolör katsayılarının belirlenmesi için bu güne kadar birçok yöntem sunulmuştur. Bu çalışmada, daha önce de denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmış performans kriterine dayalı ayarlama algoritması ve optimizasyon arama yöntemi kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda performans kriteri olarak ISE kriterini kullanılmış ve genetik algoritma ile sistem parametrelerine bağlı optimal PID katsayıları bulunmuştur.

Bölüm 2 de PID kontrolör yapıları hakkında bilgiler verilecek ve sistemler üzerinde ne gibi etkilerde bulunduğu incelenecektir. Ölü zamanlı sistemler için önerilen bazı tasarım yöntemleri üzerinde durulacaktır. Bu çeşitli yöntemler hakkında bilgiler verilecektir.

3. bölümde ölü zamanlı sistemlerde PID katsayılarının sistem parametrelerine bağlı olarak ve genetik algoritma kullanılarak nasıl belirlendiği anlatılacaktır. Daha sonra önerilen sonuçlar karşılaştırılacak, gerekli mukayeseler yapılacaktır.

Son bölümde ise yapılan işler özetlenerek değerlendirme yapılacak ve konuyla ilgili öneriler sunulacaktır.

2. PID KONTROLÖR YAPILARI

2.1 Giriş

PID kontrolörler pek çok süreç kontrol uygulamalarının temel taşıdır. Bugün dünyada pek çok cihaz ve kontrol mühendisi günlük işlerinde bu tip kontrolörleri kullanmaktadır. Yeni teknolojilerin gelişmesi ile endüstriyel kontrol teknikleri de gelişmektedir. Eksiklikleri giderilmeye çalışılmakla birlikte, basit yapısı ve kullanışlılığı ile PID kontrolörler endüstriyel kontrol sistemlerinde halen kullanılmaya devam etmektedir. (Astrom, K. J. ve Hagglund, T., 1995)

Bu bölümde PID kontrol yapıları ve çeşitli PID kontrol tasarım yöntemleri hakkında bilgiler verilecektir.

2.2. PID Kontrolörlerin Yapıları ve Temel Özellikleri

Sistemler belirli görevleri yerine getirmek amacıyla tasarlanırlar. Tasarlanan sistem, bu görevleri hangi doğrulukta ve sürede yaptığı önemlidir. Belirli bir amaç için tasarlanan sistemin performansını etkileyecek olan kriterlerin bilinmesi ve bunların tasarım süresince sisteme uygulanması gerekir. Tasarım kriterleri çoğunlukla sistemin ne yapması gerektiğini belirtmek ve nasıl yaptığını değerlendirmek için kullanılır. Genellikle sistemin kararlı olması ve kontrol hatası olabildiğince küçük olması istenir. Sistemin bu durumunu sağlamak için kontrolörler kullanılır. Kontrolörler, dış bozucu etkiler ile gürültülerin giderilmesini ve sistemin düzgün işlemlerini sağlamaya çalışırlar.

Oransal (Proportional), integral (Integral) ve türev (Derivative) kontrolörlerin toplamından oluşan PID kontrol, geri beslemeli kontrol sistemleri arasında en yaygın olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir. Bu kontrol yönteminde hatanın miktarına, hatanın belli bir zaman aralığındaki integral değerine ve hatanın türevine bakılır. Ne kadar düzeltme sinyali uygulanacağı bilgisiyle birlikte aynı zamanda ne kadar süreyle uygulanacağı da belirlenmiş olur. Bu üç farklı değer belli değerlerde katsayılarıyla çarpılarak toplanır ve kontrol için süreç girişine uygun olan kontrol sinyali elde edilir.

PID algoritmasının transfer fonksiyonu aşağıdaki denklem (2.1) de verilmiştir.

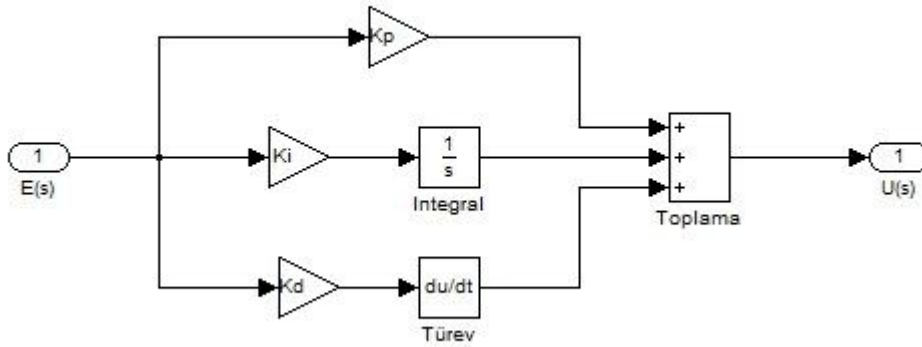
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (2.1)$$

burada $U(s)$ kontrol değişkenini, $E(s)$ ise kontrol hatası, K_p oransal kazanç, T_i integral zamanı, T_d ise türev zamanını göstermektedir.

PID kontrolörün blok şeması da Şekil 2.1' de gösterilmektedir. Şekil 2.1 deki integral sabiti K_i ve türev sabiti K_d eşitlikleri sırasıyla denklem (2.2) ve (2.3) te verilmiştir.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (2.2)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (2.3)$$



Şekil 2.1: PID kontrolörün blok şeması.

Dört tip kontrolör yapısı vardır. Bunlar P, PI, PD, PID kontrolörlerdir.

- Orantı etkisi (P Kontrol): T_i sonsuza ve T_d sıfıra gitmesi halinde kontrolör yalnızca orantı etki ile çalışır. Orantı kazancı K_p nin ayarı ile kontrolör duyarlılığı artırılabilir.
- PI kontrolör: Orantı etkiye integral etki ilavesi ile elde edilen PI kontrolörün yapısı nispeten basit olup, özellikle süreç kontrolör sistemlerinin çoğunda kullanılırlar. İntegral etki, denetlenen çıkış büyüklüğünde meydana gelebilecek kararlı hal hatalarını ortadan kaldırır. İntegral etkinin kullanım amacı sistemin bozucu etkisi üzerinde yeterli bir kontrolör etkisi sağlamaktır.
- PD kontrolör: Orantı etkiye türev etki ilavesi ile elde edilen PD kontrolör, bozucu girişten doğan kararlı hal hatasının fazla önemsenmediği, fakat buna karşılık orantı etkiye göre geçici durum davranışının iyileştirilmesi istenen durumlarda tercih edilir. Türev etkisi, sisteme sönüm ilave ederek kararsız veya kararsızlığa yatkın sistemi daha kararlı hale getirebilir. Türev etkisinin

en önemli sakıncası ise sistemde ortaya çıkan gürültü sinyallerini kuvvetlendirmesidir. Bunun sonucu olarak kontrolör çıkışında salınımlı bir hareket meydana gelebilir.

- d) PID kontrolör: Uzun ölü zaman gecikmelerinin ortaya çıktığı süreç kontrolör sistemlerinde, PI kontrolörde integral etkinin tamamlayıcısı olarak türev etki kullanılır. Sıcaklık, pH, yoğunluk, karışım v.b. ölçümlerinde ortaya çıkan ölü zaman gecikmeli sistemlerin kontrolünde kullanılır. PID kontrolör etkisi ile bir yandan kararlı hal hatası sıfırlanırken diğer yandan da sistemin geçici durum davranışı iyileştirilmiş olur.

PID kontrolör tasarımının amacı verilen kapalı döngü sistemin performans kriterinin istenen şekilde ayarlanması ve K_p , T_i ve T_d katsayılarının bulunmasıdır. PID katsayılarını arttırdığımızda kapalı çevrim sistem yanıtı nasıl değişeceğini Çizelge 2.1’de görebiliriz.

Çizelge 2.1: PID parametrelerinin artırımıyla kapalı çevrim sistem yanıtında oluşan değişiklikler.

PID Parametreleri	Yükselme zamanı	Yerleşme zamanı	Maksimum Aşım	Sürekli Hatası	Hal
K_p	Azalır	Az değişir	Artar	Azalır	
T_i	Azalır	Artar	Artar	Yok Eder	
T_d	Az değişir	Azalır	Azalır	Az değişir	

Bir sistemde kullanılacak kontrolör parametrelerinin seçimine etki eden, sistemin basamak giriş karşısında gösterdiği cevap eğrisinden ortaya çıkan zaman gecikmesi ile ölü zaman gecikmesi olmak üzere iki önemli parametre bulunmaktadır. Bunlar, eğer ölü zaman gecikmesi, sistemin zaman sabitinden küçük ise, böyle bir sistem P, PI veya PID tipi kontrolörlerinden birisi ile kolaylıkla kontrol edilebilir. Aksi halde, sistem tek bir kontrolör ile kolaylıkla kontrol edilemez.

2.3 Ölü Zamanlı Sistemler İçin Önerilen PID Kontrolör Yöntemleri

Bu bölümde ölü zamanlı sistemler için önerilen bazı PID kontrolör yöntemleri incelenmiştir.

2.3.1 Optimal olarak PID katsayılarının belirlenmesi

Visioli(2001) ISE, ISTE ve ITSE kriterlerine göre integral etkili ve ölü zamanlı sistemler ile birinci dereceden kararsız ve ölü zamanlı sistemler için ayarlama metodları önermiştir. Bu optimizasyon işlemi genetik algoritma ile sağlanmıştır. Katsayı belirleme problemi K_p , T_i ve T_d değerlerinin performans gerekliliklerini tam olarak karşılayacak şekilde seçilmesine dairdir. Optimizasyon kriteri olarak denklem (2.4) kullanılmıştır.

$$J_n(\theta) = \int_0^{\infty} t^n [e(\theta, t)]^2 \quad n = 0, 1, 2 \quad (2.4)$$

burada $\theta = [K_p, T_i, T_d]$ parametre vektörü yukarıda verilen ifadeyi minimize etme amaçlı seçilir ve $e(t) = r(t) - y(t)$ sistem hatasıdır. $n=0$, $n=1$ ve $n=2$ iken sırasıyla ISE, ITSE ve ISTE kriterlerini ifade etmektedir.

İntegral ve Ölü Zaman Etkili Sistemler: İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin genel transfer fonksiyonu denklem (2.5) te verilmiştir. Bu sistemin basamak cevabı ve bozucu etkili cevabı için Visioli(2001) tarafından önerilen PID katsayıları Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3 te verilmiştir.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{s} \quad (2.5)$$

Çizelge 2.2: İntegral etkili ve ölü zamanlı sistemlerde optimal basamak cevabı için önerilen PID katsayıları

PID Parametreleri	ISE	ITSE	ISTE
K_p	1.03/kL	0.96/kL	0.9/kL
T_i	-	-	-
T_d	0.49L	0.45L	0.45L

Çizelge 2.3: İntegral etkili ve ölü zamanlı sistemlerde optimal basamak cevabı için önerilen PID katsayıları

PID Parametreleri	ISE	ITSE	ISTE
K_p	$1.37/kL$	$1.36/kL$	$1.34/kL$
T_i	$1.49L$	$1.66L$	$1.83L$
T_d	$0.59L$	$0.53L$	$0.49L$

Birinci Dereceden Kararsız ve Ölü Zaman Etkili Sistemler: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin transfer fonksiyonu denklem (2.6) da verilmiştir. Bu sistemin basamak cevabı ve bozucu etkili cevabı için Visioli(2001) tarafından önerilen PID katsayıları Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5 te verilmiştir.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{s-1} \quad (2.6)$$

Çizelge 2.4: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemlerde optimal basamak cevabı için önerilen PID katsayıları

PID Parametreleri	ISE	ITSE	ISTE
K_p	$1.32/k(L/T)^{-0.92}$	$1.38/k(L/T)^{-0.9}$	$1.35/k(L/T)^{-0.95}$
T_i	$4(L/T)^{0.47}T$	$4.12(L/T)^{0.9}T$	$4.52(L/T)^{1.13}T$
T_d	$3.78T(1-0.84(L/T)^{-0.02})/(L/T)^{-0.95}$	$3.62T(1-0.85(L/T)^{-0.02})/(L/T)^{-0.93}$	$3.70T(1-0.86(L/T)^{-0.02})/(L/T)^{-0.97}$

Çizelge 2.5: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemlerde optimal basamak cevabı için önerilen PID katsayıları

PID Parametreleri	ISE	ITSE	ISTE
K_p	$1.37/k(L/T)^{-1}$	$1.37/k(L/T)^{-1}$	$1.7/k(L/T)^{-1}$
T_i	$2.42(L/T)^{1.18}T$	$3.67(L/T)^{1.39}T$	$4.68(L/T)^{1.52}T$
T_d	$0.6(L/T)T$	$0.55(L/T)T$	$0.5(L/T)T$

2.3.2 PID kontrolör katsayılarının basit bir metotla belirlenmesi

Chidambaram ve Padma (2003) integral ve ölü zamanlı sistemler için, Chidambaram ve diğ. (2004) birinci dereceden kararlı ve kararsız ölü zaman etkili sistemler için PID kontrolör katsayılarını basit bir metotla belirlenmiştir.

İntegral ve ölü zamanlı etkili sistemler: Chidambaram ve Padma (2003) PID katsayılarını matematiksel işlemlerle hesaplamışlardır. İntegral ve ölü zaman etkili sistemin transfer fonksiyonunu denklem (2.5) te verilmiştir.

Kapalı çevrim transfer fonksiyonu, çıkış(y) ile referans girişi(y_r) arasındaki ilişki denklem (2.7) da verilmiştir.

$$\frac{y(q)}{y_r(q)} = \frac{(K_1q + K_2 + K_3q^2)e^{-q}}{q^2 + (K_1q + K_2 + K_3q^2)e^{-q}} \quad (2.7)$$

Burada K_1 , K_2 , K_3 ve q eşitlikleri aşağıdaki gibidir.

$$K_1 = kK_pL \quad (2.8)$$

$$K_2 = \frac{K_1L}{T_i} \quad (2.9)$$

$$K_3 = \frac{K_1T_d}{L} \quad (2.10)$$

$$q = sL \quad (2.11)$$

burada s Laplace operatörüdür. Denklem (2.7) nın paydasında bulunan e^{-q} ifadesi için Pade yaklaşımını kullanırsak denklem (2.12) i elde ederiz.

$$\frac{y(q)}{y_r(q)} = \frac{(K_1q + K_2 + K_3q^2)(1 + 0.5q)e^{-q}}{q^2(1 + 0.5q) + (K_1q + K_2 + K_3q^2)(1 - 0.5q)} \quad (2.12)$$

Sadece zaman ekseninde kaymaya sebep olduğu için paydaki e^{-q} ifadesini atabiliriz. Kontrol sisteminin amacının çıkışın girişi takip etmesi olduğu düşünülürse pay ve paydadaki q ifadelerinin dereceleri cinsinden katsayılarının eşit olması gerekmektedir. Katsayılarının eşitlenmesi ile PID kontrol parametreleri denklem (2.13-2.15) te verilmiştir.

$$K_p = \frac{1}{kL} \quad (2.13)$$

$$T_i = \infty \quad (2.14)$$

$$T_d = 0.5L \quad (2.15)$$

Bu ifade bir PD kontrolör yapısıdır. Visioli(2001) genetik algoritma ile ISE kriterine göre elde edilen ifadeyi matematiksel olarak elde edilmiştir.

Buna göre PID kontrolörlerde kapalı çevrim cevabının bir miktar aşım yaptığı göz önünde bulundurulursa çıkışın referansa oranının birden daha fazla olacağı öngörülmektedir. Bu durumda paydaki q ifadesinin derecelerinin katsayıları, paydadanın α katına eşitlenir. Burada α ayarlama parametresi olarak ifade edilir ve birden büyük olmalıdır. $\alpha=1.25$ olarak seçilirse elde edilen PID katsayıları denklem (2.16-2.18) te verilmiştir.

$$K_p = \frac{1.2346}{kL} \quad (2.16)$$

$$T_i = 4.5L \quad (2.17)$$

$$T_d = 0.45L \quad (2.18)$$

Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemler: Chidambaram ve diğ. (2004), integral etkili ölü zamanlı sistemlere uygulamış oldukları matematiksel metodu birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemler için uygulamışlardır.

Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin transfer fonksiyonu denklem (2.19) de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2.19)$$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonunu $y/y_r=1$ e eşitlendiğinde birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemler için PID katsayıları denklem (2.20-2.22) deki gibi bulunmuştur.

$$K_p = \frac{(T+0.5L)}{kL} \quad (2.20)$$

$$T_i = T + 0.5L \quad (2.21)$$

$$T_d = \frac{0.5L(T+0.1667L)}{T+0.5L} \quad (2.22)$$

Birinci Dereceden Kararsız ve Ölü Zaman Etkili Sistemler: Chidambaram ve diğ. (2004), integral etkili ölü zamanlı sistemlere uygulamış oldukları matematiksel metodu birinci dereceden ve ölü zaman etkili sistemler için uygulamışlardır.

Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin transfer fonksiyonu denklem (2.7) de verilmiştir. Kararlı sistemlere benzeyen performans özelliklerinin kararsız

sistemler için karşılanamayacağı biliniyor. Kararsız sistemler için aşım ve oturma zamanı daha büyüktür. Kararsız sistemler için kapalı çevrim transfer fonksiyonunu, integral zaman sabitini negatif yaptığı için $y/y_r=1$ e eşitleyemeyiz. Bu nedenle kapalı çevrim transfer fonksiyonunu α ya eşitlenecektir. Sistemin L/T oranı arttıkça, aşımı da artar. Bu yüzden, α parametre değeri de artar. Uygun bir α değeri belirlenmesi için birçok benzetim yapılarak birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemler için PID katsayıları denklem (2.22-2.25) te verilmiştir.

$$K_p = \frac{1.4183 \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.9147}}{k} \quad 0.01 \leq \frac{L}{T} \leq 0.9 \quad (2.23)$$

$$T_i = \left(16.327 \left(\frac{L}{T}\right)^2 + 5.5778 \frac{L}{T} + 0.8158 \right) T \quad 0.01 \leq \frac{L}{T} \leq 0.6 \quad (2.24)$$

$$T_i = \left(196 \left(\frac{L}{T}\right)^2 - 247.28 \frac{L}{T} + 87.72 \right) T \quad 0.6 \leq \frac{L}{T} \leq 0.9 \quad (2.25)$$

$$T_d = \left(0.4917 \frac{L}{T} \right) T \quad 0.01 \leq \frac{L}{T} \leq 0.9 \quad (2.26)$$

2.3.3 Doğrudan sentezleme yöntemiyle PID katsayılarının belirlenmesi

Chidambaram ve diğ. (2009) ölü zamanlı ve integral etkili sistemler için PID tasarımı doğrudan sentez yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (2.27) te verilmiştir.

$$\frac{y}{y_r} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \quad (2.27)$$

burada G_p sistem transfer fonksiyonunu, G_c ise kontrolör transfer fonksiyonunu ifade etmektedir. Denklem (2.28) teki verilen denklemden,

$$G_c = \frac{1}{G_p} \frac{(y/y_r)}{1 - (y/y_r)} \quad (2.28)$$

ifadesi elde edilir. Doğrudan sentezleme yöntemiyle, kontrolör dizaynı için kapalı çevrim transfer fonksiyonu belirlenmelidir.

$$G_c = \frac{1}{G_p} \frac{(y/y_r)_d}{1 - (y/y_r)_d} \quad (2.29)$$

burada $(y/y_r)_d$ ifadesi basamak değişimleri için istenilen kapalı çevrim transfer fonksiyonunu ifade etmektedir.

İntegral ve Ölü Zaman Etkili Sistemler: İntegral ve ölü zaman etkili sistem transfer fonksiyonu denklem (2.5) te verilmiştir.

Bu sistem için istenilen kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (2.30) gibi düşünülüyor.

$$\left(\frac{y}{y_r}\right)_d = \frac{(\mu s + 1)e^{-Ls}}{(\gamma s + 1)^2} \quad (2.30)$$

Denklem (2.5) ile denklem (2.28) den kontrolör ifadesi denklem (2.29) daki gibi elde edilir.

$$G_c = \frac{s}{k} \frac{(\mu s + 1)}{[(\gamma s + 1)^2 - (\mu s + 1)e^{-Ls}]} \quad (2.31)$$

Birinci dereceden Pade yaklaşımıyla gecikme zamanı $[e^{-Ls} = (1 - 0.5Ls)/(1 + 0.5Ls)]$ şeklinde ifade edilip denklem (2.31) de yerine yazılırsa,

$$G_c = \frac{(\mu s + 1)(0.5Ls + 1)}{k[0.5L\gamma^2 s^2 + (\gamma^2 + L\gamma + 0.5L\mu)s + (2\gamma + L - \mu)]} \quad (2.32)$$

Denklem (2.32) de $\mu = 2\gamma + L$ ifadesi yerine yazılarak sadeleştirildiğinde denklem (2.33) teki seri filtreli PID kontrolör elde edilir.

$$G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{1}{T_f s + 1}\right) \quad (2.33)$$

Denklem (2.32) ile denklem (2.33) eşitlendiği zaman PID parametreleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$K_p = \frac{2\gamma + 1.5L}{k(\gamma^2 + 2\gamma L + 0.5L^2)} \quad (2.34)$$

$$T_i = 2\gamma + 1.5L \quad (2.35)$$

$$T_d = \frac{L\gamma + 1.5L^2}{2\gamma + 1.5L} \quad (2.36)$$

$$T_f = \frac{0.5L\gamma^2}{\gamma^2 + 2L\gamma + 0.5L^2} \quad (2.37)$$

İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemler: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin transfer fonksiyonu denklem (2.38) de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{s(Ts + 1)} \quad (2.38)$$

Bu sistem için istenilen kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (2.39) gibi düşünülüyor.

$$\left(\frac{y}{y_r}\right)_d = \frac{(\mu_2 s^2 + \mu_1 s + 1)e^{-Ls}}{(\gamma s + 1)^3} \quad (2.39)$$

İntegral etkili sistemde uygulanan basamakları uyguladığımızda kontrolör ifadesi denklem (2.40) deki gibi bulunur.

$$G_c = \frac{(Ts+1)(\mu_2 s^2 + \mu_1 s + 1)(0.5Ls+1)}{k[0.5L\gamma^3 s^3 + (\gamma^3 + 1.5L\gamma^2 + 0.5L\mu_2)s^2 + (3\gamma^2 + 1.5L\gamma - \mu_2 + 0.5L\mu_1)s + (3\gamma + L - \mu_1)]} \quad (2.40)$$

Kontrolör denklem yapısına bakıldığında denklem (2.41) deki seri faz ilerlemeli/gerilemeli PID kontrolör yapısını vermektedir.

$$G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \left(\frac{\alpha s + 1}{\beta s + 1}\right) \quad (2.41)$$

Denklem (2.40) ile denklem (2.41) eşitlendiği zaman PID parametreleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$K_p = \frac{\mu_1}{k(\mu_2 - 3\gamma^2 - 1.5L\gamma - 0.5L\mu_1)} \quad (2.42)$$

$$T_i = \mu_1 \quad (2.43)$$

$$T_d = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (2.44)$$

$$\alpha = 0.5L \quad (2.45)$$

$$\beta = \frac{0.5L\gamma^3}{T(3\gamma^2 + 1.5L\gamma + 0.5L\mu_1 - \mu_2)} \quad (2.46)$$

$$\mu_1 = 3\gamma + L \quad (2.47)$$

$$\mu_2 = \frac{(0.5L - T)\gamma^3 + (3T^2 - 1.5L)\gamma^2 + 3LT^2\gamma + 0.5L^2T^2}{T(0.5L + T)} \quad (2.48)$$

Çift katlı İntegral ve Ölü Zaman Etkili Sistemler: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili zaman etkili sistemlerin transfer fonksiyonu denklem (2.49) da verilmiştir.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{s^2} \quad (2.49)$$

Bu sistem için istenilen kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (2.39) gibi düşünülüyor. İntegral etkili sistemde uygulanan basamakları uyguladığımızda kontrolör ifadesi denklem (2.50) deki gibi bulunur.

$$G_c = \frac{s(\mu_2 s^2 + \mu_1 s + 1)(0.5Ls+1)}{k[0.5L\gamma^3 s^3 + (\gamma^3 + 1.5L\gamma^2 + 0.5L\mu_2)s^2 + (3\gamma^2 + 1.5L\gamma - \mu_2 + 0.5L\mu_1)s + (3\gamma + L - \mu_1)]} \quad (2.50)$$

Kontrolör denklem yapısına bakıldığında denklem (2.41) deki seri faz ilerlemeli/gerilemeli PID kontrolör yapısını vermektedir. Denklem (2.50) ile denklem (2.41) eşitlendiği zaman PID parametreleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$K_p = \frac{\mu_1}{k(\gamma^3 + 1.5L\gamma^2 + 0.5L\mu_2)} \quad (2.51)$$

$$T_i = \mu_1 \quad (2.52)$$

$$T_d = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (2.53)$$

$$\alpha = 0.5L \quad (2.54)$$

$$\beta = \frac{0.5L\gamma^3}{(\gamma^3 + 1.5L\gamma^2 + 0.5L\mu_1)} \quad (2.55)$$

$$\mu_1 = 3\gamma + L \quad (2.56)$$

$$\mu_2 = 3\gamma^2 + 1.5L\gamma + 0.5L\mu_1 \quad (2.57)$$

2.3.4 Zeigler - Nichols Tasarım Metodu

Zeigler ve Nichols (1942) sundukları PID kontrolör için tasarım metotları günümüzde halen en çok kabul gören ve kullanılan tasarım metodu olma özelliğini taşımaktadır. Bu metot proses dinamiklerinin frekans cevabı yoluyla karakterizasyonuna dayanmaktadır. Tasarım proses transfer fonksiyonu $P(s)$ in Nyquist eğrisinin negatif reel eksenini kestiği noktadan yola çıkmaktadır. Bu noktadaki frekans ω_{180} ve de o frekanstaki kazanç $k_{180}=|P(j\omega_{180})|$ olmak üzere iki parametre tanımlanabilir. Bu noktaya son nokta denmektedir ve bu noktayı karakterize eden parametreler $K_u=1/k_{180}$ ile $T_u=2\pi/\omega_{180}$ sırasıyla en son nokta kazanç ve en son nokta periyot adını almaktadır. Bu parametreler şu şekilde bulunabilmektedir. Öncelikle prosese bir oransal kontrolör bağlanır. Daha sonra ise proses osilasyona başlayana kadar oransal kazanç ifadesi yavaş yavaş arttırılır. Osilasyon başlangıç anında ulaşılan kazanç K_u ve osilasyon periyodu ise T_u dur. İstenilen parametreler bulunduktan sonra Çizelge 2.5 e bakarak kontrolör için gerekli katsayı ayarları yapılır.

Çizelge 2.5: Zeigler – Nichols metodu için P, PI, PID kontrolör katsayıları

	Kp	Ti	Td
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	-
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

2.3.5 Skogestad içsel model kontrol (SIMC)

Skogestad içsel model kontrol (SIMC) de denklem 2.23 teki ifade kullanılarak, istenilen kapalı çevrim transfer fonksiyonu birinci dereceden T_c ölü zamanlı sistem denklem 2.58 de verilmiştir.

$$\left(\frac{y}{y_s}\right)_d = \frac{e^{-Ls}}{T_c s + 1} \quad (2.58)$$

Çizelge 2.6 da bazı sistemler için Skogestad (2003) tarafından önerilen PID kontrolör katsayıları verilmiştir. Burada istenilen kapalı çevrim zaman katsayısı T_c ayarlama parametresidir ve SIMC kuralına göre hızlı bir cevap için $T_c=L$ olarak ayarlanması önerilmiştir.

Çizelge 2.6: Bazı sistemler için SIMC-PID kontrolör parametreleri.

G(s)	Kp	Ti	Td
$ke^{-Ls}/Ts+1$	$T/k(T_c+L)$	$\min\{T, 4(T_c+L)\}$	-
$ke^{-Ls}/s(Ts+1)$	$1/k(T_c+L)$	$4(T_c+L)$	T
ke^{-Ls}/s^2	$1/4k(T_c+L)^2$	$4(T_c+L)$	$4(T_c+L)$

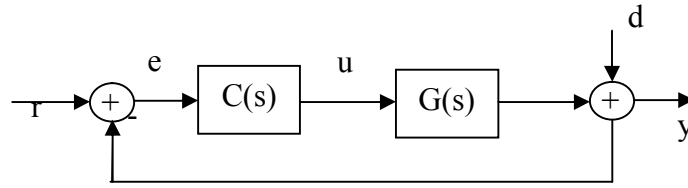
3. ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMLERDE PID KONTROLÖR KATSAYILARININ SİSTEM PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK BELİRLENMESİ

3.1 Giriş

Şekil 1’de görüldüğü üzere birim geri beslemeli bir sistem göz önüne aldığımızda, $C(s)$ paralel PİD kontrolörü ifade etmektedir:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.1)$$

Burada K_p kontrolör kazancı, T_i ve T_d sırasıyla integral ve türev zamanı katsayısıdır. $G(s)$ ise kontrol edilen sistemi ifade etmektedir.



Şekil 3.1: Birim geri beslemeli kontrol sistemi

Katsayı belirleme problemi K_p , T_i ve T_d değerlerinin performans gerekliliklerini tam karşılayacak şekilde seçilmesine dairdir. Bunlardan biri de hatanın karesinin integralinin (ISE) minimize edilmesidir. Buna göre performans indeksi için aşağıdaki ifade önemlidir.

$$J(\theta) = \int_0^\infty [e(\theta, t)]^2 \quad (3.2)$$

Burada $\theta = [K_p, T_i, T_d]$ minimize edilmek için seçilen katsayı vektörü ve $e(t) = r(t) - y(t)$ sistem hatasıdır.

Buradaki amacımız, amaç fonksiyonumuzu minimize etmek için sistem katsayılarına bağlı olarak PID katsayılarını bulmaktır. Bu amaç için, rastgele çerçeve içinde problemin global optimumu sağladığı bilinen genetik algoritma kullanıldı. Bu işlemler beş farklı sisteme uygulanmıştır ve her bir sistem için genetik algoritma popülasyonu 30, iterasyon sayısı ise 80 seçilmiştir.

3.2 İntegral ve Ölü Zaman Etkili Sistemler

İntegral ve ölü zaman etkili sistemlerin tipik özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz.

- İntegral etkisi dolayısıyla sistem transfer fonksiyonunu modellediğimizde paydada görülmesini beklediğimiz orijinde bir kutup.
- Ölü zaman etkisinden dolayısıyla bir gecikme L değeri.

İntegral ve ölü zaman etkili sistemler birçok kimyasal ve endüstriyel süreci tanımlaması açısından transfer fonksiyonu modelini şu şekilde ifade edebiliriz.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{s} \quad (3.3)$$

Burada k sistem kazancı, L ise ölü zamanı ifade etmektedir. Yukarıda belirtilen model, endüstrideki birçok integral ve ölü zaman etkili sistem modelini temsil etmektedir. Sistem transfer fonksiyonu sadece iki parametre içermesinden dolayı, tanımlamak ve çözümünün yapılması nispeten daha basittir.

3.2.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi

Sistemin k kazanç katsayısı sabit tutularak (k=1), L katsayısının farklı değerleri seçildi ve her bir farklı L değeri için Matlab ve Simulink ile çalıştırılan, birçok simülasyon gerektiren, genetik algoritma uygulandı.

Çizelge 3.1: İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin basamak yanıtında sabit k, değişen L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.

k=1 iken L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,0871	166,5682	0,246299	0,6766
1	1,04502	406,6226	0,48956	1,35
2	0,5219	232,9911	1,04589	2,702
3	0,35101	119,7986	1,509245	4,049
4	0,25846	335,6623	1,943782	5,417

Sabit k (k=1), farklı L değerleri için optimal PİD katsayıları ve ISE değerleri çizelge 3.1’de verilmiştir. Sonra, aynı işlemleri bir de sabit L (L=1), farklı k katsayıları için uygulandığında çizelge 3.2 deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 3.2: İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin basamak yanıtında sabit L, değişen k değerleri için optimal K_p , T_i , T_d , ISE değerleri

L=1 iken k	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,08749	880,7975	0,488501	1,35
1	1,04502	406,6226	0,48956	1,35
2	0,53006	381,3381	0,466872	1,35
3	0,3551	51,76385	0,501577	1,369
4	0,25627	56,57174	0,536465	1,388

Bulunan her iki tablodaki k ve L değerleri dikkate alınarak, interpolasyon yöntemiyle K_p , T_i ve T_d değerleri k ve L katsayılarına bağlı olarak formüle edilmiştir. Formül katsayıları, kestirim hatalarının mutlak değerlerinin toplamı minimize edilerek, yine genetik algoritma yardımıyla saptandı.

Veriler genetik algoritma ile formüle edildiğinde;

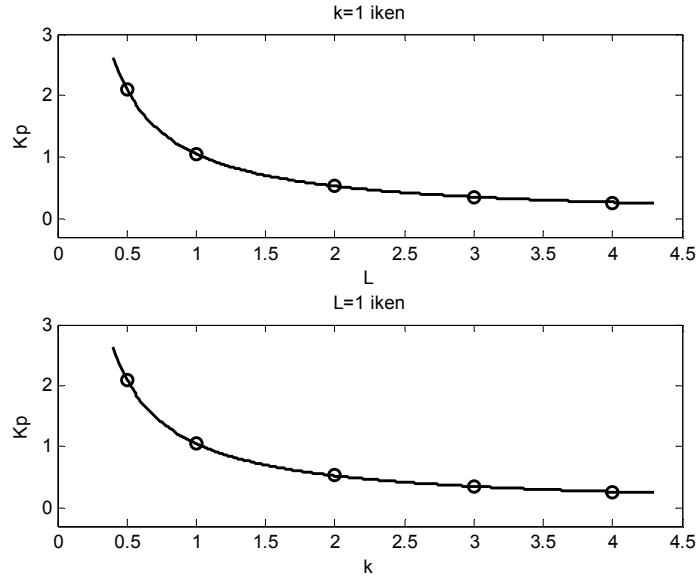
$$K_p = \frac{1.05}{kL} \quad (3.4)$$

$$T_d = 0.5L \quad (3.5)$$

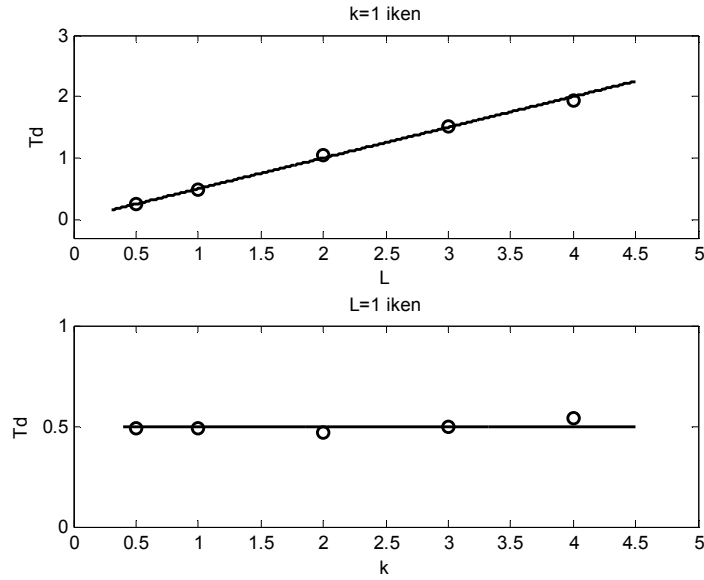
olarak bulunur. Görüldüğü üzere integral zaman katsayısı T_i değerleri çok büyük yani integral kazancı K_i yaklaşık olarak sıfır olduğundan dolayı PD kontrolör yapısı elde edilmiştir.

K_p parametresini incelediğimizde, sistemin k ve L katsayıları ile ters orantılı olduğu görülüyor. Şekil 3.2 de genetik algoritma ile bulunan K_p değerlerinin, bulunmuş olan formüller üzerindeki yerleşimleri gösterilmiştir.

T_d parametresini incelediğimizde, sistemin kazanç katsayısı k'den bağımsız olduğu görüyoruz. Sistemin gecikme zaman katsayısı L ile ise doğru orantılı olarak değişmektedir. Şekil 3.3 te genetik algoritma ile bulunan T_d değerlerinin, bulunmuş olan formüller üzerindeki yerleşimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2: İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin basamak yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda K_p değişimleri.



Şekil 3.3: İntegral ve ölü zamanlı sistemlerin basamak yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda T_d değişimi

Bulmuş olduğumuz PD kontrolör katsayıları ile Visioli (2001) nin önermiş olduğu PD katsayılarına yaklaşımlar bulunmaktadır. Çizelge 3.3 te hemen hemen aynı sonuçları bulduğumuzu görmekteyiz.

Çizelge 3.3: İntegral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı için önerilen PD katsayılarının Visioli (2001) ile karşılaştırılması.

PID katsayıları	Önerilen	Visioli(2001)
K_p	1.05/kL	1.03/kL
T_i	-	-
T_d	0.5L	0.49L

3.2.2 Bozuculu sistem cevabın incelenmesi

İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu cevabını inceleyeceğiz. Şekil 3.1 deki birim geri beslemeli kontrol sistemi göz önüne alındığında $d(s)$ bozucu transfer fonksiyonu olarak $G(s)$ sistem transfer fonksiyonu ile aynı alınmıştır.

Basamak cevabı için bulunan optimal PD kontrolörü bozuculu sisteme uyguladığımızda kararlı hal hatası olduğu görülüyor. Kararlı hal hatasını gidermek için sisteme PID kontrolör uygulamamız gerekmektedir. Bozuculu sistemin genetik algoritma ile bulunan PID katsayılarının değerleri Çizelge 3.4 ve çizelge 3.5 te verilmiştir.

Çizelge 3.4: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında sabit k , değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.

$k=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,72186	0,741667	0,297117	0,14992
1	1,3483	1,439599	0,608856	1,1925
2	0,64746	3,161889	1,183764	9,7629
3	0,46732	4,07357	1,791535	32,3669
4	0,32234	5,334988	2,659955	77,11

Çizelge 3.5: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında sabit L , değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.

$L=1$ için k	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,71673	1,406801	0,609549	0,29832
1	1,3483	1,439599	0,608856	1,1925
2	0,69076	1,578627	0,569633	4,77838
3	0,43819	1,516281	0,626372	10,816

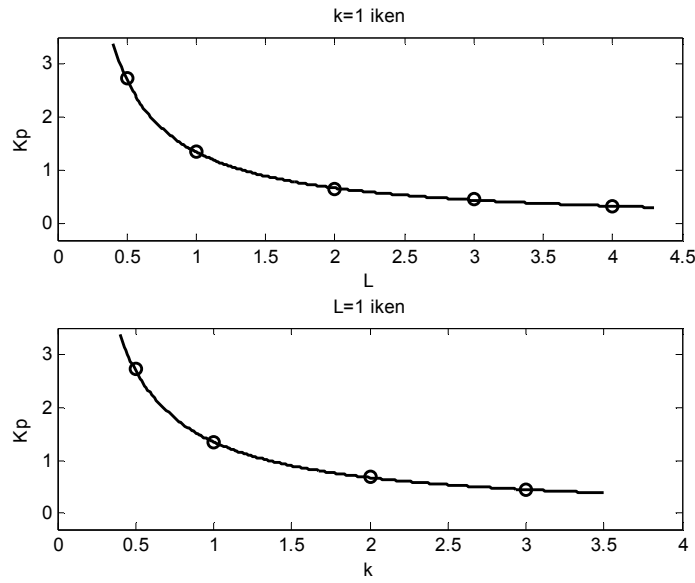
Her iki tabloyu dikkate alarak K_p , T_i ve T_d değerleri sistem transfer fonksiyonun k ve L katsayılarına bağlı olarak formüle edildiğinde;

$$K_p = \frac{1.35}{kL} \quad (3.6)$$

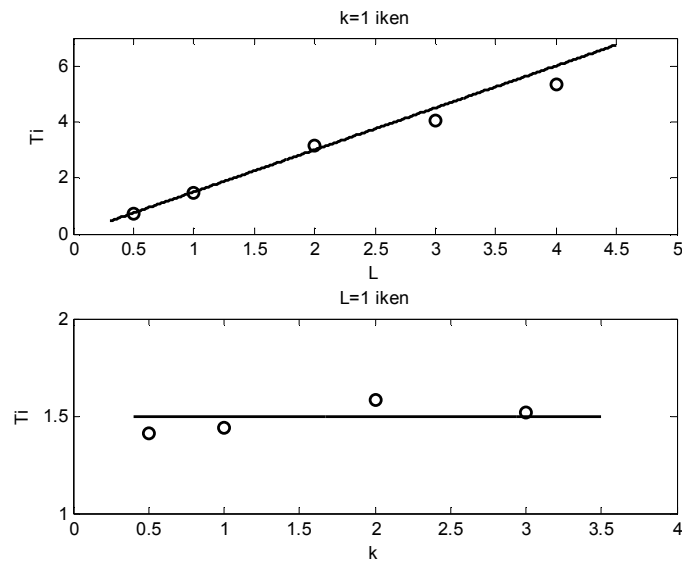
$$T_i = 1.5L \quad (3.7)$$

$$T_d = 0.6L \quad (3.8)$$

olarak bulunur.



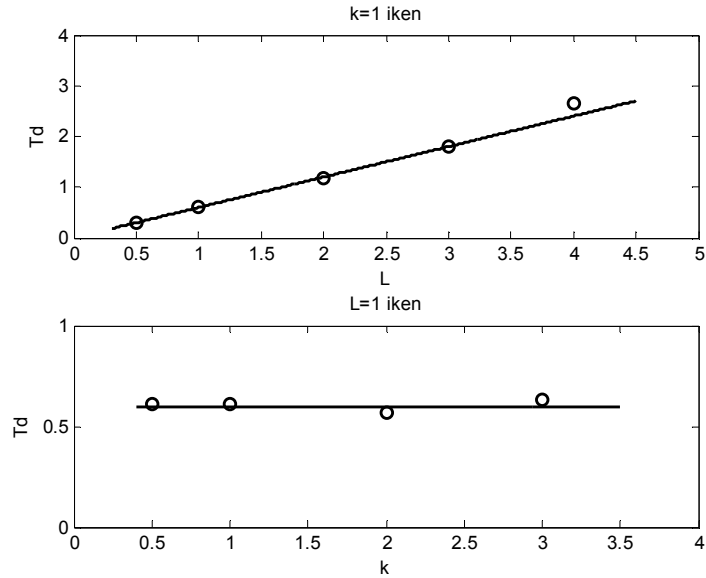
Şekil 3.4: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda K_p değişimleri.



Şekil 3.5: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda T_i değişimleri.

K_p parametresini incelediğimizde, sistemin k ve L katsayıları ile ters orantılı olduğu görülüyor. Şekil 3.4 te de genetik algoritma ile bulunan K_p değerlerinin, bulunmuş olan formül üzerindeki yerleşimleri gösterilmiştir.

T_i parametresini incelediğimizde, sistemin kazanç katsayısı k den bağımsız olarak sadece L ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu değişimleri Şekil 3.5 te açıkça görmekteyiz.



Şekil 3.6: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda T_d değişimleri.

T_d parametresini incelediğimizde ise T_i ile aynı şekilde sistemin kazanç katsayısı k den bağımsız olarak sadece L ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir.

Bulmuş olduğumuz PID kontrolör katsayıları ile Visioli(2001) nin önermiş olduğu PID katsayılarına yaklaştığımızı görmekteyiz.

Çizelge 3.6: İntegra ve ölü zamanlı sistemlerin bozuculu yanıtı için önerilen PID katsayılarının Visioli(2001) ile karşılaştırılması.

PID katsayıları	Önerilen	Visioli(2001)
K_p	$1.35/kL$	$1.37/kL$
T_i	$1.5L$	$1.49L$
T_d	$0.6L$	$0.59L$

3.2.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabının birlikte incelenmesi

Visioli (2001) basamak ve bozucu etkili sistem cevaplarını incelemiş ve optimum PID katsayıları bulmuştur. Ancak basamak yanıtında bulunan değerler bozuculu sistemde, bozuculu sistemde bulunan değerlerde basamak cevabında iyi bir sonuç vermemektedir. Bu yüzden her iki duruma da uyacak bir formül bulmak için hem basamak cevabını hemde bozuculu cevabını aynı anda incelediğimizde PID kontrolünün K_p , T_i , T_d parametreleri ve ISE değerleri Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8 de verilmiştir.

Çizelge 3.7: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında sabit k , değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.

$k=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,36167	1,999467	0,267082	1,1033
1	1,25907	2,456482	0,58131	3,34186
1,5	0,81351	3,128764	0,920898	7,72
2	0,65402	3,676335	1,193832	14,3716
2,5	0,52783	4,650894	1,384006	25,373
3	0,43676	5,922973	1,75941	40,429
3,5	0,40151	6,026869	1,887201	60,4216
4	0,34551	6,72591	2,132876	87,4615

Çizelge 3.8: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında sabit L , değişken k değerleri için K_p , T_i , T_d , ISE değerleri.

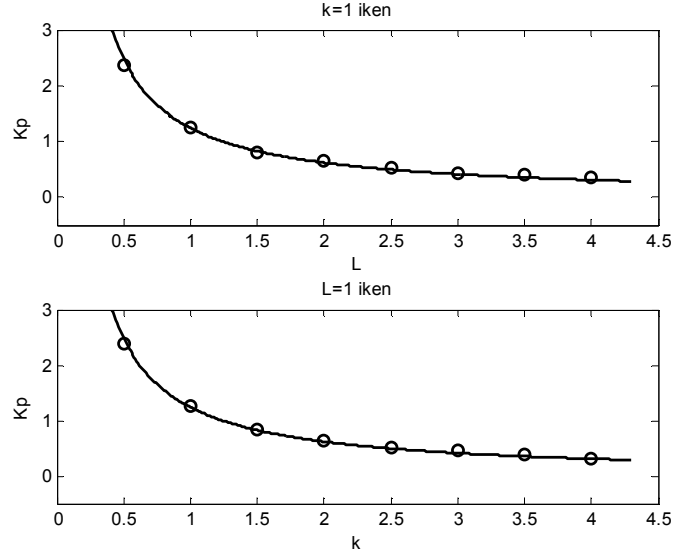
$L=1$ için k	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,39861	3,885207	0,554605	2,1536
1	1,25907	2,456482	0,58131	3,34186
1,5	0,84275	2,016872	0,589095	5,1547
2	0,65057	1,872791	0,585425	7,2077
2,5	0,51943	1,729185	0,584448	10,33575
3	0,46433	1,580321	0,568023	13,41
3,5	0,37734	1,591279	0,602958	17,54355
4	0,31075	1,495932	0,680097	22,24

Her iki tabloyu da dikkate alarak K_p , T_i ve T_d değerleri sistem transfer fonksiyonunun k ve L katsayılarına bağlı interpolasyon yöntemiyle genetik algoritma kullanılarak en uygun eşitlikler bulunmuştur.

$$K_p = \frac{1.3}{kL} \quad (3.9)$$

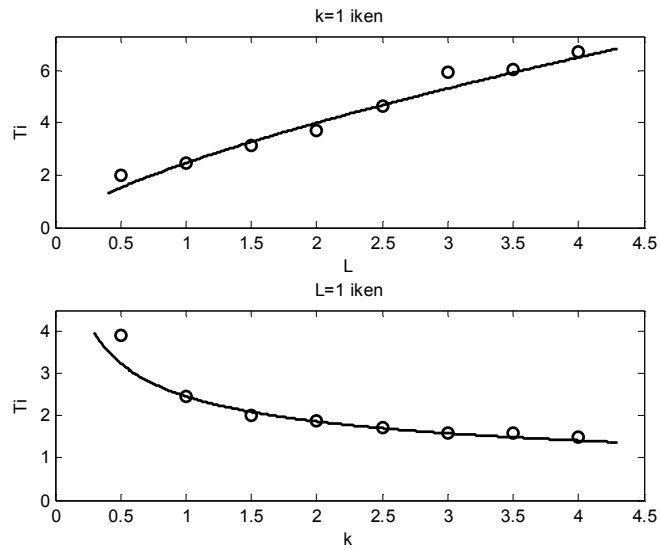
$$T_i = \frac{2.5L^{0.7}}{k^{0.4}} \quad (3.10)$$

$$T_d = 0.58L \quad (3.11)$$

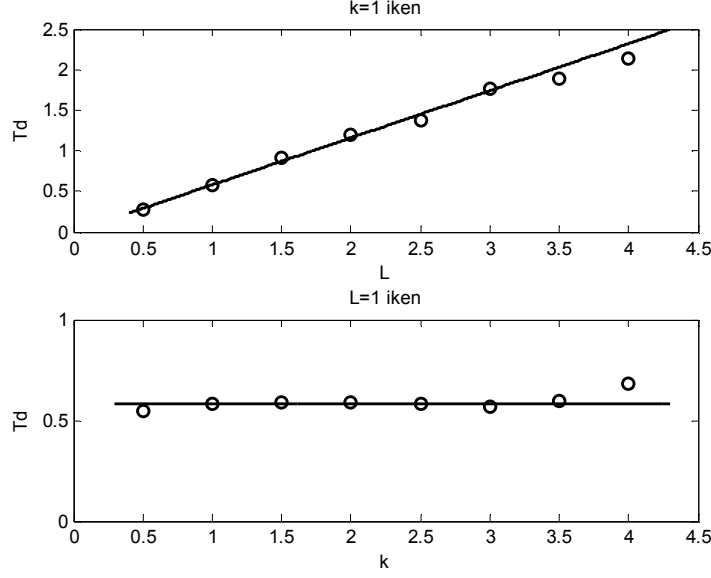


Şekil 3.7: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında $k=1$ ve $L=1$ olduğunda K_p değişimleri.

K_p parametresini incelediğimizde, sistemin k ve L katsayıları ile ters orantılı olduğu görülüyor. Şekil 3.7’de genetik algoritma ile bulunan K_p değerlerinin, bulunmuş olan formül üzerindeki yerleşimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.8: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında k ve L sistem parametrelerine bağlı T_i değişimleri



Şekil 3.9: İntegral ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtında k ve L sistem parametrelerine bağlı T_d değişimleri

Basamak cevabında ve bozuculu cevapta bulunan T_i değerlerinin aksine, sistem kazancının integral zaman katsayısına etki ettiği görülüyor. Şekil 3.8 de bu etkiyi açıkça görebiliriz.

Türev zaman katsayısı T_d ise bozuculu sistemde bulunan türev zaman katsayısı ile aynı olduğu görülmüştür. Şekil 3.9 da da görüldüğü üzere T_d değeri sadece sistem gecikme zamanı L'ye bağlı olarak değişmektedir.

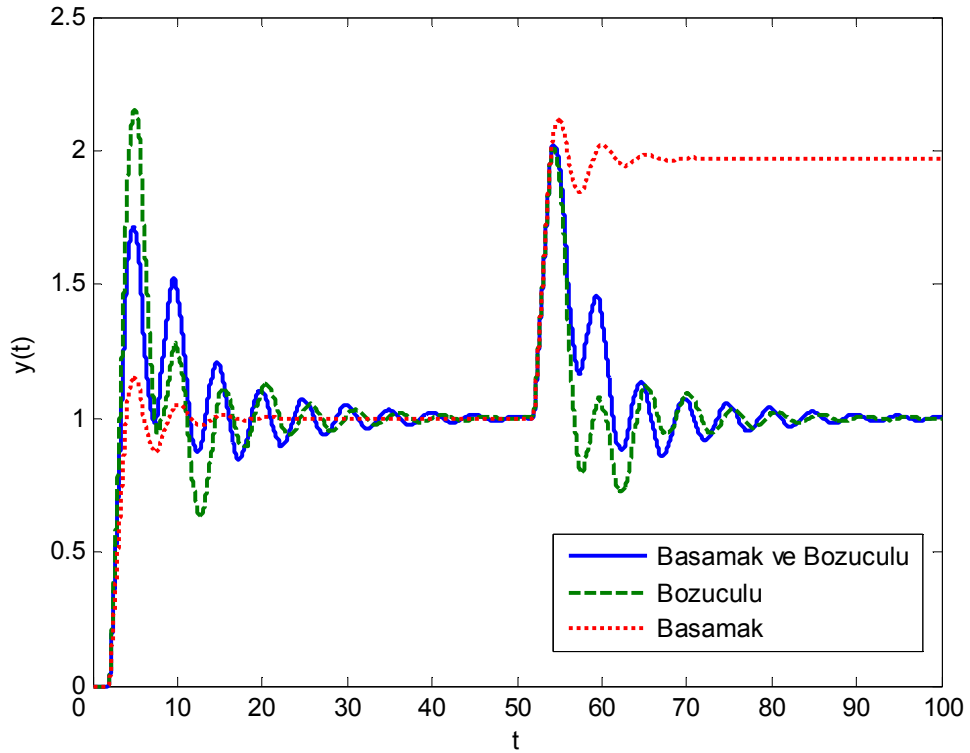
Çizelge 3.9 da her üç durum için bulunan K_p , T_i ve T_d formülleri birlikte verilmiştir. Verilen formülleri incelediğimizde ortak yanıt için bulunan değerler basamak yanıtı ve bozuculu yanıt için bulunan değerlerin arasında bir değer oldukları görülmektedir.

Çizelge 3.9: İntegral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozuculu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.

$G(s)=ke^{-Ls}/s$	K_p	T_i	T_d
Basamak	$1.05/kL$	-	$0.5L$
Bozuculu	$1.35/kL$	$1.5L$	$0.6L$
Basamak ve Bozuculu	$1.24/kL$	$2.46L^{0.7}/k^{0.4}$	$0.58L$

Bulduğumuz PID parametrelerini bir örnek üzerinde inceleyelim. Sistem kazancı $k=0.5$ ve gecikme zamanı $L=2$ s olan integral ve ölü zaman etkili bir sisteme, $t=50$ saniyede transfer fonksiyonu sistem transfer fonksiyonuna eşit olan bozucu etki

etmektedir. Her üç durum için bulunan sistem cevapları Şekil 3.10 da verilmiştir. Basamak ve bozucu sistem cevabı, ISE kriterine göre en iyi basamak sistem cevabı ve en iyi bozucu sistem cevabının beklenildiği gibi arasında bir değerde olduğu görülüyor. Kontrolör parametreleri her iki durum düşünülerek hesaplandığı için ortalama bir sistem cevabı vermiştir. Böylece sistem durumuna bakılmaksızın, basamak cevabında aşımı düşürmüş ve bozucu cevabında ise kararlı hal hatasını engelleyerek, minimumum ISE değerini veren bir PID kontrolör tasarlanmıştır.



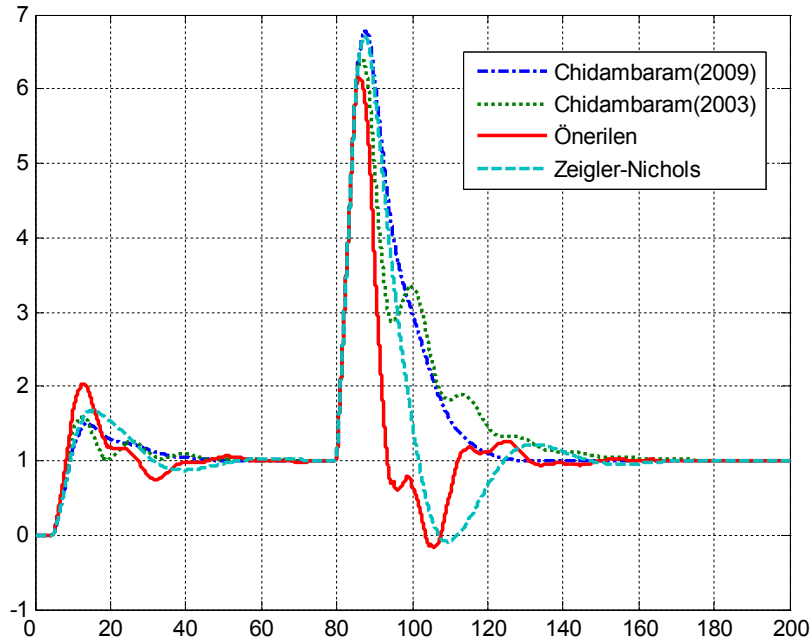
Şekil 3.10: $k=0.5$ ve $L=2$ için sistem cevapları

Denklem (3.12) de verilen integral etkili ve uzun ölü zamanlı sistemi ele alalım.

$$G(s) = \frac{e^{-5s}}{s} \quad (3.12)$$

PID kontrolör parametreleri, basamak ve bozucu etkili sistemlerin birlikte incelenerek belirlenen denklem (3.9-3.11) den hesaplanarak $K_p=0.248$, $T_i=7.5895$ ve $T_d=2.9$ bulunmuştur. Verilen bu sistem Zeigler ve Nichols (1942), Chidambaram (2003) ve Chidambaram (2009) da önerilen PID kontrolörle karşılaştırılmıştır. Bu dört kontrolörün sistem cevapları Şekil 3.11 de verilmiştir. Sistemin birim basamak cevabı gözlenmiş ve 75. saniyede bozucu eklenmiştir. Sistem sonuçlarını incelersek, basamak cevabında diğer yöntemlere göre daha kötü bir sonuç bulduğumuzu

görmekteyiz. Bozucu etkisinde ise daha hızlı bir cevap vermiştir ancak hızlı cevap vermesine rağmen oturma zamanı değişmemiştir.



Şekil 3.11: İntegral ve ölü zaman etkili $G(s)$ sistem cevaplarının karşılaştırılması

Bu dört kontrolörün parametreleri ve ISE değerleri Çizelge 3.10 da verilmiştir. Performans kriterimiz olan ISE değerlerine bakacak olursak, basamak cevabında kötü sonuç verse de bozucu etkili sistem cevabında diğer sistemlere göre daha iyi sonuç verdiğini görmekteyiz. Toplam ISE değerine bakacak olursak, tasarım kriteri olarak kullandığımız minimum ISE değerine ulaştığımızı görüyoruz.

Çizelge 3.10: $G(s)$ sisteminin PID katsayıları ve ISE değerleri

$G(s)=e^{-5s}/s$	K_p	T_i	T_d	Basamak ISE değeri	Bozucu ISE değeri	Toplam ISE değeri
Önerilen	0.248	7.59	2.9	12.4	162	174.4
Chidambaram(2003)	0.247	22.5	2.25	8.363	260.337	268.7
Chidambaram(2009)	0.2	17.5	2.143	8.818	325.98	334.8
Zeigler-Nichols	0.186	10	2.5	11.29	227.91	298.2

3.3 Birinci Dereceden Kararsız ve Ölü Zaman Etkili Sistemler

Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemlerin en tipik özelliği kararsız bölgede bir kutbu bulunması ve ölü zaman etkisinden dolayı bir gecikme zamanının bulunmasıdır. Bu sistemde değişken olarak tanımlayabileceğimiz üç parametre bulunmaktadır. Sistem transfer fonksiyonunu aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{Ts-1} \quad (3.13)$$

Burada k sistem kazancı, L ölü zamanı, T ise sistem zaman katsayısını ifade etmektedir.

3.3.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi

Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak cevabı için genetik algoritma kullanarak ISE kriterini minimize eden optimal PID katsayıları Çizelge 3.11, Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13’de verilmiştir. Bu sistemde üç parametre olduğu için üç tane ayrı ayrı tablo oluşturulmuştur.

Çizelge 3.11:Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının sabit T ve L, değişen k değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

T=2,L=1 iken k	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	4,98346	5,403296	0,597836	4,1437
1	2,49357	5,422337	0,593113	4,144
1,5	1,65865	5,402769	0,595514	4,144
2	1,22781	5,408855	0,628314	4,157

Çizelge 3.12:Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının sabit T ve k, değişken L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

T=1,k=1 için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,4	3,03383	2,370976	0,236483	1,2913
0,5	2,53486	2,652998	0,29015	2,0858
0,6	2,11939	3,147718	0,362397	3,2814
0,7	1,85978	3,736299	0,421593	5,1537
0,8	1,67008	4,429098	0,476289	8,14811
0,9	1,51957	5,205968	0,538389	13,0942

Çizelge 3.13: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının sabit k ve L iken değişken T değeri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

k=1,L=1 için T	K_p	T_i	T_d	ISE
1,5	1,93123	5,385621	0,601611	6,634
2	2,47992	5,407588	0,605112	4,476
2,5	3,03497	5,943812	0,593545	3,2148
3	3,58594	6,543328	0,587486	2,7417
3,5	4,11935	7,091324	0,583485	2,457
4	4,67914	7,841696	0,573877	2,269

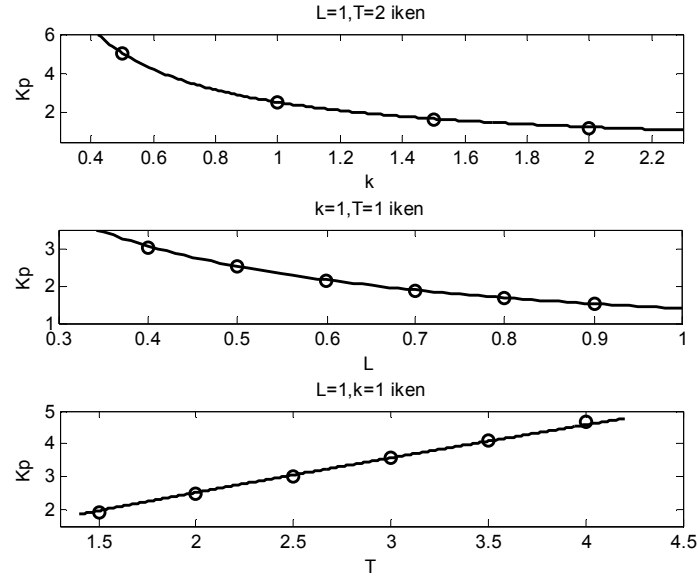
Bulunan her üç tablodaki veriler dikkate alıp sistem parametrelerine bağlı olarak K_p , T_i ve T_d değerlerinin kestirim hatalarının mutlak değerlerinin toplamı minimize edilerek formüle edilmiştir. İntegral ve ölü zamanlı sisteme ek olarak bulunan sistem zaman sabiti nedeniyle formüle edilmesi biraz daha zorlaşmıştır. Kontrolör parametreleri, üç sistem parametresi ile en uygun şekilde ayarlanmıştır.

$$K_p = \frac{1.39T^{0.86}}{kL^{0.86}} \quad (3.14)$$

$$T_i = \left(1.8 + 4.3 \left(\frac{L}{T}\right)^{2.2}\right) T^{0.98} \quad (3.15)$$

$$T_d = 0.6L \quad (3.16)$$

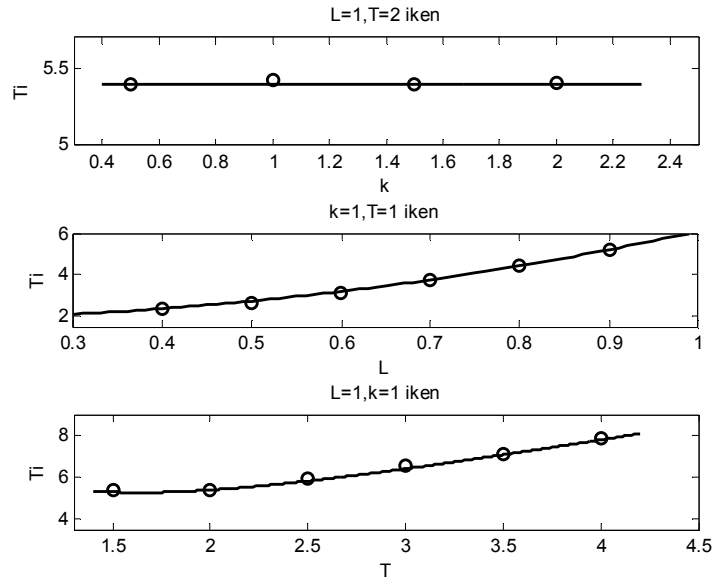
K_p parametresini incelediğimizde, sistemin k ve L katsayıları ile ters orantılı, T katsayısı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Şekil 3.12 de ise bulunan formüllerin genetik algoritma ile bulunan verilerin yerleşimleri gösterilmiştir.



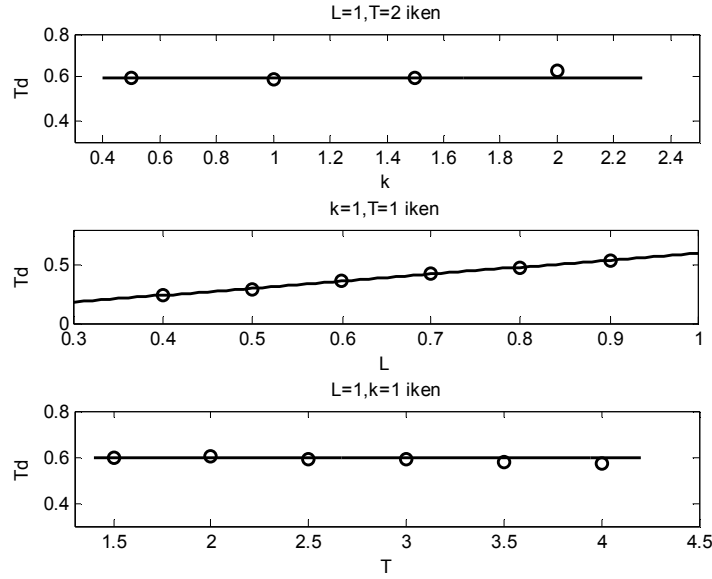
Şekil 3.12: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri

T_i parametresi sistem kazancından bağımsız olarak sistemin ölü zamanı ve sistem zaman sabitine bağlı olarak değiştiği Şekil 3.13 de gösterilmektedir.

T_d parametresi ise diğer kontrol parametrelerine göre daha basit bir yapıya sahiptir. Sadece sistemin ölü zamanına bağlı, doğru orantılı olarak değişmektedir. Şekil 3.14 de bu değişim açıkça görülmektedir.



Şekil 3.13: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri



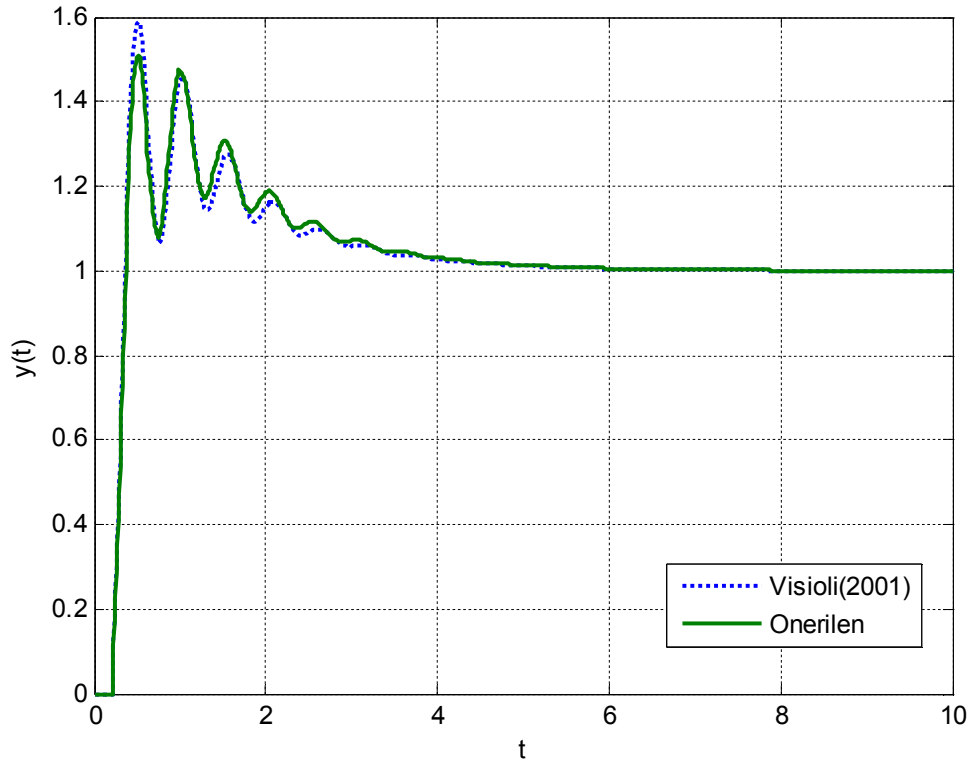
Şekil 3.14: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

Birinci dereceden ölü zamanlı kararsız sistemlerin basamak cevabı için önerilen PID parametreleri Çizelge 3.14 de Visioli(2001) ile karşılaştırılmıştır. İntegral etkili ölü zamanlı sistemde Visioli(2001) ye tam olarak yaklaşmıştık ancak burada özellikle integral zaman katsayısında farklılık olduğu görülmüştür. Türev zaman katsayısında da farklılık göze çarpsa da küçük değişimleri göz ardı ederek çözümlersek, türev zaman katsayıları yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu görülüyor.

Çizelge 3.14: Önerilen PID katsayılarının Visioli ile karşılaştırılması

PID katsayıları	Önerilen	Visioli
K_p	$1.39T^{0.86} / kL^{0.86}$	$1.32T^{0.92} / kL^{0.92}$
T_i	$(1.8+4.3(L/T)^{2.2})T^{0.98}$	$4(L/T)^{0.47}T$
T_d	$0.6L$	$3.78T(1-0.84(L/T)^{-0.02})/(L/T)^{-0.95}$

Kontrol parametrelerini Visioli(2001) den farklı bulduğumuz için basamak cevabını ve ISE kriterini karşılaştıralım. Örnek olarak Visioli(2001) nin de kullandığı $G_p(s)=e^{-0.2s}/s-1$ sistemini kullanalım. Bulunan formüller farklı olsa da sistem cevaplarının yaklaşık olarak aynı olduğunu Şekil 3.15 te görülmektedir. Hatta tepe aşımını azda olsa düşürdüğümüzü görmekteyiz.



Şekil 3.15: G_p sisteminin basamak cevaplarının karşılaştırılması

$G_p(s)$ sisteminin bulunan PID kontrolör parametreleri ve hesaplanan ISE değerleri Çizelge 3.15 te karşılaştırılmıştır. Tablodan da görüldüğü üzere bulunan denklemler farklı olsa ISE değerleri yaklaşık olarak aynıdır.

Çizelge 3.15: G_p sistemi basamak cevabı için bulunan PID parametreleri ve ISE değerleri

$G_p(s)=e^{-0.2s}/s-1$	K_p	T_i	T_d	ISE
Önerilen	5.548	1.925	0.12	0.4108
Visioli(2001)	5.8	1.88	0.11	0.4099

3.3.2 Bozuculu sistem cevabın incelenmesi

Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin sadece bozuculu yanıtını incelemek için Şekil 3.1 deki birim geri beslemeli kontrol sistemi kullanılmıştır. Bozucu olarak ise sistem transfer fonksiyonu ile aynı alınarak benzetimler yapılmıştır. İntegral ve ölü zaman etkili sistemde olduğu gibi bu sistemde de basamak cevabı için bulunan kontrol parametreleri bozucu eklendiği zaman iyi bir

cevap vermemektedir. Bu yüzden aynı sistemi bir de sadece bozucu eklenerek minimum ISE değerlerini elde eden kontrolör parametreleri Çizelge 3.16, Çizelge 3.17 ve Çizelge 3.18’ de verilmiştir.

Çizelge 3.16:Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının sabit T ve L, farklı k değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.

T=3,L=1 için k	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	8,08164	1,952493	0,60438	0,05989
1	4,05225	1,995268	0,59735	0,2395
1,5	2,69628	1,95868	0,602041	0,539
2	2,03417	1,975881	0,595019	0,9585

Çizelge 3.17:Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının sabit T ve k, farklı L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.

T=1,k=1 için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,4	3,35581	0,839885	0,241232	0,15988
0,5	2,70131	1,239571	0,298644	0,3864
0,6	2,2545	1,574679	0,366684	0,84
0,7	1,95748	2,08789	0,422911	1,7127
0,8	1,72019	2,776874	0,483633	3,36127

Çizelge 3.18:Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının sabit T ve k, farklı L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.

k=1,L=1 için T	K_p	T_i	T_d	ISE
1,5	2,05662	3,296499	0,576694	2,04489
2	2,70625	2,318941	0,601434	0,7654
2,5	3,3738	2,131512	0,602614	0,3949
3	4,05202	1,99488	0,596108	0,2396
3,5	4,729	1,857431	0,601043	0,16
4	5,41893	1,833625	0,596398	0,1148

Genetik algoritma yardımıyla bulmuş olduğumuz bu değerlerin üzerinden veya bu değerlerden en az hatayla geçecek şekilde yine genetik algoritma kullanılarak ve sistem parametrelerine bağlı olarak kontrol parametreleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$K_p = \frac{1.37T}{kL} \quad (3.17)$$

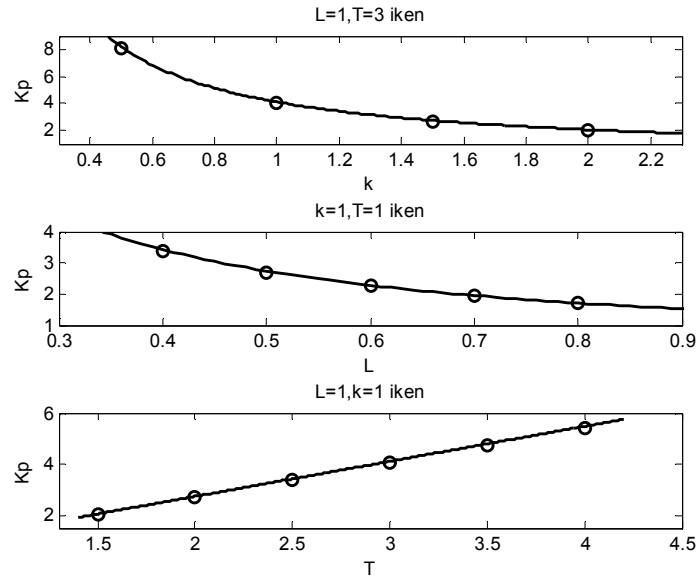
$$T_i = \frac{4.1L^{1.7}}{T^{0.65}} \quad (3.18)$$

$$T_d = 0.6L \quad (3.19)$$

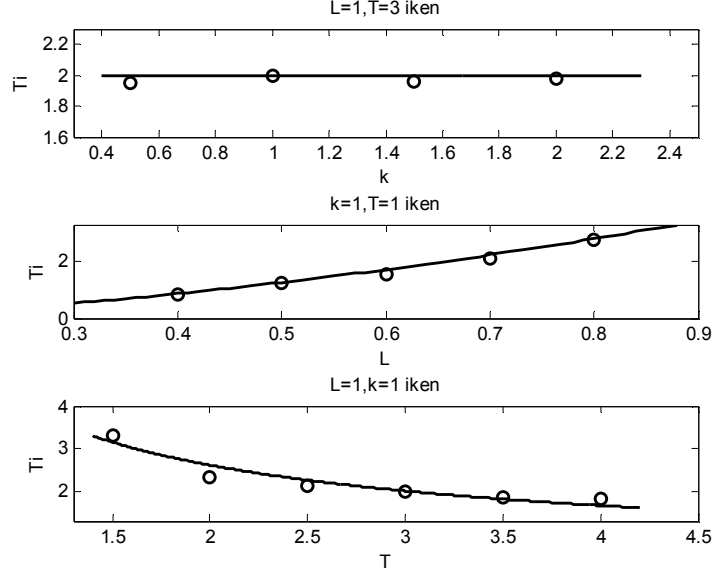
Bulunan f rm llerle tabloları Őimdide grafikler üzerinde inceleyelim. Bu grafiklerde bulunan verilerle kontrolör parametreleri K_p , T_i ve T_d 'nin uygunluğu da sırasıyla Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18' de görülmektedir.

Öncelikle K_p parametresini incelediğimizde, basamak cevabına göre hesaplaması daha basit bir denklem bulunmuştur. Her üç sistem parametresine bağlıdır. Sistem kazancı ve sistem  l  zamanına ters, sistem zaman sabitinle ise doğru orantılı olarak değişmektedir.

T_i parametresine baktığımız zaman sistem kazancından bağımsız olduğunu görmekteyiz. Sistem zaman sabitiyle ters, sistem  l  zamanıyla ise doğru orantılıdır. Basamak cevabıyla karşılaştıracak olursak daha sade bir yapıya sahip olduğu görülüyor.

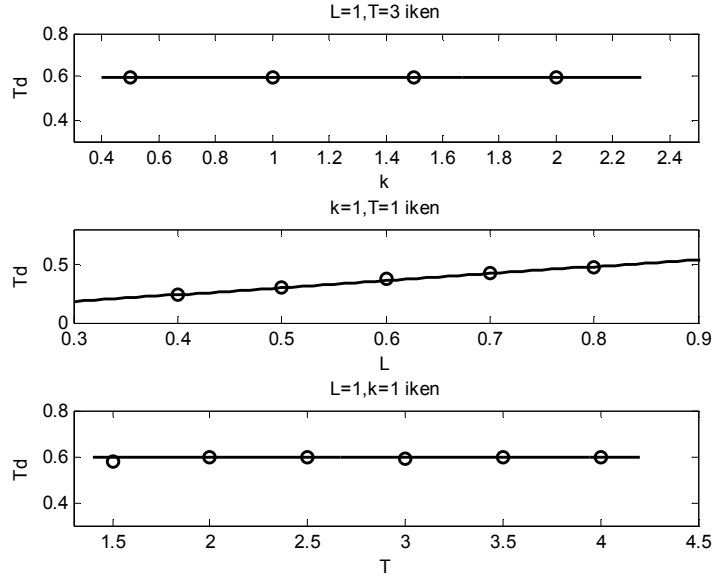


Şekil 3.16: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.17: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri

T_d parametresi incelediğimizde ise basamak cevabındaki bulunan değerle aynı olduğu görülmektedir. Sadece sistem ölü zamanına bağlı olarak, doğru orantılı bir şekilde değişmektedir. Bulunan bu üç kontrolör parametrelerinin içinden en sadesi ve hesaplanması en kolay parametredir.



Şekil 3.18: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

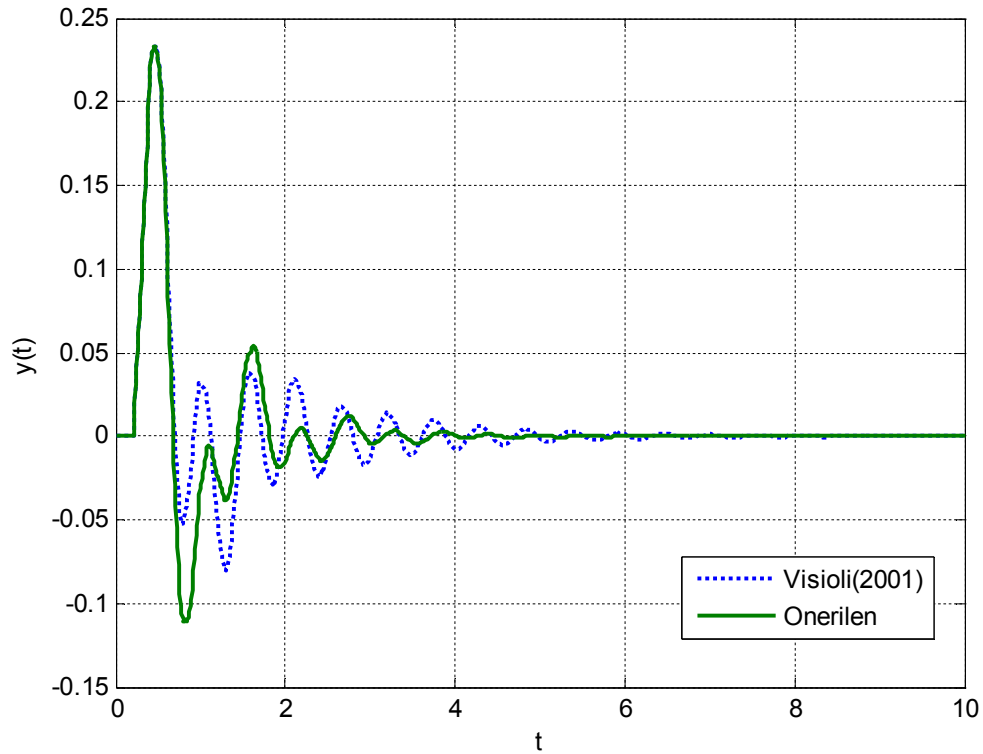
Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemlerin bozucu etkisi altında önerilen ve Visioli(2001) nin önermiş olduğu PID katsayıları Çizelge 3.19 da karşılaştırılmıştır. Basamak cevabındaki bulunan farklı değerlerin aksine burada daha

yakın değerler elde edilmiştir. Oransal katsayı ve türevsel zaman katsayısı tamamen aynı bulunmuştur. Ancak integral zaman katsayısı basamak yanıtında olduğu gibi yine farklı bulunmuştur.

Çizelge 3.19: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için önerilen PID katsayılarının Visioli(2001) ile karşılaştırılması.

PID katsayıları	Önerilen	Visioli(2001)
K_p	$1.37T / kL$	$1.37T / kL$
T_i	$4.1L^{1.7} / T^{0.65}$	$2.42L^{1.18} / T^{0.18}$
T_d	$0.6L$	$0.6L$

Bu karşılaştırmayı bir de örnek üzerinde inceleyelim. Örnek olarak basamak cevabında kullandığımız $G_p(s)=e^{-0.2s}/s-1$ sistemi ele alalım. Önerilen PID ile Visioli (2001) nin önermiş olduğu PID katsayılarından sadece integral zaman katsayısı farklı olduğu için sistemin oturma zamanına etki etmiştir.



Şekil 3.19: G_p sisteminin bozucu etkili cevaplarının karşılaştırılması

3.3.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabın birlikte incelenmesi

Visioli (2001) basamak ve bozucu etkili sistem cevaplarını incelemiş ve optimum PID katsayıları bulmuştur. Ancak basamak cevabında bulunan kontrolör bozucu etkili sistemde, bozuculu sistemde bulunan kontrolör ise basamak cevabında iyi sonuç vermemektedir. Bu nedenle her iki cevaba da uyacak bir kontrolör tasarlamak gerekir. Bu işlem için hem basamak cevabı, hem de bozucu etkili sistem cevabı dikkate alınarak bir kontrolör tasarlanmalıdır. Bu tasarım için genetik algoritma yardımı ile ISE kriterini minimize eden PID kontrolör parametreleri bulunmuştur. Bu değerler Çizelge 3.20, Çizelge 3.21 ve Çizelge 3.22 de verilmiştir.

Çizelge 3.20: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının sabit T ve L, farklı k değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

T=3,L=1 için K	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	7,22	5,971878	0,587258	2,854
0,75	4,82	5,477273	0,591286	2,98
1	3,65	5	0,583562	3,15
1,25	2,94	4,59375	0,588435	3,359
1,5	2,46	4,169492	0,585366	3,59
1,75	2,13	3,944444	0,591549	3,85
2	1,88	3,686275	0,590426	4,14

Çizelge 3.21: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının sabit T ve k, farklı L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.

T=1,K=1 için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,3	4,01	1,610442	0,17207	0,86
0,4	3,08	1,855422	0,233766	1,53
0,5	2,52	2,172414	0,301587	2,59
0,6	2,15	2,559524	0,35814	4,3
0,7	1,88	3,081967	0,420213	7,1
0,8	1,65	3,75	0,49697	11,9

Çizelge 3.22: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının sabit T ve k, farklı L değerleri için optimal K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.

K=1,L=1 için T	K_p	T_i	T_d	ISE
1,5	1,9778	4,353511	0,594448	9,01
2	2,55	4,396552	0,588235	5,16
2,5	3,1	4,769231	0,587097	3,81
3	3,65	5,069444	0,586301	3,15
3,5	4,2	5,454545	0,583333	2,76
4	4,75	5,9375	0,578947	2,51

Bulunan bu değerler sistem parametrelerinin değişimlerine göre kontrolör parametrelerinin değişimlerini göstermektedir. Bu değişimler dikkate alınarak en uygun şekilde oluşturulan K_p , T_i ve T_d değerleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$K_p = \frac{1.37T^{0.9}}{kL^{0.9}} \quad (3.20)$$

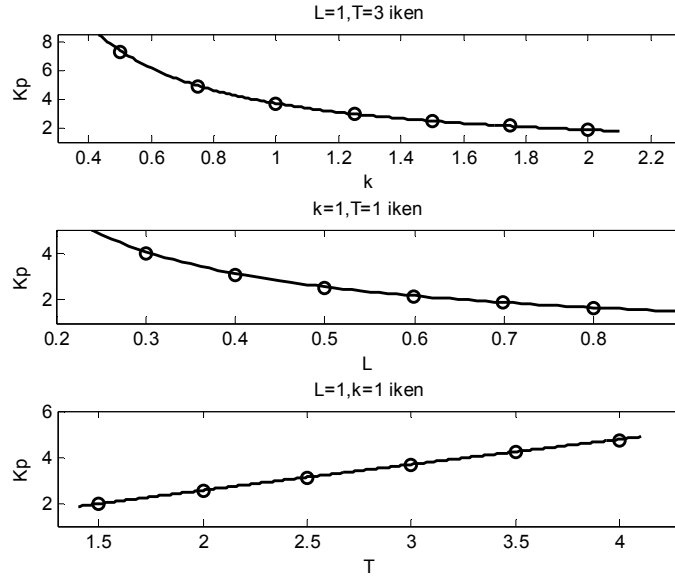
$$T_i = \frac{(3+0.9T^{0.8})L^{0.85}}{k^{0.3}} \quad (3.21)$$

$$T_d = 0.59L \quad (3.22)$$

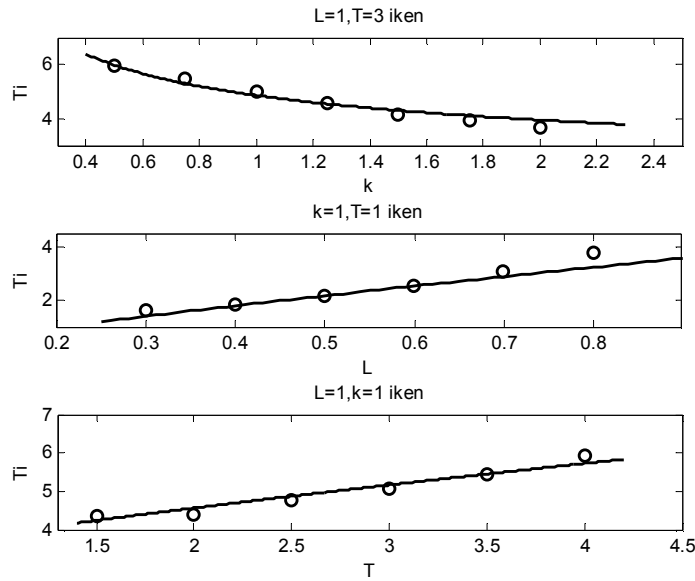
Bulunan bu denklemler yine genetik algoritma kullanılarak, kestirim hatalarını minimize edecek şekilde belirlenmiştir. Denklemlerin genetik algoritma ile bulunan değerler üzerindeki yerleşimleri Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21’ de gösterilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere, bulunan denklemler ile bulunan verilerin birbirleri ile örtüştüğü görülüyor.

K_p katsayısını incelediğimizde, sistem kazanç katsayısı ve sistem ölü zaman katsayısı ile ters orantılı, sistem zaman katsayısı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Her üç cevap içinde oransal katsayı yaklaşık olarak aynıdır. Sadece sistem ölü zaman katsayısı ve zaman katsayılarının etkileri değişmiştir.

İntegral zaman katsayısı T_i değerini incelediğimizde ise basamak cevabı ve bozuculu cevaptan farklı olarak sistem kazancına da bağlı olduğunu görmekteyiz. İntegral zaman katsayısı, sistem zaman katsayısı ve sistem ölü zaman katsayısına doğru orantılı, sistem kazanç katsayısına ise ters orantılıdır.

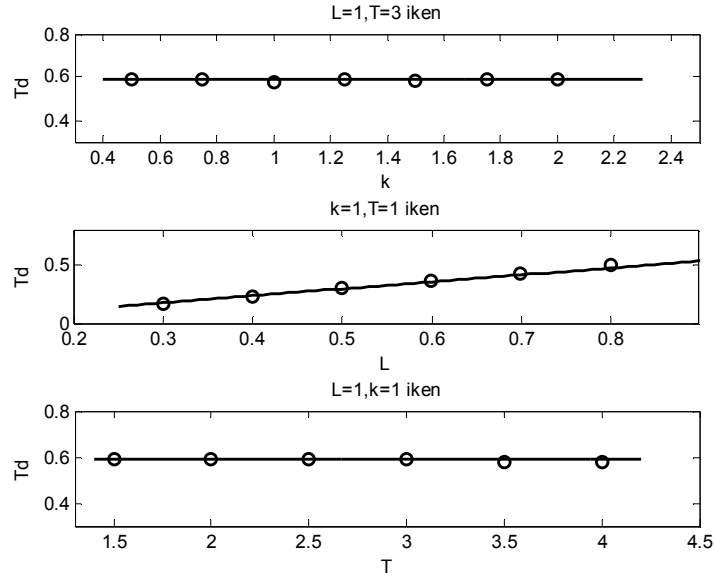


Şekil 3.20: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.21: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri.

Türev zaman katsayısı da oransal katsayı gibi her üç durum için de aynı olduğunu görmekteyiz. Türev zaman katsayısı sadece sistem ölü zamanına bağlı olarak değişmektedir.



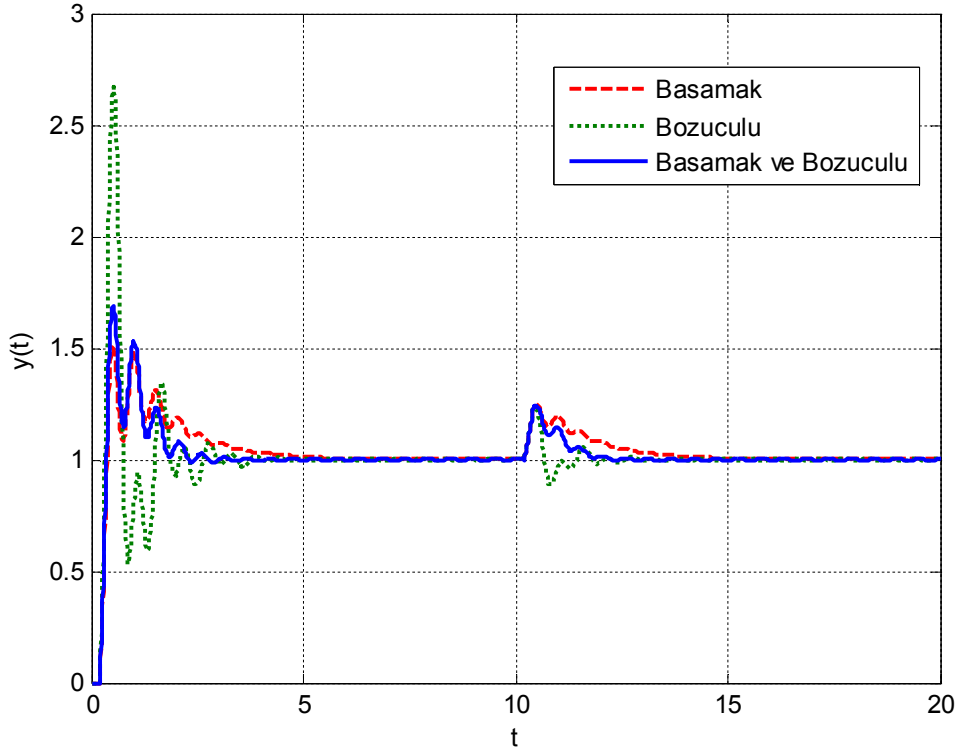
Şekil 3.22: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozucu yanıtının k , L ve T 'ye bağlı olarak T_d değişimleri.

Her üç durum incelendiği zaman, önemli değişikliklerin kontrolörün integral zaman katsayısında olduğu görülüyor. Oransal ve türevsel katsayılarında ise fazla bir değişiklik olmamıştır. Bu değişimleri Çizelge 3.23 de açıkça görebiliriz.

Çizelge 3.23: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozucu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri

$G(s)=ke^{-Ls}/Ts-1$	K_p	T_i	T_d
Basamak	$1.39T^{0.86}/kL^{0.86}$	$(1.8+4.3(L/T)^{2.2})T^{0.98}$	$0.6L$
Bozucu	$1.37T/kL$	$4.1L^{1.7}/T^{0.65}$	$0.6L$
Basamak ve Bozucu	$1.37T^{0.9}/kL^{0.9}$	$(3+0.9T^{0.8})L^{0.85}/k^{0.3}$	$0.59L$

Bu üç kontrol parametrelerini bir örnek üzerinde inceleyelim. Basamak ve bozucu etkili sistemlerde de ele aldığımız $G_p(s)=e^{-0.2s}/s-1$ sistemini bir de bulmuş olduğumuz bu kontrolör için deneyelim. Bu üç kontrolörü $t=10$ saniyede bozucu etki ederek denenmiştir. Beklenildiği gibi her iki durum içinde ideal bir kontrolör tasarlanmış olduğu Şekil 3.23 de verilmiştir. Basamak cevabında, bozucu sistemler için tasarlanan kontrolörün yapmış olduğu aşım engellenmiş. Bozucu etkili cevapta ise basamak cevabı için tasarlanan kontrolörün oturma zamanı geciktirilerek daha iyi bir kontrolör tasarlanmıştır.

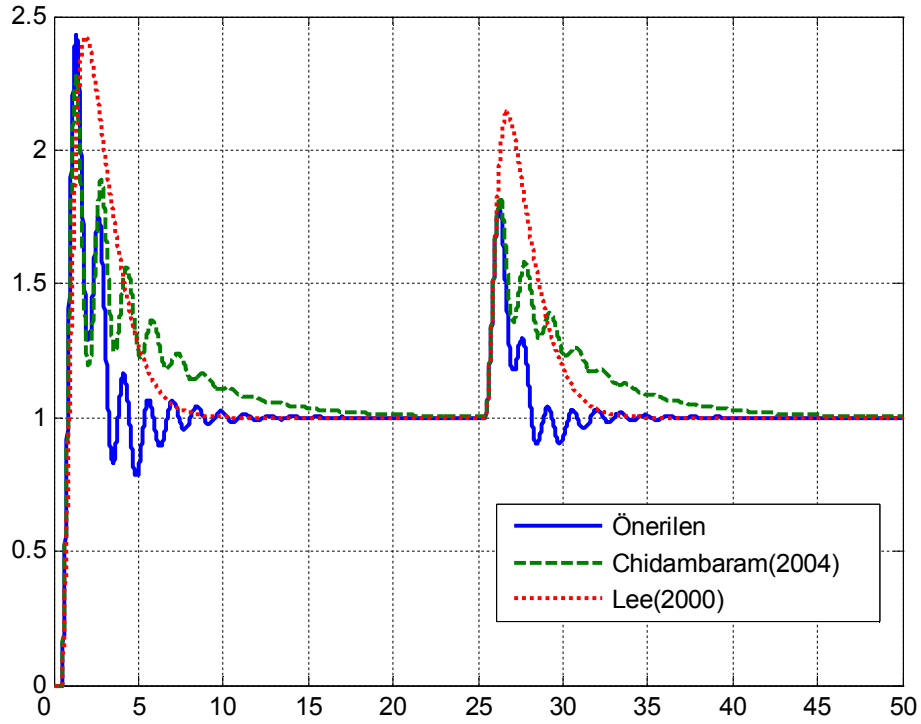


Şekil 3.23: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili G_p sisteminin bulunan farklı kontrolörler için sistem cevapları.

Denklem (3.13) de verilen birinci dereceden kararsız ve ölü zamanlı sistemi ele alalım.

$$G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{s-1} \quad (3.23)$$

PID kontrolör parametreleri, basamak ve bozucu etkili sistemlerin birlikte incelenerek belirlenen denklem (3.20-3.22) den hesaplanarak $K_p=2.56$, $T_i=2.16$ ve $T_d=0.295$ bulunmuştur. Verilen bu sistem Chidambaram (2004) ve Lee ve diğ. (2000) de önerilen PID kontrolörlerle karşılaştırılmıştır. Bu üç kontrolörün sistem cevapları Şekil 3.24 de verilmiştir. Sistemin birim basamak cevabı gözlenmiş ve 25. saniyede bozucu eklenmiştir. Sistem sonuçlarını incelersek, Chidambaram (2004) ve Lee ve diğ. (2000) e göre hem basamak cevabında hem de bozucu etkisi altında yerleşme zamanı olarak daha iyi bir sistem cevabı elde ettiğimizi görmekteyiz.



Şekil 3.24: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili örnek sistem cevaplarının karşılaştırılması.

Bu üç kontrolörün parametreleri ve ISE değerleri Çizelge 3.24 te verilmiştir. Performans kriterimiz olan ISE değerlerini Chidambaram (2004) ve Lee ve diğ. (2000) ile karşılaştıracak olursak, hem basamak hem de bozucu etkisi altında daha düşük bir ISE değeri elde ettiğimizi görüyoruz. Toplam ISE değerine bakacak olursak, tasarım kriteri olarak kullandığımız minimum ISE değerine ulaştığımızı görüyoruz.

Çizelge 3.24: Birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili örnek sistemin bulunan PID katsayıları ve ISE değerleri

$G(s)=e^{-0.5s}/s-1$	K_p	T_i	T_d	Basamak ISE değeri	Bozucu ISE değeri	Toplam ISE değeri
Önerilen	2.56	2.16	0.295	2.122	0.473	2.595
Chidambaram(2004)	2.62	8.375	0.245	2.572	1.172	3.744
Lee(2000)	1.86	5.78	0.185	4.335	2.365	6.7

3.4 Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemler

Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin en tipik özelliği kararlı bölgede bir kutbu bulunması ve ölü zaman etkisinden dolayı bir gecikme zamanının bulunmasıdır. Bu sistemde değişken olarak tanımlayabileceğimiz üç sistem parametresi vardır. Sistem transfer fonksiyonunu şu şekilde ifade edebiliriz.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (3.24)$$

Burada k sistem kazancı, L ölü zamanı, T ise sistem zaman katsayısını ifade etmektedir.

3.4.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi

Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak cevabı için ISE kriterini minimum yapan PID kontrolör katsayıları Çizelge A.1, Çizelge A.2 ve Çizelge A.3'te verilmiştir. Her bir sistem parametresi için ayrı bir tablo oluşturulmuştur. Bulunan her üç tabloda dikkate alınarak sistem parametrelerine bağlı olarak kontrolör parametrelerinin ara değerleri bulunmak istenmiştir. Bunun içinde yine genetik algoritma kullanılarak optimum denklemler elde edilmiştir.

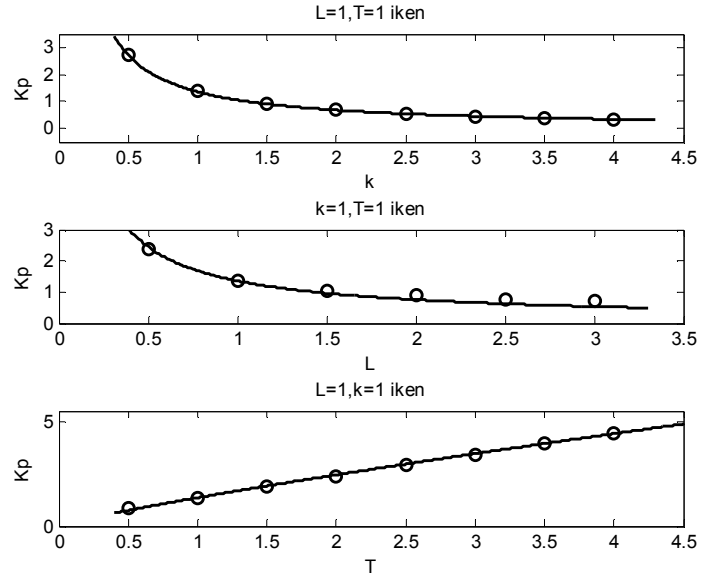
$$K_p = \frac{1.36T^{0.85}}{kL^{0.85}} \quad (3.25)$$

$$T_i = 1.4T + 0.41L \quad (3.26)$$

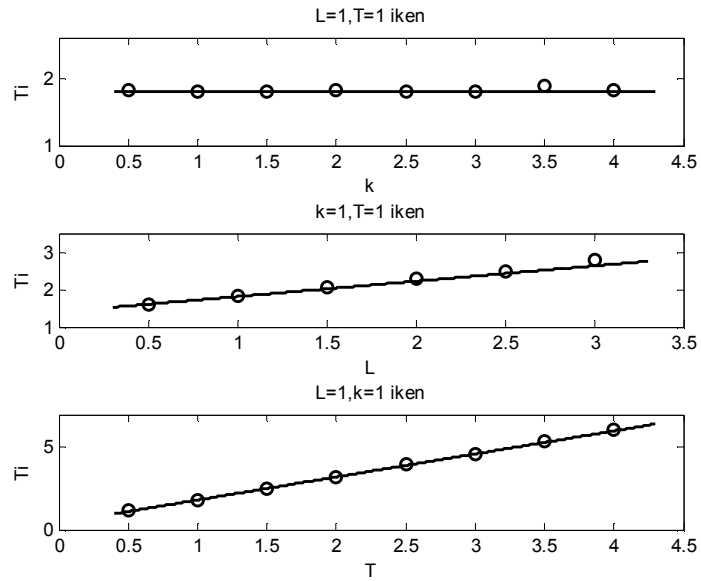
$$T_d = 0.4L^{0.8}T^{0.12} \quad (3.27)$$

Bulunmuş olan bu denklemlerin veriler üzerindeki yerleşimlerini inceleyelim. K_p , T_i ve T_d Denklemlerinin veriler ile karşılaştırılmaları Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'te verilmiştir.

Oransal katsayısı K_p her üç sistem parametresine de bağlıdır. Sistem kazanç katsayısına ve sistem ölü zaman katsayısına ters orantılı, sistem zaman katsayısı ile ise doğru orantılıdır.



Şekil 3.25: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri

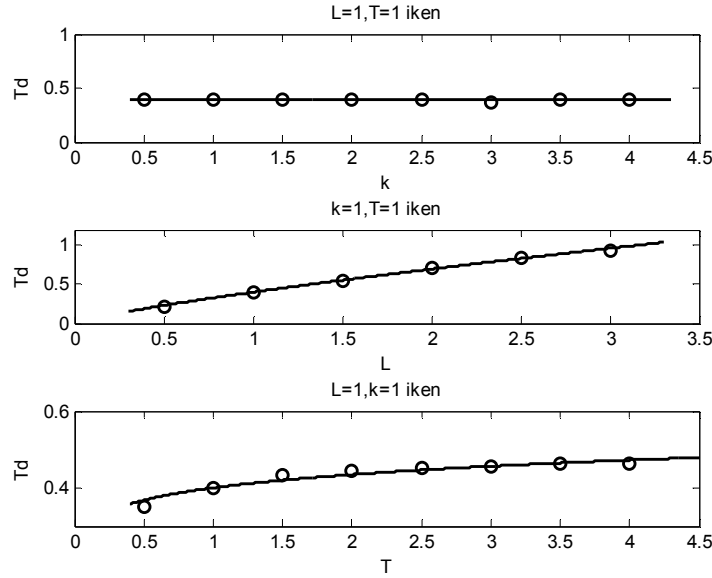


Şekil 3.26: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri

İntegral zaman katsayısını ise incelediğimizde, Şekil 3.23'ten de anlaşılacağı üzere sistem kazanç katsayısına bağlı değildir. Sistem zaman katsayısı ve sistemin ölü zamanıyla doğru orantılı olarak değişmektedir.

Türevsel zaman katsayısı da sistem kazanç katsayısından bağımsızdır. Sistem ölü zamanıyla doğru orantılı olarak değişmekle birlikte az da olsa sistem zaman katsayısının da etkisi olduğu görülüyor. Birinci dereceden kararsız ve ölü zamanlı sisteminde kontrolörün türevsel zaman sabiti sistem zaman katsayısından tamamen

bağımsızdı. Ancak bu sistemde az da olsa bir etkisi olduğu Şekil 3.24'te görülmektedir.



Şekil 3.27: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

3.4.2 Bozuculu sistem cevabının incelenmesi

Daha önceki sistemlerde de incelediğimiz gibi bu birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemde de bozucu etkisini inceleyeceğiz. Bozucu etkili sistemi incelemek için Şekil 3.1'deki birim geri beslemeli kontrol sistemi kullanılmıştır. Önceki sistemlerdeki gibi bozucu etkisi olarak, bozucu transfer fonksiyonu sistem transfer fonksiyonu ile eşit alınmıştır. Bu durumlar göz önüne alınarak yapılan genetik algoritma aratmalarıyla ISE kriterine göre sistem cevabını en iyi yapan PID parametreleri bulunmuştur. Bu parametreler ve ISE değerleri Çizelge A.4, Çizelge A.5 ve Çizelge A.6 da verilmiştir. Bulunan bu değerler incelenip, genetik algoritma kullanılarak verilere en uygun denklemler aşağıdaki gibi bulunmuştur.

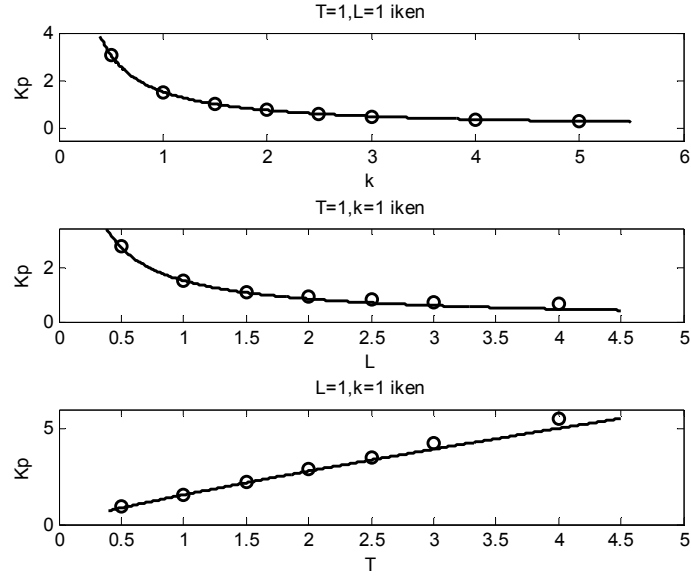
$$K_p = \frac{1.54T^{0.9}}{kL^{0.9}} \quad (3.28)$$

$$T_i = 0.89L^{0.75}T^{0.25} \quad (3.29)$$

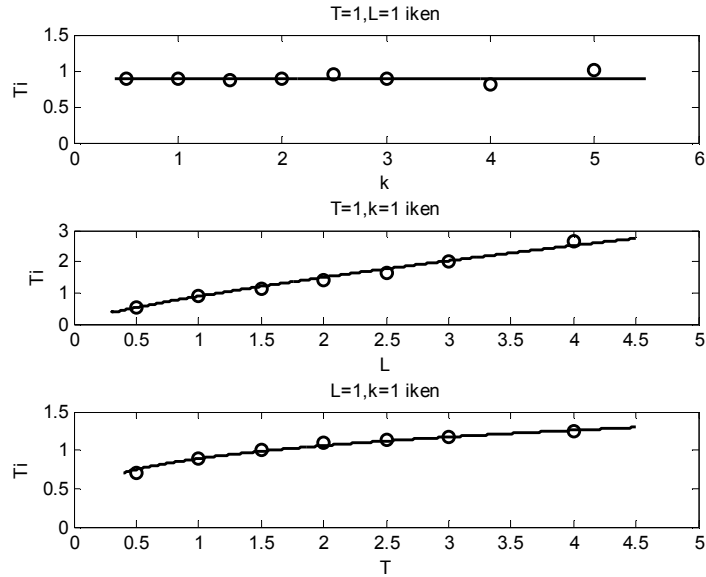
$$T_d = 0.54L^{0.75}T^{0.07} \quad (3.30)$$

Bulunan bu verileri teker teker incelediğimizde basamak cevabında bulunan değerlerle farklılıklar olduğunu görmekteyiz. Bu farklılıklar denklemlerde bir takım değişiklikler meydana getirmiştir. Bulmuş olduğumuz kontrolör parametrelerinin

sistem katsayılarına göre değişimleri Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’de verilmiştir. Aynı zamanda bu grafiklerde bulunmuş olunan formüllerin, genetik algoritma ile bulunmuş verilere uygunluğu da görülmektedir.

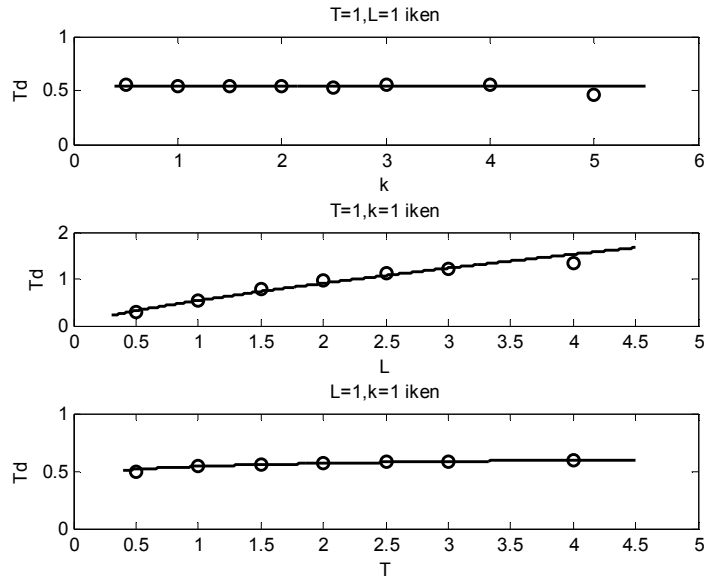


Şekil 3.28: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.29: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri

K_p parametresine baktığımızda, sistem kazancı ve sistem ölü zamanı arttıkça oransal kazanç azalmakta, sistem zaman sabiti arttıkça ise artmaktadır. T_i ve T_d parametreleri ise sadece sistem zaman katsayısı ve sistem ölü zamanı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 3.30: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

3.4.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabının birlikte incelenmesi

Basamak cevabında bulunan değerler bozuculu sistemde, bozuculu sistemde bulunan değerlerde basamak cevabında iyi bir sonuç vermemektedir. Bu yüzden her iki duruma da uyacak bir formül bulmak için hem basamak cevabını hem de bozuculu cevabını birlikte incelendi. PİD katsayılarını sistem parametrelerine bağlı olarak belirlenmesi için ISE değerlerini minimum yapan kontrolör katsayıları ve ISE değerleri Çizelge A.7, Çizelge A.8 ve Çizelge A.9 da verilmiştir.

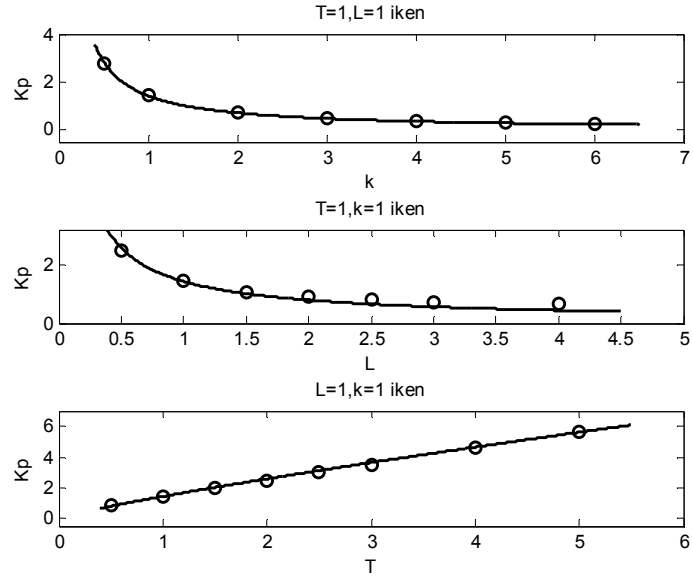
Genetik algoritma ile bulunan bu değerler dikkate alınarak hesaplanan PİD kontrolör parametreleri aşağıda verilmiştir.

$$K_p = \frac{1.43T^{0.85}}{kL^{0.85}} \quad (3.31)$$

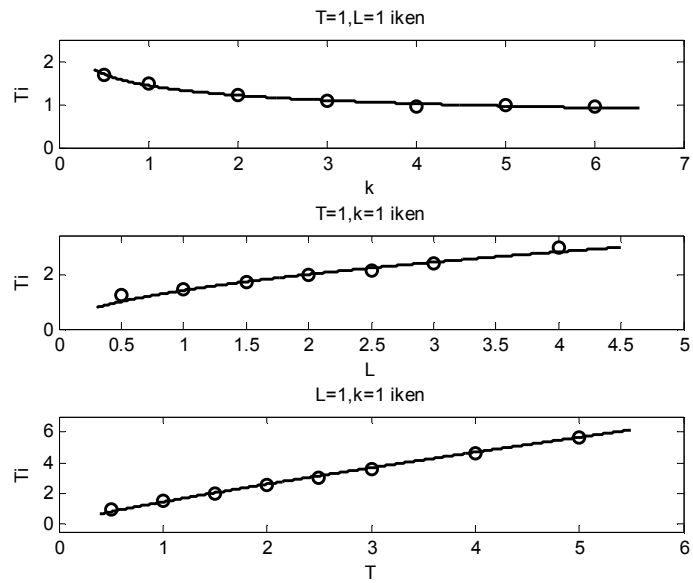
$$T_i = \frac{1.44L^{0.5}T^{0.85}}{k^{0.25}} \quad (3.32)$$

$$T_d = 0.47L^{0.8}T^{0.1} \quad (3.33)$$

Oransal katsayının sistem parametrelerine göre değişimleri Şekil 3.31 de verilmiştir. Sistem kazanç katsayısı ve sistem ölü zaman katsayısı ile ters orantılı, sistem zaman sabiti ile ise doğru orantılı olarak değişmektedir.

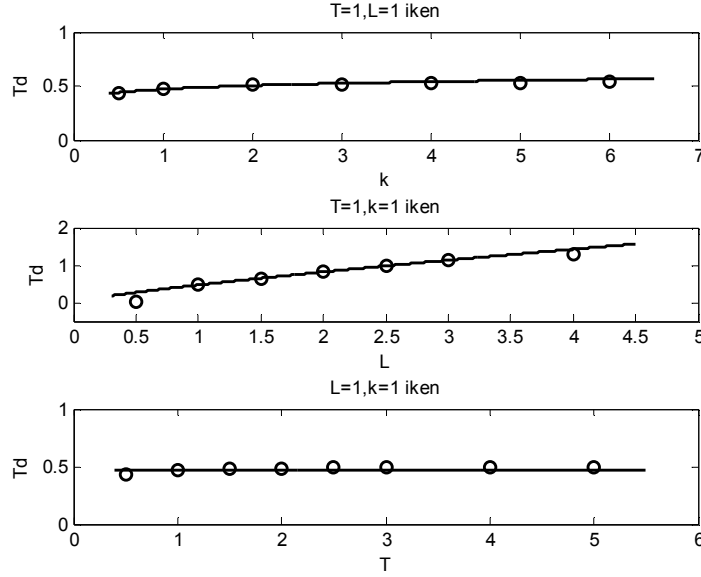


Şekil 3.31: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.32: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri

İntegral zaman katsayısının sistem parametrelerine göre değişimleri Şekil 3.32 de verilmiştir. Basamak cevabı ve bozuculu cevaptan farklı olarak sistem kazanç katsayısı ile ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 3.33: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

Türevsel zaman katsayısının sistem parametrelerine göre değişimleri Şekil 3.33'da verilmiştir. Sistem kazanç katsayısı ve sistem ölü zaman katsayısı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

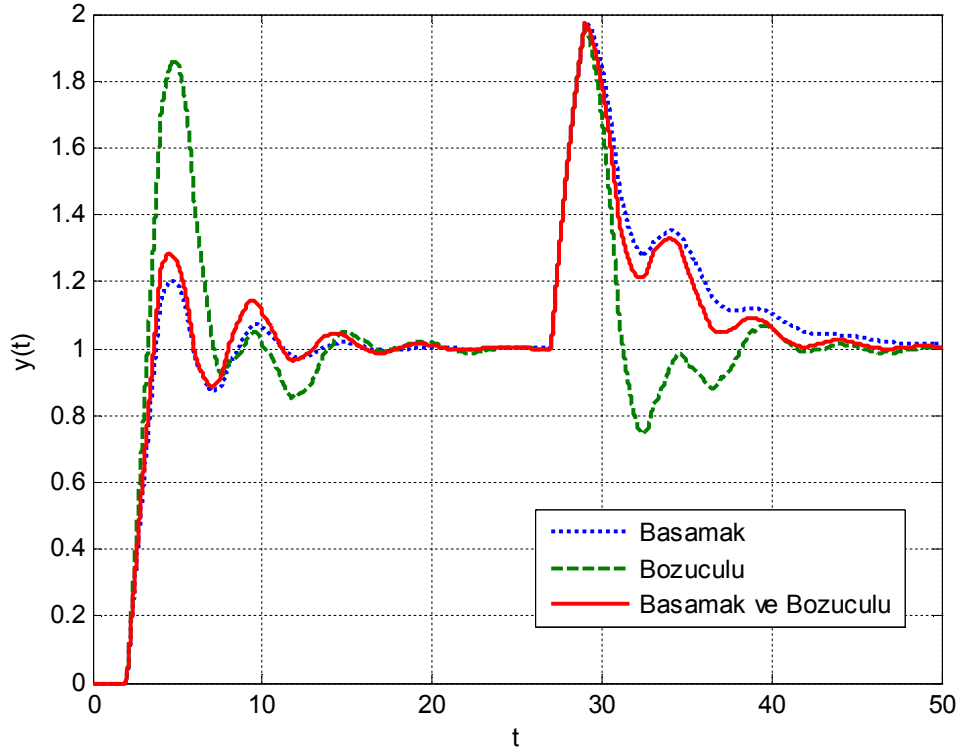
Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemler için belirlenen PID katsayıları Çizelge 3.25 te verilmiştir. Tabloda da görüldüğü üzere her istenen sistem durumları için farklı PID kontrolör parametreleri bulunmuştur.

Çizelge 3.25: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozuculu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.

$G(s)=ke^{-Ls}/Ts+1$	K_p	T_i	T_d
Basamak	$1.36T^{0.85}/kL^{0.85}$	$1.4T+0.41L$	$0.4L^{0.8}T^{0.12}$
Bozuculu	$1.54T^{0.9}/kL^{0.9}$	$0.89L^{0.75}T^{0.25}$	$0.54L^{0.75}T^{0.07}$
Basamak ve Bozuculu	$1.43T^{0.85}/kL^{0.85}$	$1.44T^{0.85}L^{0.5}/k^{0.25}$	$0.47L^{0.8}k^{0.1}$

Bu üç kontrolör parametresini bir örnek üzerinde inceleyelim. Örnek olarak $G_s(s)=2e^{-2s}/3s+1$ sistemini ele alalım. Her üç PID kontrolörlerin sistem üzerindeki cevapları Şekil 3.34 te gösterilmiştir. Kontrol sistemine $t=25$ saniyede bozucu eklenmiştir. Bozucu transfer fonksiyonu olarak yine sistem transfer fonksiyonuna eşit alınmıştır. ISE kriteri olarak en iyi basamak sistem cevabı için tasarlanan kontrolörle basamak ve bozucu etkili sistem için tasarlanan kontrolörün cevaplarının

birbirine yaklaşık olarak aynı olduğu görülüyor. Basamak cevabında aşımı arttırarak, bozucu etkisi altında ise yerleşim zamanını düşmüştür.



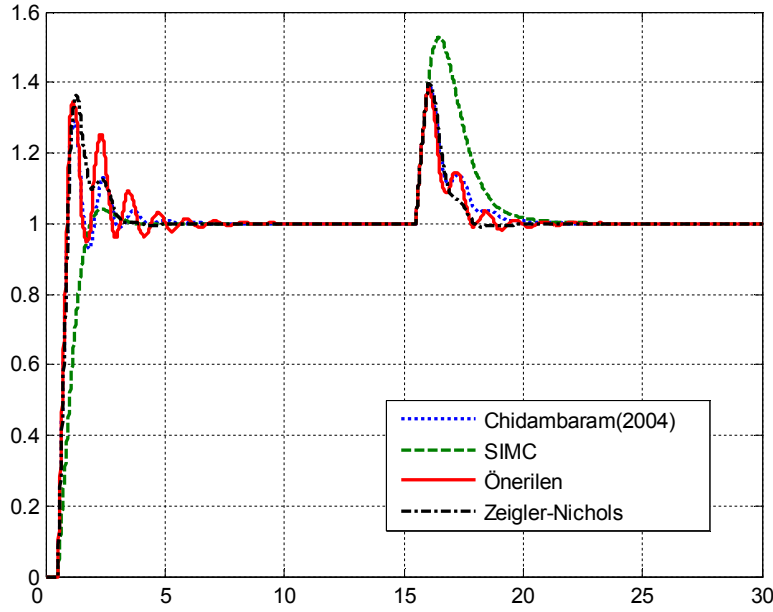
Şekil 3.34: G_s sisteminin bulunan farklı kontrolörler için sistem cevapları karşılaştırılması.

Denklem (3.24) de verilen birinci dereceden kararsız ve ölü zamanlı sistemi ele alalım.

$$G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{s+1} \quad (3.34)$$

PID kontrolör parametreleri, basamak ve bozucu etkili sistemlerin birlikte incelenerek belirlenen denklem (3.31-3.33) den hesaplanarak $K_p=2.578$, $T_i=1.018$ ve $T_d=0.27$ bulunmuştur. Verilen bu sistem Chidambaram (2004), SIMC ve Zeigler-Nichols yöntemlerinde önerilen PID kontrolörle karşılaştırılmıştır. Bu dört kontrolörün sistem cevapları Şekil 3.35 de verilmiştir. Sistemin birim basamak cevabı gözlenmiş ve 15. saniyede bozucu eklenmiştir. Sistem sonuçlarını incelersek, Chidambaram (2004) a göre hem basamak cevabında hem de bozucu etkisi altında

hemen hemen aynı sonucu verdiğini görmekteyiz. Sadece basamak cevabındaki aşım biraz daha fazladır.



Şekil 3.35: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili örnek sistem cevaplarının karşılaştırılması.

Bu üç kontrolörün parametreleri ve ISE değerleri Çizelge 3.26 te verilmiştir. Performans kriterimiz olan ISE değerlerini karşılaştıracak olursak, Chidambaram(2004) da basamak cevabında, önerilende ise bozucu etkisi altında daha düşük bir ISE değeri elde ettiğimizi görüyoruz. Toplam ISE değerine bakacak olursak, tasarım kriteri olarak kullandığımız minimum ISE değerlerinin aynı olduğunu görüyoruz.

Çizelge 3.26: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistem için örnek verilen sistemin PID katsayıları ve ISE değerleri

$G(s)=e^{-0.5s}/s+1$	K_p	T_i	T_d	Basamak ISE değeri	Bozucu ISE değeri	Toplam ISE değeri
Önerilen	2.58	1.02	0.27	0.7034	0.0934	0.7968
Chidambaram(2004)	2.5	1.25	0.2167	0.6748	0.1102	0.785
SIMC	1	1	-	0.8429	0.3601	1.203
Zeigler-Nichols	2.28	0.875	0.21875	0.7181	0.1042	0.8223

3.5 Çift katlı İntegral ve Ölü Zaman Etkili Sistemler

Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin en belirgin özellikleri orijinde çift katlı kutbu olması ve ölü zaman etkisinden dolayı bir gecikme zamanı bulunmaktadır. Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemler birçok kimyasal ve endüstriyel süreci tanımlaması açısından transfer fonksiyonu modelini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{s^2} \quad (3.35)$$

Burada k sistem kazancı, L ise ölü zamanı ifade etmektedir.

3.5.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi

Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemin basamak cevabı için genetik algoritma kullanarak ISE kriterini minimize eden optimal PID katsayıları Çizelge A.10 ve Çizelge A.11 de verilmiştir. Bu sistemde iki parametre olduğu için iki tane ayrı ayrı tablo oluşturulmuştur.

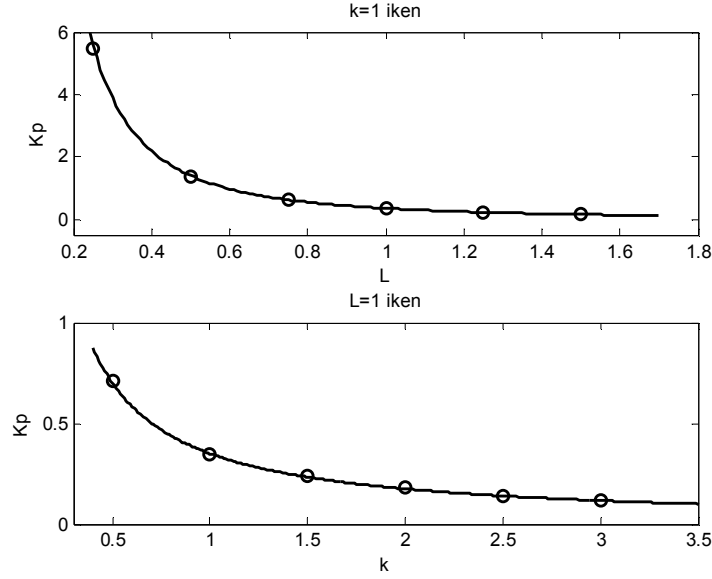
Bulunan her iki tablodaki değerler dikkate alıp, sistem parametrelerine bağlı olarak K_p , T_i ve T_d değerlerinin kestirim hatalarının mutlak değerlerinin toplamı minimize edilerek formüle edilmiştir.

$$K_p = \frac{0.35}{kL^2} \quad (3.36)$$

$$T_d = 2.8L \quad (3.37)$$

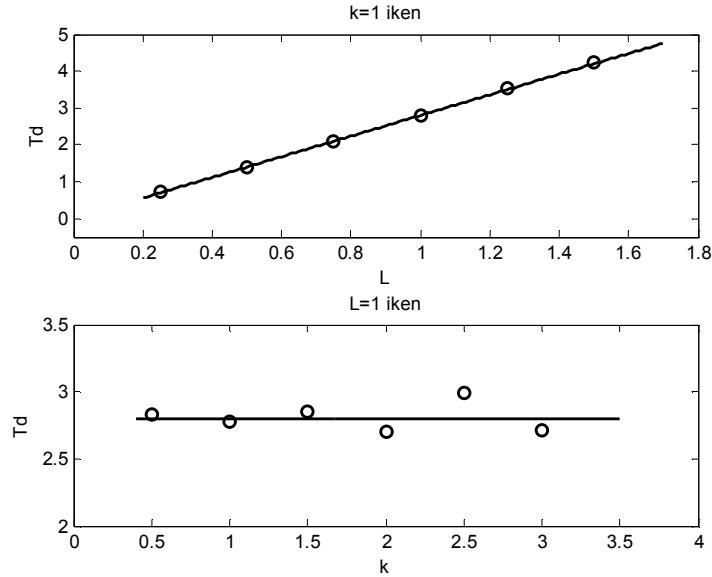
Yukarıdaki değerlerden de anlaşılacağı üzere PD kontrolör elde edilmiştir. Genetik algoritma ile bulunan T_i değerleri çok büyük, dolayısıyla K_i değeri sıfıra çok yakın olduğu için kontrolörün integral etkisi alınmamıştır.

K_p parametresini incelediğimizde, sistemin kazanç ve ölü zaman katsayıları ile ters orantılı olduğu Şekil 3.36 de görülmektedir. Ancak sistem ölü zaman sabitinin etkisi, sistem kazanç katsayısının etkisinden daha fazladır.



Şekil 3.36: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı için k ve L 'ye bağlı olarak K_p değişimleri

Türevsel zaman katsayısını incelediğimizde ise sistem kazanç katsayısından bağımsız olarak, sadece sistem ölü zaman katsayısıyla ters orantılı olarak değişmektedir. Bu değişim Şekil 3.37 de verilmiştir.



Şekil 3.37: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı için k ve L 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

3.5.2 Bozuculu sistem cevabının incelenmesi

Basamak sistem cevabını incelediğimiz sistemin bir de bozucu etkili sistem cevabını inceleyeceğiz. Bozucu etkili sistemi incelemek için Şekil 3.1'deki birim geri

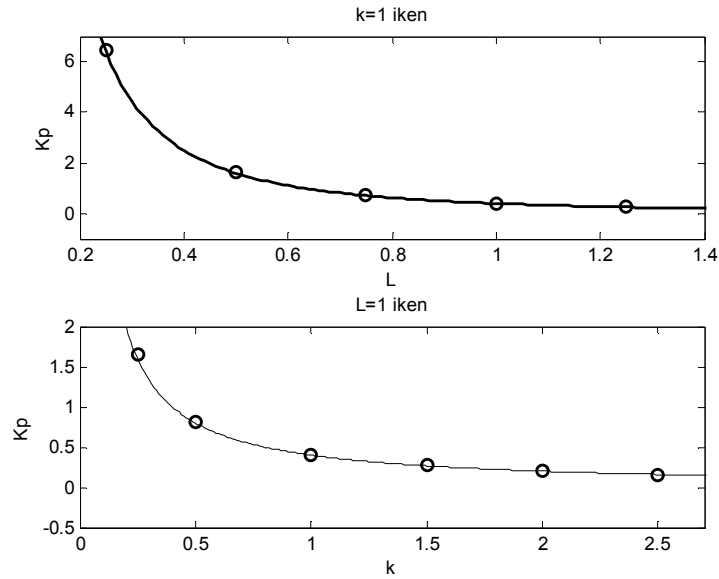
beslemeli kontrol sistemi kullanılmıştır. Önceki sistemlerdeki gibi bozucu etkisi olarak, bozucu transfer fonksiyonu sistem transfer fonksiyonu ile eşit alınmıştır. Bu durumlar göz önüne alınarak yapılan genetik algoritma aratmalarıyla ISE kriterine göre sistem cevabını en iyi yapan PİD parametreleri bulunmuştur. Bu parametreler ve ISE değerleri Çizelge A.12 ve Çizelge A.13 te verilmiştir. Bulunan bu değerler incelenip, genetik algoritma kullanılarak verilere en uygun denklemler aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$K_p = \frac{0.4}{kL^2} \quad (3.38)$$

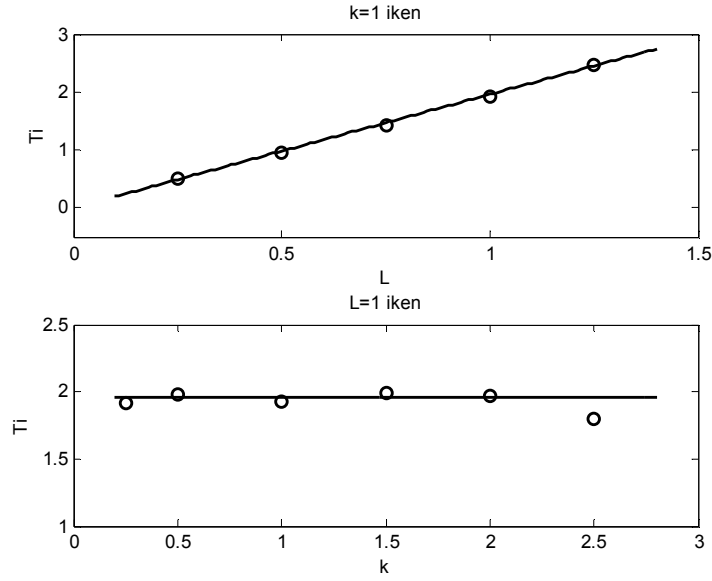
$$T_i = 1.96L \quad (3.39)$$

$$T_d = 3.13L \quad (3.40)$$

K_p parametresini incelediğimizde, sistemin kazanç katsayısı ve sistem ölü zamanıyla ters orantılıdır. Şekil 3.38 de de genetik algoritma ile bulunan K_p değerlerinin, bulunmuş olan formüller üzerindeki yerleşimleri gösterilmiştir.



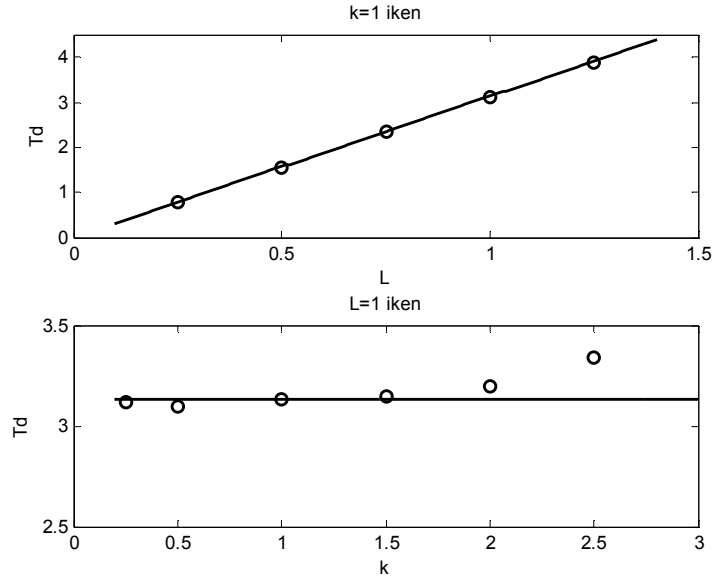
Şekil 3.38: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtı için k ve L 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.39: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtı için k ve L 'ye bağlı olarak T_i değişimleri

T_i parametresinin sistem katsayılarına göre değişimleri Şekil 3.39 da verilmiştir. Sistem kazancından bağımsız olarak sadece sistem ölü zamanıyla doğru orantılı olarak değişmektedir.

T_d parametresi de integral zaman katsayısı ile benzer şekilde sadece sistem ölü zamanına bağlı olarak ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 3.40: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtı için k ve L 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

3.5.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabının birlikte incelenmesi

Basamak cevabında bulunan değerler bozuculu sistemde, bozuculu sistemde bulunan değerlerde basamak cevabında iyi bir sonuç vermediğinden her iki duruma da uyacak bir formül bulmak için hem basamak sistem cevabı hem de bozucu etkili sistem cevabı birlikte incelendi. PID katsayılarını sistem parametrelerine bağlı olarak belirlenmesi için ISE değerlerini minimum yapan kontrolör katsayıları ve ISE değerleri Çizelge A.14 ve Çizelge A.15 te verilmiştir.

Bulunan bu değerler sistem parametrelerinin değişimlerine göre kontrolör parametrelerinin değişimlerini göstermektedir. Bu veriler dikkate alınarak en uygun şekilde oluşturulan PID parametreleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

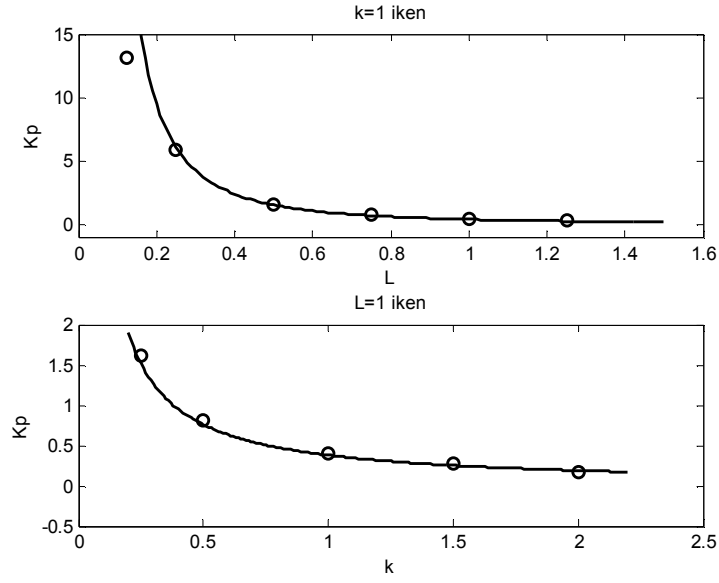
$$K_p = \frac{0.38}{kL^2} \quad (3.41)$$

$$T_i = (1.92 + 0.4/L)/k^{0.5} \quad (3.42)$$

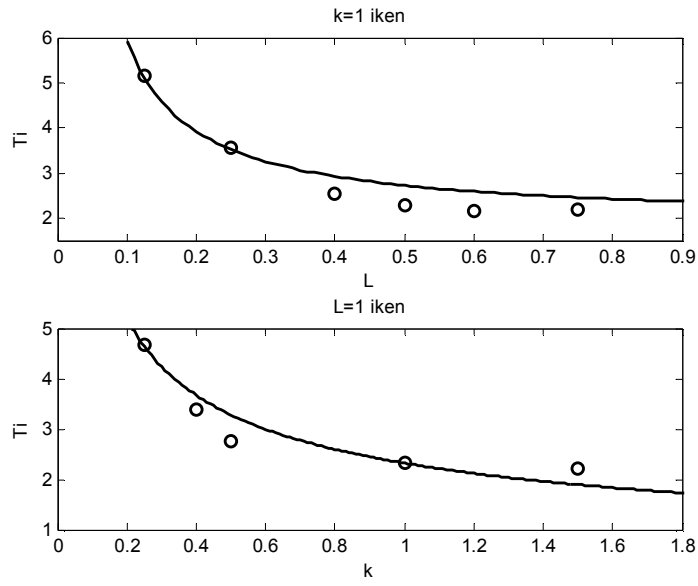
$$T_d = 3.1Lk^{0.06} \quad (3.43)$$

Bulmuş olduğumuz bu denklemleri genetik algoritma ile bulmuş olduğumuz verilerle uygunluğunu bir de grafikler üzerinde görelim. PID kontrolör parametreleri K, T ve T_d 'nin sistem parametreleriyle değişimleri sırasıyla Şekil 3.41, Şekil 3.42 ve Şekil 3.43 te verilmiştir.

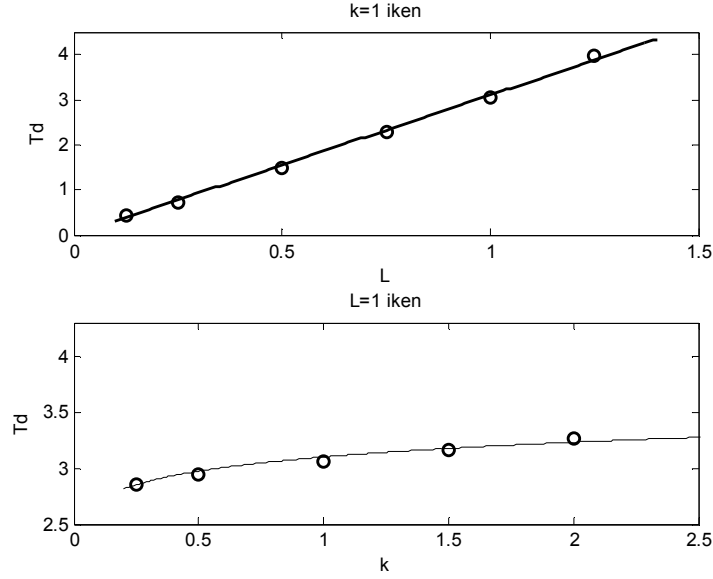
K_p parametresi, sistem parametreleri k ve L ile ters orantılı olarak değişmektedir. T_i parametresini incelediğimizde, genetik algoritma ile bulunan verilerle bulunan denklem arasında farklılar olduğu görülüyor. Bu durum genetik algoritma ile aratma sırasında meydana gelen farklı T_i değerlerinden kaynaklanmaktadır. Hem basamak cevabı hem de bozucu etki cevabı aynı anda incelendiği için sadece integral zaman katsayısında değişik cevaplar aldığımızı gördük. Bu nedenle ortalama bir değer alıp formüle ettiğimizde integral zaman katsayısında böyle bir farklılık ortaya çıkmıştır. Ancak yapmış olduğumuz benzetim sonuçlarında integral zaman katsayısındaki bu farklılık fazla bir değişiklik yapmadığını gördüğümüz için bu denklem kullanılmıştır. Türevsel zaman sabiti ise sistem parametreleri ile doğru orantılıdır. Sistem kazancının türevsel zaman katsayısında az da olsa bir etkisi gözükmemektedir.



Şekil 3.41: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k ve L 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.42: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k ve L 'ye bağlı olarak T_i değişimleri



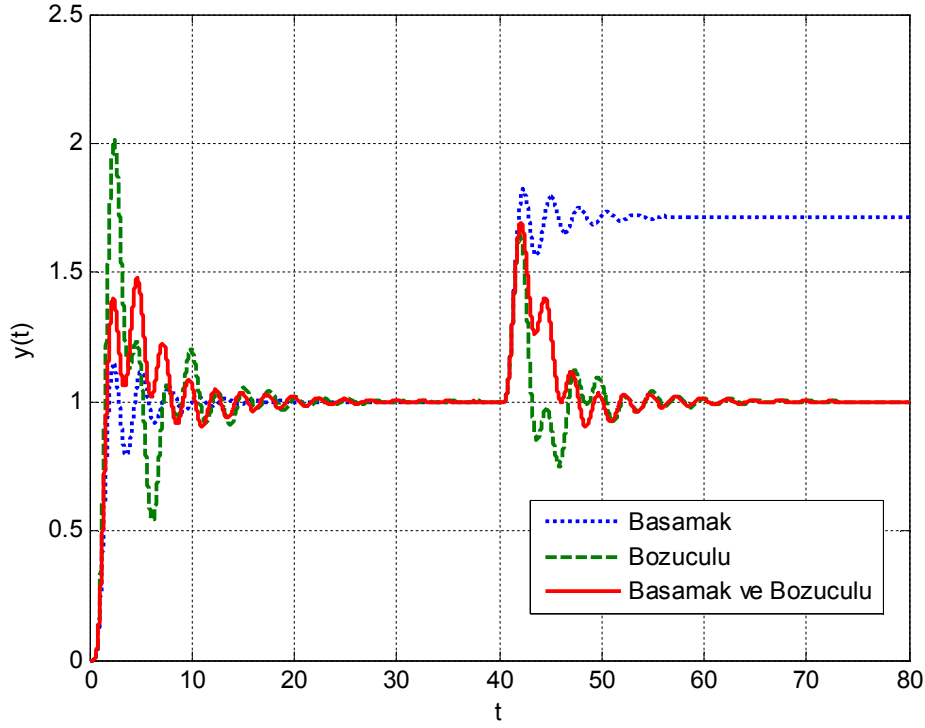
Şekil 3.43: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k ve L 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

Her üç durum için bulduğumuz PİD kontrolör parametreleri Çizelge 3.27 de verilmiştir. Tabloda da görüldüğü üzere her istenen sistem durumları için farklı PİD kontrolör parametreleri bulunmuştur.

Çizelge 3.27: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozuculu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.

$G(s)=ke^{-Ls}/Ts^2$	K_p	T_i	T_d
Basamak	$0.35/kL^2$	-	$2.8L$
Bozuculu	$0.4/kL^2$	$1.96L$	$3.13L$
Basamak ve Bozuculu	$0.38/kL^2$	$(1.92+0.4/L)/k^{0.5}$	$3.1Lk^{0.06}$

Bu üç kontrolör parametresini bir örnek üzerinde inceleyelim. Örnek olarak $G_D(s)=e^{-0.5s}/s^2$ sistemini ele alalım. Her üç PİD kontrolörlerin sistem üzerindeki cevapları Şekil 3.44 te gösterilmiştir. Kontrol sistemine $t=40$ saniyede bozucu eklenmiştir. Bozucu transfer fonksiyonu olarak yine sistem transfer fonksiyonuna eşit alınmıştır. ISE kriteri olarak en iyi basamak ve bozucu etkili sistem cevabı, en iyi basamak sistem cevabı ve en iyi bozucu etkili sistem cevabının beklenildiği gibi ara bir değerde olduğu görülüyor. Basamak ve bozuculu sistemler için tasarlanan PİD kontrolörü, basamak cevabında aşımı azaltarak, bozucu etkisi altında ise kararlı hal hatasını gidermiştir.

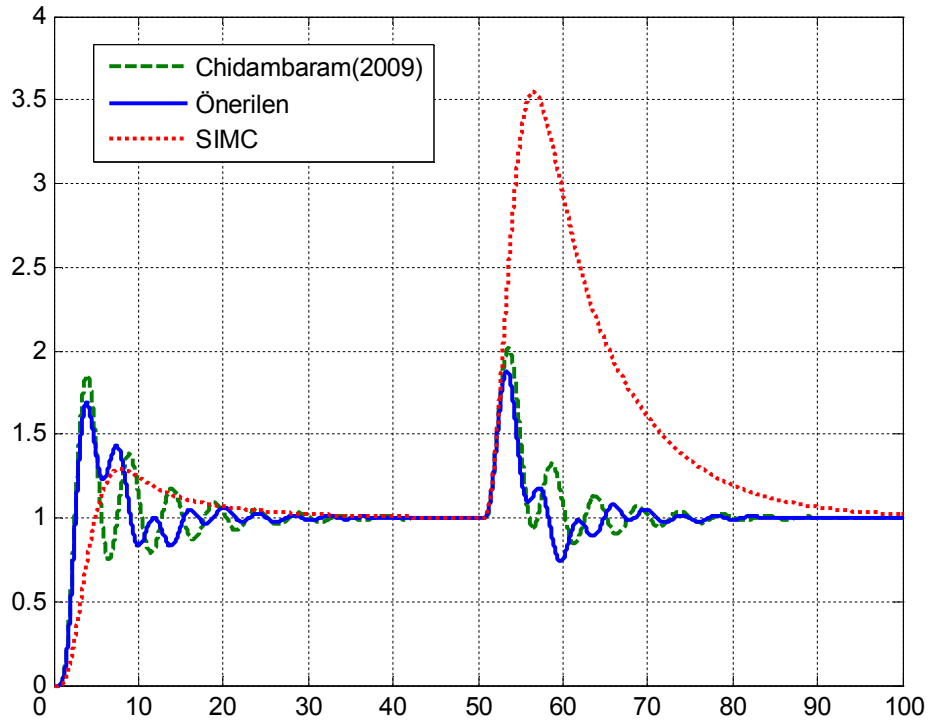


Şekil 3.44: G_s sisteminin bulunan farklı kontrolörler için sistem cevapları karşılaştırılması

Denklem (3.35) de verilen çift katlı integral ve ölü zamanlı sistemi ele alalım.

$$G(s) = \frac{e^{-0.8s}}{s^2} \quad (3.44)$$

PID kontrolör parametreleri, basamak ve bozucu etkili sistemlerin birlikte incelenerek belirlenen denklem (3.41-3.43) den hesaplanarak $K_p=0.594$, $T_i=2.42$ ve $T_d=2.48$ bulunmuştur. Verilen bu sistem Chidambaram (2009) ve SIMC yöntemlerinde önerilen PID kontrolörlerle karşılaştırılmıştır. Bu üç kontrolörün sistem cevapları Şekil 3.45 de verilmiştir. Sistemin birim basamak cevabı gözlenmiş ve 50. saniyede bozucu eklenmiştir. Sistem sonuçlarını incelersek, Chidambaram (2009) a göre hem basamak cevabında hem de bozucu etkisi altında aşımın daha düşük, yerleşim zamanlarının ise aynı olduğunu görülmektedir. SIMC yönteminde ise bozucu etkisi altında diğer sistem cevaplarına göre çok fazla aşım yaptığı görülmüştür.



Şekil 3.45: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili örnek sistem cevaplarının karşılaştırılması.

Bu üç kontrolörün parametreleri ve ISE değerleri Çizelge 3.28 de verilmiştir. Performans kriterimiz olan ISE değerlerini Chidambaram (2009) ile karşılaştıracak olursak, hem basamak cevabında hem de bozucu etkisi altında daha düşük bir ISE değeri elde ettiğimizi görüyoruz. Toplam ISE değerine bakacak olursak, tasarım kriteri olarak kullandığımız minimum toplam ISE değerlerinin daha düşük olduğunu görüyoruz.

Çizelge 3.28: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili örnek sistemin PID katsayıları ve ISE değerleri

$G(s)=e^{-0.8s}/s^2$	K_p	T_i	T_d	Basamak ISE değeri	Bozucu ISE değeri	Toplam ISE değeri
Önerilen	0.594	2.42	2.48	2.897	6.555	9.452
Chidambaram(2009)	0.6807	4.4	1.7091	3.199	9.231	12.43
SIMC	0.097	6.4	6.4	3.132	50.488	53.62

3.6 İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemler

İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin en belirgin özellikleri kararlı bölgede ve orijinde iki kutbu bulunması ve ölü zaman etkisinden dolayı bir gecikme zamanının bulunmasıdır. Bu sistemde değişken olarak tanımlayabileceğimiz üç parametre bulunmaktadır. Sistem transfer fonksiyonunu aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{s(Ts+1)} \quad (3.45)$$

Burada k sistem kazancı, L ölü zamanı, T ise sistem zaman katsayısını ifade etmektedir.

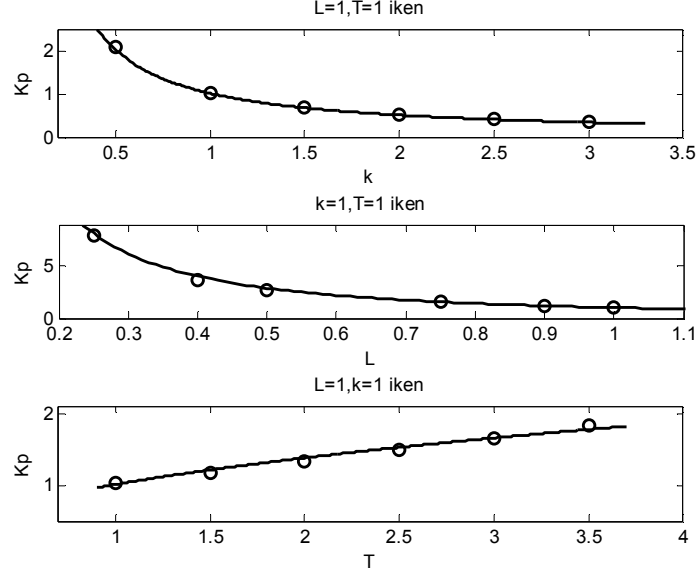
3.6.1 Basamak sistem cevabının incelenmesi

İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemin basamak cevabı için genetik algoritma ile minimize edilen ISE kriteri ve PİD katsayıları Çizelge A.16, Çizelge A.17 ve Çizelge A.18 de verilmiştir. Bulunan bu veriler dikkate alınarak yine genetik algoritma kullanılarak belirlenen PİD katsayıları aşağıdaki gibidir.

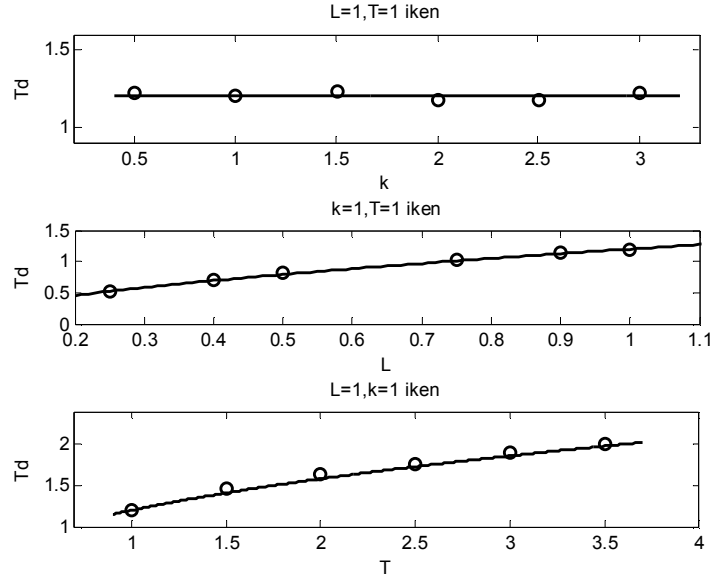
$$K_p = \frac{1.01T^{0.45}}{kL^{1.5}} \quad (3.46)$$

$$T_d = 1.2L^{0.6}T^{0.4} \quad (3.47)$$

Bulunan bu kontrolör bir PD kontrolördür. İntegral zaman katsayısı çok büyük bir başka değişle, integral katsayısı K_i sıfıra yakın olduğu için kontrolün integral etkisi alınmamıştır. PD kontrolörünün K_p ve T_d parametrelerinin grafikleri sırasıyla Şekil 3.46 ve Şekil 3.47 de verilmiştir. Bu grafiklerde aynı zamanda genetik algoritma ile bulunan verilerin denklemlere uygunluğu da gösterilmiştir.



Şekil 3.46: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.47: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

3.6.2 Bozuculu sistem cevabının incelenmesi

Daha önceki sistemlerde de incelediğimiz gibi bu integral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemde de bozucu etkisini inceleyeceğiz. Çünkü basamak cevabında bulunan sistem cevabı bozucu etkisi altında kararlı hal hatası vermektedir. Bozucu etkili sistemi incelemek için Şekil 3.1'deki birim geri beslemeli kontrol sistemi kullanılmıştır. Önceki sistemlerdeki gibi bozucu etkisi olarak, bozucu transfer fonksiyonu sistem transfer fonksiyonu ile eşit alınmıştır. Bu durumlar göz

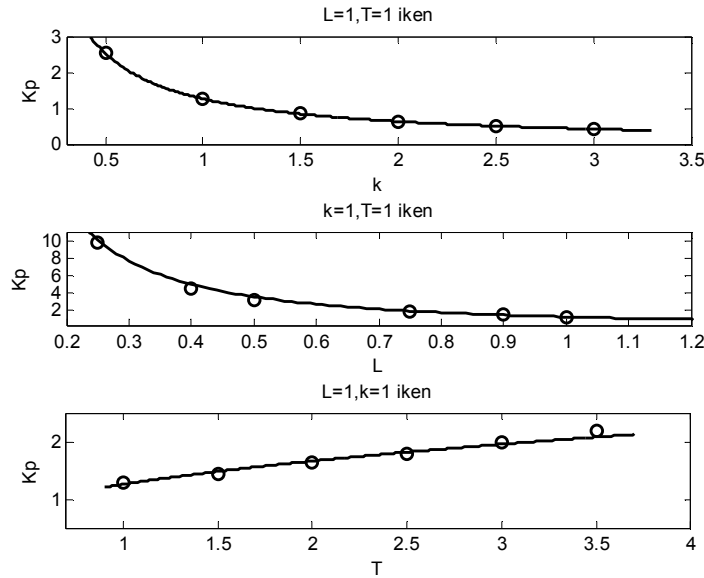
önüne alınarak yapılan genetik algoritma aratmalarıyla ISE kriterine göre sistem cevabını en iyi yapan PİD parametreleri bulunmuştur. Bu parametreler ve ISE değerleri Çizelge A.19, Çizelge A.20 ve Çizelge A.21’te verilmiştir. Bulunan bu değerler incelenip, genetik algoritma kullanılarak verilere en uygun denklemler aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$K_p = \frac{1.26T^{0.4}}{kL^{1.5}} \quad (3.48)$$

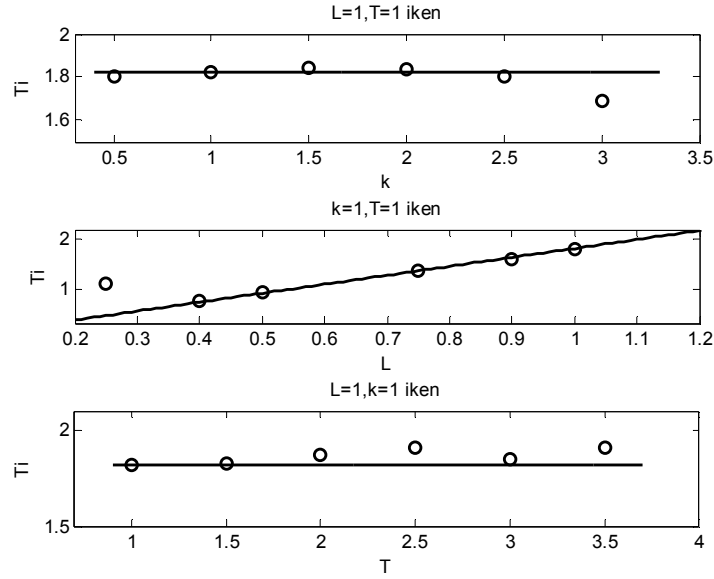
$$T_i = 1.82L \quad (3.49)$$

$$T_d = 1.41L^{0.6}T^{0.4} \quad (3.50)$$

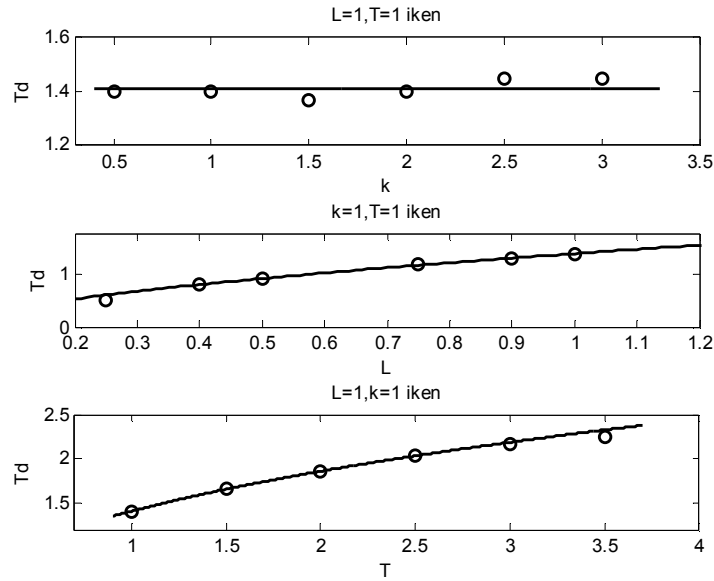
Bulunan bu verileri teker teker incelediğimizde basamak cevabında bulunan değerlerle farklılıklar olduğunu görmekteyiz. Bu farklılıklar denklemlerde bir takım değişiklikler meydana getirmiştir. Bulmuş olduğumuz kontrolör parametrelerinin sistem katsayılarına göre değişimleri Şekil 3.48, Şekil 3.49 ve Şekil 3.50 de verilmiştir. Aynı zamanda bu grafiklerde bulunmuş olunan formüllerin, genetik algoritma ile bulunmuş verilere uygunluğu da görülmektedir.



Şekil 3.48: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.49: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri



Şekil 3.50: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_d değişimleri

3.6.3 Basamak ve bozuculu sistem cevabının birlikte incelenmesi

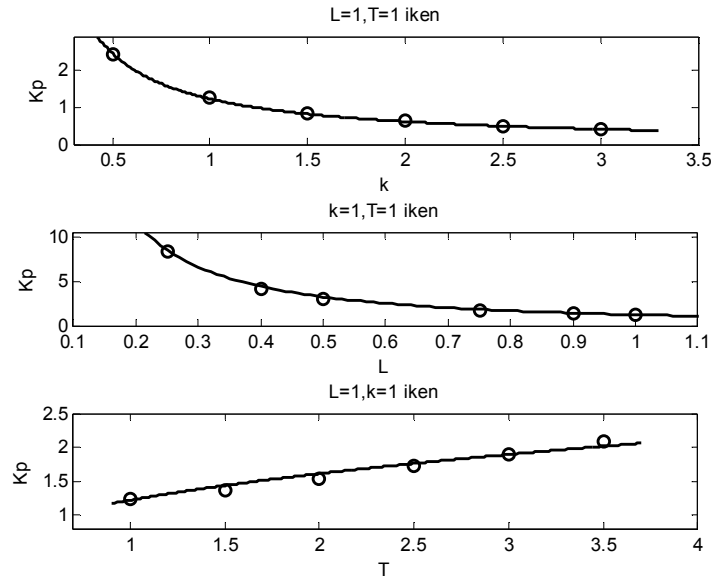
İntegral etkili birinci dereceden kararsız ve ölü zaman etkili sistemin basamak ve bozucu etkili sistem cevaplarını inceledik ve minimum ISE kriterini sağlayacak PİD kontrolör parametrelerini bulduk. Şimdi de her iki durumu birlikte inceleyerek bulunan optimum PİD katsayıları ve ISE değerleri Çizelge A.22, Çizelge A.23 ve Çizelge A.24'te verilmiştir. Bu verileri göz önünde bulundurarak genetik algoritma yardımıyla bulunan PİD katsayıları aşağıdaki verilmiştir.

$$K_p = \frac{1.22T^{0.4}}{kL^{1.4}} \quad (3.51)$$

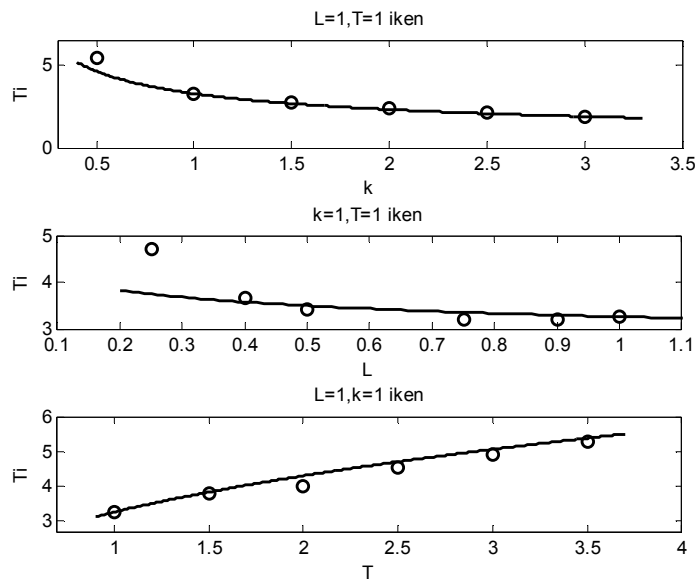
$$T_i = \frac{3.26T^{0.4}}{k^{0.5}L^{0.1}} \quad (3.52)$$

$$T_d = 1.32L^{0.65}T^{0.4}k^{0.1} \quad (3.53)$$

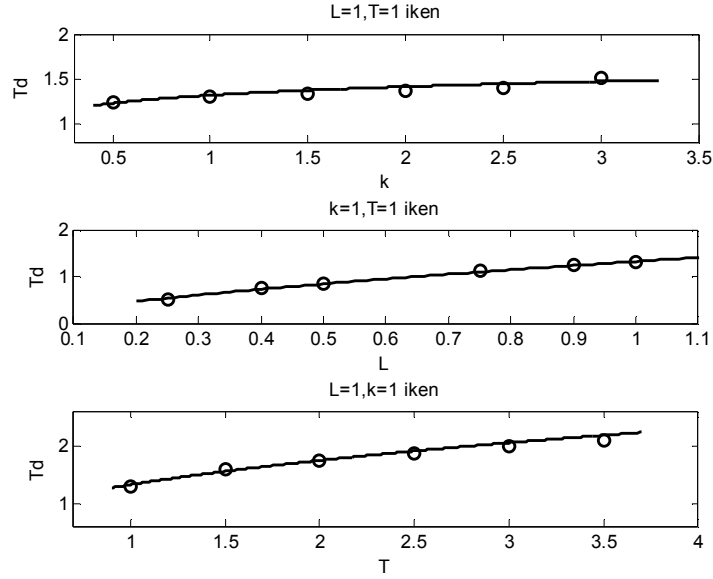
Bulunmuş olan bu denklemlerin veriler üzerindeki yerleşimlerini inceleyelim. K_p , T_i ve T_d denklemlerinin veriler ile karşılaştırılmaları sırasıyla Şekil 3.51, Şekil 3.52 ve Şekil 3.53 te verilmiştir.



Şekil 3.51: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak K_p değişimleri



Şekil 3.52: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtı için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri



Şekil 3.53: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili Sistemlerin basamak ve bozucu yanıtları için k , L ve T 'ye bağlı olarak T_i değişimleri

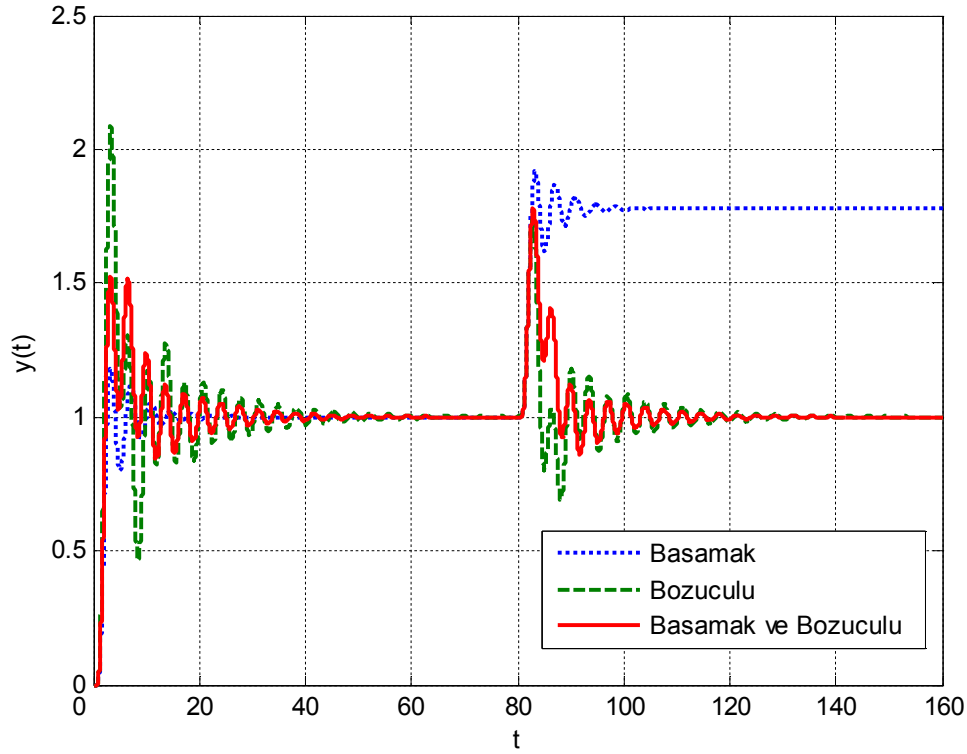
Her üç durum için bulduğumuz PİD kontrolör parametreleri Çizelge 3.29 da verilmiştir. Tabloda da görüldüğü üzere her istenen sistem durumları için farklı PİD kontrolör parametreleri bulunmuştur.

Çizelge 3.29:İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtı, bozucu yanıt ve her iki durum için bulunan PID parametreleri.

$G(s)=ke^{-Ls}/s(Ts+1)$	K_p	T_i	T_d
Basamak	$1.01T^{0.45}/kL^{1.5}$	-	$1.2L^{0.6}T^{0.4}$
Bozucu	$1.26T^{0.4}/kL^{1.5}$	1.82L	$1.41L^{0.6}T^{0.4}$
Basamak ve Bozucu	$1.22T^{0.4}/kL^{1.4}$	$3.26T^{0.4}/k^{0.5}L^{0.1}$	$3.1Lk^{0.06}$

Bu üç kontrolör parametresini bir örnek üzerinde inceleyelim. Örnek olarak $G_I(s)=1.5e^{-0.8s}/s(2s+1)$ sistemini ele alalım. Her üç PİD kontrolörlerin sistem üzerindeki cevapları Şekil 3.54 te gösterilmiştir. Kontrol sistemine $t=80$ saniyede bozucu eklenmiştir. Bozucu transfer fonksiyonu olarak yine sistem transfer fonksiyonuna eşit alınmıştır. ISE kriteri olarak en iyi basamak ve bozucu etkili sistem cevabı, en iyi basamak sistem cevabı ve en iyi bozucu etkili sistem cevabının beklenildiği gibi ara bir değerde olduğu görülüyor. Basamak ve bozucu sistemler

için tasarlanan PİD kontrolörü, basamak cevabında aşımı azaltarak, bozucu etkisi altında ise kararlı hal hatasını gidermiştir.

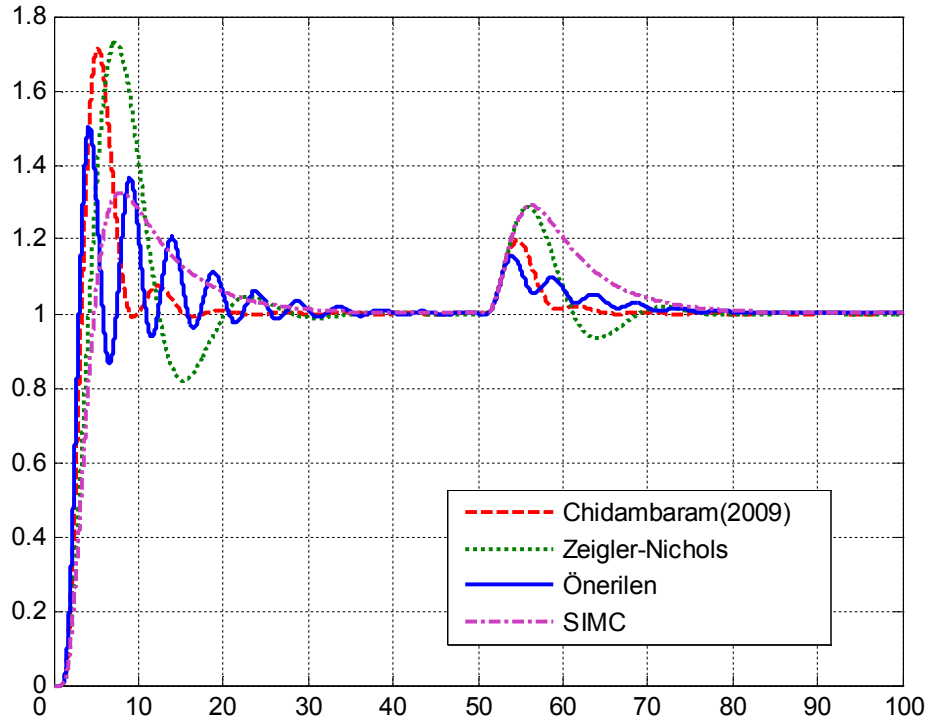


Şekil 3.54: G_1 sisteminin bulunan farklı kontrolörler için sistem cevapları

Denklem (3.54) de verilen çift katlı integral ve ölü zamanlı sistemi ele alalım.

$$G(s) = \frac{0.167e^{-1.077s}}{s(1.863s+1)} \quad (3.54)$$

PID kontrolör parametreleri, basamak ve bozucu etkili sistemlerin birlikte incelenerek belirlenen denklem (3.51-3.53) den hesaplanarak $K_p=8.45$, $T_i=10.16$ ve $T_d=1.49$ bulunmuştur. Verilen bu sistem Chidambaram (2009), SIMC ve Zeigler-Nichols yöntemlerinde önerilen PID kontrolörle karşılaştırılmıştır. Bu dört kontrolörün sistem cevapları Şekil 3.45 de verilmiştir. Sistemin birim basamak cevabı gözlenmiş ve 50. saniyede bozucu eklenmiştir. Sistem sonuçlarını incelersek, Chidambaram (2009) a göre hem basamak cevabında hem de bozucu etkisi altında yerleşim zamanlarını olarak daha kötü bir sistem cevabı elde ettiğimizi görmekteyiz.



Şekil 3.55: Birinci dereceden integral ve ölü zaman etkili örnek sistem cevaplarının karşılaştırılması

Bu dört kontrolörün parametreleri ve ISE değerleri Çizelge 3.30 da verilmiştir. Performans kriterimiz olan ISE değerleri hem basamak cevabında hem de bozucu etkisi altında daha düşük bir ISE değeri elde ettiğimizi görüyoruz. Sistem cevabı iyi olmasa da toplam amaç fonksiyonumuz olan minimum ISE değeri daha küçük bir değer çıkmıştır.

Çizelge 3.30: İntegral Etkili Birinci Dereceden Kararlı ve Ölü Zaman Etkili örnek verilen sistemin PID katsayıları ve ISE değerleri.

$G(s)=0.167e^{-1.077s}/s(1.863s+1)$	K_p	T_i	T_d	Basamak ISE değeri	Bozucu ISE değeri	Toplam ISE değeri
Önerilen	8.45	10.16	1.49	2.692	0.093	2.785
Chidambaram(2009)	6.332	5.6	1.24	3.369	0.117	3.486
Zeigler-Nichols	3.6	4.9	1.225	4.726	0.371	5.097
SIMC	2.78	8.616	1.863	3.331	0.579	3.91

4. SONUÇLAR

Bu çalışmamızda pek çok endüstriyel prosesin kontrolünde kullanılabilecek PID kontrolör tasarımı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bunun yapılabilmesi için öncelikle literatürdeki sistem tanıma yöntemleri incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Ardından PID kontrolörler ve tasarım yöntemleri incelenerek performansları hakkında bilgiler verilmiştir. PID tasarım yöntemi olarak, daha önce de bazı sistemler üzerinde denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmış genetik algoritma ile PID kontrolör tasarım yöntemi kullanılmıştır.

İntegral ve ölü zamanlı sistemler ve birinci dereceden kararsız ve ölü zamanlı sistemlerde Visioli(2001) tarafından basamak sistem yanıtları ve bozucu etkili sistem yanıtları için ISE performans indeksine göre bulunan optimum PID katsayıları gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. İntegral ve ölü zaman etkili sistemler için yaklaşık sonuçlar bulunmuş olursa da, birinci dereceden kararsız sistemler için ise farklı PID katsayıları elde edilmiştir. Ancak, farklı PID katsayıları elde edilse de sonuçlar örnek sistemler üzerinde incelendiğinde yaklaşık olarak aynı ISE değerleri elde edilmiştir. Daha sonra yine bu yöntem kullanılarak birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili, çift katlı integral ve ölü zaman etkili ve birinci dereceden integral ve ölü zaman etkili sistemler için de uygulanmış ve hem basamak sistem yanıtı için hem de bozucu etkili sistem yanıtı için optimum PID katsayıları belirlenmiştir. Ancak, basamak yanıtı için bulunan PID kontrolör bozucu etkisi altında, bozucu etkili sistem için bulunan PID kontrolör basamak yanıtında iyi cevap vermediği gözlenmiştir. Bunun için her iki durum için de tek bir PID kontrolör tasarımı için sistemin basamak yanıtının ve bozucu etkili yanıtının aynı anda incelenip, optimum PID katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra da farklı sistemler için tasarlanan bu PID kontrolör katsayıları literatürdeki diğer tasarım yöntemleriyle karşılaştırılmış ve uygun bir tasarım olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada önerilen PID tasarımlarının bilgisayar ortamında benzetim çalışmaları yapılarak sonuçlar verilmiştir. Bir sonraki aşamada ise bu tezde elde edilen sonuçların gerçek zamanlı kontrol sistemlerinin üzerinde uygulanarak sonuçlarının

görülməsi planlanmaktadır. Bu şekilde teorikte elde edilen sonuçların pratikte uygulanabilirliği görülmüş olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, A., Somanath, M., 2010. PID controller tuning for integrating processes, *ISA Transactions*, **49**, 70-78.
- Astrom, K. J., Hagglund, T., 1995. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, Instrument Society of America.
- Chidambaram, M., 1994. Design of PI controller for integrator/deadtime processes. Hung. J. Ind. Chem. **22**, 37.
- Chidambaram, M., Sree, R. P., 2003. A simple method of tuning PID controllers for integrator/dead-time processes, *Comp. Chem. Eng.*, **27**, 211-215.
- Chidambaram, M., Sree, R. P., Srinivas, M. N., 2004. A simple method of PID controllers for stable and unstable FOPTD systems, *Computer and Chemical Engineering*, **28**, 2201-2218.
- Chidambaram, M., Seshagiri Rao, A., Rao, V. S. R., 2009. Direct synthesis-based controller design for integrating processes with time delay, *Journal of The Franklin Institute*, **346**, 38-56.
- Lee, Y., Lee, J., Park, S., 2000. PID controller tuning for integrating and unstable processes with time delay, *Chemical Engineering Science*, **55**, 3481-3493.
- Luyben, W. L., Tyreus, B. D., 1992. Tuning PI controllers for integrator/dead time processes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**, 2625-2628.
- Luyben, W. L., 1996. Tuning proportional-integral-derivative controller for integrator/dead time processes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 3480-3483.
- Skogestad, S., 2003. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, *J. Process Control*, **13**, 291-309.
- Url <<http://web.sakarya.edu.tr/~afboz/control/bolum10.html>>, alındığı tarih 20.03.2011.
- Ünal, M., 2008. PID kontrolörün karınca kolonisi/genetik algoritma tabanlı optimizasyonu ve GUNT RT 532 basınç prosesinin kontrolü, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Yüksek Lisans Tezi*
- Visioli, A., 2001. Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes. *IEE Proc. Control Theory Appl.* **148**, 180.
- Zeigler, J. G., Nichols, N. B., 1942. Optimum setting for automatic controllers, *Transaction of the ASME*, **64**, 759-768.

EKLER

EK A: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistem, çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistem ve integral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin farklı sistem parametreleri için genetik algoritma ile bulunan optimum K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri.

EK A:**Çizelge A.1:** Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $T=1$, $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, L=1$ için K	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,66677	1,794319	0,396367	1,3004
1	1,24889	1,873213	0,352009	1,3088
1,5	0,89574	1,754805	0,399156	1,3008
2	0,66151	1,831575	0,402639	1,3008
2,5	0,5372	1,759638	0,417275	1,301
3	0,43935	1,790123	0,411176	1,3008
3,5	0,37338	1,840852	0,356286	1,3025

Çizelge A.2: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $T=1$, $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, K=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,30759	1,586594	0,214622	0,6659
1	1,24889	1,873213	0,352009	1,3088
1,5	1,03626	2,068466	0,53447	1,9138
2	0,86542	2,316621	0,643641	2,5103
2,5	0,77862	2,549175	0,801405	3,0933
3	0,7251	2,781038	0,91495	3,667

Çizelge A.3: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $L=1$, $k=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$K=1, L=1$ için T	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	0,85932	1,127228	0,335998	1,2577
1	1,24889	1,873213	0,352009	1,3088
1,5	1,83084	2,49944	0,417257	1,3177
2	2,32876	3,150933	0,435854	1,3269
2,5	2,82754	3,896186	0,438441	1,3327
3	3,35856	4,676097	0,447144	1,3365
3,5	3,86272	5,301201	0,452078	1,3392
4	4,37478	6,045019	0,456773	1,3414

Çizelge A.4: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $L=1$, $T=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, L=1$ için K	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	3,07855	0,885144	0,545832	0,0849
1	1,54322	0,89404	0,540001	0,3399
1,5	1,03036	0,884649	0,541684	0,7649
2	0,77995	0,885361	0,538099	1,36
2,5	0,60611	0,953783	0,52997	2,13559
3	0,51712	0,889363	0,547881	3,0606
4	0,3818	0,816527	0,56451	5,4555
5	0,31806	1,023721	0,464818	8,6329

Çizelge A.5: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $k=1$, $T=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, K=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,83837	0,54333	0,288091	0,0742
1	1,54322	0,89404	0,540001	0,3399
1,5	1,11394	1,133193	0,789935	0,729
2	0,92463	1,421327	0,965954	1,1816
2,5	0,81762	1,664807	1,107605	1,667
3	0,74277	2,003101	1,234931	2,172
4	0,68652	2,640665	1,342831	3,209

Çizelge A.6: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $k=1$, $L=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$K=1, L=1$ için T	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	0,92111	0,704622	0,486174	0,5918
1	1,54322	0,89404	0,540001	0,3399
1,5	2,19032	1,009885	0,565817	0,2154
2	2,8674	1,089405	0,571532	0,14769
2,5	3,51705	1,130179	0,583833	0,10726
3	4,2115	1,172202	0,584735	0,0813
4	5,55048	1,237714	0,589908	0,05125

Çizelge A.7: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $T=1$, $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, L=1$ için K	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,7768	1,704489	0,428817	1,4
1	1,4281	1,484203	0,46725	1,717
1,5	0,96938	1,35553	0,484444	2,1984
2	0,73733	1,208381	0,511277	2,838
3	0,50612	1,096115	0,512961	4,559
4	0,38517	0,95811	0,530779	7,027
5	0,29726	0,9729	0,529637	10,12
6	0,25244	0,940221	0,541792	13,847

Çizelge A.8: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $T=1$, $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, K=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,488	1,262528	0,024207	0,7822
1	1,4281	1,484203	0,46725	1,717
1,5	1,0777	1,744246	0,652584	2,735
2	0,906	1,99064	0,813002	3,7914
2,5	0,79887	2,19289	0,988659	4,8599
3	0,73217	2,426252	1,13781	5,9311
4	0,67691	3,042702	1,293451	8,08846

Çizelge A.9: Birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $L=1$, $k=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$K=1, L=1$ için T	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	0,87403	0,953963	0,429379	1,897
1	1,4281	1,484203	0,46725	1,717
1,5	1,96435	2,033489	0,479492	0,94189
2	2,49854	2,5361	0,481537	1,563
2,5	3,03352	3,040117	0,487355	1,5254
3	3,52053	3,56925	0,490793	1,499
4	4,60553	4,631653	0,492408	1,4643
5	5,66499	5,638882	0,490349	1,4428

Çizelge A.10: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$k=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,25	5,4763	1744,045	0,707233	0,6095
0,5	1,38453	419,5545	1,410883	1,2162
0,75	0,61861	951,7077	2,097299	1,822
1	0,34789	285,1557	2,77812	2,4321
1,25	0,22649	92,06911	3,548722	3,0745
1,5	0,1555	196,8354	4,242637	3,65533

Çizelge A.11: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$L=1$ için k	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	0,7099	57,76241	2,833667	2,4752
1	0,34789	285,1557	2,77812	2,4321
1,5	0,23903	63,91176	2,853449	2,4729
2	0,17841	49,42105	2,696261	2,4916
2,5	0,1371	32,79904	2,986142	2,5178
3	0,11749	135,046	2,710869	2,44729

Çizelge A.12: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$k=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,25	6,44578	0,501634	0,785771	0,01713
0,5	1,63912	0,963033	1,562168	0,536
0,75	0,72936	1,42037	2,353735	4,0408
1	0,4125	1,933805	3,126885	16,977
1,25	0,26353	2,471675	3,877737	51,6986

Çizelge A.13: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

L=1 için k	K_p	T_i	T_d	ISE
0,25	1,647	1,919513	3,123121	1,0603
0,5	0,82444	1,984689	3,104738	4,2444
1	0,4125	1,933805	3,126885	16,977
1,5	0,2705	1,990141	3,153641	38,2527
2	0,2015	1,967389	3,202481	68,047
2,5	0,15608	1,802518	3,342901	107,1721

Çizelge A.14: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

k=1 için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,25	5,8645	3,586368	0,715686	0,7224
0,5	1,57987	2,231738	1,467703	2,3298
0,75	0,71778	2,050214	2,28786	7,208
1	0,40355	2,317788	3,064577	21,6275
1,25	0,26164	2,393122	3,976953	58,04

Çizelge A.15: Çift katlı integral ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

L=1 için k	K_p	T_i	T_d	ISE
0,25	1,6171	4,682089	2,862451	4,6311
0,4	1,01326	3,398263	2,950941	6,6627
0,5	0,82278	2,749014	2,93917	8,3795
0,75	0,553	2,904107	2,943671	14,0639
1	0,40355	2,317788	3,064577	21,6275
1,5	0,26844	2,206296	3,158359	43,1416

Çizelge A.16: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $L=1$, $T=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, L=1$ için K	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,06798	400,7713	1,224432	1,9422
1	1,03441	344,8033	1,202628	1,94165
1,5	0,68915	87,34474	1,230879	1,9519
2	0,51716	347,0872	1,178958	1,9422
2,5	0,40984	525,4359	1,183413	1,9421
3	0,34222	290,0169	1,225118	1,9426

Çizelge A.17: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $k=1$, $T=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, K=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,25	7,87844	644,1897	0,515876	0,5622
0,4	3,68817	3352,882	0,711071	0,8649
0,5	2,638	539,4683	0,828169	1,057
0,75	1,52528	798,5759	1,021045	1,5127
0,9	1,17581	1199,806	1,148723	1,7727
1	1,03441	344,8033	1,202628	1,94165

Çizelge A.18: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak yanıtında $k=1$, $L=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$K=1, L=1$ için T	K_p	T_i	T_d	ISE
1	1,03441	344,8033	1,202628	1,94165
1,5	1,18042	437,1926	1,470011	2,04503
2	1,32686	502,5985	1,646843	2,111
2,5	1,49665	4157,361	1,76424	2,159
3	1,64793	405,8941	1,902927	2,1932
3,5	1,82986	378,0702	2,003197	2,22

Çizelge A.19: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $T=1$, $L=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, L=1$ için K	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,56248	1,796429	1,404909	0,415
1	1,27915	1,823216	1,400915	1,66019
1,5	0,86068	1,840121	1,370231	3,7385
2	0,64407	1,835794	1,396618	6,643
2,5	0,50193	1,798839	1,448369	10,4022
3	0,42333	1,688121	1,455035	15,005

Çizelge A.20: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $T=1$, $k=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, K=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,25	9,75959	1,101647	0,508162	0,00999
0,4	4,49651	0,750584	0,813589	0,0554
0,5	3,22109	0,942503	0,940241	0,1336
0,75	1,84077	1,375166	1,200954	0,6074
0,9	1,46689	1,603141	1,321087	1,1568
1	1,27915	1,823216	1,400915	1,66019

Çizelge A.21: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin bozuculu yanıtında $L=1$, $k=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$K=1, L=1$ için T	K_p	T_i	T_d	ISE
1	1,27915	1,823216	1,400915	1,66019
1,5	1,451	1,828677	1,662936	1,33
2	1,63179	1,872994	1,857292	1,0597
2,5	1,80212	1,913383	2,029671	0,8547
3	2,00737	1,85452	2,162152	0,699
3,5	2,19832	1,910403	2,251114	0,58099

Çizelge A.22: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $L=1$, $T=1$ ve değişen k değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, L=1$ için K	K_p	T_i	T_d	ISE
0,5	2,43508	5,440425	1,243458	3,0684
1	1,23874	3,261044	1,301605	4,7386
1,5	0,83011	2,703413	1,338798	7,0677
2	0,62593	2,353032	1,365856	10,13636
2,5	0,50055	2,12629	1,402797	13,9848
3	0,40661	1,870934	1,515408	18,7539

Çizelge A.23: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $k=1$, $T=1$ ve değişen L değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$T=1, K=1$ için L	K_p	T_i	T_d	ISE
0,25	8,30674	4,695939	0,524591	0,63422
0,4	4,07237	3,664906	0,737764	1,11479
0,5	2,95528	3,412564	0,858294	1,5056
0,75	1,73412	3,21056	1,108182	2,81288
0,9	1,38063	3,188227	1,256723	3,8814
1	1,23874	3,261044	1,301605	4,7386

Çizelge A.24: İntegral etkili birinci dereceden kararlı ve ölü zaman etkili sistemlerin basamak ve bozuculu yanıtında $k=1$, $L=1$ ve değişen T değerleri için K_p , T_i , T_d ve ISE değerleri

$K=1, L=1$ için T	K_p	T_i	T_d	ISE
1	1,23874	3,261044	1,301605	4,7386
1,5	1,37334	3,797743	1,592461	4,4631
2	1,54442	4,01367	1,754173	4,223
2,5	1,72103	4,545894	1,866266	3,9986
3	1,90539	4,909028	1,985761	3,8159
3,5	2,07624	5,2591	2,099179	3,67

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Taner SAYIM

Doğum Yeri ve Tarihi: Kırklareli / 03.02.1986

Adres: Bademlik M. Şehiter Mustafa Kalenci C. No:37 KIRKLARELİ

Lisans Üniversite: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi