

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKZOTERMİK (ISI YAYAN) KİMYASAL REAKTÖRÜ SİMÜLE EDEN BİR
ISIL SİSTEMİN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Onur UYSAL**

Anabilim Dalı : Kimya Mühendisliği

Programı : Kimya Mühendisliği

EYLÜL 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKZOTERMİK (ISI YAYAN) KİMYASAL REAKTÖRÜ SİMÜLE EDEN BİR
ISIL SİSTEMİN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur UYSAL

(506081013)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Eylül 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Eylül 2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Dursun Ali ŞAŞMAZ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA (İTÜ)
Dr. Hikmet İSKENDER (İTÜ)

EYLÜL 2010

ÖNSÖZ

Bu konuyu yüksek lisans tez çalışması olarak öneren, bilgileri ile çalışmalarına ışık tutan ve bana her zaman destek olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Dursun Ali ŞAŞMAZ'a,

Çalışmalarım boyunca değerli bilgi, deneyim ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Hikmet İSKENDER'e,

Büyük emek ve özverileriyle beni yetiştirip bugünlere gelmemi sağlayan, aldığım kararlarda beni destekleyen, ilgi ve sevgilerini her zaman hissettiğim sevgili annem ve babama,

Deney cihazını yapan Sayın Remzi ERİKMAN ve Mehmet Ali ERİKMAN'a,

Yüksek lisans eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan değerli arkadaşlarıma sonsuz desteklerinden dolayı en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Eylül 2010

Onur UYSAL

(Kimya Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
2. OTOMATİK KONTROL	5
2.1 Otomatik Kontrolün Tarihi.....	5
2.2 Kontrol Sistemleri	8
2.2.1 Açık çevrim sistemler	10
2.2.2 Kapalı çevrim sistemler	10
2.3 Kontrol Ediciler.....	11
2.3.1 Oransal (P) kontrol edici	11
2.3.2 Oransal – integral (PI) kontrol edici	13
2.3.3 Oransal – integral – türevsel (PID) kontrol edici	14
2.4 Kontrol Edicilerin Gelişmiş Ayar Yöntemleri	17
2.4.1 Frekans cevaplarından yararlanılarak geri beslemeli kontrol çevrimlerinin tasarımı	17
2.4.1.1 Bode kararlılık koşulu	18
2.4.1.2 Kazanç payı (gain margin) ve faz payı (phase margin)	18
2.4.2 Ziegler – Nichols ayar yöntemi.....	21
2.4.2.1 Limit kararlı hal değerlerinin elde edilmesi	22
2.4.2.2 Reaksiyon eğrisi yöntemi	23
2.4.3 Cohen – Coon ayar yöntemi.....	24
2.4.4 Tyreus – Luyben ayar yöntemi	25
2.4.5 İntegral ilişkisi ile ayarlama	25
2.4.5.1 Hatanın karesinin integrali (ISE, Integral of the square error).....	26
2.4.5.2 Hatanın mutlak değerinin integrali (IAE, Integral of the absolute value of the error).....	26
2.4.5.3 Hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı integrali (ITAE, Integral of the time-weighted absolute value of the error)	26
2.4.6 IMC (Internal Model Control) yöntemi	28
3. KİMYASAL REAKTÖRLER	29
3.1 Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörler (CSTR)	29
3.2 Piston Akışlı Reaktörler (PFR)	29
3.3 Kesikli (Batch) Reaktörler	30
3.3.1 Kesikli reaktörlerin modellenmesi	31

4. PROSES TANIMA.....	33
4.1 Proses Tanıma Yöntemleri	34
4.1.1 Basamak değişimi testi ile proses tanıma.....	34
4.1.2 Basamak değişimi testi ile tanıma yöntemleri.....	35
4.1.2.1 Açık çevrim basamak cevap testleri.....	35
Grafik yöntemi	35
İki nokta yöntemi	38
4.1.2.2 Kapalı çevrim proseslerde basamak testi cevabına göre proses tanıma	38
Grafik yöntemi	39
4.1.3 Darbe testi ile proses tanıma	40
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
5.1 Deney Düzenegi	41
5.1.1 Karıştırıcı.....	42
5.1.2 Dalgıç ısıtıcı	42
5.1.3 Varyak	43
5.1.4 Termoçift ve önyükseltici.....	43
5.1.5 Soğutma suyu deposu.....	43
5.2 Deney Yöntemi.....	44
5.2.1 Reaktörün kararlı haldeki parametrelerinin tespiti için yapılan çalışma...	45
5.2.2 Reaktörün basamak etkisine verdiği cevabın incelenmesi	45
5.2.3 Reaktörün ısı iletim katsayısının (U) tespiti.....	48
5.2.4 Isı kayıplarının tespiti.....	50
5.3 Dinamik İnceleme	52
5.3.1 Kararlı haldeki F_{SU} değerinin tespiti	52
5.3.2 Verilen ısıya (Q) bağlı transfer fonksiyonlarının hesaplanması.....	53
5.3.3 Verilen ısıya (Q) bağlı transfer fonksiyonlarına ait proses parametrelerinin iki nokta yöntemine göre belirlenmesi.....	55
5.3.4 Ceket soğutma suyuna (F_{SU}) bağlı transfer fonksiyonlarının hesaplanması	57
5.3.5 Pay dinamiği olan ikinci derece sistemler.....	60
5.4 Isıl Sistemin Kontrol Edilmesi	61
5.4.1 Limit kararlı hal değerlerinin elde edilmesi	63
5.4.2 Bode diyagramları kullanılarak uygun kontrol edici parametrelerinin belirlenmesi	65
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
6.1 Soğutma Ceketli Ekzotermik Tank Reaktörün Bilgisayar Ortamında Kontrolü.....	67
6.1.1 Basamak girişine karşı kapalı çevrim sistemin cevabı.....	70
6.1.2 Dikdörtgen darbe girişine karşı kapalı çevrim sistemin cevabı	75
6.1.3 Sinüsoidal darbe girişine karşı kapalı çevrim sistemin cevabı.....	82
6.2 Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi İçin Önerilen Çalışmalar	88
KAYNAKLAR.....	91
EKLER.....	95

KISALTMALAR

P	: Oransal (Proportional)
PI	: Oransal – İntegral (Proportional – Integral)
PID	: Oransal – İntegral – Türevsel (Proportional – Integral – Derivative)
PD	: Oransal – Türevsel (Proportional – Derivative)
PB	: Oransal band (Proportional band)
ZN	: Ziegler – Nichols
C–C	: Cohen – Coon
ISE	: Hatanın karesinin İntegrali (Integral of the square error)
IAE	: Hatanın mutlak değerinin İntegrali (Integral of the absolute value of the error)
ITAE	: Hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı İntegrali (Integral of the time-weighted absolute value of the error)
IMC	: İç model kontrolü (Internal model control)
CSTR	: Sürekli karıştırmalı tank reaktörler (Continuous stirred tank reactor)
PFR	: Piston akışlı reaktör (Plug flow reactor)
POR	: Aşma oranı (Peak overshoot ratio)
PB	: Oransal bant (Proportional band)
P	: Oransal denetleyici
I	: İntegral denetleyici
D	: Türevsel denetleyici
KE	: Kontrol edici

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : P, I ve D kontrol mod'larının karakteristikleri	17
Çizelge 2.2 : Ziegler-Nichols Kapalı Çevrim Ayar Parametreleri	21
Çizelge 2.3 : Orijinal ve geliştirilmiş Ziegler – Nichols ayar parametreleri.	22
Çizelge 2.4 : Reaksiyon eğrisi yöntemine göre uygun KE ayar parametreleri.....	24
Çizelge 2.5 : Cohen – Coon yöntemine göre uygun KE ayar parametreleri.	25
Çizelge 2.6 : Tyreus – Luyben yöntemi ile uygun KE ayar parametreleri.	25
Çizelge 2.7 : Hata integrali yöntemi ile KE ayarlamasında PID parametreleri hesabı için yararlanılacak A ve B sabitleri.....	27
Çizelge 5.1 : Her bir deneye ait basamak testi koşulları ve elde edilen sonuçlar.....	47
Çizelge 5.2 : Her bir deneye ait koşullar ve hesaplanan U katsayıları.	49
Çizelge A.2 : Çizelge 5.2'nin daha ayrıntılı gösterimi.	98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sıvı düzeyi kontrol sistemi.....	5
Şekil 2.2 : Kuluçka makinesi.....	6
Şekil 2.3 : Buhar motoru hız kontrol sistemi Flyball Governer.....	7
Şekil 2.4 : Bir prosesin P tipi kontrol edici ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevabı.....	12
Şekil 2.5 : Bir prosesin PI tipi kontrol edici ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevabı.....	13
Şekil 2.6 : Bir prosesin PID tipi kontrol edici ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevabı.....	14
Şekil 2.7 : Bir prosesin çeşitli tip kontrol ediciler ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevapları...	16
Şekil 2.8 : Açık sistem Bode diyagramı üzerinde kazanç payı ve faz payı tanımlamaları.....	19
Şekil 2.9 : Reaksiyon eğrisi yöntemi grafiği.....	23
Şekil 2.10 : Zamanla ayar değerinden ayrılmalar (hatalar).....	26
Şekil 3.1 : Kesikli bir reaktörün genel görüntüsü.....	30
Şekil 4.1 : Zaman gecikmeli birinci derece bir sistemin basamak giriş değişimine cevabı.....	36
Şekil 4.2 : Zaman gecikmeli ikinci derece bir sistemin basamak giriş değişimine cevabı.....	37
Şekil 4.3 : Açık çevrim zaman gecikmeli proses çıktısında iki nokta yöntemi grafiği.....	38
Şekil 4.4 : Kapalı çevrim sistemin basamak girişine cevabı.....	39
Şekil 4.5 : Darbe testi giriş ve çıkış (cevap) eğrileri.....	40
Şekil 5.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan reaktör ve boyutları.....	42
Şekil 5.2 : Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği.....	44
Şekil 5.3 : 1.8 kg/dakika soğutma suyu debisi ve 1250 watt basamak girişinin verildiği deneye ait sıcaklık – zaman grafiği.....	47
Şekil 5.4 : Isıtıcı gücü 1500 W olduğu durumda elde edilen sıcaklık değerleri ile oluşturulan sıcaklık–zaman grafiği.....	50
Şekil 5.5 : Isıl sistemin şematik görünümü.....	52
Şekil 5.6 : Isıl sistemin transfer fonksiyonunun basamak etkisine verdiği cevap eğrisi.....	55
Şekil 5.7 : Isıl sistemin transfer fonksiyonlarının birim basamak girişine verdiği cevap eğrisi.....	56
Şekil 5.8 : Pay dinamiği olan ikinci derece sistemin 0.1 [kg/dakika] basamak girişine karşı cevabı.....	61
Şekil 5.9 : Isıl sistem için önerilen geri beslemeli kontrol çevrimi.....	62
Şekil 5.10 : Isıl sistem için önerilen geri beslemeli kontrol çevriminin simülasyon çalışmaları için oluşturulmuş blok diyagramı.....	63

Şekil 5.11 : Kontrol edici kazancı K_{CU} değerinde olduğunda kapalı çevrim sistemin $\Delta Q=18$ [kcal/dakika] basamak girişine verdiği cevap.	64
Şekil 5.12 : K_C değeri 1 kabul edildiğinde kapalı çevrim sisteme ait Bode diyagramı.....	66
Şekil 6.1 : Kapalı çevrim sistemde çeşitli bozan etken etkilerine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.....	69
Şekil 6.2 : Basamak girişinin zamana bağlı değişiminin grafiği.	70
Şekil 6.3 : Kapalı çevrim sistemde basamak girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.....	71
Şekil 6.4 : KE parametreleri $K_C=0.3$ ve $K_I=0.1$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişine cevabı.....	72
Şekil 6.5 : KE parametreleri $K_C=0.3$ ve $K_I=0.1$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.....	72
Şekil 6.6 : KE parametreleri $K_C=0.75$ ve $K_I=0.3$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişine cevabı.....	73
Şekil 6.7 : KE parametreleri $K_C=0.75$ ve $K_I=0.3$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.....	73
Şekil 6.8 : KE parametreleri $K_C=1.02$ ve $K_I=0.11$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişine cevabı.....	74
Şekil 6.9 : KE parametreleri $K_C=1.02$ ve $K_I=0.11$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.....	74
Şekil 6.10 : Dikdörtgen darbe girişinin zamana bağlı değişiminin grafiği.....	76
Şekil 6.11 : Kapalı çevrim sistemde dikdörtgen darbe girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.....	77
Şekil 6.12 : KE parametreleri $K_C=0.25$ ve $K_I=0.1$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişine cevabı.....	78
Şekil 6.13 : KE parametreleri $K_C=0.25$ ve $K_I=0.1$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.....	78
Şekil 6.14 : KE parametreleri $K_C=0.7$ ve $K_I=0.3$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişine cevabı.....	79
Şekil 6.15 : KE parametreleri $K_C=0.75$ ve $K_I=0.3$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.....	79
Şekil 6.16 : KE parametreleri $K_C=1.11$ ve $K_I=0.12$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişine cevabı.....	80
Şekil 6.17 : KE parametreleri $K_C=1.11$ ve $K_I=0.12$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.....	80
Şekil 6.18 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.4$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişine cevabı.....	81
Şekil 6.19 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.4$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.....	81

Şekil 6.20 : Sinüsoidal darbe girişinin zamana bağlı değişiminin grafiği.	83
Şekil 6.21 : Kapalı çevrim sistemde sinüsoidal darbe girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.	84
Şekil 6.22 : KE parametreleri $K_C=0.5$ ve $K_I=0.1$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.1 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişine cevabı.	85
Şekil 6.23 : KE parametreleri $K_C=0.5$ ve $K_I=0.1$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.1 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.	85
Şekil 6.24 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.01$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.1 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişine cevabı.	86
Şekil 6.25 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.01$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.1 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.	86
Şekil 6.26 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.01$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.05 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişine cevabı.	87
Şekil 6.27 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.01$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.05 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.	87
Şekil 6.28 : Isıl sistem için önerilen kaskat kontrol çevrimi.....	89
Şekil A.1 : Farklı değerlerle oluşturulan diğer reaksiyon eğrileri.	95
Şekil A.1 (devam) : Farklı değerlerle oluşturulan diğer reaksiyon eğrileri.	96
Şekil A.1 (devam) : Farklı değerlerle oluşturulan diğer reaksiyon eğrileri.	97
Şekil C.1 : Simulink Signal Builder bloğu.	100
Şekil C.2 : Signal Builder bloğu ayar penceresi.	100

SEMBOL LİSTESİ

K_p	: Proses kazanç sabiti
τ_p	: Proses zaman sabiti
θ	: Proses zaman gecikmesi (ölü zaman)
G	: Proses transfer fonksiyonu
ζ	: Sönümlenme katsayısı
e	: Hata değeri
R	: Ayar değeri
y	: Kontrol edilen değişkenin ölçüm değeri
\bar{y}	: Kararlı halde kontrol edilen değişkenin ölçüm değeri
G_C	: Kontrol edici transfer fonksiyonu
K_C	: Oransal kontrol edici kazancı
K_I	: Integral kontrol edici kazancı
K_D	: Türevsel kontrol edici kazancı
τ_I	: Integral zaman sabiti
τ_D	: Türevsel zaman sabiti
K	: Kontrol edici çıkış sinyali
ω_{CO}	: Aşma frekansı
K_U	: Ultimate kazanç
P_U	: Ultimate periyot
ω_U	: Ultimate frekans
U	: Basamak giriş değeri
Q	: Sisteme verilen ısı miktarı
$Q_{iç}$: Tankın içine giren ısı miktarı
Q_{CE}	: Ceket soğutma suyunun aldığı ısı miktarı
U	: Toplam ısı transfer katsayısı
A	: Isı transfer alanı
m_{SU}	: Soğutma suyu kütlesi
F_{SU}	: Soğutma suyu debisi
\bar{F}_{SU}	: Kararlı haldeki soğutma suyu debisi
$\rho_{iç}$: Tanktaki çözelti yoğunluğu
ρ_{CE}	: Soğutma suyu yoğunluğu
C_P	: Reaktördeki çözeltinin ısı kapasitesi
C_{PCE}	: Soğutma suyunun ısı kapasitesi
$V_{iç}$: Tank hacmi
V_{CE}	: Ceket hacmi
$M_{iç}$: Tankın içindeki su kütlesi
M_{CE}	: Ceketin içindeki su kütlesi
$T_{iç,0}$: Başlangıçtaki reaktör iç sıcaklığı
$T_{iç}$: Reaktör iç sıcaklığı
$T_{2,0}$: Başlangıçtaki soğutma suyu çıkış sıcaklığı
T_2	: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı
\bar{T}_2	: Kararlı haldeki soğutma suyu çıkış sıcaklığı

- T₀** : Soğutma suyu giriş sıcaklığı
T_{CE} : Soğutma suyu ortalama sıcaklığı (ceket soğutma suyu sıcaklığı)
ΔT_{log} : Reaktör ile ceket soğutma suyu sıcaklık farkının logaritmik ortalaması

EKZOTERMİK (ISI YAYAN) KİMYASAL REAKTÖRÜ SİMÜLE EDEN BİR ISIL SİSTEMİN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

İnsanlar eski çağlardan beri otomatik kontrole ilgi duymuş ve ihtiyaçları doğrultusunda çeşitli otomatik kontrol sistemleri geliştirmiştir. Bilinen ilk otomatik kontrol sistemi eski çağlarda geliştirilmiş olan ve bir kaptaki sıvı seviyesini sabit tutmaya yarayan sıvı düzeyi kontrol sistemidir. Daha sonraki yıllarda kuluçka makinesi, buhar motoru hız kontrol sistemi gibi çeşitli kontrol sistemleri geliştirilmiş ve insanlığın kullanımına sunulmuştur. Elektronik devrelerin keşfedilmesinden önce mekanik mühendisliğe bağlı olan kontrol teknolojisi, yüksek hızda ve doğrulukta işlem yapabilen bilgisayarların kullanımıyla birlikte hızlı bir gelişme göstermiştir.

Kontrol sistemleri açık çevrim kontrol sistemleri ve kapalı çevrim kontrol sistemleri olmak üzere ikiye ayrılır. Açık çevrim sistemlerde sisteme bir giriş etkisi verilir ve çıkan sonuca göre yorum yapılır. Kapalı çevrim sistemlerde ise giriş etkisinin sonucunda oluşan çıktı değerini referans değerle karşılaştıran bir geri besleme mekanizması bulunur. Sistemdeki kontrol edici, hata değerine göre son kontrol elemanına sinyal göndererek sisteme müdahale eder.

Kontrol ediciler kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ölçüm elemanı ile son kontrol elemanı arasında bulunan cihazlardır. Kimyasal proseslerde en çok kullanılan kontrol ediciler; oransal (P), oransal-integral (PI) ve oransal-integral-türevsel (PID) kontrol edicilerdir. Bunlardan en gelişmiş ve en iyi sonuç vereni PID kontrol edicidir fakat parametrelerinin hesaplanması diğerlerine göre daha zordur.

Kimyasal reaktörler, kimyasal maddeler üreten bir kuruluşun en önemli cihazlarıdır. Kimyasal reaktörler ısı alışverişlerine göre ısı alan (endotermik) ve ısı yayan (ekzotermik) olmak üzere ikiye ayrılır. Bu reaktörler içinde ekzotermik reaktörler özel bir öneme sahiptirler. Çünkü ekzotermik kimyasal reaktörler kendi kendine dengeye gelemeyen (non-self regulating) cihazlardır. Kimyasal reaksiyonlarda sıcaklığın artması reaksiyonun ilerlemesine, reaksiyonun ilerlemesi de sıcaklığın artmasına neden olduğu için denge sıcaklığındaki çok küçük değişimler bile karasızlığa sebep olabilir. Sistemi kararlı halde tutabilmek için sistemin bozan etkenlere karşı kontrol edilmesi gerekir. Bu nedenle ekzotermik bir kimyasal reaktörün sıcaklık değişimine uğradığında vereceği cevabın önceden bilinmesi pratik açıdan çok önemlidir.

Kaliteli ve ekonomik bir üretim için kimyasal reaktörlerin doğru bir şekilde tasarlanması ve kontrol edilmesi gerekir. Belirli bir sistem için kontrol edici tasarlanırken çeşitli giriş değişkenlerine göre dinamik cevabın eldesi amacıyla dijital simülasyon yapmak kaçınılmazdır. Böyle bir dinamik simülasyonun yapılabilmesi için önce sistemin tanınması yani dinamik özelliklerinin bilinmesi ve bu dinamik özellikler kullanılarak sistemin doğru bir şekilde modellenmesi gerekir.

Sistemin dinamik özelliklerinin belirlenebilmesi için sistem üzerinde çeşitli testler yapılır. Testleri yapmak için sistemin belirli bir giriş değişkenine basamak (step), darbe (impulse), frekans (frequency) etkileri verilir ve sonuçlar kaydedilir. Yapılan testlerin sonuçları bir araya getirilip yorumlanarak sistem parametrelerinin tahmini yapılır. Bu parametreler kullanılarak çeşitli matematiksel denklemlerle sistem modellenir ve dijital ortamda simüle edilir. Simüle edilen sistem üzerinde birçok test yapılarak hızlı ve ekonomik bir şekilde, sistemin düzgün ve verimli çalışabilmesi için uygun olan kontrol edici tasarlanır.

Bu çalışmada ekzotermik kimyasal reaktörü fiziksel olarak simüle eden bir ısı sistem oluşturulmuştur, bu ısı sistem üzerinde, proses kontrol biliminin temel yöntemleri olan ve bir kontrol edicinin parametrelerinin tespit edilmesinde uygulanan basamak testleri yapılmıştır. Bu testlerin sonuçları, klasik sayısal analiz yöntemleri kullanılarak ve bilgisayar programları yazılarak işlenmiş, değerlendirilmiş ve sistemin dinamik özellikleri tespit edilmiştir. Elde edilen değerler ve çeşitli denklemler kullanılarak sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş ve sistemin iç sıcaklığı ile ceket soğutma suyu debisi arasındaki transfer fonksiyonu bulunmuştur. Ayrıca, bu tespitlerden sonra sistemin dijital simülasyonu yapılarak ve frekans cevabı elde edilerek kararlılık şartları belirlenmiştir.

Sistemin kontrolü için dijital simülasyonda çeşitli kontrol edici parametreleri denenmiştir. Bu parametreler kullanılarak sisteme basamak, dikdörtgen darbe ve sinüsoidal darbe girişleri verilerek sistemin tepkisi incelenmiş ve test edilen kontrol ediciye ait integral hata değerleri hesaplanarak sistem için en uygun kontrol edici parametreleri tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, sistem üzerinde yapılan deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda, soğutma ceketli ekzotermik bir reaktörün kararlı ve verimli çalışabilmesi için uygun olan kontrol edici tasarlanmıştır.

EXAMINATION OF THE DYNAMICAL BEHAVIOUR OF A THERMAL SYSTEM SIMULATING AN EXOTHERMIC CHEMICAL REACTOR

SUMMARY

Since ancient times people have interested in automatic control and they have developed variety of automatic control systems according to their needs. The first known automatic control system that was developed in ancient times is liquid level control system which keeps the level of liquid in a container constant. In later years various control systems such as incubator and steam engine speed control system was developed and presented to usage of humankind. The control technology that was depend of mechanical engineering before the invention of electronic circuits, have showed a rapid development with the use of computers that capable of processing at high speed and accuracy.

There are two types of control systems, one of them is open-loop control system and the other is closed-loop control system. In open-loop systems, an input is given to system and system is assessed according to output. In closed-loop systems, there is a feedback mechanism which comparing output, that result of input, with reference value. The system controller intervenes to system by sending a signal to final control element depending on the value of the error.

Controller is a device, which located between the measurement device and final control element in closed-loop systems. The most widely used controllers on chemical processes are proportional (P), proportional-integral (PI) and proportional-integral-derivative (PID) controllers. PID controller is the most advanced among them and it gives the best results, but the parameters of PID controller calculation are more difficult than others.

Chemical reactors are the essential equipments of a plant that producing chemicals. there are two types of chemical reactors by heat exchange, one of them is endothermic reactor that absorbs energy and the other is exothermic reactor that absorbs energy. Exothermic reactors play a significant role among them. Exothermic chemical reactors are non-self regulating equipments that cannot balance them. Even a small variation in the equilibrium temperature causes instability, since an increase in the temperature proceeds the reaction and the progress of a reaction increases the temperature. To keep the system at steady state it should be controlled against the disturbance. Therefore, when the temperature changes in an exothermic chemical reactor, it is practically important know how it will response.

For economical and good production, chemical reactors should be well designed and controlled. It is necessary to perform digital simulations in order to obtain the dynamical response according to input variables to design a controller for a specific system. To perform the digital simulation, firstly the system must be identified, which means dynamic properties of the system must be known and then accurate modeling of the system must be made by using these properties.

To determine the dynamic properties of the system, various tests are performed on the system. To make the tests; step, pulse, frequency effects are given to a particular input variable of the system and the results are recorded. The results of the tests are gathered, interpreted and the parameters of system are estimated. By using these parameters, the system is modeled with various mathematical equations and is simulated digitally. To make the system work properly and efficiently, several tests are done on the simulated system and suitable controller is designed with fast and economical way.

In this project, a thermal system that physically simulating the exothermic chemical reactor had established and the parameters of a controller had determined by applying step forcing functions, which are the basic methods of the process control. The results of these tests are assessed by using classical numerical analysis methods and computer programs, and dynamic properties of the system have been identified. The mathematical model of the system was created with the obtained values and using various mathematical equations, after then transfer function of the system between internal temperature of tank and jacket cooling water flow rate, has been found. In addition, after the findings transfer function of the system, stability conditions were determined with digital simulation and frequency response analysis.

To control the system, a variety of controller parameters had tested on the digital simulation. By using these parameters, step, rectangular pulse and sinusoidal pulse inputs are examined on the system. After examination for each controller that has tested, integral error values were calculated and the most suitable controller parameters were found.

As a result, according to data obtained from experiments performed on the system, a suitable controller have designed in order to make an exothermic reactor with cooling jacket work properly, stable and efficiently.

1. GİRİŞ

Kimyasal reaktörler kimya endüstrisinde en çok kullanılan cihazlardır. Çalışma biçimlerine göre kesikli reaktör, sürekli karıştırılmalı tank reaktör (CSTR) ve piston akışlı reaktör (PFR) olmak üzere 3 ana gruba ayrılır. Ayrıca dış ortamla olan ısı alış-verişlerine göre de ısı alan (endotermik) ve ısı yayan (ekzotermik) reaktörler olmak üzere gruplandırılırlar. Bu reaktörler içinde ekzotermik (ısı yayan) reaktörler özel olarak önemlidirler. Çünkü bu tip reaktörler kendi kendine dengeye gelemeyen (non-self regulating) cihazlardır.

Bu cihazların içinde gerçekleşmekte olan ekzotermik karakterdeki reaksiyonlardan ötürü, reaksiyon süresince, sürekli biçimde ısı açığa çıkar. Bu ısı reaksiyon karışımının sıcaklığının artmasına sebep olur. Sıcaklığın artması ise, yine ekzotermik reaksiyonların karakteristik özelliğinden ötürü, reaksiyonun daha da ilerlemesine, reaksiyonun ilerlemesi de sıcaklığın artmasına neden olduğu için denge sıcaklığındaki çok küçük değişimler bile, kartopu etkisi sonucu, karasızlığa sebep olabilir [1].

Reaktörlerde elde edilen ürünlerin istenen kalitede ve ekonomik bir biçimde üretilmesi için, bunların mümkün olan en iyi verim koşullarında ve kararlılıkta çalıştırılması gerekir. Bu nedenle, reaktörlerin analizi, dinamik modellenmesi ve kontrolü çok önemlidir. Kontrol çalışmaları yapılmadan önce sistemin doğru bir şekilde tanımlanması, dinamik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bilindiği gibi iyi bir kontrol, ancak iyi bir modelleme sonucu oluşturulabilir. Sistemin seçilen bir giriş değişkenine uygulanan basamak (step), darbe (impulse) ve frekans (frequency) tipinde değişimler ile bunların dinamik davranışları belirlenebilir [2].

Dinamik özellikleri belirlenen bir sistem, dijital veya analog biçimde simüle edilebilir. Bilgisayar ortamında simüle edilen sisteme, daha karmaşık testler uygulanabilir ve bu da kontrol tasarımcısına büyük avantaj sağlar. Sonrasında yapılan bütün testlerin sonuçları bir araya getirilip yorumlanmasıyla, sistemin en doğru modeli oluşturulabilir ve bu modele dayanılarak, sistem için en uygun özelliklere sahip kontrol edici tasarımı yapılabilir.

Gelişmiş bir kontrol edici oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) kontrol biçimleri ile çalışır. Açık sistem özelliklerine ve istenilen kontrol duyarlılığına bağlı olarak kontrol edicilerde bu üç çalışma biçiminin çeşitli bileşimleri kullanılabilir. Günümüzde en çok kullanılan klasik kontrol ediciler P, PI ve PID tipi kontrol edicilerdir. Kapalı çevrim cevabının istenilen şekilde olabilmesi için, kontrol edici parametrelerinin uygun değerlerinin seçilmesi gerekir. Bu parametrelerin uygun değerlerinin belirlenmesinde çeşitli yaklaşım yöntemlerinden yararlanılabilir. En çok kullanılan yaklaşım yöntemlerinden biri, sistemin transfer fonksiyonun, deneysel veya teorik biçimde elde edilip, açık çevrim basamak cevabının incelenmesi ve analiz edilmesi esasına dayanan yöntemdir [3].

Bu çalışmada, içinde bir elektrikli ısıtıcı bulunan, dış ceketli soğutucuya sahip bir karıştırıcı tank reaktörün fiziksel modeli yaptırılmış, elektrikli ısıtıcının gücü (sisteme verdiği ısı debisi) değiştirilerek, ekzotermik reaksiyon şartları sağlanmıştır. Yani sistem tamamen ısıl bir sistemdir ama aynı zamanda ekzotermik reaktörlerin incelenmesini de mümkün kılar.

Deneysel çalışmada, sistem üzerinde çeşitli testler yapılarak sistemin transfer fonksiyonu bulunmuştur. Bunun için farklı soğutma suyu debilerinde, ısıtıcının gücü değişik şiddetlere sahip basamak ve darbe biçiminde değiştirilerek, sistemin dinamik cevapları alınmış, bu cevap değerlerinin zamana karşı grafiği çizilerek sistemin dinamik davranışı incelenmiştir.

Çeşitli matematiksel denklemler ve deneylerden elde edilen veriler kullanılarak sisteme ait transfer fonksiyonu bulunmuş ve transfer fonksiyonundan sistemin kazanç sabiti (K_p), zaman sabiti (τ_p), gibi dinamik parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra bu transfer fonksiyonu kullanılarak (ısı iletimindeki atalet nedeniyle sistem transfer fonksiyonuna küçük bir ölü zaman değeri ilave edilmektedir) sistem simüle edilmiştir.

Sistem için uygun kontrol çevrimleri oluşturularak sistemin transfer fonksiyonu bilgisayar ortamında Matlab programı kullanılarak kapalı çevrim sistemde basamak, dikdörtgen darbe ve sinüsoidal darbe girişine maruz bırakılmıştır. Bu çevrimlerin dinamik davranışları incelenmiş ve çıkan sonuçlar analiz edilerek çeşitli yaklaşımlar yardımıyla seçilen kontrol edicinin parametreleri hesaplanmıştır.

Bulunan bu sabitler kullanılarak kontrol edicinin bozan etken (disturbans) etkisi altındaki sistemi nasıl etkilediği incelenmiş ve sistemin hata integrali değerlerine gore en uygun kontrol edici parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Belirlenen kontrol edici parametreleri kullanıldığında, sistemin bozan etken girişlerine verdiği cevapların zamana karşı grafiği çizilmiş ve sonuçlar karşılaştırılıp tartışılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma ile bir prosesin tanınması ve kontrol edilmesi için gerekli olan teorik ve pratik bilgilere ulaşılması amaçlanmıştır.

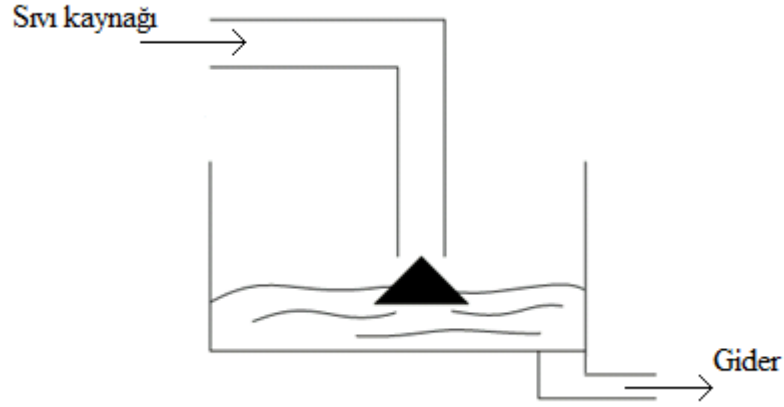
1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, ekzotermik reaktorleri benzeştiren bir ısıl sistemin basamak ve darbe değerlişimlerine cevapları alınarak dinamik modelinin deneysel olarak elde edilmesi, bunların teorik biçimde belirlenen eşdeğerleri ile karşılaştırılması, sistem için uygun kontrol çevrimleri belirlenerek, PID kontrol parametreleri saptanması ve en iyi kontrol şartlarının bulunmasıdır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler ile teorik bilgiler, beraber kullanılarak, üretilen bilgilerden etkin bir şekilde yararlanılması ve diğital ortamda simülasyon çalışmaları yapılarak, yeni bilgilerin üretilmesi amaçlanmıştır.

2. OTOMATİK KONTROL

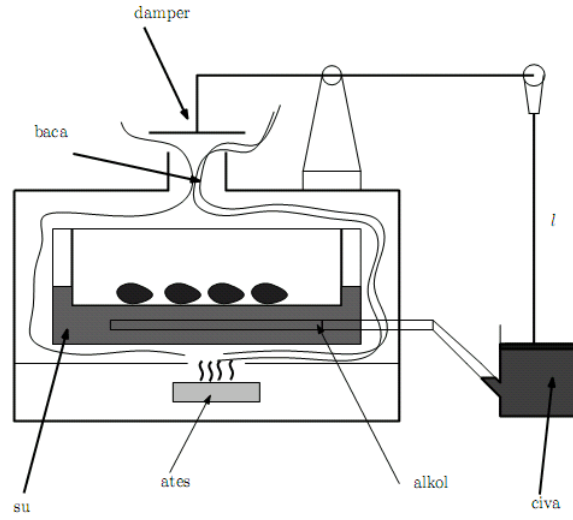
2.1 Otomatik Kontrolün Tarihi

Kontrol sistemlerinin tarihi çok eski dönemlere dayanır. İlk otomatik kontrol sistemleri şarap fiçilerini sürekli olarak dolu tutmaya yarayan sıvı akış kontrolörlerinin kullanıldığı sistemlerdir. Burada kontrol sisteminin amacı, şarap fiçisinden ne kadar kupa şarap alınır alınır fiçiyi dolu tutmaktır. Bu sistemlerde kullanılan sıvı düzeyi kontrol sistemleri günümüzde bile hala kullanılmaktadır. Şekil 2.1'den görülebileceği gibi sıvı düzeyi yükseldikçe özel olarak tasarlanmış tıpa su borusunun ağzını tıkayarak sıvı akışını azaltmakta, sıvı düzeyi düştüğünde ise tıpa boruyu açarak su kaynağından akışı hızlandırmaktadır. Dikkat edilmesi gereken nokta bu sistemde geri besleme sensörü ile eyleyici (actuator) elemanlarının aynı eleman olmasıdır.



Şekil 2.1 : Sıvı düzeyi kontrol sistemi.

Önemli kontrol gelişmelerinden biri, Cornelis Drebbel tarafından 1620 yılında üretilen kuluçka makinesidir (Şekil 2.2). Amaç kuluçka sisteminin iç sıcaklığını istenilen değerde tutmaktır. Burada sıcaklık kaynağı kontrollü şömine, sensör ise içi alkol veya cıva ile dolu cam bir borudur. Sistemin iç ısı arttığında alkol ve cıva içeren cam borudaki sıvı karışımı genişerek belirli uzunluktaki pistonu kaldırır. Bu hareket damperi aşağıya doğru hareket ettirerek bacayı kapatır ve sistemdeki oksijen miktarını düşürerek ateşin şiddetini azaltır. Benzer şekilde sıcaklık istenilen düzeyin altına düştüğünde ise, alkol ve cıva içeren cam borudaki basınç düşmekte ve böylece damper yukarı hareket ederek bacayı açmaktadır. Bu durumda şöminenin ateşi şiddetlenerek ısı arttırılmaktadır. Sistemin referans sıcaklığını ayarlayan ise pistonun uzunluğudur.

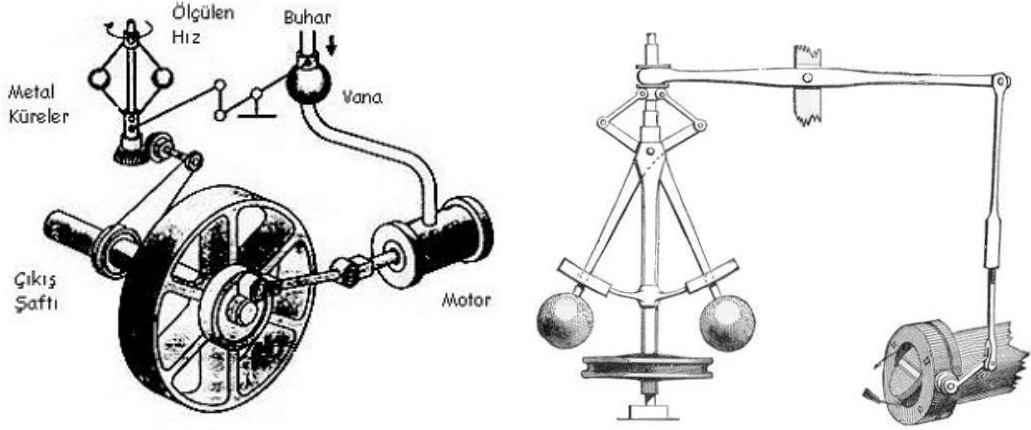


Şekil 2.2 : Kuluçka makinesi.

Diğer bir önemli kontrol düzeneği ise, James Watt tarafından 1788’de geliştirilen *flyball governor* adı verilen sistemdir. Bu sistemin amacı buhar makinelerinin hızını kontrol etmektir. Yine daha önceki sistemlerde olduğu gibi mekanik bir yapıdır. Sistemin basitleştirilmiş çizimi Şekil 2.3’te gösterilmiştir.

Çalışma ilkesi şu şekilde özetlenebilir: Sistem sabit bir devirde çalışırken milin dönüş hızı sabit olduğundan hareketli toplar merkez şaft etrafında belli bir açı ile dönüş yaparlar. Motor miline ani bir yük binmesi durumunda motorun, dolayısıyla milin hızı düşeceğinden, dönmekte olan topların merkez eksenle yaptığı açı azalır.

Bu durumda topların mekanik bağlantısı, buhar makinesinin giriş yolu üzerindeki kelebek vananın açıklığı artar ve sonuçta sisteme daha fazla buhar girer. Bu da makinenin hızının artmasına neden olur Benzer durum mil hızı arttığında da kelebek açısının azalmasına neden olacak ve dolayısı ile buhar makinesi daha az buhar üreterek motoru yavaşlatacaktır [4].



Şekil 2.3 : Buhar motoru hız kontrol sistemi Flyball Governer.

1868'lere kadar ki dönemde otomatik kontrol sistemlerinin gelişimi sezgiler ve buluşlar ile olmaktadır. Kontrol edilen sistemin duyarlılığının artırılmasının ve ani değişimlerin daha yavaş sönümlenmesinin istenmesi, sistemlerin daha ayrıntılı bir şekilde incelemesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Böylece otomatik kontrol teorisinin geliştirilmesi zorunluluğu doğmuştur. J. C. Maxwell kontrol teorisine ilişkin olarak geliştirdiği matematik teorisi ile James Watt'ın Flyball Governor'unu türevsel denklemler ile modellemiştir. Maxwell sistemin değişik parametrelerinin genel sistem performansı üzerine etkilerini incelemiştir [5,6].

2. Dünya savaşı süresinde otomatik kontrol teorisi ve uygulamaları, uçak otomatik pilotlarının, silah hedefleme sistemlerinin, radar anten kontrol sistemlerinin ve birçok diğer geri beslemeli yapıdaki savunma sistemlerinin acilen tasarlanması ve üretilmesi gerekliliği yüzünden, oldukça hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. 1940'lardan itibaren, kontrol uygulamalarının sayısı artmış, bu uygulamalara ilişkin matematik ve analitik yöntemler gelişmiş ve kontrol mühendisliği kendi kurallarına kavuşmaya başlamıştır.

2. Dünya savaşını izleyen yıllarda, frekans analizi teknikleri, kontrol mühendisliğinin ana uğraşı alanı haline gelmiştir. 1950'lerde kontrol mühendisliğinin üzerinde önemle durduğu ve geliştirdiği kavram, kompleks fonksiyonlar yöntemi ve özellikle kök-yer-eğrisi (root-locus) yaklaşımıdır.

1980'lerden itibaren ise, sayısal (dijital) sistemlerinin gelişimi, kontrole yeni bir ufuk açmıştır.

Bu yeni kontrol teknolojisi, eski zamanlarda kontrol mühendislerin yapamayacağı derecede çok hızlı ve yüksek doğrulukta işlem yapabilme olanağı getirmektedir. Bu arada Sputnik'in uzaya gönderilmesi ile başlayan uzay çağı, kontrol mühendisliğinde yeni uğraşı alanı yaratmış, uzay mekikleri ve füzeler için çok yüksek duyarlılıkta, karmaşık kontrol sistemleri tasarlanması zorunluluğu gelmiştir. Bu sebepler yüzünden Liapunov, Minorsky ve diğerleri tarafından zaman-bölgesi teknikleri geliştirilmiş ve oldukça büyük ilgi görmüştür [7].

2.2 Kontrol Sistemleri

Dinamik sistemlerin kontrolü birçok değişik özelliği üzerinde barındıran çok genel bir konudur. İnsanların bizzat kontrolü üslendiği sistemlere genellikle *manuel kontrol sistemleri* adı verilir. Bu tip sistemlere örnek olarak bisiklet kullanan bir kimse verilebilir. Bisikleti kullanan kimsenin yerini bir makine aldığı anda, sistem bir *otomatik kontrol sistemi* olarak adlandırılır. Buna göre bir sistemin otomatik kontrol sistemi olabilmesi için tam olarak makine kontrollü bir sistem olması gerekmektedir. Sıcaklık ve basınç gibi proses değişkenlerini kontrol eden sistemler, robotlar, titreşim azaltıcı sistemler, otomatik iniş sistemleri, otomatik uçuş kontrol sistemleri, otomatik kontrollü füze sistemleri v.b. tam anlamıyla otomatik kontrol sistemleridir [8].

Kontrol sistemlerinin en önemli amaçları, kapalı çevrim sistemi kararlı kılmak ve istenen performans ölçütlerini yerine getirmektir. Burada kararlılık en önemli unsurdur. Zira kararsız bir sistemin düzgün olarak çalışması beklenemez ve böyle bir sistemi istenilen görevleri yerine getiremez. Sistem kararlı olduğunda ise diğer amaç, sistemin belli performans ölçütlerini yerine getirmesi istenir. Bu istekler ise çoğunlukla üç ana grupta toplanabilir:

- Belli bir referans yörüngesinin izlenmesi (tracking problem).
- Sabit bir referans değerinin izlenmesi (regulator problem).
- Sisteme etkiyen bozan etkenlerin etkilerinin yok edilmesi (disturbance rejection problem).

Referans bir yörüngenin izlenmesinde, zamanla değişen bir referansın en iyi biçimde izlenmesi istenir. Bu tür sistemleri, regülatör sistemlerden ayıran en önemli özellik, regülatör sistemlerin referans değerlerinin zamanla değişmemesidir [9].

Bir derin soğutucunun referans sıcaklığının -20°C olarak sabit kalması istenirken, bir güdümlü füze sisteminin yörüngesinin, zamanla değişiyor olması, belli bir rotayı izlemesi istenir. Bozan etkenlerin etkilerinin yok edilmesi konusu da çok önemlidir. Örneğin bir radar antenine etki eden rüzgârın, radarın çıkış sinyalini etkilememesi istenir. Böyle sistemlerde bozucu bastıran kontrol edicilerden yararlanılır [8].

Dünya üzerinde kontrol sistemlerinin kullanılmadığı yerler hemen hemen yok gibidir. Kiminin varlığı son kullanıcı için oldukça net olmasına rağmen kimi otomatik kontrol sistemi gizli olarak bazı sistemlerin içinde yer alır. Örneğin robotlar, otomatik hız kontrol sistemleri, otomatik iniş sistemleri, çamaşır makineleri vs. kullanıcının otomatik kontrol sisteminin varlığını net olarak bildiği halde, bir el kamerasında görüntünün titreşmesini engelleyen *steady-shot* mekanizması, yeni nesil bir cep telefonunda görüntü-ses uyumunu sağlayan faz kilitlemeli devreler ise gizli kontrol sistemleridir.

Günümüzde güçlü, güvenilir ve hızlı bilgisayarların üretiliyor olması ve yaygınlaşması otomatik kontrol sistemlerinin gelişmesinde büyük pay sahibi olmuştur. Aynı zamanda üstün bilgisayar yazılımları vasıtası ile kontrol sistemlerinin daha kolay analizi ve tasarımı yapılabilmektedir. Matlab ve Simulink hazır programları, her düzeydeki kontrol sistemlerinin analiz ve tasarımında büyük yardımcıdırlar [10].

Kontrol sistemleri, sistemdeki sinyallerin değerlendirilmesine göre, Açık Çevrim Sistemler ve Kapalı Çevrim Sistemler olmak üzere iki kısımda incelenebilirler.

2.2.1 Açık çevrim sistemler

Sistemi kontrol eden ünite, sistemin çıkış değerine gereksinme duymuyor ise bu türden sistemlere *açık çevrim sistemler (open-loop systems)* adı verilir. Böyle kontrol sistemlerinde, bir geri besleme yapılmaz. Sistemin mevcut durumuyla ilgili herhangi bir bilgi denetleyiciye geri gelmemektedir. Açık çevrim sistemine örnek olarak, hız göstergesi bulunmayan bir vasıtanın hızını 100 km/saat değerinde sabit tutmak isteyen bir sürücünün durumunu verebiliriz. Sürücü, gaz pedalına belirli bir miktarda bastığında istenen hızda kalacağını tahmin edebilir, fakat aracın gerçek hızına dair kesin bir veriye sahip olamaz [11].

2.2.2 Kapalı çevrim sistemler

Sistemi kontrol eden ünite, sistem çıkış sinyali değerinden yararlanmakta ise, böyle sistemlere *kapalı çevrim sistemler (closed-loop systems)* adı verilir. Kapalı çevrim sistemlerde mutlaka geri-besleme (feedback) yapısı kullanılır. Yani kontrol edilen değişkeninin aldığı değer geri besleme yolu ile kontrol edicinin girişine verilir. Kontrol edici, ayar (set) değeri ile ölçülen ve geri beslenen değeri kıyaslayarak, daha doğrusu ikisi arasındaki farktan ibaret olan hata değerini saptayarak ve bunu kendisine öğretilen uygun bir kontrol algoritmasına göre işleyerek, kontrol edilen sisteme gönderilmek üzere bir çıkış sinyali üretilir [12].

Yukarıdaki verilen vasıta örneğinde, vasıtanın hızını gösteren bir gösterge eklenirse, kapalı çevrim elde edilir. Sürücü hız göstergesine bakarak, hızlanabilme veya yavaşlayabilme kararlarından gerekeni verebilir. Bu örnekte sürücünün gözlerinden ve beyninden kaynaklanan bir geri besleme olayı söz konusudur. Hız göstergesine, otomatik kontrol sistemlerinde, genel olarak *sensör* adı verilir.

Kapalı çevrim kontrol sistemleri, kontrol sisteminde kullanılan elemanlara göre, bilgisayarlı, elektromekanik, biyolojik, hidrolik (sıvılı) ve pnömatik (havalı) kontrol sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Sınıflandırma kontrol sisteminin amacına göre yapılırsa, hız, konum, sıcaklık, gerilim ve akım şiddeti kontrolleri sayılabilir [11].

2.3 Kontrol Ediciler

Kontrol ediciler, geri beslemeli kontrol çevriminde ölçme cihazı ile son kontrol elemanı arasında bulunan cihazlardır. Kontrol edicilerin görevi, ölçülmüş kontrol büyüklüğü sinyalini almak, bunu referans büyüklüğü sinyali ile kıyaslamak, kıyaslama sonucu bulunan hata sinyalini kendine özgü bir biçimde işleyerek, hatayı yok etmeye yönelik sinyal üreterek bunu son kontrol vanasına göndermektir [13].

Proses kontrol uygulamalarında hangi tip kontrol edicilerin kullanılacağına, bunların genel karakteristiklerine bakılarak karar verilir. Kullanılan en genel kontrol ediciler aşağıdaki gibi sıralanabilir [14].

- Aç-Kapa (On-Off) Kontrol Edici
- Oransal (P) Kontrol Edici
- Oransal-İntegral (PI) Kontrol Edici
- Oransal-Türevsel (PD) Kontrol Edici
- Oransal-İntegral-Türevsel (PID) Kontrol Edici

Bu çalışmada PID tip kontrol ediciler üzerinde yoğunlaşacağı için, aşağıda sadece P, PI, PID tipi kontrol edicilerin tanımlamaları yapılacaktır.

2.3.1 Oransal (P) kontrol edici

Oransal kontrol ediciler, saptadıkları hata değerini, P tip kontrol edicinin kazancı olarak bilinen bir sabit ile (K_c) çarparak son kontrol elemanına gönderir. Bu çeşit kontrole de Orantılı (Proportional - P tipi) kontrol adı verilir [13].

$$e(t) = R(t) - y(t) \quad (2.1)$$

$e(t)$: Hata değeri

$R(t)$: Ayar değeri (Ayar değeri zamanın fonksiyonu olabileceği gibi, sabit bir değer de olabilir.)

$y(t)$: Kontrol edilen değişkenin ölçüm değeri

$$y(t) = \bar{y} + K_c \cdot e(t) \quad (2.2)$$

\bar{y} : Kararlı halde (Sıfır hata durumunda, $e=0$) kontrol edici çıkış değeri.

K_c : Kontrol edicinin kazanç değeri (Orantılı kontrol edici kazancı)

P tipi kontrol ediciler, Oransal kazanç (K_c) değeri ile karakterize edilebildikleri gibi kontrol edici çıkışını %100 değiştirecek hata olan ve (2.3) numaralı eşitlikle belirtilen oransal bant (PB) ile de ifade edilebilir.

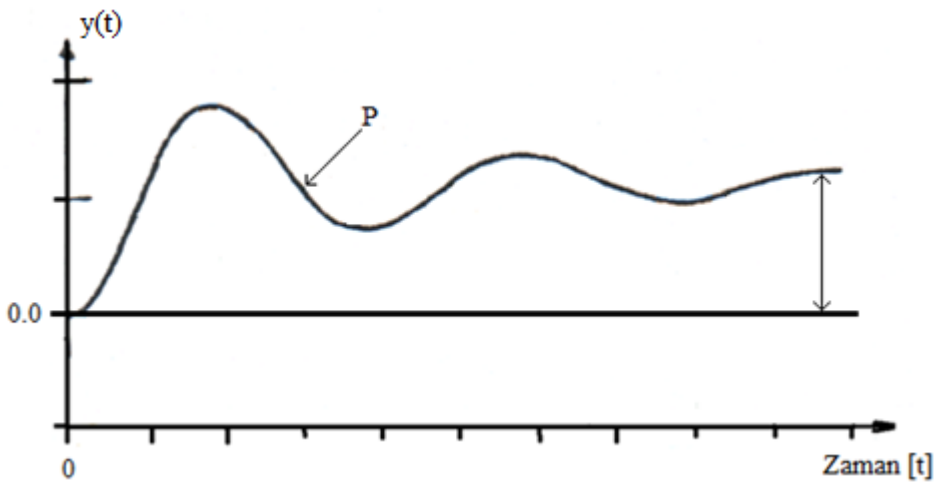
$$PB = \frac{100}{K_c} \quad (2.3)$$

Oransal bant, hatanın hangi aralıkta olduğunu belirler. Bu aralık genellikle $1 \leq PB \leq 500$ aralığında değişir.

Oransal kontrolün önemli sakıncası, kararlı çalışmayı bozan herhangi etkiler veya ayar değeri değişimi sonrasında oluşan kararlı hal hatalarını yok edememesidir. Sadece P tipi kontrol uygulandığında kontrol edici, yukarıda değinilen etkiler altında kalan kontrol edilen değişkeni, belirli bir kararsız çalışma sonunda, belirli bir değere geri döndürür ve sonuçta kontrol edilen değişken yeni bir kararlı hal değerinde sabit kalır. Bu yeni kararlı hal değeriyle başlangıç kararlı hal değeri arasındaki farka *kararlı hal hatası (offset)* adı verilir.

Offsetlerin göz ardı edildiği bazı kontrol uygulamalarında, oransal kontrol basitliğinden dolayı yeğlenebilir. Fakat offset oluşumunun istenmediği daha hassas uygulamalarda, integral kontrol yöntemini içeren bir kontrol ediciyi kullanmak daha uygundur, bu sistem offsetin elimine edilmesini sağlar [13,15].

Bir oransal kontrol ediciye ait sıcaklık-zaman grafiği ve kararlı hal hatası durumu Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Bir prosesin P tipi kontrol edici ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevabı.

2.3.2 Oransal – integral (PI) kontrol edici

Oransal kontrol edici integral kontrol ile geliştirildiğinde oransal – integral kontrol tipi ortaya çıkar ve *PI* ile simgelenir. PI tipi kontrolün sonuçları sadece P tipi kontrolden alınan sonuçlara göre daha tatmin edicidir [13,15].

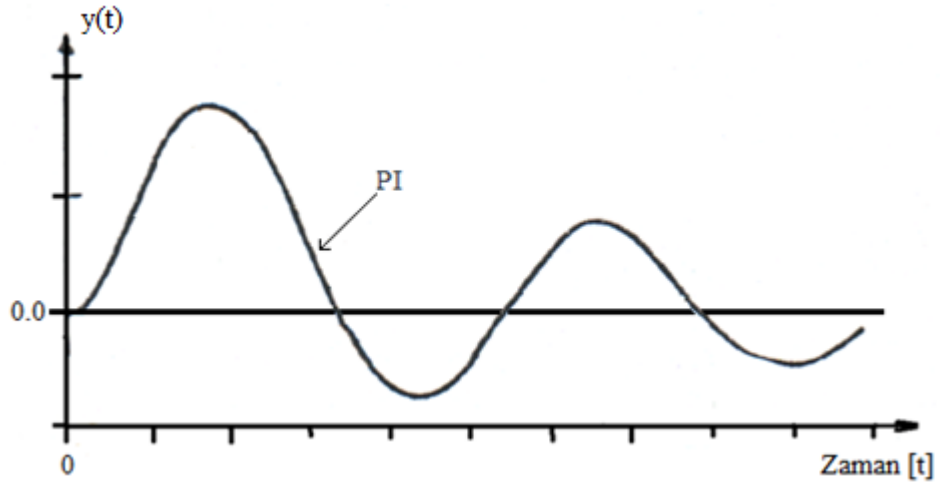
$$y(t) = \bar{y} + K_C \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int e(t) dt \right] \quad (2.4)$$

Oransal – İntegral kontrolde kontrol edicinin çıkış büyüklüğü, oransal kontrole hata değerinin zamana bağlı integralinin eklenmesiyle elde edilir.

Burada τ_I integral zaman sabiti ya da yeniden ayarlama zamanı (reset zamanı) olarak bilinir.

PI tipi kontrolde, oransal kontrol ediciye integral davranış biçiminin eklenmesi offset'i yok etme ve kontrol edilen değişkenin başlangıç değerine geri dönmesini sağlamaktadır. Fakat integral davranışın bu üstünlüğü daha titreşimli bir cevap alınmasına neden olur. Bu durum sistemin kararlılığını düşürür [16].

Bir PI tip KE ile kontrol edilen bir prosesin birim basamak değişimine cevap eğrisi, Şekil 2.5'de görülmektedir.

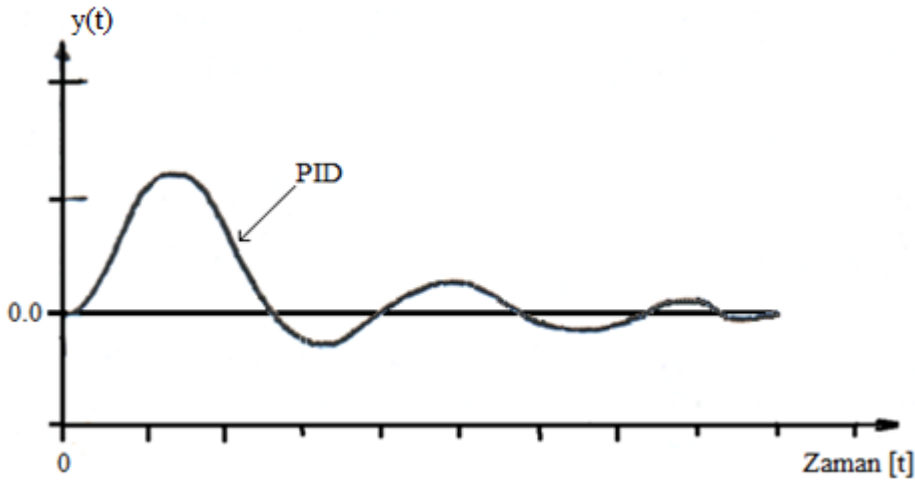


Şekil 2.5 : Bir prosesin PI tipi kontrol edici ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevabı.

2.3.3 Oransal – integral – türevsel (PID) kontrol edici

PI biçimi davranışa türevsel davranış biçiminin eklenmesi cevapta belirgin bir düzelme ve gelişme sağlar. Bu şekilde kontrol edilen değişkene daha çabuk müdahale edilir ve çok az bir titreşim ile kontrol değişkeninin orijinal değerine hızla dönmesi sağlanır [13,17].

Klasik bir PID tip KE ile kontrol edilen bir prosesin birim basamak değişimine cevap eğrisi, Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6 : Bir prosesin PID tipi kontrol edici ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevabı.

Oransal İntegral Türevsel (Proportional-Integral-Derivative) kontrol edici ilk kez 1922 yılında N. Minorsky tarafından önerilmiştir ve günümüzde en çok kullanılan kontrol edicidir. Yaklaşık olarak endüstrideki uygulamaların %95’inde kullanılmaktadır. PID kontrol edici; oransal (proportional), integral (integral), ve türevsel (derivative) denetleyicilerden oluşmaktadır [18].

Çok geniş bir uygulama alanı olmasına rağmen PID denetleyici için standart bir tanımlama yoktur. Ancak en yaygın PID algoritması aşağıdaki gibidir [19]:

$$y(t) = \bar{y} + K_C \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.5)$$

P(t), I(t) ve D(t) sırası ile oransal, integral ve türev işlemlerini temsil ederse; yukarıdaki formül biraz daha basite indirgenerek genel olarak u(t) denetleyici çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanabilir [20].

$$K(t) = P(t) + I(t) + D(t) \quad (2.6)$$

PID denetleyicinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$G_C(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = K_C + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.7)$$

Bazı kaynaklarda (2.7) denklemini aşağıdaki formda da görülebilmektedir:

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (2.8)$$

Burada K_C , K_I , K_D , sırası ile oransal, integral ve türev kazançlarıdır. $U(s)$ kontrol edicinin çıkışı, $e(s)$ de hata sinyali ve kontrol edicinin girişidir.

$$\tau_I = \frac{K_C}{K_I} \quad (2.9)$$

$$\tau_D = \frac{K_D}{K_C} \quad (2.10)$$

τ_I ve τ_D sırasıyla integral ve türev zaman sabitleri olarak isimlendirilirler.

K_C , K_I ve K_D kontrol edicinin oransal, integral ve türevsel kazanç sabitleridir. Bazı kontrol edicilerde ayarlar, K_C kontrol edici kazancı yerine oransal bant değeri üzerinden yapılmaktadır.

(2.5) denklemine göre hesaplanan hata sinyali PID KE'ye gönderilir ve KE, bu hata değerinin türevini ve integralini, içindeki özel yapılandırılmış elektronik devreler vasıtasıyla, hesaplar. KE çıkışı (K) sinyali, oransal kazanç K_C ile hata değerinin çarpım değeri, integral kazancı K_I ile hatanın integralinin çarpım değeri ve türevsel kazanç K_D ile hatanın türevi çarpım değerinin toplamına eşittir.

Bu (K) sinyali kontrol edilen sisteme gönderilir ve yeni çıkış (y) elde edilmiş olur. Algılayıcı bu (y) çıkış sinyali KE'ye geri gönderilerek yeni hata sinyali (e) elde edilir. KE yeni hata sinyaline aynı işlemleri uygular ve bu kontrol işlevi bu biçimde devam eder [21].

PID algoritmasının bileşenleri ve kontrol ediciye etkileri şunlardır:

Kıyaslama: Geri besleme ile alınan bilginin istenen değerle karşılaştırılması ve hatanın tespit edilmesi.

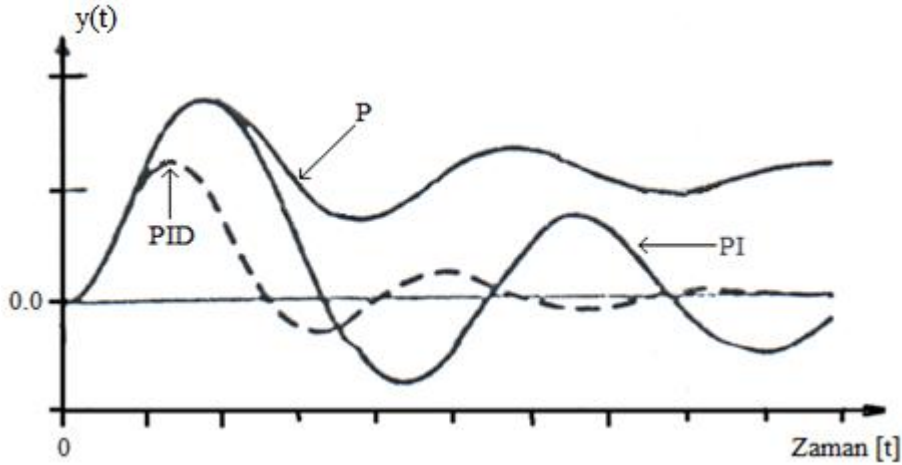
Oransal İşlem: Hata ile orantılı kontrol sinyali üretilmesi.

İntegral İşlemi: Hatanın zaman integrali alınarak belli bir oranda kontrol sinyaline eklenmesi.

Türev İşlemi: Sistemde birim zamandaki değişim bilgisinin (hatanın zamana göre değişimi) belli bir oranda kontrol sinyaline eklenmesi.

Oransal davranış biçimi kontrol edilen sistemin cevabını hızlandırır. Buna karşılık offset verir. İntegral davranış biçimi ise cevabı yavaşlatır ve daha yüksek bir aşma (overshoot) ile titreşimli hale getirir. Bu titreşimler sistemin kararsız hale gelmesine bile neden olabilir. Buna karşılık offset vermez. Türevsel davranış biçimi ise, aşma miktarını ve titreşimleri azaltarak sistemin kararlılığını yükseltir. Bu hali ile integral mod'un kararsızlığa kayma meyilini dengeler ve sisteme stabilizasyon kazandırır.

Şekil 2.7'de bir prosesin çeşitli tip kontrol ediciler kullanılarak, girişteki birim basamak yük değişimine karşı verdiği cevaplar birlikte gösterilmektedir.



Şekil 2.7 : Bir prosesin çeşitli tip kontrol ediciler ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevapları.

Kapalı çevrimli sistemlerdeki her kontrol modunun etkisi Çizelge 2.1'de görülmektedir [17].

Çizelge 2.1 : P, I ve D kontrol modlarının karakteristikleri.

Denetleyici	Yükselme zamanı	Sistem ani tepkisi	Yeni denge oluşumu zamanı	Kararlı durum hatası
K_P	Azalır	Artar	Çok az değişim gösterir	Azalır
K_I	Azalır	Artar	Artar	Yok eder
K_D	Çok az değişim gösterir	Azalır	Azalır	Çok az değişim gösterir

Bu çizelgede belirtilenler genel bir yaklaşım olup, her durum için geçerli değildir. Çünkü K_P , K_I ve K_D birbirlerine bağımlıdır, öyle ki bunlardan birinin değerinin değişmesi, diğerlerinin etkisinin değişmesine neden olabilir. Bu sebeple Çizelge 2.1, K_I , K_P ve K_D işlevlerinin tanınmasında sadece bir referanstan ileri değildir.

K_P , K_I ve τ_D parametrelerinin uygun değerlere ayarlanması ile iyi bir kontrol sağlanabilir. Eğer bu parametreler uygun bir şekilde ayarlanamaz ise, PID KE'nin sağladığı üstünlüklerden yararlanılamaz [22].

PID Kontrol edici tasarımında izlenecek temel aşamalar [3]:

- Sistemin transfer fonksiyonu, deneysel veya modelleme ile elde edilerek hangi değişkenin kontrol edileceğine karar verilmesi.
- Sisteme yükselme zamanını iyileştirmek için oransal denetleyici eklenmesi.
- Sistemde ani tepkinin iyileştirilmesi için türevsel denetleyicinin eklenmesi.
- Kararlı durum hatasını yok etmek üzere, KE'ye integral modun eklenmesi.
- K_P , K_I , K_D parametrelerinin istenilen çıkış elde edilecek şekilde ayarlanması.

2.4 Kontrol Edicilerin Gelişmiş Ayar Yöntemleri

Oransal, integral ve türev işlemlerinin hangi ağırlıkta çıkış sinyaline etki edeceğinin saptanmasına ise *parametre ayarı (tuning)* denir. PID tip KE'lerin ayarlanmasında yararlanılan başlıca ayar yöntemleri şunlardır [23]:

2.4.1 Frekans cevaplarından yararlanılarak geri beslemeli kontrol çevrimlerinin tasarımı

Frekans cevabı analizleri, geri beslemeli kontrol çevrimlerinin tasarımında çok faydalı olan bir yöntemdir. Tasarımcıya aşağıdaki konularda yardımcı olur:

(a) Açık çevrim elemanları için oluşturulan Bode diyagramları kullanılarak kapalı çevrimin kararlılığı incelenebilir.

(b) Bir kontrol edicinin ayarlanabilir parametrelerinin en uygun değerlerinin seçiminde başarıyla yardımcı olur.

Bütün bunları yapabilmek için önce *Bode kararlılık koşulu* olarak bilinen bir konu incelenmelidir.

2.4.1.1 Bode kararlılık koşulu

Bu koşul, geri beslemeli çevrimlerin kararlılığı ile ilgilidir ve Bode diyagramları ile beraber kullanıldığında kapalı kontrol çevrimi için çok güzel tasarım değerleri verir.

Eğer bir açık çevrim transfer fonksiyonunun -180° faz açısına karşın olan genlik oranı 1 değerinden büyükse, bu açık çevrim ile oluşturulan geri beslemeli kontrol çevrimi kararsızdır.

Kararlılık sınırı faz gecikmesine karşılık olan -180° faz açısının elde edildiği açısal frekans değerine *aşma frekansı (crossover frequency)* adı verilir ve ω_{CO} ile gösterilir.

Bu koşulun uygulanması sadece açık çevrim frekans cevabının çizilmesini (örneğin Bode diyagramı) gerektirir. Bu da kuramsal temelde transfer fonksiyonlarının bilinmesi durumunda kolaylıkla çizilebilir. Eğer sistem dinamiği, yani transfer fonksiyonları kuramsal yoldan elde edilemiyor ise, frekans cevabı değerleri deneysel olarak tespit edilmelidir. Bu durumda gereksinilen Bode diyagramı deneysel değerlerden hareketle çizilir.

2.4.1.2 Kazanç payı (gain margin) ve faz payı (phase margin)

Bode diyagramları Bode kararlılık koşuluna göre, kapalı çevrim cevabında kararlı hallerde kalabilmek üzere, bir geri beslemeli kontrol edicinin parametre değerlerinin ayarlanması amacıyla kullanılabilir.

KE, son kontrol valfi, proses ve ölçüm elemanları bloklarından oluşan bir açık sistemin, deneysel veya kuramsal olarak saptanmış frekans değerleri yardımıyla çizilmiş bir Bode diyagramı Şekil 2.8'de görülmektedir.

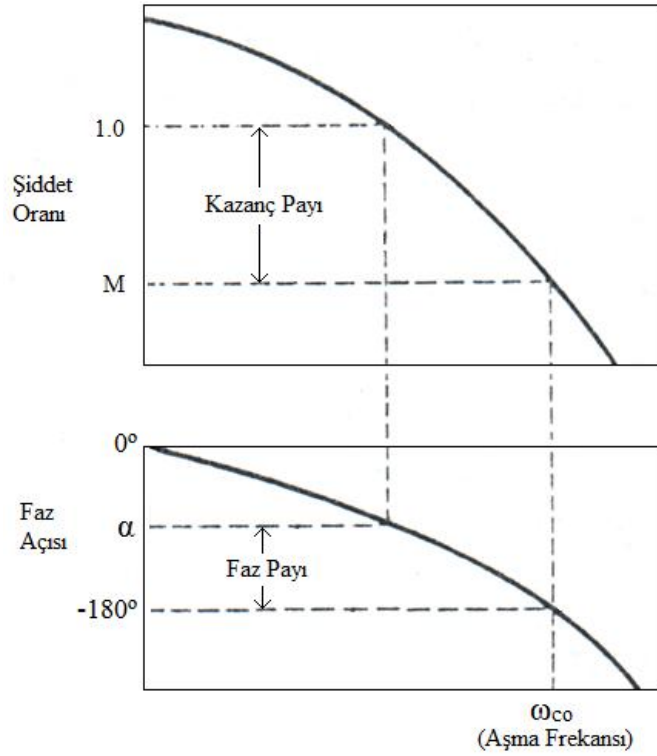
Faz gecikmesinin -180° olduğu noktaya karşın olan ω_{CO} aşma frekansında şiddet oranı değeri M olsun.

Eğer $M > 1$ ise, Bode kararlılık koşulundan bilinmektedir ki, sistem kararlı değildir. Kararsızlığın başlıca nedeninin, sistemde çalışan kontrol edicinin parametre değerlerinin iyi seçilememiş olduğu düşünülmelidir. Böyle bir durumda problem, kontrol edici parametrelerinin doğru belirlenememesi problemidir.

Şekilden de görüldüğü gibi $M < 1$ ve dolayısıyla sistemin kararlı olduğunu varsayalım. Buradaki problem ise, sistemin ne kadar kararlı olduğunu belirleyebilmektir. Açık ki M değeri, 1'den çok az küçük ise, sistem şöyle-böyle veya yetersiz kararlıdır ve umulur ve beklenir ki, kuramsal olarak kararlı olsa bile, ileri derecede titreşimli bir davranış gösterecektir. (Kompleks düzlemde, sistem transfer fonksiyonunun paydasının köklerinin sanal eksene çok yakın veya onun üzerinde bulunması hali).

Öte yandan M değeri, sistemin fiziksel parametreleri vasıtasıyla belirlenen bir değer olduğu için ve bu parametreler de, başlangıçta tam doğru olarak alınmış olsa bile, zaman içinde değer değişimine uğrayabileceklerinden, M 'in 1'e yakın değerleri güvenli bir tasarım için yeterli sayılmamalıdır.

Bu yoruma sayısal bir büyüklük karşı getirmek amacıyla, *kazanç payı* (*gain margin*) adı verilen aşağıdaki tanım yapılmıştır.



Şekil 2.8 : Açık sistem Bode diyagramı üzerinde kazanç payı ve faz payı tanımlamaları.

$$\text{Kazanç Payı} = \frac{1}{M} \qquad M = \frac{1}{\text{Kazanç Payı}} \qquad (2.11)$$

Güvenli bir tasarım için kazanç payı değerinin 1.7'den düşük olmaması gerektiği, genel olarak benimsenmiştir. Bunun anlamı aşma frekansında şiddet oranının 1.7 ile bölünmüş bir halde elde edileceği, 1'den daha fazla uzaklaşılacağı için yapılan tasarımın kararlılık açısından daha güvenli olacaktır.

Şu halde kazanç payı gerçekte bir güvenlik katsayısıdır ve tasarımcının özel görüşlerine bağlı olarak arttırılabilir veya azaltılabilir. Doğal olarak bu katsayının alt sınırı 1 değeridir.

Özet olarak kazanç payı hakkında şunlar söylenebilir:

(a) Ölü zaman, proses kazancı veya zaman sabiti, veya kontrol edici parametreleri gibi sistem parametreleri, çoğu kez tam doğru değer olarak saptanamadıkları için, kararlı bölgede kalabilmek üzere, 1'den büyük, örneğin 1.7 gibi bir kazanç payı değeri alınmalıdır.

(b) Sistem parametreleri çok iyi biliniyorsa kazanç payı daha küçük, örneğin 1.4 gibi, alınabilir. Parametreler ne kadar az güvenli iseler kazanç payı o kadar yüksek seçilmelidir. Örneğin bu değer 3.00'a kadar yükseltilebilir.

Tasarım amacıyla sık sık kullanılan diğer bir pay kavramı da *faz payı (phase margin)* oluşturur. Şekil 2.8'de de görüleceği gibi faz payı, -180° ile kazancın 1 olduğu açısız frekanstaki faz gecikme açısı arasındaki farktır. Bundan dolayı faz payı, sistemi kararlı bölgeye çekmek için eklenmesi gereken faz gecikme açısı değerini göstermektedir. Faz payı için tipik bir tasarım değeri, bunun 30° 'den büyük tutulmasıdır.

$$\text{Faz Payı} = 180 - \alpha \qquad \alpha \geq 30^\circ \qquad (2.12)$$

Kazanç payı için yapılan yorumlar ve öneriler, aynen faz payı için de geçerlidir.

Kazanç payı ve faz payı kavramlarından yararlanarak iyi bir geri beslemeli kontrol çevrimi tasarımı yapmak mümkündür. Fakat izlenecek yol, deneme – yanılma tipinde olduğundan, özellikle bir PID tip kontrol edici tasarlamak üzere, oldukça güçtür. Çünkü KE'nin belirlenmesi gereken parametrelerinin sayısı fazladır. Bunun yerine, genellikle iyi birer kazanç ve faz payları veren, daha basit kurallar bulunmaktadır. Bunlar, aşağıda açıklanacak olan Ziegler – Nichols kurallarıdır [15,21].

2.4.2 Ziegler – Nichols ayar yöntemi

Ziegler ve Nichols adlı bilim adamları tarafından önerilen bu yöntem, bir kapalı çevrim yöntemidir ve çok tanınan ve kullanılan bir yöntemdir.

ZN yönteminin iki ayrı uygulama şekli bulunmaktadır.

Eğer kontrol edilen sistem salınımlı cevap verebiliyorsa, osilasyon (eş şiddetli salınım) yöntemi uygulanır. Bu yöntemde PID KE'nin öncelikle P mod'u ayarlanır. Önce K_C (kontrol edici kazancı) küçük bir değerde tutulur. Sistem girişine artırımlar uygulanır ve sistem cevabı incelenir.

Kapalı çevrim sistem cevabı sürekli bir çevrim ya da sabit genlikli bir sönümlenme verene kadar K_C küçük aralıklarda arttırılır. Süreklilik gösteren bir eş şiddetli, salınım veren K_C değeri, K_U [ultimate (son, limit) kazanç] olarak kaydedilir. Bu durumda sürekli salınımların periyodu P_U değerinde ise, KE parametreleri, Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi hesaplanır [19].

Çizelge 2.2 : Ziegler-Nichols Kapalı Çevrim Ayar Parametreleri.

Kontrol edici tipi	K_C	τ_I	τ_D
P	$0.5 \cdot K_U$	-----	-----
PI	$0.45 \cdot K_U$	$\frac{P_U}{1.2}$	-----
PID	$0.6 \cdot K_U$	$\frac{P_U}{2}$	$\frac{P_U}{8}$

Çizelge 2.2'de verilen ZN kapalı çevrim ayar parametreleri 1/4 (%25) aşma oranı sağlamak üzere geliştirilmiştir. Bazı kontrol çevrimlerinde, 1/4 aşma oranıyla elde edilen sönümlenmenin derecesi, ayar değeri değişimlerdeki büyük aşma oranları nedeniyle istenmeyen bir durumdur. Bu istenmeyen durumu ortadan kaldırmak için ZN yöntemi az aşma oranı ve sıfır aşma oranı için geliştirilmiştir. Orijinal ve geliştirilmiş Ziegler – Nichols Ayar parametreleri Çizelge 2.3'te verilmektedir [14].

Çizelge 2.3 : Orijinal ve geliştirilmiş Ziegler – Nichols ayar parametreleri.

	K_C	τ_I	τ_D
¼ Bozunma oranı (ZN-1)	$0.6 \cdot K_U$	$\frac{P_U}{2}$	$\frac{P_U}{8}$
Sıfır aşma oranı (ZN-2)	$0.2 \cdot K_U$	$\frac{P_U}{2}$	$\frac{P_U}{3}$
Az aşma oranı (ZN-3)	$0.33 \cdot K_U$	$\frac{P_U}{2}$	$\frac{P_U}{3}$

Kapalı çevrim sisteme deneysel olarak titreşimler yaptırmak, sisteme zarar verebilir. Bu nedenle ZN yöntemi, günümüzde deneysel olarak değil, dijital simülasyon yapılarak uygulanmaktadır. Söz konusu simülasyonlar, hazır programlar ile yapılabileceği gibi, doğrudan kapalı çevrim transfer fonksiyonundan yararlanarak da yapılabilir.

2.4.2.1 Limit kararlı hal değerlerinin elde edilmesi

Kontrol sistemini limit kararlı hale gelmesinde, kontrol sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonunun paydası (sistem karakteristik denklemi) etkindir. Karakteristik denklem üzerinde uygulanan, çok basit ve faydalı bir yöntemle, sistemin limit kararlı hal parametrelerini (K_U ve P_U) elde etmek mümkündür. *doğrudan yerine koyma (direct substitution)* adı ile bilinen bu yöntem uygulanırken karakteristik denklemde doğrudan $s = i \cdot \omega$ değeri yerine konur ve özdeşliklerden yararlanılır.

Bilindiği gibi eğer karakteristik denklemin bütün kökleri kompleks düzlemin sol yarı tarafında bulunuyorsa sistem kararlı, köklerden herhangi biri sağ yarı tarafta ise kararsızdır. Bundan dolayı kompleks düzlemin sanal eksenini kararlılık sınırını göstermektedir. Bu eksen üzerinde yer alan köklerin gerçek kısmı $a=0$ değerinde olduğundan, bu kökler için $s = i \cdot \omega$ yazılabilir. Bu kompleks sayı sistemin, limit kararlı durum olarak adlandırılan sabit uzanımlı (genlikli) sönmeyen sonsuz titreşimli zaman cevabı vermesine yol açar. Yöntem karakteristik denklemde bu değeri yerine koymak ve elde edilen denklemi sağlayan ω değerini ve diğer parametreleri (KE kazancı (K_C)) hesaplamaktan ibarettir. Limit kararlı hal titreşimlerin ω_U ultimate açısal hızları ve bununla ilişkili olarak P_U titreşimlerin ultimate periyotları, aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

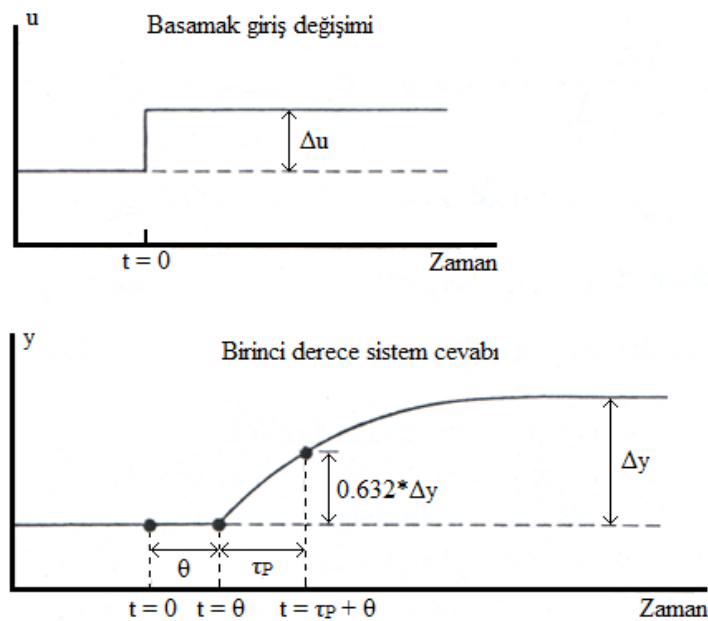
$$P_U = \frac{2\pi}{\omega_U} \quad (2.13)$$

Titreşimlerin bu şekilde saptanan periyotları, ZN ayarlama yönteminde adı geçen periyotların tam aynıdır. Anlatılan yöntem, sistemlerin frekans cevaplarının eldesi için uygulanan yöntemle yakından ilişkilidir. Çünkü her iki yöntemde de karakteristik denklemde $s = i \cdot \omega$ değeri yerine konularak çalışılmaktadır. Bu şekilde, Laplace bölgesi incelemelerinden frekans bölgesi incelemelerine bir geçiş yapılmakta ise de, gerçekte bu ikisinin tamamen farklı olduğu unutulmamalıdır. Çünkü frekans bölgesi incelemelerinde tüm sistemin transfer fonksiyonundan yararlanılırken burada sadece sistemin karakteristik denkleminde yararlanılmaktadır.

2.4.2.2 Reaksiyon eğrisi yöntemi

Bu yöntem ile PID parametreleri, sistemin *reaksiyon eğrisi* olarak adlandırılan açık çevrim transfer fonksiyonunun, basamak şeklindeki giriş değişimine verdiği dinamik cevap incelenerek belirlenir. Şekil 2.9'daki grafik üzerinde gösterilen değerler bulunur. Bu cevap denklem (2.14)'deki gibi birinci dereceden zaman gecikmeli bir fonksiyonun, birim basamak fonksiyonuna verdiği cevaba denktir.

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau_p s + 1} \quad (2.14)$$



Şekil 2.9 : Reaksiyon eğrisi yöntemi grafiği.

Çizelge 2.4'te, reaksiyon eğrisi yöntemi uygulamasıyla tespit edilen sistem kazancı K_p , sistem zaman sabiti τ_p ve ölü zaman θ değerlerine bağlı olarak, açık çevrimi kapatacak en iyi KE'nin parametre değerlerinin hesaplanması formülleri görülmektedir. Bu parametreler de kapalı çevrimin 1/4 aşma oranı vereceği varsayımıyla elde edilmiştir. Eğer sistem düşük $\frac{\theta}{\tau_p} \left(\frac{\text{ölü zaman}}{\text{proses zaman sabiti}} \right)$ oranına sahipse, bu düşük oran K_C 'nin (kontrol edici kazancı) çok büyük olmasına neden olur. Uygun oran $\frac{\theta}{\tau_p} \approx 0.1-1.0$ arasındadır. Aynı şekilde (τ_I) integral zaman sabitinin düşük değerde olması, kapalı çevrim cevabının çok salınımlı olmasına neden olur [24].

Çizelge 2.4 : Reaksiyon eğrisi yöntemine göre uygun KE ayar parametreleri.

Kontrol edici tipi	K_C	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{\theta}{\tau_p} \right)^{-1}$	-----	-----
PI	$\frac{0.9}{K_p} \left(\frac{\theta}{\tau_p} \right)^{-1}$	3.33 θ	-----
PID	$\frac{1.2}{K_p} \left(\frac{\theta}{\tau_p} \right)^{-1}$	2 θ	$\frac{1}{2}\theta$

Sıcaklık kontrolü gibi yavaş ve gecikmeli sistemlerde, PID KE parametre değerlerini elde etmek üzere, reaksiyon eğrisi yöntemi en kolay yöntem olduğu için tercih edilebilir. En azından uygun değerlere ulaşmak üzere, iyi bir başlangıç sağlayabilir [25].

2.4.3 Cohen – Coon ayar yöntemi

Bu yöntem, reaksiyon eğrisi yöntemine çok benzer. Şekil 2.9 gibi bir reaksiyon eğrisi elde edildikten sonra, sadece PID parametrelerinin hesaplamalarında farklılık gösterir. Cohen – Coon yönteminde ¼ aşma oranı yanında minimum offset değeri elde edilir. C-C yöntemine göre KE ayar parametreleri Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Cohen – Coon yöntemine göre uygun KE ayar parametreleri.

Kontrol edici tipi	K_C	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{\tau_p}{\theta} \right) \left(1 + \frac{\theta}{3\tau_p} \right)$	-----	-----
PI	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{\tau_p}{\theta} \right) \left(\frac{9}{10} + \frac{\theta}{12\tau_p} \right)$	$\theta \frac{30+3(\theta/\tau)}{9+20(\theta/\tau)}$	-----
PID	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{\tau_p}{\theta} \right) \left(\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau_p} \right)$	$\theta \frac{32+6(\theta/\tau)}{13+8(\theta/\tau)}$	$\theta \frac{4}{11+2(\theta/\tau)}$

Cohen – Coon ayar yöntemi zaman gecikmesiz veya çok küçük zaman gecikmeli sistemler için uygun değildir. Çünkü zaman gecikmesi değeri $\theta \approx 0$ değerine yaklaştıkça K_C değeri büyür ve sistemde salınımlara neden olur [26].

2.4.4 Tyreus – Luyben ayar yöntemi

PI ve PID kontrol ediciler için ZN yöntemine alternatif olarak Tyreus – Luyben ayar yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle elde edilen değerler salınımlı azaltıcı ve sağlamlık sağlayacak biçimdedirler. Elde edilen K_U ve P_U değerleri ile elde edilen KE parametreleri, Çizelge 2.6'da görülmektedir [27].

Çizelge 2.6 : Tyreus – Luyben yöntemi ile uygun KE ayar parametreleri.

Kontrol edici tipi	K_C	τ_I	τ_D
PI	$\frac{K_U}{3.2}$	$2.2 \cdot P_U$	-----
PID	$\frac{K_U}{2.2}$	$2.2 \cdot P_U$	$\frac{P_U}{6.3}$

2.4.5 İntegral ilişkisi ile ayarlama

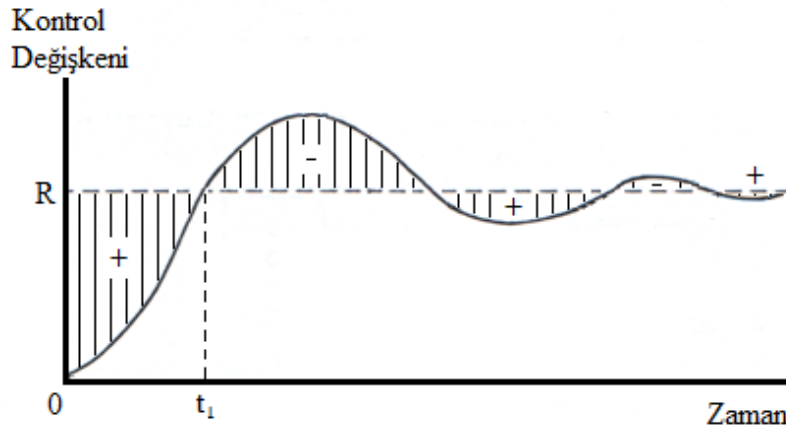
Minimum integral hata yöntemi Louisiana State Üniversitesinde Profesör Paul W. Murrill ve Profesör Cecil L. Smith tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin geliştirilmesinde de, birinci derece ve ölü zamanlı bir proses transfer fonksiyonu esas alınmıştır. Bu yöntemde, kontrol edilmekte olan değişkenin ayarlandığı değerden, gözlem müddeti boyunca gerçekleşen ayrılmaları (hata değerleri) toplamının (Şekil 2.10'da gösterilen taralı bölgelerin toplamının) minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle yöntemin diğer adı *minimum integral hata yöntemi*'dir.

Hata integrali hesaplanırken uygulanan kriterler ve formüller, aşağıdaki gibi özetlenebilir.

2.4.5.1 Hatanın karesinin integrali (ISE, Integral of the square error)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2.15)$$

Ayar değerinden pozitif yönde ve negatif yönde olan ayrılmaların, doğrudan integral alınarak birbirine eklenmesi ile yapılacak yanlış hesabın önüne geçmek ve ayrıca büyük hataları daha belirginleştirmek üzere, hataların karelerinin integrali alınır [28].



Şekil 2.10 : Zamanla ayar değerinden ayrılmalar (hatalar).

2.4.5.2 Hatanın mutlak değerinin integrali (IAE, Integral of the absolute value of the error)

Hatanın mutlak değerinin integralini alınarak pozitif ve negatif hataların birbirini etkilemesinin önüne geçilir ve hem büyük hem de küçük hatalara eşit derecede ağırlık verilmiş olur.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.16)$$

2.4.5.3 Hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı integrali (ITAE, Integral of the time-weighted absolute value of the error)

Zaman ağırlıklı bu fonksiyon uzun süre boyunca devam eden hataları aza indirir. Bu fonksiyon aynı zamanda kısa yerleşme zamanı sağlayan kontrol edici ayarları elde eder.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (2.17)$$

Yukarıda verilen üç kriterin optimum kontrol parametrelerinin hesaplanmasında aşağıdaki denklemlerden yararlanır:

$$Y = A \left(\frac{\theta}{\tau_p} \right)^B \quad (2.18)$$

Çizelge 2.7 : Hata integrali yöntemi ile KE ayarlamasında PID parametreleri hesabı için yararlanılacak A ve B sabitleri.

		A	B
IAE	Oransal	1.435	-0.921
	Integral	0.877	-0.749
	Türevsel	0.482	1.136
ISE	Oransal	1.495	-0.945
	Integral	1.101	-0.771
	Türevsel	0.560	1.006
ITAE	Oransal	1.357	-0.947
	Integral	0.842	-0.738
	Türevsel	0.381	0.995

(2.18) denklemindeki τ_p ve θ değerleri proses reaksiyon eğrisinden elde edilen zaman sabiti ve ölü zaman değerleridir. A ve B sabitleri ise, uygulanan integral yöntemine bağlı olarak Çizelge 2.7'den alınır. Bu denklemden hesaplanan Y değerlerinden hareketle, PID KE'nin parametreleri aşağıdaki eşitliklere göre belirlenir [29].

$$K_C = \frac{Y}{K_P} \quad (2.19)$$

$$\tau_I = \frac{\tau_p}{Y} \quad (2.20)$$

$$\tau_D = Y \cdot \tau_p \quad (2.21)$$

2.4.6 IMC (Internal Model Control) yöntemi

IMC geniş kapsamlı bir parametre ayarlama yöntemidir. bu yöntemde PID kontrol parametreleri hesaplanmasında aşağıdaki eşitliklerden yararlanılır [2].

$$K_C \cdot K_P = \frac{2\left(\frac{\tau_P}{\theta}\right) + 1}{2\left(\frac{\tau_c}{\theta}\right) + 1} \quad (2.22)$$

$$\tau_I = \frac{\theta}{2} + \tau_P \quad (2.23)$$

$$\tau_D = \frac{\tau_P}{2\left(\frac{\tau_P}{\theta} + 1\right)} \quad (2.24)$$

3. KİMYASAL REAKTÖRLER

Kimyasal reaktörler çalışma biçimlerine göre sürekli karıştırılmalı tank reaktörler, borusal (piston akışlı) reaktörler ve kesikli reaktörler olmak üzere 3 ana gruba ayrılır.

3.1 Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktörler (CSTR)

Proseslerde en çok kullanılan reaktör tipidir. Özellikle organik kimya endüstrisinde ve plastiklerin, patlayıcıların, sentetik kauçukların üretiminde kullanılır. İçine sürekli biçimde reaksiyon hammaddeleri beslenen ve reaksiyon ürünleri alınan, çok iyi karıştırıldığı ve bu nedenle her noktasında aynı bileşime sahip olduğu varsayılan tank biçiminde cihazlardır. Genellikle, akış debisi çok yüksek olmayan sıvı faz reaksiyonlar için kullanılır. Bu tip reaktörlerin sıcaklık kontrolü oldukça kolay bir şekilde yapılabilir [30].

Sürekli karıştırılmalı tank reaktörler genel olarak kararlı çalışırlar ve tank içinde her konumdaki derişim, sıcaklık ve tepkime hızında önemli değişmeler söz konusu olmaz. Ayrıca yalnız çalıştırılabilecekleri gibi, birbirine seri bağlı olarak da çalıştırabilirler [31].

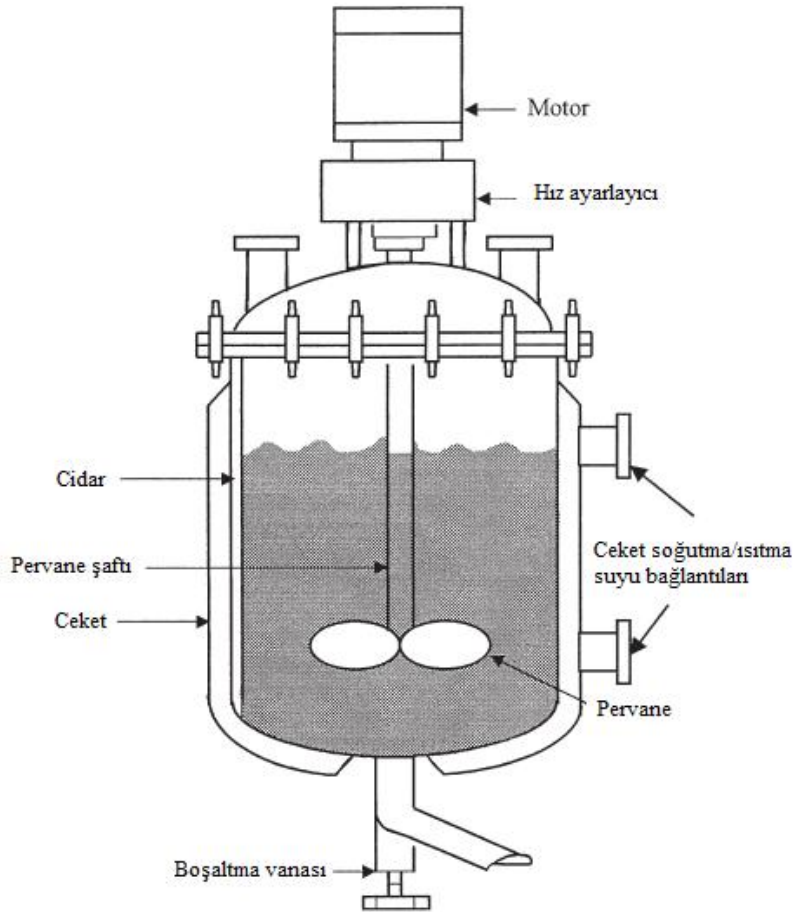
3.2 Piston Akışlı Reaktörler (PFR)

Silindir şeklinde bir borudan ibarettir. Genel olarak gaz fazında gerçekleştirilen katalitik reaksiyonlar için, nadiren de bazı sıvı faz reaksiyonları için kullanılırlar. Birim reaktör hacmi için en yüksek dönüşüm oranını sağlar. Bu reaktörlerde, özellikle reaksiyon ekzotermik karakterde ise bazı sıcak noktalar oluşabilir. Bu nedenle bu tip reaktörlerin sıcaklık kontrolü oldukça güçlükle yapılabilir.

3.3 Kesikli (Batch) Reaktörler

Kesikli reaktörler, daha ziyade hassas kimyasal maddelerin üretiminde, beşeri ilaç üretim endüstrisinde, biyokimya endüstrisinde kullanılan, açık veya kapalı tank biçiminde reaktörlerdir. Tank hacmi 1 litre kadar küçük olabilir. Genellikle sabit hacim şartlarında, bazı özel durumlarda ise sabit basınç altında çalışabilirler. Özellikle çok büyük reaksiyon zamanı gerektiren sıvı faz reaksiyonlar için uygundur. Bir üretim prosesinin geliştirilmesi için veya pahalı maddelerin üretiminde, az miktarda ürün eldesi için ideal reaktörlerdir [32,33].

Tipik bir kesikli reaktör resmi Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Kesikli bir reaktörün genel görüntüsü.

Öte yandan, birim madde üretimi başına yüksek maliyet gerektirmesi, uzun yükleme ve boşaltma zamanına ihtiyaç duyması, büyük ölçekli üretimlerde kullanışsız olması gibi dezavantajları da vardır.

Verimli bir çalışma için her şeyde olduğu gibi kesikli reaktörlerinde doğru bir şekilde modellenip bu modele uygun bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Bu denli kullanım alanlarına sahip olmasına rağmen kesikli reaktörler son 50 yıldır hemen hemen aynı şekilde kontrol edilmektedir [30].

3.3.1 Kesikli reaktörlerin modellenmesi

Soğutma ceketli kesikli bir reaktörün modellenmesi için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

1. Reaktör içerisinde mükemmel karışma vardır. Bunun sonucu olarak reaktör içerisinde her konumda ve belirli zamanlarda sıcaklık ve derişim aynı değerlerdedir.
2. Reaktör içindeki karışımın ortalama ısı kapasitesi ve ortalama yoğunluğu, sıcaklık ve derişimden bağımsız, sabit değerlerdir.
3. Ceket soğutma suyunun giriş sıcaklığı sabittir.
4. Çok iyi yalıtım sonucu, sistemin çevreye ısı kayıpları ihmal edilebilir düzeydedir.

Soğutma ceketli kesikli bir ekzotermik reaktörün matematiksel modeli, enerji denklikleri şeklinde aşağıda verilmiştir [31].

Reaktör için yapılan enerji dengesinden, reaktör sıcaklığının zamanla değişimi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{dT_{I\dot{C}}}{dt} = \frac{Q - UA(T_{I\dot{C}} - T_{CE})}{V_{I\dot{C}} \cdot \rho_{I\dot{C}} \cdot C_P} \quad (3.1)$$

Ceket için yapılan enerji dengesinden de, soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamanla değişimi, yine aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{dT_{CE}}{dt} = \frac{m_{SU} C_{P_{CE}} (T_0 - T_2) + UA \left[T_{I\dot{C}} - \frac{(T_0 + T_2)}{2} \right]}{V_{CE} \cdot \rho_{CE} \cdot C_{P_{CE}}} \quad (3.2)$$

Denklem (3.1) ve (3.2)'deki parametrelerin açıklamaları şunlardır:

Q: Reaktöre giren ısı miktarı

U: Toplam ısı transfer katsayısı

A: Isı transfer alanı

m_{SU} : Soğutma suyunun kütlesi

$\rho_{i\dot{C}}$: Reaktördeki çözeltinin yoğunluğu

ρ_{CE} : Soğutma suyunun yoğunluğu

C_P : Reaktördeki çözeltinin ısı kapasitesi

C_{PCE} : Soğutma suyunun ısı kapasitesi

$V_{i\dot{C}}$: Reaktör hacmi

V_{CE} : Ceket hacmi

$T_{i\dot{C}}$: Reaktör iç sıcaklığı

T_2 : Soğutma suyu çıkış sıcaklığı

T_0 : Soğutma suyu giriş sıcaklığı

T_{CE} : Soğutma suyu ortalama sıcaklığı (ceket soğutma suyu sıcaklığı)

4. PROSES TANIMA

Kontrol edilecek bir proses, öncelikle transfer fonksiyonu/fonksiyonları ile tanımlanmalıdır. Transfer fonksiyonları, temel mühendislik ilkeleri uygulanarak, teorik biçimde elde edilebilir. Ama aynı zamanda, deneysel olarak da belirlenebilirler. Proses tanıma, laboratuvar şartlarında fiziksel bir modelden veya çalışmakta olan bir procesten veriler alıp bunları işleyerek proses parametrelerini ve sistemin transfer fonksiyonunu belirleme çalışmasıdır. Bu çalışma sonunda, proseseye uygulanacak kontrol, mükemmel bir biçimde tasarlanabilir [21].

Prosesin teorik modeli, sistem özelliklerine göre lineer veya lineer olmayan (non-linear) biçimde, tek parça parametrelili veya dağıntık parametrelili formda, dinamik veya statik temelde elde edilebilir. En önemlisi de kesikli veya sürekli zamanlı olabilir. Teorik modelleme, basit sistemler için olumlu sonuçlar sağlar. Fakat karmaşık sistemlerin bilinmeyen proses parametreleri, kesinlikle deneysel olarak belirlenmeli, bunun için proses başında dinamik testler uygulanmalıdır [15].

Özellikle kimyasal reaksiyon sistemlerinde proses davranışının iyi tanımlanamadığı durumlarda, deneysel biçimde prosesin dinamik davranışı tanımlanabilir ve sonuçta prosesin kontrolü için bir transfer fonksiyonu geliştirilebilir [35].

İlke olarak, gerçeğe yakın bir modelleme yapabilmek için, teorik ve deneysel çalışmalar beraber yürütülmelidir.

Proses tanıma, çevrimdışı (offline) ve çevrimiçi (online) olarak iki ayrı biçimde yapılabilir.

Çevrimdışı (offline) çalışmada deneysel veriler değişik zamanlarda kaydedilir. Sonra bu veriler bir araya getirilip yorumlanarak prosesin parametreleri hesaplanır. Yani çevrimdışı tanımada önce tüm deneysel veriler toplanır ve daha sonra tüm bu veriler bir araya getirilip yorumlanarak parametre değerleri belirlenir.

Çevrimiçi (online) çalışmada ise parametreler, deneysel çalışmadan hemen sonra belirlenir. Akabinde belirlenen bu parametre değerleri proseseye uygulanır ve işlem birkaç kez tekrar edilir. Yani deneme-yanılma tipi bir çalışma gerçekleştirilir [36,37].

4.1 Proses Tanıma Yöntemleri

Proses tanıma için birçok yöntem geliştirilmiştir. Çok sayıdaki proses tanıma yöntemlerinden çok önemli ve halen kullanılmakta olanlardan başlıcaları; basamak değişimi testi ile tanıma, darbe testi ile tanıma ve sinüzoidal değiştirme testi ile tanıma yöntemleridir. Bu testler de kendi içinde çeşitli kollara ayrılır [38].

4.1.1 Basamak değişimi testi ile proses tanıma

Basamak değişimi testi bir prosesin deneysel lineer dinamik modelini elde etmek için kullanılan yöntemdir. Deneysel verilerden elde edilen basamak cevap bilgileriyle prosesin modelini oluşturmak için gereken parametreler (ölü zaman, zaman sabiti, sönümlenme katsayısı) bulunabilir.

Basamak cevap fikri ilk olarak basamak cevaptan birinci derece ve zaman gecikmeli model parametrelerini tahmin etmek için önerilen ilk yöntemi öneren Küpfmüller (1928) tarafından tanıtılmıştır. Bu Oldenbourg ve Sartorius (1948) tarafından ve sonra da Rake (1980) ve Unbehauen ve Rao (1987) tarafından tanımlanmış grafiksel teknik cevap eğrisinin bükülme noktasına teğet çizmeyi gerektirmektedir ve bu birinci ve ikinci derece modeller için benzer yöntemlerin bir numarası olsun diye bir kaynağa dönüştürülür. Strejc (1959), Küpfmüller'in yöntemine bir gelişme olarak bükülme noktasının herhangi bir tarafında uygun bir şekilde seçilmiş iki noktaya dayanan parametreler tahmin etmeyi önermiştir.

Yöntem basit ve kolay uygulanabilir karakterdedir. Birçok mühendislik amacı için yeterli sayılabilecek bir model verir. Örneğin, buradan elde edilen transfer fonksiyonu, kontrol edicinin kurulması için ilk değerleri temin etmede kullanılabilir. Fakat yöntem, tam doğru bir yüksek derece model veremez ve non-lineerliğe çok duyarlıdır. Bilindiği gibi birçok kimya mühendisliği prosesi, non-lineer karakterdedir. Bu durumda lineer modelin parametre değerleri, önemli derecede hatalı olurlar. Fakat basamak değişiminin değeri çok küçük seçilirse (girişin normal değerinin 10^{-4} – 10^{-6} kadar küçük değerleri) non-lineerlik bir problem olmaktan çıkar. Diğer yönden, bu kadar küçük giriş sinyallerinin de her proseste rastlanılabilecek normal gürültü sinyalleri arasında, çıkışta algılanamaması mümkündür. Böylelikle basamak testinin deneysel olarak, sınırlı bir uygulama alanına sahip olduğu anlaşılır [15].

4.1.2 Basamak değişimi testi ile tanıma yöntemleri

Basamak cevaba dayanan yöntemler, özellikle proses endüstrisinde genellikle sistem tanımları için kullanılır.

Bu yöntemde, prosese bir basamak girdisi $U(t)$ verilir ve çıktıları $y(t)$ zamana bağlı değişken olarak kaydedilir. Hızlı ve pratik sonuç üretilmesi gerektiğinde basitçe çıktının verdiği eğrinin şekline bakarak modelin mertebesi tahmin edilebilir [42].

Bu yöntem genel olarak açık çevrim için kullanıldığı gibi kapalı çevrim proseslerde de kullanılmaktadır.

4.1.2.1 Açık çevrim basamak cevap testleri

Açık çevrim proseslerin tanımlanmasında şimdiye kadar birçok yöntem geliştirilmiştir ve hala geliştirilmektedir. Burada bu yöntemler arasında en çok kullanılan iki farklı yöntem incelenmektedir.

Grafik yöntemi

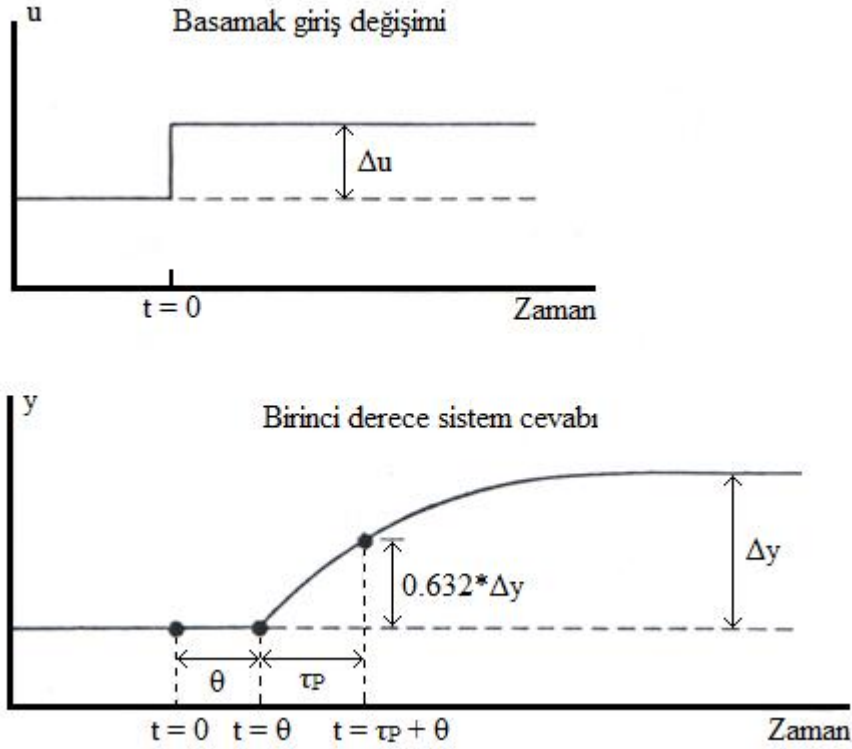
Çok sayıda grafik yöntemi literatürlerde mevcuttur ve gerçek hayatta etkin olarak uygulamaları yapılmıştır. Grafik yöntemin sınırlamaları Sundaresan, Prasad ve Krishnaswamy (1978) tarafından ana hatlarıyla belirtilmiştir ve grafik yöntemdeki bazı gelişmeler Huang (1982), Huang (1993) ve Rangaiah ile Krishnaswamy (1994) tarafından rapor edilmiştir [41].

Şekil 4.1'de bir açık çevrimde $U(t)$ basamak değişimi oluşturulup, $y(t)$ çıkış değişkeninde zamanla kaydedilen değişimler görülmektedir. Bu $y(t)$ eğrisinin şekli, prosesin transfer fonksiyonu $[G(s)]$ hakkında yaklaşık bir fikir verir. Şöyle ki, bütün kimya mühendisliği açık çevrim proseslerinin hemen %80 kadarını, kazanç, ölü zaman ve bir zaman sabiti vasıtasıyla modellemek mümkündür.

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau_p s + 1} \quad (4.1)$$

Böyle modellenebilen bir prosesin basamak cevabı eğrisi Şekil 4.1'deki birinci derece sistem cevabı biçiminde olur ve kararlı hal kazancı K_p , son kararlı hal değişimi Δy 'nin basamak girişi şiddetine oranı hesaplanarak elde edilir.

$$K_p = \frac{\Delta y}{U} \quad (4.2)$$



Şekil 4.1 : Zaman gecikmeli birinci derece bir sistemin basamak giriş değişimine cevabı.

Ölü zaman (θ), $y(t)$ eğrisinin zaman eksenini ilk terk ettiği zamandır. Bu yöntemde sisteme basamak girdisi verilmesiyle sistemin cevap vermeden sabit kaldığı zaman aralığına ölü zaman (θ) adı verilir. $y(t)$ cevabının, son kararlı hal değişiminin %63.2'sine ulaştığı zaman değeri bize zaman sabitiyle (τ_p) ölü zamanın (θ) toplamını verir.

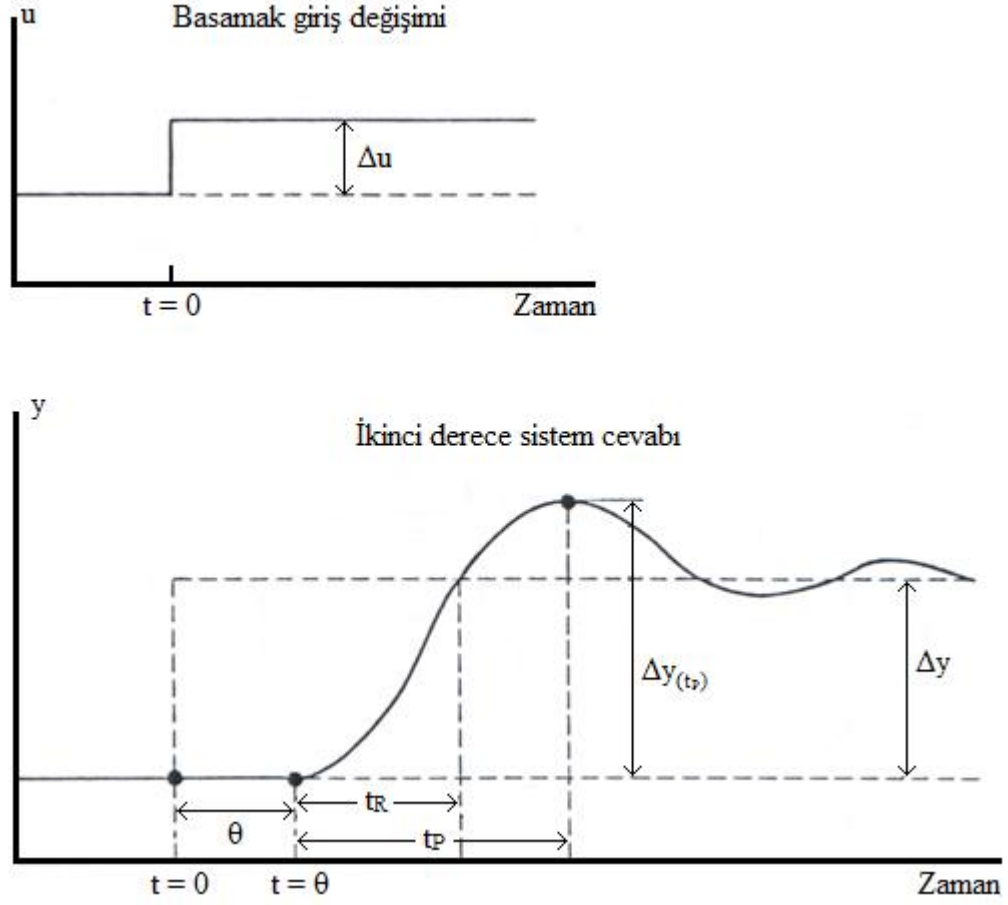
Bazı açık çevrim prosesler ve kapalı çevrim proseslerin birçoğu, aşağıdaki denklemle modellenenmektedirler.

$$G(s) = \frac{K_p \cdot e^{-\theta s}}{\tau_p^2 s^2 + 2\zeta \tau_p s + 1} \quad (4.3)$$

(4.3) denklemi sönümlü bir ikinci derece sistemin transfer fonksiyonudur. Bu denklem kullanılarak elde edilecek $y(t)$ eğrisi, Şekil 4.2'deki ikinci derece sistem cevabı gibi olur. Kararlı hal kazancı (K_p) ve ölü zaman (θ), daha önce söylenen birinci derece modelde yapıldığı gibi hesaplanırlar. Sönüm katsayısı (ζ) ise maksimum aşma oranı değeri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{\Delta y_{\max} - \Delta y}{\Delta y} = e^{(-\pi \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}})} = \text{POR} \quad (4.4)$$

$$\zeta = \frac{|\ln \text{POR}|}{\sqrt{(\pi^2 + |\ln \text{POR}|^2)}} \quad (4.5)$$



Şekil 4.2 : Zaman gecikmeli ikinci derece bir sistemin basamak giriş değişimine cevabı.

(4.4) denklemindeki Δy_{\max} değeri, en yüksek aşma değeri olup, pik zamanı (maksimum aşma zamanı) denilen bir zamanda, cevabın ulaştığı değerdir.

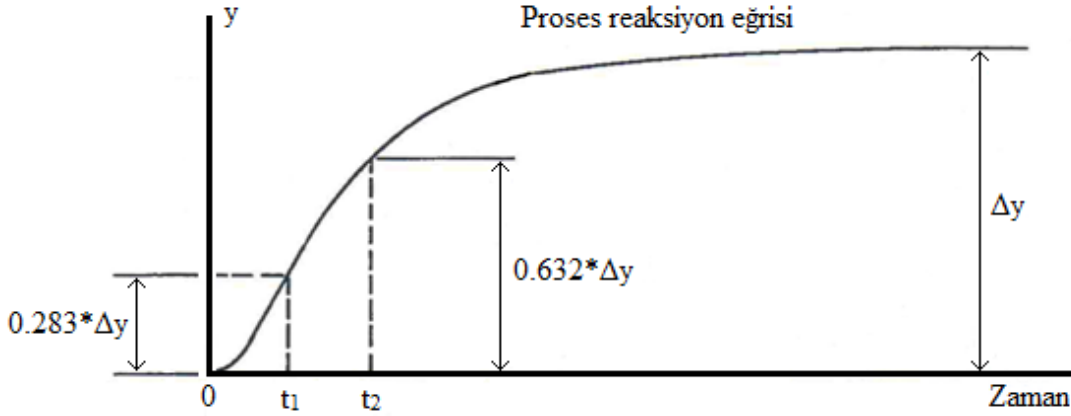
Zaman sabiti (τ) ise, eğri üzerinde tespit edilen t_R yükselme zamanı (rise time) (cevabın son kararlı hal değerine ilk kez ulaştığı zaman) kavramından yararlanılarak belirlenir. Zaman sabiti aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır [43,44].

$$\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\tau} \cdot t_R + \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} = \pi \quad (4.6)$$

$$\tau = \frac{t_R \cdot \sqrt{1-\zeta^2}}{\pi - \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}} \quad (4.7)$$

İki nokta yöntemi

Proses kazancı (K_p) grafik koşullardaki gibi belirlenir. Zaman sabiti (τ) ve ölü zaman (θ) ise proses çıktısı olarak alınan ve cevabın kararlı hale ulaştığı durumdaki değerinin $[(\Delta y)$ farkı] %28.3 ve %63.2 kadarı belirlenir. Bu noktaların zaman eksenindeki değerleri $t_{28.3} = t_1$ ve $t_{63.2} = t_2$ olarak işaretlenir.



Şekil 4.3 : Açık çevrim zaman gecikmeli proses çıktısında iki nokta yöntemi grafiği.

$$\text{Proses kararlı hal kazancı: } K_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (4.8)$$

$$\text{Proses zaman sabiti: } \tau_p = 1.5 \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.9)$$

$$\text{Ölü zaman: } \theta = t_2 - \tau_p \quad (4.10)$$

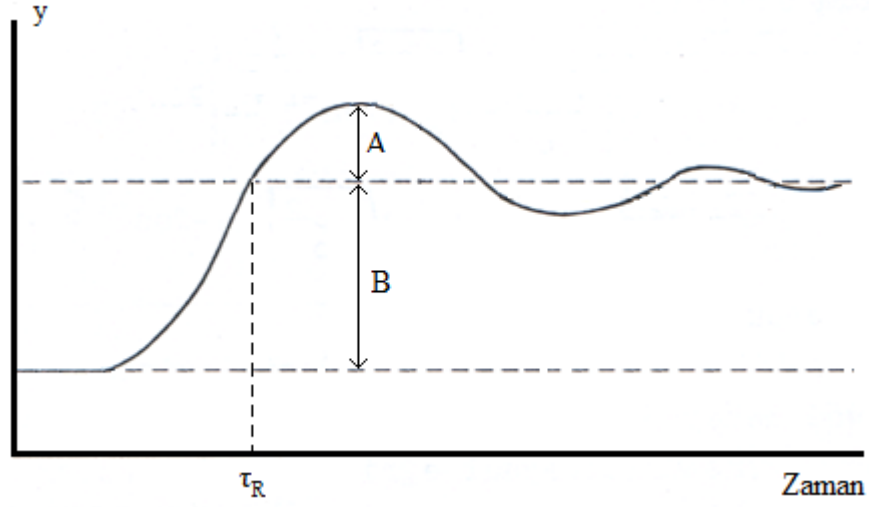
Bu yöntemlerin dışında açık çevrim sistemler için Tanjant yöntemi, Amaç yöntemi, La Guerre yöntemi de proses tanımada kullanılmaktadır [48,49].

4.1.2.2 Kapalı çevrim proseslerde basamak testi cevabına göre proses tanıma

Kapalı çevrim proseslerin tanımlanmasında şimdiye kadar birçok yöntem geliştirilmiştir ve hala geliştirilmektedir. Burada bu yöntemler arasında en çok kullanılan biri olan grafik yöntemi incelenmektedir.

Grafik yöntemi

Bir kapalı çevrim prosese ait cevap eğrisi Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4 : Kapalı çevrim sistemin basamak girişine cevabı.

Tıpkı açık çevrim yöntemlerde olduğu gibi proses çıktı eğrisinden ölü zaman ve K_P okunur [50,51,21].

$$\text{POR} = \frac{A}{B} = e^{-\pi \cdot \cot \theta} \quad (4.11)$$

POR = Aşma Oranı (Peak Overshot Ratio)

A = Prosesin maksimum aşma değeri ile dengeye oturduğu değer arasındaki fark

B = Prosesin başlangıç değeri ile dengeye oturduğu değer arasındaki fark

$$\arccos \zeta = \theta \quad (4.12)$$

$$\frac{t_R}{\tau_p} = \frac{\pi - \theta}{\sin \theta} \quad (4.13)$$

$$G(s) = \frac{K_p \cdot e^{-\theta s}}{\tau_p^2 s^2 + 2\zeta \tau_p s + 1} \quad (4.14)$$

K_p = Kararlı Hal Kazanç Değeri

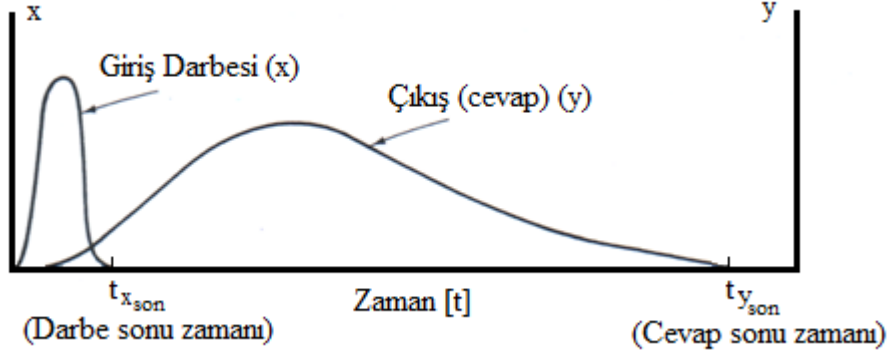
θ = Ölü zaman

τ_p = Zaman sabiti

ζ = Sönümlenme katsayısı

4.1.3 Darbe testi ile proses tanıma

Deneysel olarak dinamik davranışı elde etmek üzere yararlı ve pratik yöntemlerden biri de darbe uygulamasıdır. İyi tasarlanmış bir darbe testi, birtakım matematik işlemler sonunda, prosesin kesin frekans cevap eğrisinin elde edilmesine de olanak sağlar ve basitliği yanında, procese doğrudan uygulanan sinüsoidal giriş testinin (frekans testi) gereksindiği zamanın sadece çok az bir kısmına gerek duyar.



Şekil 4.5 : Darbe testi giriş ve çıkış (cevap) eğrileri.

Proses, genel şekli teorik olarak dikdörtgen olan, belirli sürede etki eden bir basamak artımı uygulanır. Bu sinyal, normal olarak aynı başlangıç değerinde sonlanır. Çıktı cevabı kaydedilir. Sonuçta tipik olarak çıktı sinyali de orijinal kararlı değerine geri döner (Şekil 4.5).

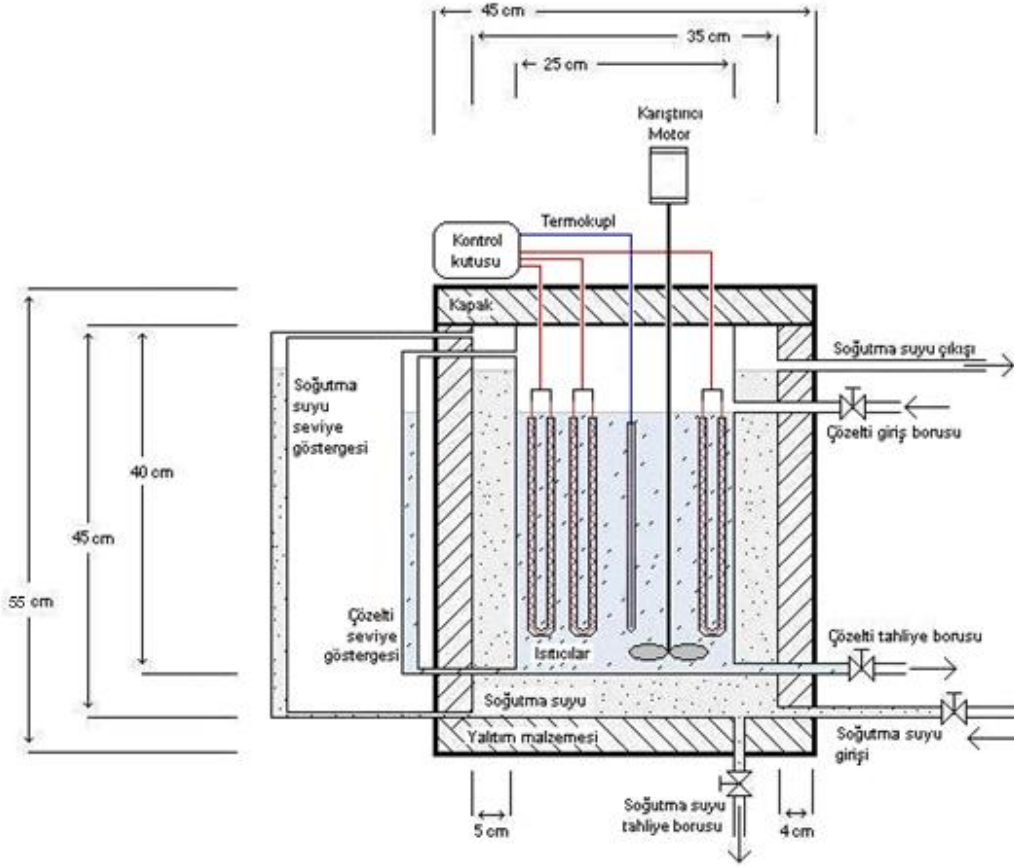
Bundan sonra giriş ve çıkış fonksiyonlarının Fourier dönüşümleri alınır ve bunlar frekans bölgesinde $G(i \cdot \omega)$ sistem transfer fonksiyonunu vermek üzere oranlanır. Teorik olarak, tüm bir frekans cevabı eğrisini üretmek üzere sadece bir tane darbe girişine gereksinme vardır. Pratikte ise, giriş darbesinin en uygun boyut ve süresini tespit için birkaç darbe girişi gerekebilir [40].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada çeşitli deneyler yapılarak soğutma ceketli kesikli bir ekzotermik reaktörün proses parametrelerinin tespiti ve bu parametreleri kullanarak oluşturulan matematiksel modelin yardımıyla bu reaktörün istenilen şartlarda çalışabilmesi için reaktörün sıcaklık kontrol edicisinin tasarımı yapılmaya çalışılmıştır.

5.1 Deney Düzeneği

Çalışmanın yapıldığı, soğutma ceketli kesikli reaktör, paslanmaz çelikten yapılmıştır. Reaktörün iç hacmi, 15.7 L, soğutma ceket hacmi, 17.5 L'dir. Reaktörün iç çapı 25 cm, yüksekliği ise 40 cm'dir. Soğutma ceket çapı, 35 cm'dir. Reaktör içi ile ceket soğutma suyu arasındaki ısı iletim alanı 0.3 m²'dir. Reaktörün çevreyle olan ısı alışverişini engellemek için soğutma ceketini ile dış cidar arasına 5 cm kalınlığında cam yünüden yapılmış yalıtım malzemesi yerleştirilmiştir. Şekil 5.1'de reaktör ve boyutları gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan reaktör ve boyutları.

5.1.1 Karıştırıcı

Reaktör içinde homojen karışmayı sağlamak amacı ile paslanmaz çelikten yapılmış iki paletli bir karıştırıcıdır. Karıştırıcı hızı yaklaşık 200 devir/dakika'dır. Karıştırıcı reaktör kapağına monte edilmiş bir elektrik motoruna bir mil ile bağlı bulunmaktadır. Karıştırıcı reaktörde etkin bir karıştırma sağlamak amacıyla, reaktörün tabanına mümkün olduğunca yakın olacak şekilde konumlandırılmıştır.

5.1.2 Dalgıç ısıtıcı

Reaktörün içindeki karışımı ısıtmak için, 1 adet 1000 W, 1 adet 750 W ve 1 adet 500 W gücünde toplam 3 adet dalgıç şeklinde ısıtıcı kullanılmıştır. Isıtıcılar reaktör kapağına belli aralıklarla monte edilmişlerdir ve üzerinde bir aç-kapa kontrol edicinin bulunduğu bir kontrol panosuna bağlı olarak ayrı ayrı çalıştırılabilmektedirler.

5.1.3 Varyak

Rektör içine konulmuş olan dalgıç ısıtıcıya belli voltajlarda elektrik enerjisinin verildiği bir cihazdır. Reaktör içeriği, bu cihazdan dalgıç ısıtıcıya gönderilen elektrik enerjisi yardımıyla ısıtılmış veya sıcaklığı sabit tutulmaya çalışılmıştır.

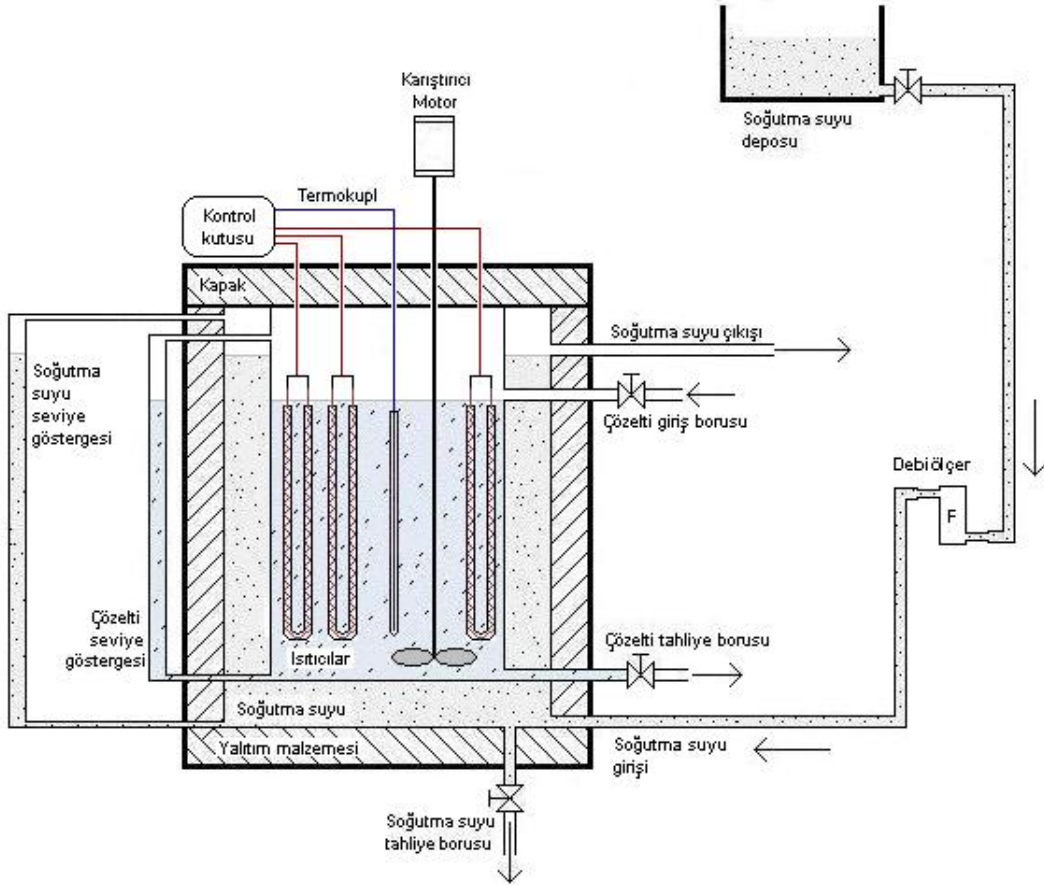
5.1.4 Termoçift ve önyükseltici

Reaktör içi sıcaklığı, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için termoçiftler kullanılmaktadır. Termoçiftler (termokupl) birbirinden farklı alaşımlara sahip metallerin birer uçlarının kaynaklanmasıyla oluşturulan basit sıcaklık ölçüm elemanlarıdır. Kaynak nokta sıcak nokta, diğer açık iki uç soğuk nokta (referans noktası) olarak adlandırılır. İşte bu sıcaklık farkına orantılı soğuk nokta uçlarından mV mertebesinde gerilim üretilir. Üretilen gerilim çok küçük olduğundan sayısal bilgisayar ile termoçift arasına bir ön yükseltici yerleştirilir. Bu ön yükseltici 0-4 mV değerindeki gerilimi 0-10 V'a çevirmektedir. Böylece reaktör içerisine yerleştirilen termoçiftler, deney sırasındaki sıcaklık değişimlerinin bilgisayar tarafından anında ve doğru olarak okunmasını sağlamaktadır. Yapılan çalışmada Fe – Constant termoçift kullanılmıştır.

5.1.5 Soğutma suyu deposu

Reaktör ceketinden soğutma suyunun sürekli olarak aynı debide geçirilebilmesi için reaktörden daha yüksek bir yere yerleştirilmiş yayvan bir su deposu kullanılmıştır. Su deposunun yayvan yapılmasının nedeni soğutma suyu debisinin, suyun seviye yüksekliğine bağlı değişimlerinden en az şekilde etkilenmesidir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan ve ayrıntılı olarak anlatılan deney düzeneği Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği.

5.2 Deney Yöntemi

Isıl sistemin parametreleri, farklı koşullarda deneyler yapılarak incelenmiştir.

Başlangıçta reaktörün kararlı haldeki parametrelerinin tespiti için çalışmalar yapılmıştır. Soğutma suyu debisi ve ısıtıcı gücü sabit tutularak belirli zaman aralıklarında reaktör içi ve soğutma suyu çıkış sıcaklıkları ölçülmüş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Reaktör kararlı hale gelince deney sonlandırılmıştır. Ardından sonuçlar kullanılarak reaktör içi ve ceket soğutma suyu için sıcaklık – zaman grafikleri çizilmiştir.

Reaktörün kararlı haldeki parametrelerinin tespitinden sonra sistemin birim basamak etkisine verdiği cevap incelenmiştir.

Bu deneylerde reaktör bir süre kararlı halde çalıştırılmış ve belli bir anda sisteme basamak etkisi verilmiştir. Belirli zaman aralıklarında reaktör içi ve soğutma suyu çıkış sıcaklıkları ölçülmüş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Ölçümler kullanılarak reaktör içi ve ceket soğutma suyu için sıcaklık – zaman grafikleri çizilmiştir.

5.2.1 Reaktörün kararlı haldeki parametrelerinin tespiti için yapılan çalışma

Reaktörün tank bölümü ve ceket bölümü tam dolu olacak şekilde su ile doldurulmuştur. Homojen bir dağılım için kapağa monte edilmiş olan karıştırıcı çalıştırılmıştır.

Soğutma suyu ceket çıkışına da bir adet termometre konulmuştur. Soğutma suyu çeşitli akış hızlarında reaktöre gönderilmiştir. Isıtıcı kontrol edicisi aç – kapa moduna getirilmiş ve ayar değeri 60°C girilmiştir.

1. 2. ve 3. ısıtıcılar çeşitli kombinasyonlarda çalıştırılarak deney başlatılmıştır.

Deney süresince soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığı iki farklı termometre kullanılarak, reaktör içi sıcaklığı ise reaktör kapağına monte edilmiş olan termoçift aracılığı ile gözlenmiş ve en fazla 2 dakikada bir kaydedilmiştir.

Reaktör kararlı koşula gelince deney sonlandırılmıştır. Ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

5.2.2 Reaktörün basamak etkisine verdiği cevabın incelenmesi

Basamak etkisinin incelenmesi için önceki deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında reaktörün kararlı hale gelmesi için gerekli soğutma suyu debisi ayarlanır ve 1 ve/veya 2 ısıtıcı çalıştırılır.

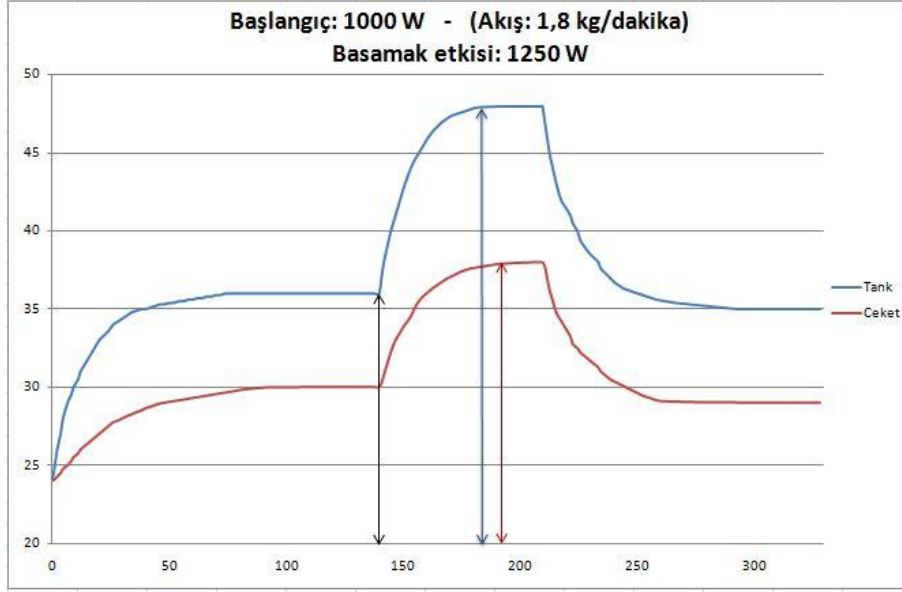
Reaktör kararlı koşula geldiğinde, aniden diğer ısıtıcı(lar) da çalıştırılıp ısıtıcı gücü artırılarak deney başlatılır. Böylece sonradan çalıştırılan ısıtıcıların verdiği basamak etkisinin reaktör sıcaklığına ve soğutma suyu sıcaklığına etkisi incelenmiş olur.

Bu deneyler, sabit su hacminde, soğutma ceketine beslenen F_{SU} soğutma suyu debisi ve tank içine verilen Q ısıtma debisi değiştirilerek yapılmışlardır.

Yapılan deneylerde tank her seferinde $M=15.7$ kg su ile doldurulmuştur. Soğutma suyu debisi $F_{SU} \left[\frac{\text{kg}}{\text{dakika}} \right]$ kararlı akış debisine ayarlanmış ve bu değerde sabit tutulmuştur. Bu esnada giriş ve çıkış sıcaklıkları aynı T_0 değerindedir. Soğutma suyu debisi ve sıcaklığı sabitlendikten sonra, tank içindeki 1 veya 2 tane ısı sağlayan direnç ve aynı zamanda tank içinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmek amacıyla karıştırıcı çalıştırılır. Bu direncin verdiği ısı ile iç tank $T_{iç,0}$ ve soğutma suyu çıkış sıcaklığı da $T_{CE,0}$ değerlerine ulaşır ($T_{iç,0} > T_{2,0}$). Bu durum, sisteme basamak değişimi uygulamasının başlangıcı ve $t=0$ zamanıdır. Bundan sonra tank içindeki diğer ısıtıcı(lar) da devreye alınarak, sisteme pozitif basamak değişimi biçiminde ısı verilmeye başlanır. Deney, bu koşulda, $T_{iç}(t)$ ve $T_{CE}(t)$ sıcaklıkları yeni denge konumlarına ulaşmaya kadar devam eder. Sıcaklıkların zamanla değişimleri gözlenir ve kaydedilir. Ulaşılan bu yeni denge konumundaki sıcaklık değerleri $T_{iç}$ ve T_2 olarak adlandırılırsa, $\Delta T_{iç} = T_{iç} - T_{iç,0}$ ve $\Delta T_2 = T_2 - T_{2,0}$ değişimleri, sistemin ısı basamak değişimine verdiği kararlı hal değişimi cevaplarıdır.

Ulaşılan kararlı halde bir müddet beklendikten sonra, devreye sonradan alınmış olan diğer ısıtıcı(lar) kapatılmak suretiyle sıfırlanır ve pozitif basamak etkisi geri alınarak sistemin yeni bir kararlı hale geçmesi beklenir. Denemelerin bu aşamasında da sıcaklıkların zamanla değişimi gözlenir ve kaydedilir. Bu ikinci kararlı halin, iç tank sıcaklığı ve soğutma suyu sıcaklıklarının, basamak değişimi başlangıcındaki değerleri olması beklenir. Nitekim denemelerin çoğunda bu beklentinin gerçekleştiği görülmüştür.

Yapılan birçok basamak testi sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri, zamana karşı çizilerek, her deneye ait reaksiyon eğrileri oluşturulmuştur. Tipik bir sıcaklık – zaman eğrisi, Şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3 : 1.8 kg/dakika soğutma suyu debisi ve 1250 watt basamak girişinin verildiği deneye ait sıcaklık – zaman grafiği.

Soğutma suyu debisi F_{SU} ve iç tanka verilen basamak şiddeti (Q) değerleri değiştirilerek elde edilen diğer reaksiyon eğrileri de EK A.1'de verilmektedir.

Basamak testlerinin sonucu Çizelge 5.1'de bir arada görülmektedir.

Çizelge 5.1 : Her bir deneye ait basamak testi koşulları ve elde edilen sonuçlar.

Deney No	$T_{iç}$ [°C]		T_2 [°C]		$\Delta T_{iç}$ [°C]	ΔT_2 [°C]	Debi [kg/dakika]	Güç	
	İlk	Son	İlk	Son				[Watt]	[kcal/dakika]
1	36	48	30	38	12	8	1,8	1250	17,94
2	33	47	28	38	14	10	1,8	1500	21,53
3	29	47	26	37	18	11	1,8	1750	25,12
4	37	48	31,5	39,75	11	8,25	1,5	1250	17,94
5	34	48	30	40,5	14	10,5	1,5	1500	21,53
6	31	49	27,5	40,75	18	13,25	1,5	1750	25,12
7	37	47	30,5	37,25	10	6,75	2,1	1250	17,94
8	33	47	28,25	36,75	14	8,5	2,1	1500	21,53
9	28	46	24,5	35,5	18	11	2,1	1750	25,12

Yapılan deney ve hesaplamalardan reaktör içi sıcaklığının ($T_{iç}$) ceket soğutma suyu çıkış sıcaklığına (T_2) oranının ortalama 1.26 olduğu görülmüştür.

$$T_{iç} = 1.26 \cdot T_2 \quad (5.1)$$

5.2.3 Reaktörün ısı iletim katsayısının (U) tespiti

Reaktörün basamak etkisine verdiği cevabın incelenmesinden sonra, reaktörün içi ile soğutma suyu arasındaki ısı iletim katsayısı tespit edilmeye çalışılmıştır.. Bunun için (5.2) denklemi kullanılmıştır.

$$Q_{CE} = U \cdot A \cdot \Delta T_{\log} \quad (5.2)$$

Burada;

Q_{CE} = Ceket soğutma suyunun aldığı ısı miktarı [kcal]

ΔT_{\log} = Reaktör ile ceket soğutma suyu sıcaklık farkının logaritmik ortalaması [$^{\circ}\text{C}$]

A = Isı iletim alanı [m^2]

$$U = \text{Tüm ısı iletim katsayısı} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{dakika} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right]$$

Hesaplamalar yapılırken önce her deney için ceket soğutma suyunun belirli bir zaman aralığında aldığı ısı miktarı bulunmuştur. Bu ısı miktarı çalışılan zaman aralığına bölünerek birim zamanda ceketin aldığı ısı miktarı hesaplanmıştır. Ardından (5.2) denkleminde U değişkeni yalnız bırakılarak her deney için sistemin tüm ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır.

Her deneyin çalışılma parametreleri farklı olduğu için hesaplanan U katsayıları az-çok farklı elde edilmişlerdir. Bu U değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak tüm hesaplamalarda kullanılmak üzere bir U değeri tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2'de çeşitli koşullarda yapılan deneylerden hesaplanan U değerleri deney koşulları ile birlikte gösterilmiştir (Çizelge 5.2'nin daha ayrıntılı hali EK A.2'de verilmektedir).

Çizelge 5.2 : Her bir deneye ait koşullar ve hesaplanan U katsayıları.

Deney No	$\Delta T_{iç}$	ΔT_{ceket}	ΔT_{log}	Debi	Güç	Zaman	Ceketin Aldığı Isı	U
	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/dakika]	[W]	[Dakika]	$Q=U \cdot A \cdot \Delta T$ [kcal/dakika]	[kcal/m ² ·dakika·°C]
1	12	8	9,87	1,8	1250	35	12,56	4,24
2	14	10	11,89	1,8	1500	50	17,14	4,80
3	18	11	14,21	1,8	1750	75	21,35	5,01
4	11	8,25	9,56	1,5	1250	45	14,10	4,92
5	14	10,5	12,17	1,5	1500	60	17,87	4,90
6	18	13,25	15,50	1,5	1750	92	22,05	4,74
7	10	6,75	8,27	2,1	1250	38	13,81	5,57
8	14	8,5	11,02	2,1	1500	65	18,15	5,49
9	18	11	14,21	2,1	1750	84	21,76	5,10

Hesaplanan U değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak;

$$U = 4.97 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{dakika} \cdot \text{°C}} \right] \text{ değeri bulunmuştur.}$$

Daha ileri hesaplamalarda tank ile ceket arasındaki ısı iletim katsayısı değeri olarak bu değer kullanılmaktadır.

Yapılan literatür araştırması sonucu, soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı ceket soğutmalı ekzotermik reaktörlerde, dış ceket ile iç tank arasındaki cidarın ısı iletim katsayısı bazı kaynaklara göre $150 - 300 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°F}}$, bazı kaynaklara göre de $250 - 500 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°F}}$ olarak belirtilmektedir [37,52].

$$1 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°F}} = 4.882 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}} = 0.0813 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{dakika} \cdot \text{°C}} \quad (5.3)$$

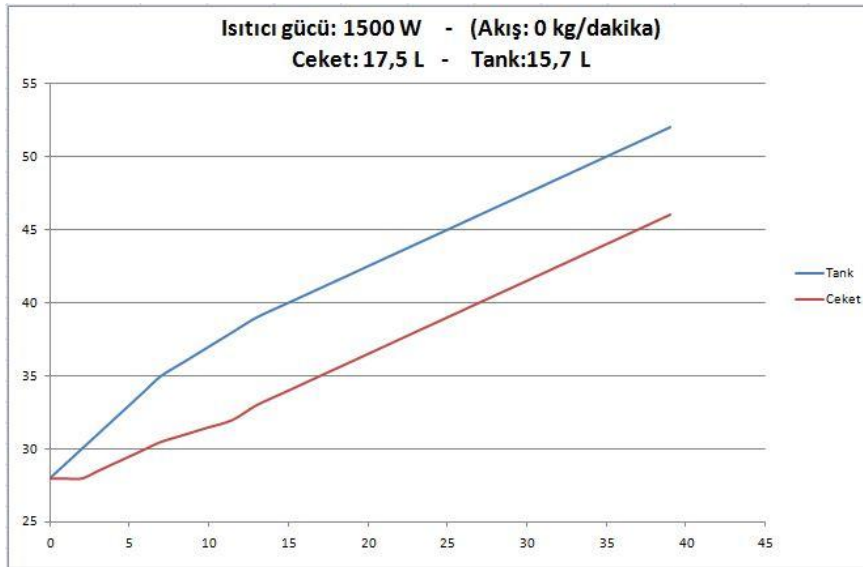
Bu çalışmada kullanılan cihazın hesapladığımız ısı iletim katsayısının (5.3) denkleminde göre $61.13 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°F}}$ olduğu görülmektedir [43].

5.2.4 Isı kayıplarının tespiti

Isı kayıplarının tespiti için, tank ve ceket bölümü su ile tam dolu halde ve ceket kısmında soğutucu akışı olmadan iç tank içindeki dirençler çalıştırılmış, bu durumda sisteme verilen ısı ile sistemin aldığı gerçek ısı miktarı arasındaki farktan sistemin ısı kayıpları hesaplanmıştır.

Deneylerde 500 W, 750 W ve 1000 W gücündeki rezistanslar çeşitli kombinasyonlarda çalıştırılarak tank içi ve ceket suyu sıcaklıkları ölçülerek her bir deney için sıcaklık–zaman grafikleri çizilmiştir. Bu kombinasyonlar sonucu deneyler ısıtıcı gücü 500 W, 1000 W, 1500 W, 1750 W ve 2250 W durumlarında yapılmıştır.

Isıtıcı gücü 1500 W olduğu durumda elde edilen sıcaklık değerleri ile oluşturulan sıcaklık–zaman grafiği Şekil 5.4’te gösterilmektedir.



Şekil 5.4 : Isıtıcı gücü 1500 W olduğu durumda elde edilen sıcaklık değerleri ile oluşturulan sıcaklık – zaman grafiği.

45 dakika sürdürülen bu deney sonunda tank sıcaklığı 28°C'den 52°C'ye, ceket suyu sıcaklığı ise 28°C'den 46°C'ye yükselmiştir. Klasik ısıtma formülüne göre;

$$Q = M \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (5.4)$$

Tankın aldığı ısı miktarı:

$$Q_{I\dot{C}} = M_{I\dot{C}} \cdot C_{P_{su}} \cdot (T_{I\dot{C}} - T_{I\dot{C},0}) \quad (5.5)$$

Ceketin aldığı ısı miktarı:

$$Q_{CE} = M_{CE} \cdot C_{P_{su}} \cdot (T_{CE} - T_{C,0}) \quad (5.6)$$

Sistemin aldığı toplam ısı miktarı:

$$Q_{Alinan} = Q_{iC} + Q_{CE} \quad (5.7)$$

Sisteme ısıtıcı tarafından verilen ısı miktarı:

$$Q_{Verilen} = \text{Isıtıcı gücü} \cdot \text{Zaman} \quad (5.8)$$

Sistemden kaybedilen ısı miktarı

$$Q_{Verilen} - Q_{Alinan} = Q_{Kaybedilen} \quad (5.9)$$

Kaybedilen ısı miktarı deney süresine bölünerek birim zamanda kaybedilen ısı miktarı hesaplanmıştır. Buna göre dakikada kaybedilen ısı miktarı

$$\text{Dakikada kaybedilen ısı miktarı} = \frac{Q_{Kaybedilen}}{\text{Zaman}} \quad (5.10)$$

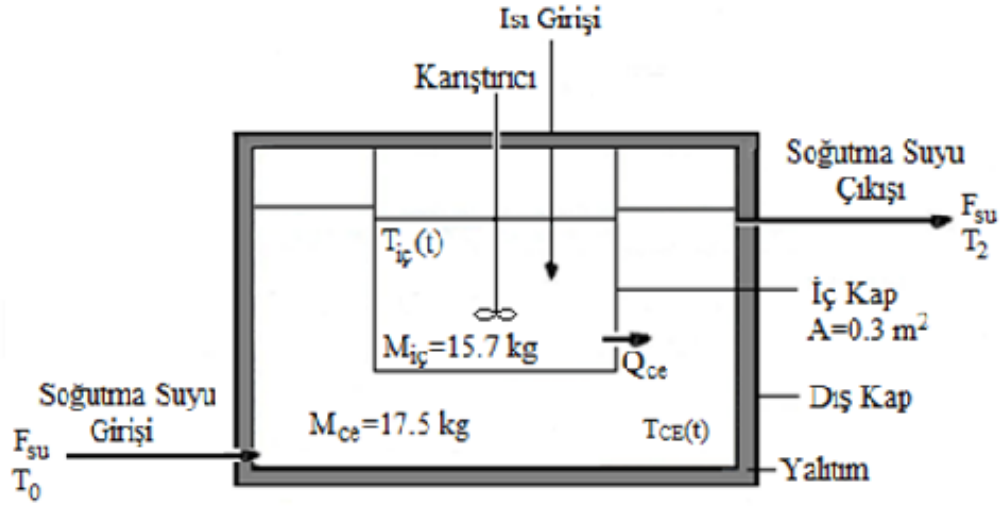
şeklinde hesaplanır.

Benzer hesaplamalar ısıtıcı gücü 1000 W, 1500 W, 1750 W ve 2250 W değerlerinde iken yapılmış, ısı kaybının ısıtıcı gücüne göre değiştiği ve ortalama ısı kaybı olarak

$$Q_{Kayıp} = 4 \frac{\text{kcal}}{\text{dakika}} \text{ alınabileceği bulunmuştur.}$$

5.3 Dinamik İnceleme

Isıl sistem şematik olarak Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5 : Isıl sistemin şematik görünümü.

İç tanka verilen ısının bir kısmı, soğutma ceketine aktarılmakta olduğu için bu ısı sistemde, iç tank ve etrafındaki soğutma ceketinin ısı davranışları birbirinden etkilenir. Dinamik sistemin değişkenleri $Q(t)$, $F(t)$, $T_{İÇ}(t)$ ve $T_{SU}(t)$ değerleridir.

5.3.1 Kararlı haldeki F_{SU} değerinin tespiti

Sistem kararlı hale ulaştığında sisteme verilen ısı ile sistemden dışarı atılan ısı eşit olur. Belirli deney koşullarında, sisteme basamak etkisi verilmeden önce sistemin kararlı son halinde soğutma suyunun debisi (F_{SU}) aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır:

$$Q_{\text{Verilen}} = Q_{\text{Atılan}} \quad (5.11)$$

$$Q_{\text{Verilen}} = \overline{F_{SU}} \cdot C_P \cdot (T_{İÇ} - T_0) \quad (5.12)$$

Ceket soğutma suyu debisinin (F_{SU}) $1.8 \frac{\text{kg}}{\text{dakika}}$ ve basamak etkisinin 1000 W olduğu

deney için kararlı haldeki değeri;

$$Q_{\text{Verilen}} = 14.35 \frac{\text{kcal}}{\text{dakika}} \quad (5.13)$$

$T_{İÇ} = 30^\circ\text{C}$ ve $T_0 = 24^\circ\text{C}$

Buna göre;

$$14.35 = \overline{F}_{SU} \cdot 1 \cdot (30 - 24) \quad (5.14)$$

$$\overline{F}_{SU} = 2.39 \frac{\text{kg}}{\text{dakika}} \quad (5.15)$$

olarak bulunmaktadır.

Burada deney sırasındaki F_{SU} debisi ile hesaplanan \overline{F}_{SU} debisinin farklı olduğu görülmektedir. Bu farkın sebebi ısı kayıplarıdır. Hesaplanan \overline{F}_{SU} değeri sistemin kaybettiği ısının soğutma suyu debisi şeklinde karşılığıdır.

5.3.2 Verilen ısıya (Q) bağlı transfer fonksiyonlarının hesaplanması

İç kap için kararsız hal ısı dengesi:

$$Q(t) - U \cdot A \cdot (T_{iç}(t) - T_{CE}(t)) = M_{iç} \cdot C_P \cdot \left(\frac{dT_{iç}(t)}{dt} \right) \quad (5.16)$$

$$T_{CE}(t) = \frac{T_0(t) + T_2(t)}{2} \quad (5.17)$$

$$Q(t) - U \cdot A \cdot \left(T_{iç}(t) - \frac{T_0(t) + T_2(t)}{2} \right) = M_{iç} \cdot C_P \cdot \left(\frac{dT_{iç}(t)}{dt} \right) \quad (5.18)$$

$$Q(t) - U \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (2T_{iç}(t) - T_0(t) - T_2(t)) = M_{iç} \cdot C_P \cdot \left(\frac{dT_{iç}(t)}{dt} \right) \quad (5.19)$$

$$T_{iç} = 1.26 \cdot T_2 \quad (5.20)$$

$$Q(t) - U \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot 1.26 \cdot T_2(t) - T_0(t) - T_2(t)) = M_{iç} \cdot C_P \cdot 1.26 \cdot \left(\frac{dT_2(t)}{dt} \right) \quad (5.21)$$

$$Q(t) - U \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (1.52 \cdot T_2(t) - T_0(t)) = M_{iç} \cdot C_P \cdot 1.26 \cdot \left(\frac{dT_2(t)}{dt} \right) \quad (5.22)$$

Sapma denklemi:

$$\Delta Q - U \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.52 \cdot \Delta T_2 = M_{iç} \cdot C_P \cdot 1.26 \cdot \left(\frac{d(\Delta T_2)}{dt} \right) \quad (5.23)$$

Laplace ortamı denklemi:

$$Q(s) - U \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.52 \cdot T_2(s) = M_{i\check{C}} \cdot C_P \cdot 1.26 \text{ s} \cdot T_2(s) \quad (5.24)$$

$$U \cdot A \cong 1.49 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{dakika} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \quad (5.25)$$

$$Q(s) - 1.49 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.52 \cdot T_2(s) = M_{i\check{C}} \cdot C_P \cdot 1.26 \text{ s} \cdot T_2(s) \quad (5.26)$$

$$M_T = 15,7 \text{ kg ve } C_P = 1 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

değerleri yerine koyulduğunda;

$$Q(s) - 1.49 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.52 \cdot T_2(s) = 15.7 \cdot 1 \cdot 1.26 \text{ s} \cdot T_2(s) \quad (5.27)$$

$$Q(s) - 1.125 \cdot T_2(s) = 19.78 \text{ s} \cdot T_2(s) \quad (5.28)$$

$$Q(s) = (19.78 \text{ s} + 1.125) \cdot T_2(s) \quad (5.29)$$

$$Q(s) = (15.7 \text{ s} + 0.9) \cdot T_{i\check{C}}(s) \quad (5.30)$$

Buradan tank içindeki suyun sıcaklığı ($T_{i\check{C}}$) ve ceket soğutma suyu sıcaklığı (T_2) ile verilen ısı (Q) arasındaki transfer fonksiyonu;

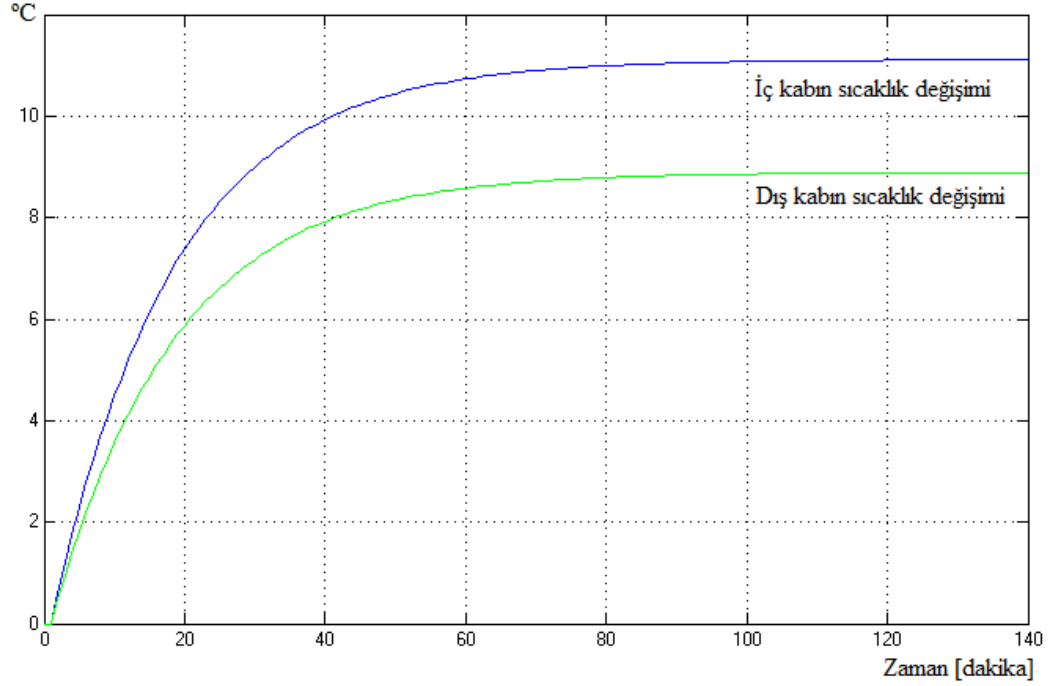
$$\frac{T_{i\check{C}}(s)}{Q(s)} = \frac{1}{15.7 \text{ s} + 0.9} \quad (5.31)$$

$$\frac{T_2(s)}{Q(s)} = \frac{1}{19.78 \text{ s} + 1.125} \quad (5.32)$$

şeklinde bulunur.

Bulunan (5.30) ve (5.31) denklemlerindeki transfer fonksiyonlarının doğruluğunu test etmek için elde edilen transfer fonksiyonları açık çevrim sistemde belirli bir basamak etkisine maruz bırakılmış ve sistem cevabının zamana karşı grafiği çizilmiştir.

Şekil 5.6'da çalışılan deney koşullarındaki verilerle elde edilen (5.30) ve (5.31) denklemlerindeki transfer fonksiyonlarının 1250 W basamak etkisine karşı cevabı görülmektedir.



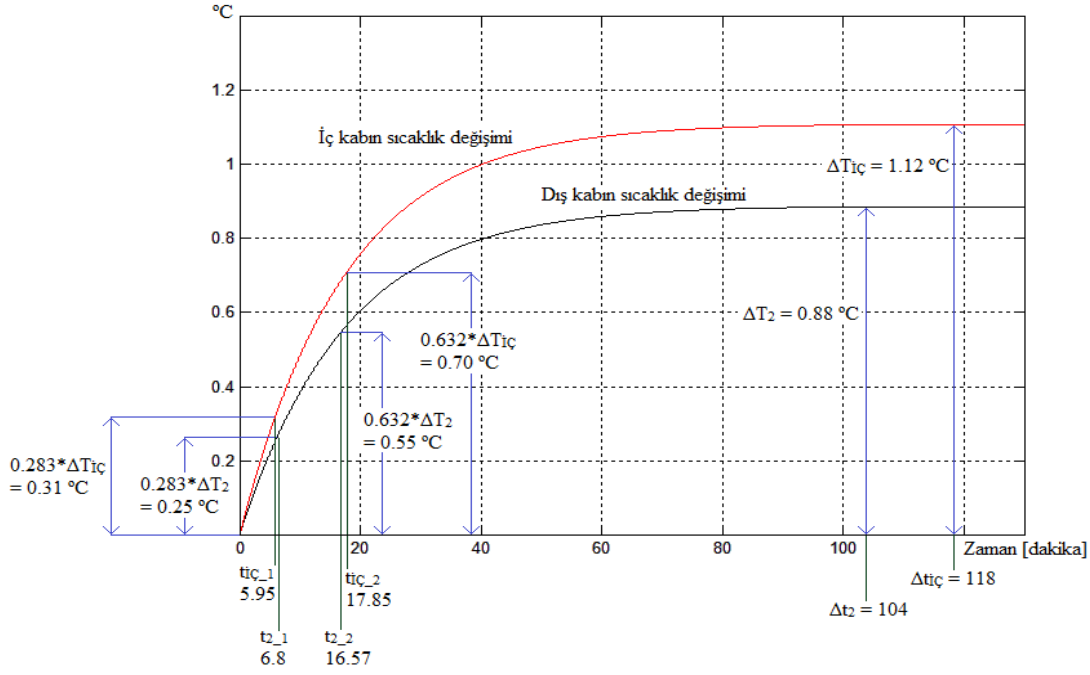
Şekil 5.6 : Isıl sistemin transfer fonksiyonunun basamak etkisine verdiği cevap eğrisi.

Şekilden, ısı girişinde oluşturulan basamak artımı sonucu, hem iç kaptaki, hem de dış kaptaki suyun sıcaklıklarının, zamanın artmasıyla arttığı ve bir dengeye ulaştığı görülmektedir.

5.3.3 Verilen ısıya (Q) bağlı transfer fonksiyonlarına ait proses parametrelerinin iki nokta yöntemine göre belirlenmesi

(5.30) ve (5.31) denklemlerindeki transfer fonksiyonlarına birim basamak girişi uygulandığı zaman Şekil 5.6'ya benzeyen fakat daha düşük bir değerde kararlı hale oturan bir eğri elde edilir.

Isıl sistemin birim basamak girişine cevabı Şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5.7 : Isıl sistemin transfer fonksiyonlarının birim basamak girişine verdiği cevap eğrisi.

Şekil 5.7'deki değerlere göre proses parametreleri

$$\frac{T_{1ç}(s)}{Q(s)} = \frac{1}{15.7 s + 0.9} \text{ denklemi için;}$$

$$\text{Proses kararlı hal kazancı: } K_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1.12}{118} = 0.0095 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{(\text{kcal/dakika})} \right] \quad (5.33)$$

$$\text{Proses zaman sabiti: } \tau_p = 1.5 \cdot (t_2 - t_1) = 1.5 \cdot (17.85 - 5.95) = 17.75 \text{ [dakika]} \quad (5.34)$$

$$\text{Ölü zaman: } \theta = t_2 - \tau_p = 17.85 - 17.75 = 0.1 \text{ [dakika]} \quad (5.35)$$

$$\text{Aynı şekilde } \frac{T_2(s)}{Q(s)} = \frac{1}{19.78 s + 1.125} \text{ denklemi için;}$$

$$\text{Proses kararlı hal kazancı: } K_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{0.88}{104} = 0.0084 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{(\text{kcal/dakika})} \right] \quad (5.36)$$

$$\text{Proses zaman sabiti: } \tau_p = 1.5 \cdot (t_2 - t_1) = 1.5 \cdot (16.57 - 6.8) = 14.65 \text{ [dakika]} \quad (5.37)$$

$$\text{Ölü zaman: } \theta = t_2 - \tau_p = 16.57 - 14.65 = 1.92 \text{ [dakika]} \quad (5.38)$$

olarak bulunur.

5.3.4 Ceket soğutma suyuna (F_{SU}) bağlı transfer fonksiyonlarının hesaplanması

Soğutma ceketini için kararsız hal ısı dengesi:

$$F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot (T_0 - T_2(t)) + U \cdot A \cdot (T_{iC}(t) - T_{CE}(t)) = M_{CE} \cdot C_P \cdot \left(\frac{dT_{CE}(t)}{dt} \right) \quad (5.39)$$

$$F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot (T_0 - T_2(t)) + U \cdot A \cdot \left(T_{iC}(t) - \frac{T_0(t) + T_2(t)}{2} \right) = M_{CE} \cdot C_P \cdot \left(\frac{dT_{CE}(t)}{dt} \right) \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} & F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot T_0 - F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot T_2(t) + U \cdot A \cdot \left(\frac{2T_{iC}(t) - T_0(t) - T_2(t)}{2} \right) = \\ & = M_{CE} \cdot C_P \cdot \left(\frac{dT_{CE}(t)}{dt} \right) \end{aligned} \quad (5.41)$$

(5.34) denklemindeki 2. kısmın ($F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot T_2(t)$) türevini alırsak;

$$\begin{aligned} & F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot T_0 - \overline{F_{SU}} \cdot C_P \cdot T_2(t) - F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot \overline{T_2} + U \cdot A \cdot \left(\frac{2T_{iC}(t) - T_0(t) - T_2(t)}{2} \right) = \\ & = M_{CE} \cdot C_P \cdot \left(\frac{dT_{CE}(t)}{dt} \right) \end{aligned} \quad (5.42)$$

Sapma denklemi:

$$\begin{aligned} & \Delta F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot T_0 - \overline{F_{SU}} \cdot C_P \cdot \Delta T_2(t) - \Delta F_{SU}(t) \cdot C_P \cdot \overline{T_2} + U \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot \Delta T_{iC}(t) - \Delta T_2(t)) = \\ & = M_{CE} \cdot C_P \cdot \left(\frac{d(\Delta T_{CE}(t))}{dt} \right) \end{aligned} \quad (5.43)$$

Laplace ortamı denklemi:

$$\begin{aligned} & F_{SU}(s) \cdot C_P \cdot T_0 - \overline{F_{SU}} \cdot C_P \cdot T_2(s) - F_{SU}(s) \cdot C_P \cdot \overline{T_2} + U \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot T_{iC}(s) - T_2(s)) = \\ & = M_{CE} \cdot C_P \cdot s \cdot T_{CE}(s) \end{aligned} \quad (5.44)$$

$$\overline{F_{SU}} = 2.39 \frac{\text{kg}}{\text{dakika}}$$

$$M_{CE} = 17.5 \text{ kg}$$

$T_0 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $\overline{T_2} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğuna göre;

$$T_{CE}(t) = \frac{T_0(t) + T_2(t)}{2} \quad (5.45)$$

$$T_{iÇ}(t) = 1.26 \cdot T_2(t) \quad (5.46)$$

$$\begin{aligned} F_{SU}(s) \cdot 1 \cdot 24 - 2.39 \cdot 1 \cdot T_2(s) - F_{SU}(s) \cdot 1 \cdot 30 + 1.49 \cdot \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot T_{iÇ}(s) - T_2(s)) = \\ = 17.5 \cdot 1 \cdot s \cdot \frac{T_2(s)}{2} \end{aligned} \quad (5.47)$$

$$-6F_{SU}(s) - 2.39T_2(s) + 1.49T_{iÇ}(s) - 0.745T_2(s) = 8.75s \cdot T_2(s) \quad (5.48)$$

$$-6F_{SU}(s) + 1.49T_{iÇ}(s) = (8.75s + 3.135) \cdot T_2(s) \quad (5.49)$$

$$-6F_{SU}(s) + 1.49 \cdot 1.26 \cdot T_2(s) = (8.75s + 3.135) \cdot T_2(s) \quad (5.50)$$

$$-6F_{SU}(s) + 1.87 \cdot T_2(s) = (8.75s + 3.135) \cdot T_2(s) \quad (5.51)$$

$$-6F_{SU}(s) = (8.75s + 1.265) \cdot T_2(s) \quad (5.52)$$

Buradan ceket soğutma suyu sıcaklığı (T_2) ile ceket soğutma suyu debisi (F_{SU}) arasındaki transfer fonksiyonu;

$$\frac{T_2(s)}{F_{SU}(s)} = \frac{-6}{8.75s + 1.265} \quad (5.53)$$

$$\frac{T_2(s)}{F_{SU}(s)} = \frac{-1}{1.45s + 0.21} \quad (5.54)$$

şeklinde bulunur.

Yukarıdaki (5.54) denkleminde $T_2(s)$ yerine (5.31) denklemindeki karşılığını koyarsak;

$$\frac{Q(s)}{F_{SU}(s)} = \frac{-(19.78s + 1.125)}{1.45s + 0.21} \quad (5.55)$$

(5.55) denklemindeki $Q(s)$ yerine de (5.30) denklemindeki karşılığını koyarsak;

$$\frac{(15.7s + 0.9) \cdot T_{iÇ}(s)}{F_{SU}(s)} = \frac{-(19.78s + 1.125)}{1.45s + 0.21} \quad (5.56)$$

$$\frac{T_{i\check{C}}(s)}{F_{SU}(s)} = \frac{-(19.78 s + 1.125)}{(1.45 s + 0.21) \cdot (15.7 s + 0.9)} \quad (5.57)$$

Sonuç olarak tankın içindeki su sıcaklığı ($T_{i\check{C}}$) ile ceket soğutma suyu debisi (F_{SU}) arasındaki transfer fonksiyonu;

$$\frac{T_{i\check{C}}(s)}{F_{SU}(s)} = \frac{-(19.78 s + 1.125)}{(22.84 s^2 + 4.6 s + 0.19)} \quad (5.58)$$

şeklinde bulunur.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, bulunan transfer fonksiyonun belirli başlangıç koşullarındaki sistem için geçerli olduğudur.

Yukarıdaki transfer fonksiyonu sistemin başlangıçtaki ceket soğutma suyu debisinin (F_{SU}) $1.8 \frac{\text{kg}}{\text{dakika}}$ ve basamak etkisinin 1250 W olduğu deney koşulları için geçerlidir.

Farklı başlangıç koşullarındaki sistemler için transfer fonksiyonu, genel formu değişmemek üzere yeni sayısal değerlerle hesaplanabilir ve kontrol çalışmalarında, bulunan transfer fonksiyonu kullanılabilir.

5.3.5 Pay dinamiği olan ikinci derece sistemler

Saf ikinci derece sistemlerde pay ile payda arasındaki bağıl derece 2'dir. Fakat yukarıdaki (5.58) denkleminde olduğu gibi bazı durumlarda payda ikinciden ve pay birinciden bir polinom olabilir. Böyle sistemlere *pay dinamiği olan ikinci derece sistemler (second order systems with numerator dynamics)* denir. Genel denklemi aşağıdaki (5.59) gibidir ve klasik ikinci derece sistemlerden farklı cevap verirler.

$$G_P(s) = \frac{K_p \cdot (\tau_n s + 1)}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s + 1)} \quad (5.59)$$

(5.59) denkleminin bir giriş etkisiyle birlikte zaman bölgesindeki formu;

$$y(t) = K_p \cdot \Delta u \cdot \left[1 + \left(\frac{\tau_n - \tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \right) e^{-t/\tau_1} + \left(\frac{\tau_n - \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \right) e^{-t/\tau_2} \right] \quad (5.60)$$

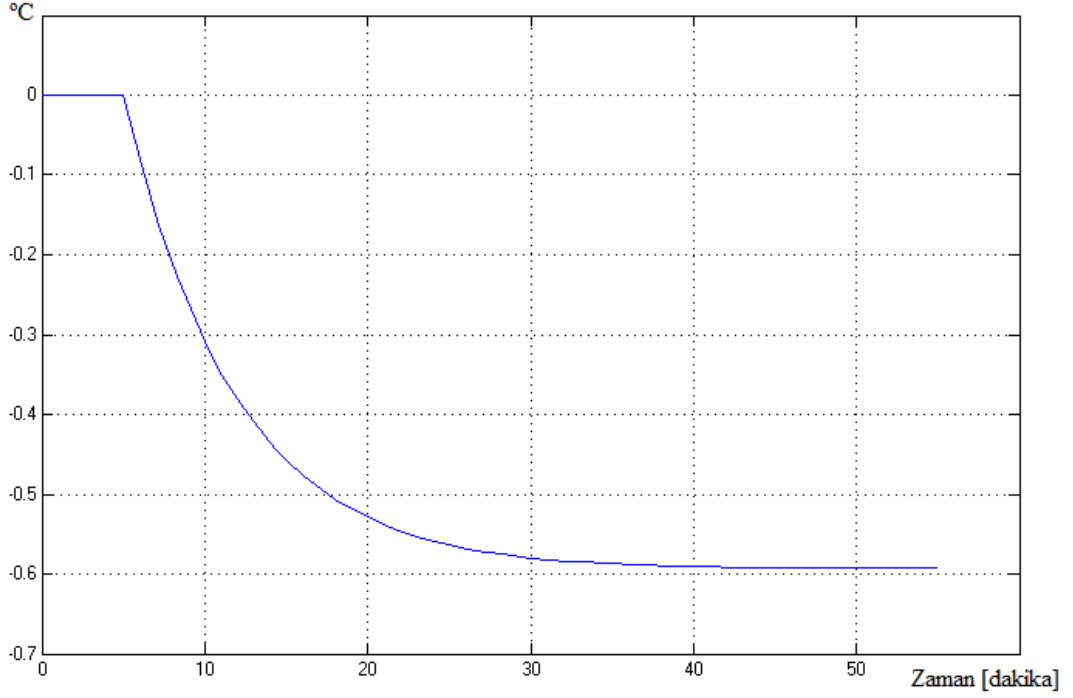
gibidir. Denklemden de anlaşılacağı gibi eğer $\tau_n = \tau_2$ olursa sistem cevabı birinciden ikinciden sistem cevabı gibi olur.

Deney sistemimize ait (5.58) denklemini de (5.59)'daki forma getirirsek;

$$\frac{T_{IÇ}(s)}{F_{SU}(s)} = \frac{-5.92 \cdot (17.58 s + 1)}{(6.97 s + 1) \cdot (17.24 s + 1)} \quad (5.61)$$

denklemini elde ederiz. Bu denkleme göre $K_p = -5.92 \frac{°C}{kg/dakika}$ olduğu görülmektedir.

Bulduğumuz (5.61) fonksiyonunun $\Delta F_{SU}=0.1 \left[\frac{kg}{dakika} \right]$ basamak girişine karşı verdiği $\Delta T_{IÇ}$ cevabı Şekil 5.8'de görülmektedir.



Şekil 5.8 : Pay dinamiği olan ikinci derece sistemin $0.1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{dakika}} \right]$ basamak girişine karşı cevabı.

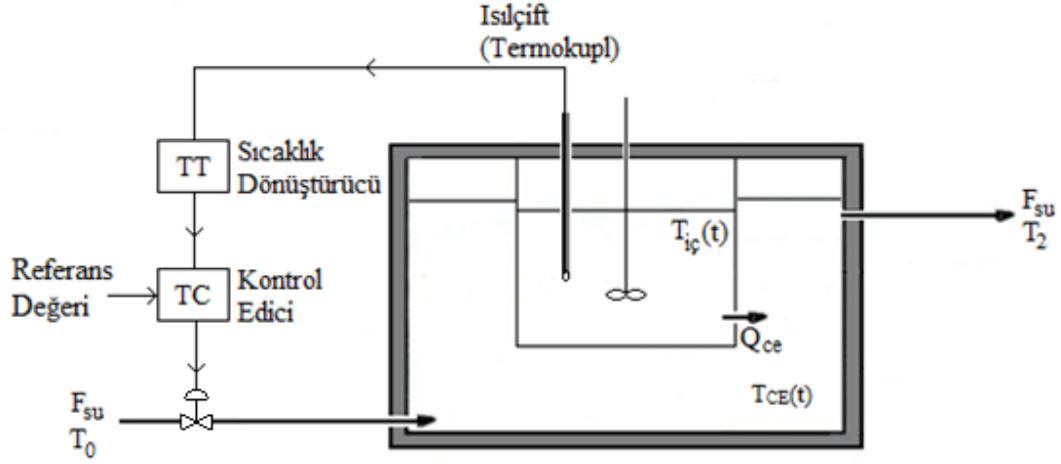
Şekil 5.8'da görüldüğü gibi cevap eğrisi önce bir miktar düşüş gösterip bir süre sonra da kararlı duruma gelmektedir. Tankın içindeki suyun sıcaklığı ($T_{iç}$) soğutma suyu debisindeki (F_{SU}) artışa bağlı olarak azalmaktadır.

Sonuç olarak buradan, elde edilen (5.61) denklemi doğrultusunda sistemimizin kararlı olduğu sonucu çıkarılabilir.

5.4 Isıl Sistemin Kontrol Edilmesi

Önerilen kontrol çevrimi aşağıda fiziksel şekil ve blok diyagramı olarak görülmektedir. Geri beslemeli kontrol çevrimi, sistemdeki iç kaptaki bulunan suyun sıcaklığına ($T_{iç}$) bağlı olarak dış kaba verilen soğutma suyu miktarını ayarlayacak biçimde çalışır.

Bu ısıl sistemin kontrolü için önerilen geri bildirmeli kontrol çevrimi, Şekil 5.9'da görülmektedir.

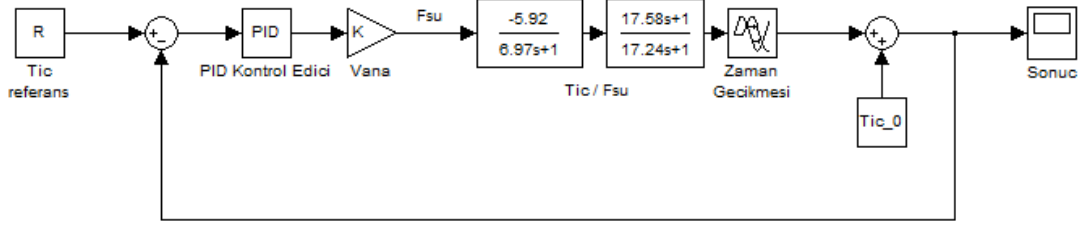


Şekil 5.9 : Isıl sistem için önerilen geri beslemeli kontrol çevrimi.

Bu kontrol çevriminde iç kaptaki suyun sıcaklığı ($T_{İÇ}$) bir ölçüm elemanı vasıtasıyla ölçülür ve sıcaklık değerini elektrik sinyallerine dönüştüren bir dönüştürücü ile sıcaklığa bağlı elektrik sinyalleri oluşturulur. Ölçülen ve dönüştürülen bu değer istenen sıcaklık değeri (referans değeri) ile karşılaştırılıp hata değeri ölçülür. Kontrol edici bu hata değerini kullanarak soğutma suyunun debisini (F_{SU}) ayarlayan son kontrol elemanına (vana) sinyal gönderir ve soğutma suyu debisini kontrol eder. Debiye bağlı olarak iç kaptan dış kaba aktarılan ısı miktarı değişir ve iç kaptaki su sıcaklığı değişir. Ardından yukarıda anlatılan çevrim tekrarlanır. $T_{İÇ}$ sıcaklığı referans değerine ulaştığı zaman sistem kararlı hale gelir ve dışarıdan bir etki verilmediği sürece soğutma suyu debisi ve iç kaptaki su sıcaklığı sabit bir değerde seyretmeye devam eder.

Dışarıdan gelen bir bozan etken (distürens) etkisiyle veya başka nedenle sistemde referans değerinden sapma meydana gelirse F_{SU} değeri kontrol edilerek tekrar kararlı hale ulaşılmaya çalışılır.

Şekil 5.10'da yukarıda anlatılan geri bildirmeli kontrol çevriminin blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.10 : Isıl sistem için önerilen geri beslemeli kontrol çevriminin simülasyon çalışmaları için oluşturulmuş blok diyagramı.

Burada yukarıda anlatılan sistem blok diyagramı haline getirilerek bilgisayar ortamında simüle edilmiştir.

Blok diyagramda prosesi temsil etmek üzere daha önceki bölümlerde hesaplanan, iç kaptaki bulunan suyun sıcaklığı ile soğutma suyunun debisi arasındaki transfer fonksiyonu kullanılmıştır.

Kontrol edici olarak PID tipi KE seçilmiştir. KE parametreleri daha ilerideki bölümlerde gösterilen şekillerde hesaplanmış ve bu parametrelerle kontrol edilen sistemin basamak etkisine verdiği cevap ve kararlılığı incelenmiştir.

5.4.1 Limit kararlı hal değerlerinin elde edilmesi

Limit kararlı hal değerleri sistemin kararlı halden kararsız hale ulaştığı noktadaki değerlerdir.

Bu değerler sistemin kararsızlaşma noktasını gösterdiği gibi uygun KE parametrelerinin tespitinde de kullanılabilirler.

Limit kararlı hal değerleri için sistemin karakteristik denkleminde s yerine $i \cdot \omega$ koyularak paydası 0'a eşitlenir ve denklem çözülerek K_{CU} (ultimate kazanç) ile ω_U (ultimate frekans) değerleri tespit edilir.

Karakteristik denklemin genel gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$\text{Karakteristik denklem: } 1 + G_p \cdot G_C \quad (5.62)$$

G_C : Kontrol edicinin transfer fonksiyonu

G_p : Proses transfer fonksiyonu

$e^{-\theta s}$: Ölü zaman

G_C yerine K_C ve G_P yerine de bulduğumuz transfer fonksiyonunu ölü zamanla birlikte (ölü zaman yerine ikinci derece Padé yaklaşımındaki karşılığı kullanılmıştır) yazarsak:

$$G_P: \frac{T_{i\check{C}}(s)}{F_{SU}(s)} = \frac{-5.92 \cdot (17.58 s + 1)}{(6.97 s + 1) \cdot (17.24 s + 1)} \quad (5.63)$$

$$G_C: K_C \quad (5.64)$$

$$e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta s}{2}}{1 + \frac{\theta s}{2}} \quad (\text{Birinci derece Padé yaklaşımı } (\theta = 1 \text{ dakika})) \quad (5.65)$$

Karakteristik denklem:

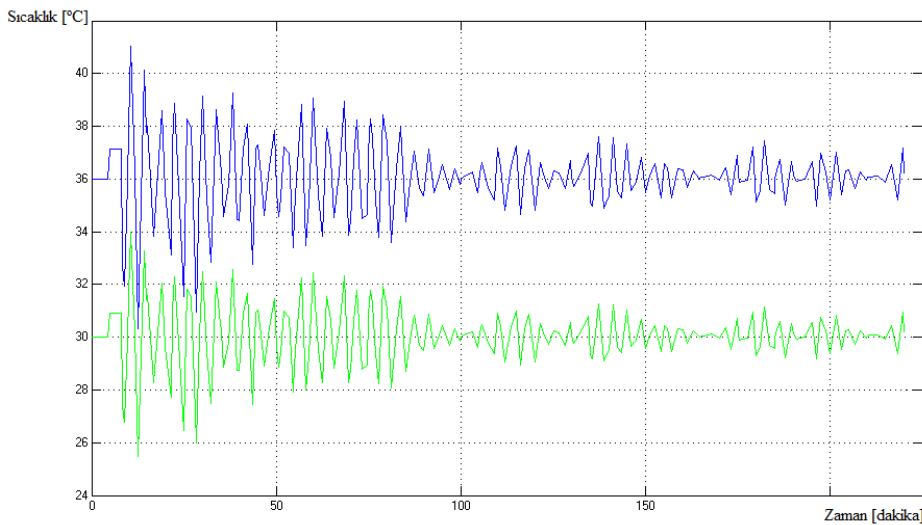
$$1 + \frac{-5.92 \cdot (17.58 s + 1)}{(6.97 s + 1) \cdot (17.24 s + 1)} \cdot \frac{1 - \frac{\theta s}{2}}{1 + \frac{\theta s}{2}} \cdot K_C \quad (5.66)$$

şeklinde olur. Denklem (5.66)'yı 0'a eşitleyip çözdüğümüzde;

$K_{CU} = 2.28$ ve $\omega_U = 0$ bulunur.

K_C değeri ultimate değer olan 2.28 değeri olduğunda kapalı çevrim sistemin

$\Delta Q = 18 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{dakika}} \right]$ basamak girişine cevabı Şekil 5.11'de görülmektedir.



Şekil 5.11 : Kontrol edici kazancı K_{CU} değerinde olduğunda kapalı çevrim sistemin

$\Delta Q = 18 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{dakika}} \right]$ basamak girişine verdiği cevap.

Elde edilen ultimate değerler (K_{CU} , ω_U) Ziegler – Nichols veya Tyreus – Luyben KE denklemlerinde kullanılarak uygun KE parametreleri belirlenebilir. Fakat bizim sistemimizde $\omega_U=0$ olduğu için KE parametrelerinin belirlenmesinde bu yöntemleri kullanamamaktayız.

Bu şekilde $\omega_U=0$ olan sistemlere *minimumu olmayan faz sistemleri (nonminimum phase systems)* denilmektedir [24].

Bizim sistemimiz de bu tür bir sistem olduğu için KE parametrelerinin belirlenmesi için limitler arasında kalarak, oluşturulan bilgisayar simülasyonu kullanılarak deneme – yanılma yöntemi uygulanabilir.

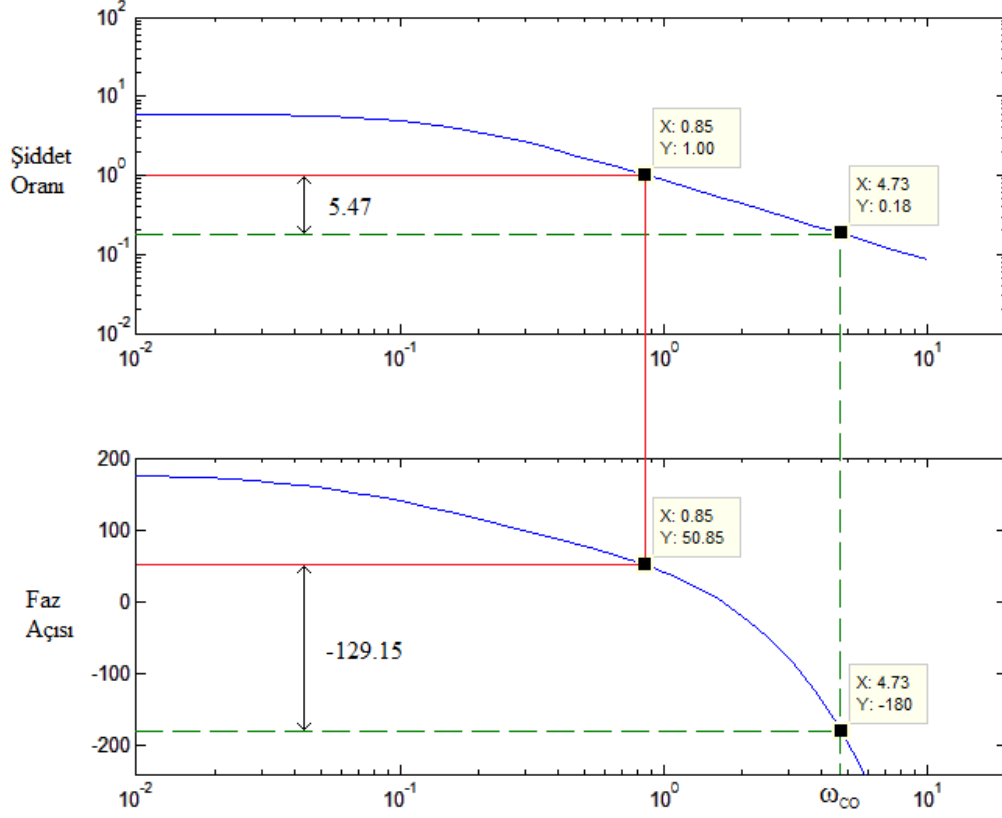
5.4.2 Bode diyagramları kullanılarak uygun kontrol edici parametrelerinin belirlenmesi

Bode kararlılık kriterine göre bir sistemin kararlı olabilmesi için sistemin Bode diyagramında şiddet oranı (amplitude ratio) değerinin 1’den küçük olması gerekir. Şiddet oranı değeri 1’den küçük olduğunda sistemin kazanç payı (5.67) denklemine göre 1’den büyük olur. Fakat güvenli bir kontrol için sistemin kazanç payının 1.7’ye eşit veya daha büyük olması beklenir.

$$\text{Kazanç Payı} = \frac{1}{M} \quad (5.67)$$

Denklem (5.67)’ye göre kazanç payının en az 1.7 olabilmesi için M değerinin en fazla 0.58 olması gerekir.

KE kazancını rastgele bir değer olan $K_C=1$ kabul edip bizim sistemimize ait Bode diyagramı Şekil 5.10’da görülmektedir.



Şekil 5.12 : K_C değeri 1 kabul edildiğinde kapalı çevrim sisteme ait Bode diyagramı.

Şekil 5.12'deki Bode diyagramından da görüldüğü gibi faz gecikmesinin -180° olduğu noktaya karşın olan ω_{CO} aşma frekansında şiddet oranı değeri $M=0.18$ olduğu için sistem kararlıdır. Kazanç payı değeri:

$$\text{Kazanç Payı} = \frac{1}{M} = \frac{1}{0.18} = 5.47 \quad (5.68)$$

olarak bulunmaktadır. Bode diyagramının çizilmesin de için yazılan Matlab kodu ve çıkan sonuçlar EK B.1'de gösterilmektedir.

Bunun anlamı KE kazancı en fazla 5.47 değerine kadar yükseltildiğinde sistemin kararlı davranış göstereceği, bu değer aşıldığında ise sistemin kararsız olacaktır [55].

Bizim sistemimize ait bulduğumuz transfer fonksiyonunu kullanarak yaptığımız denemelerde yukarıda bulduğumuz $K_{CU}=5.47$ değerinde sistemimizin kararsız davranış gösterdiği görülmüştür. Bunun sebebi sistemimizin oldukça (pay dinamiği olan sistem) karmaşık olmasıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde ilk olarak, soğutma ceketli ekzotermik tank reaktörün kontrol edilebilmesi için, elde edilen transfer fonksiyonları doğrultusunda tasarlanan kontrol sisteminin performansı incelenmektedir.

Bilgisayar ortamında simulink programıyla oluşturulan blok diyagramında farklı KE parametrelerinde sisteme uygulanan basamak, dikdörtgen darbe ve sinüsoidal darbe bozan etkenleri sonucu sistemin tank içi su sıcaklığı ($T_{iç}$) ve soğutma suyu debisinin (F_{SU}) zamana karşı değişimi incelenerek kullanılan KE parametrelerinin uygunluğu tartışılmaktadır.

Bölümün son kısmında tasarlanan kontrol sistemini daha iyi hale getirmek için yapılması düşünülen geliştirmeler anlatılmaktadır.

6.1 Soğutma Ceketli Ekzotermik Tank Reaktörün Bilgisayar Ortamında Kontrolü

Bir proses kontrol sisteminin tasarımında, proses transfer fonksiyonu elde edilip uygun K_C değeri belirlendikten sonra, bulunan değerlerin uygunluğunun incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan kapalı çevrim sistem blok diyagramından yararlanılabilir.

Böylece sistem için en uygun KE parametreleri sistem fiziksel olarak gerçekleştirilmeden daha hızlı ve daha güvenli bir şekilde deneme – yanılma yöntemiyle tespit edilebilir.

Literatürde KE parametrelerinin belirlenmesi için Ziegler – Nichols, Cohen – Coon, Tyreus – Luyben yöntemi gibi çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler ile çeşitli prosesler için çoğu zaman uygun değerler elde edilebilmektedir. Fakat bu çalışmada kullanılan sistem minimumu olmayan faz sistemi olduğu için KE parametrelerinin belirlenmesinde bu yöntemlerden yararlanılmamış, uygun KE parametreleri yapılan çeşitli denemeler sonucu deneme – yanılma yoluyla belirlenmiştir.

Bozan etken olarak basamak, dikdörtgen darbe ve sinüsoidal darbe girişi uygulandığı durumlarda sistemin cevabının bilgisayar ortamında incelenebilmesi için oluşturulan simulink blok diyagramı Şekil 6.1’de gösterilmektedir.

Burada $T_{\text{bozanetken}}$ ile gösterilen giriş değeri, sisteme sonra etki eden Q bozan etkeninin (6.1) denklemine göre sıcaklık cinsinden değerini temsil etmektedir.

$$Q = M \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (6.1)$$

$$\Delta T = (T_{\text{son}} - T_{\text{ilk}}) = \frac{Q}{M_{\text{IÇ}} \cdot C_{\text{Psu}}} \quad (6.2)$$

$$C_{\text{Psu}} = 1 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \quad (6.3)$$

olduğu için sisteme sonradan verilen Q ısıısının karşılığı

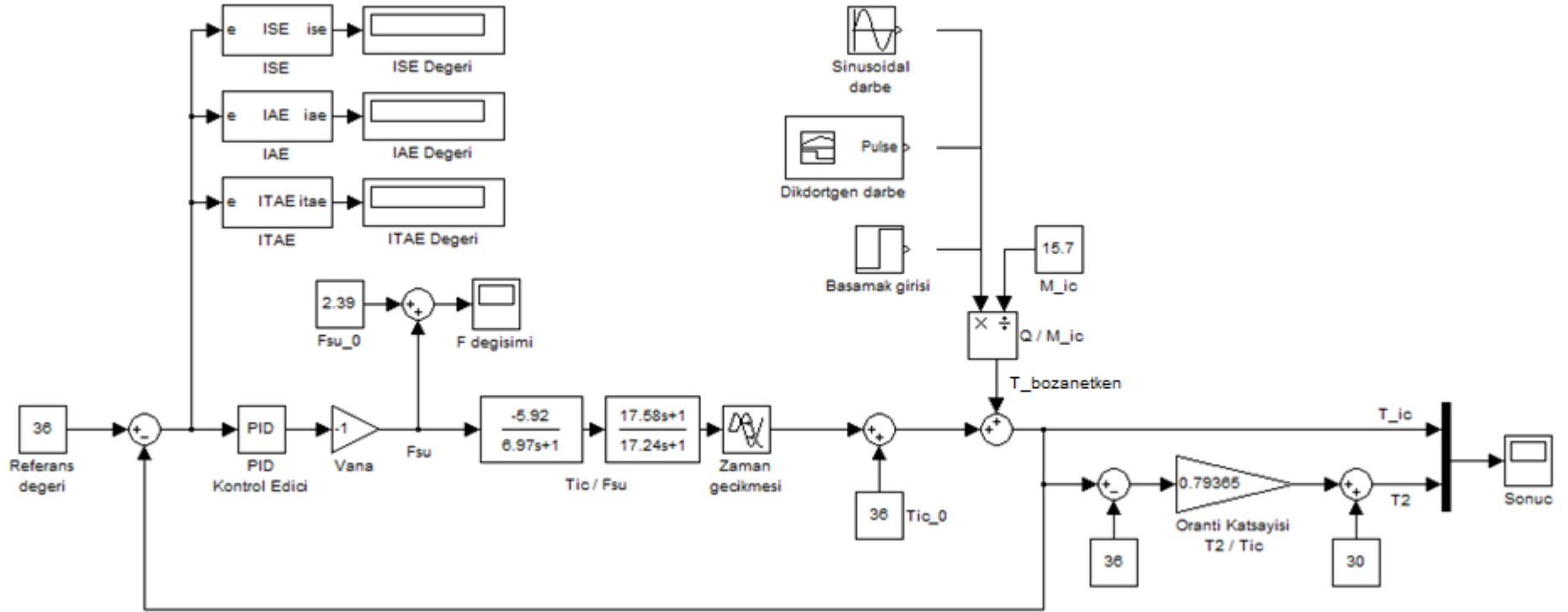
$$\Delta T = \frac{Q}{M_{\text{IÇ}}} \quad (6.4)$$

şeklinde olur.

Şekil 6.1’deki blok diyagramda kontrol işlemi için PID tipi KE, son kontrol elemanı olarak havalı (pnömatik) vana ve prosesi temsil etmek üzere iç tanktaki su sıcaklığı ($T_{\text{IÇ}}$) ile soğutma suyu debisi (F_{SU}) arasındaki transfer fonksiyonu

$$\frac{T_{\text{IÇ}}(s)}{F_{\text{SU}}(s)} = \frac{-5.92 \cdot (17.58 s + 1)}{(6.97 s + 1) \cdot (17.24 s + 1)} \text{ ve zaman gecikmesi kullanılmıştır.}$$

Sonuç kısmındaki grafikte kontrol edilen $T_{\text{IÇ}}$ ve T_2 değişkenlerinin zamana bağlı değerleri dolayısıyla kontrol edicinin sistemi kontrol edebilme kabiliyeti gösterilmektedir.

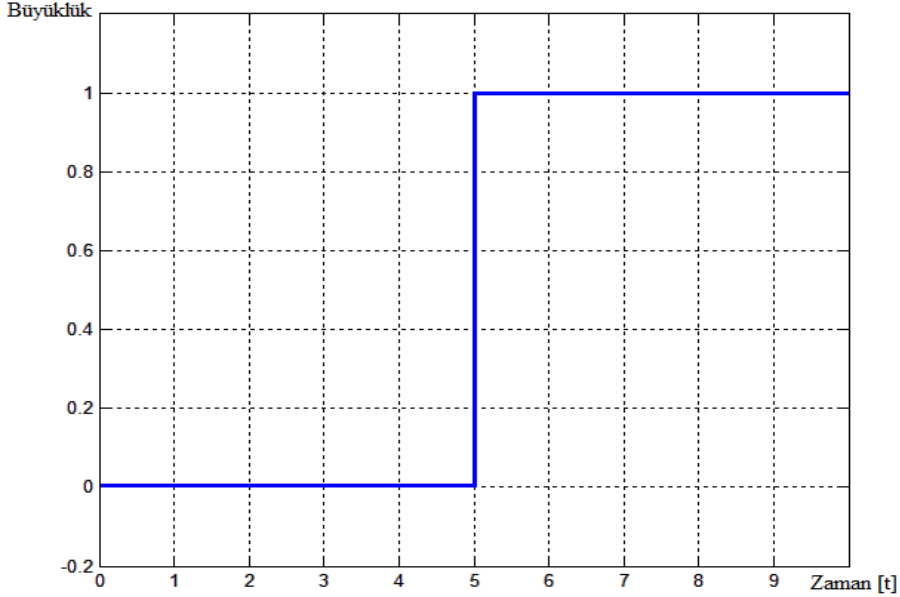


Şekil 6.1 : Kapalı çevrim sistemde çeşitli bozan etken etkilerine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.

6.1.1 Basamak girişine karşı kapalı çevrim sistemin cevabı

KE performansının incelenmesinde kullanılan yöntemlerin en temel olanlarından biri bozan etken olarak basamak etkisinin kullanıldığı yöntemdir.

Tipik bir basamak girişinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.2’de verilmektedir.



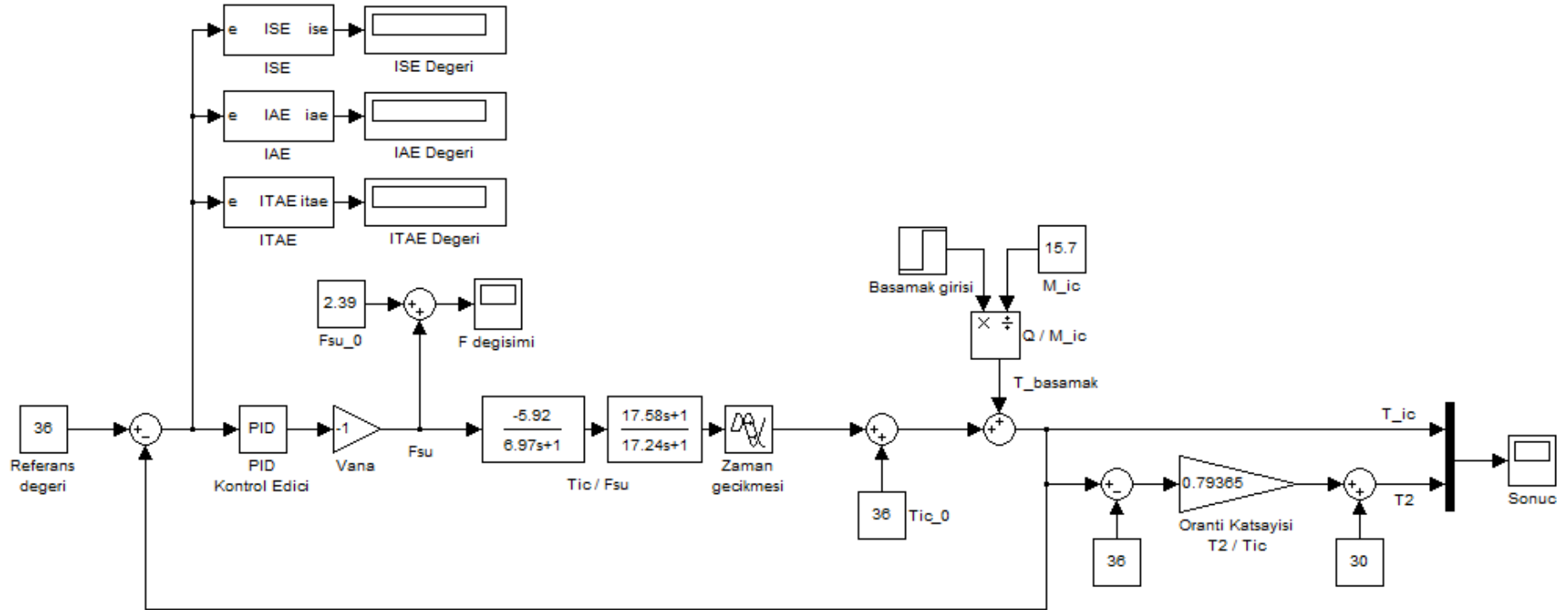
Şekil 6.2 : Basamak girişinin zamana bağlı değişiminin grafiği.

Şekilden de görüldüğü gibi basamak girişi belli bir ilk değere sahip bozan etkenin anda başka son değere gelmesi ve o değerde sabit kalmasıyla elde edilir.

Basamak Şekil 6.2’de olduğu gibi düşük bir ilk değerden daha büyük bir son değere ulaşıyorsa *pozitif basamak* olarak adlandırılabilir. Diğer yandan son değer ilk değerden küçük olduğu basamak ise *negatif basamak* olarak adlandırılır.

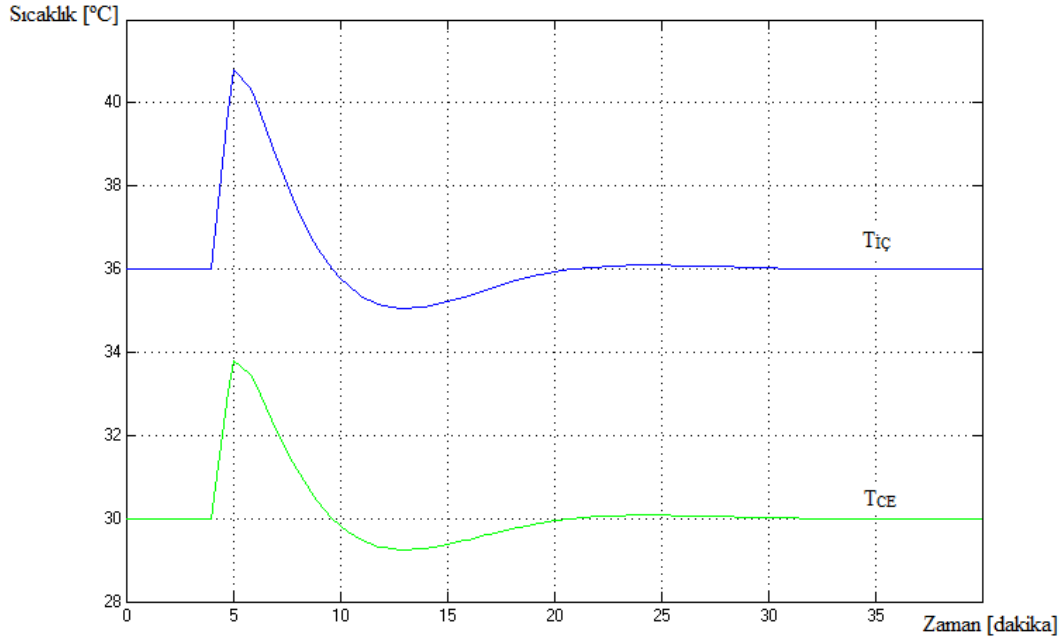
Bozan etken olarak pozitif basamak girişinin uygulandığı durumlarda sistemin cevabının bilgisayar ortamında incelenebilmesi için oluşturulan simulink blok diyagramı Şekil 6.3’te gösterilmektedir.

Gerçek sistemde bulunan ısıtıcı devreye alındıktan yaklaşık 1 dakika sonra maksimum ısısına ulaştığı için simulink blok diyagramındaki basamak girişi de 1 dakikada maksimum değerine ulaşmaktadır.



Şekil 6.3 : Kapalı çevrim sistemde basamak girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.

Yukarıdaki blok diyagramında farklı KE parametreleri kullanıldığı durumlarda sisteme ait cevap eğrileri Şekil 6.4, Şekil 6.6 ve Şekil 6.8’de gösterilmektedir.



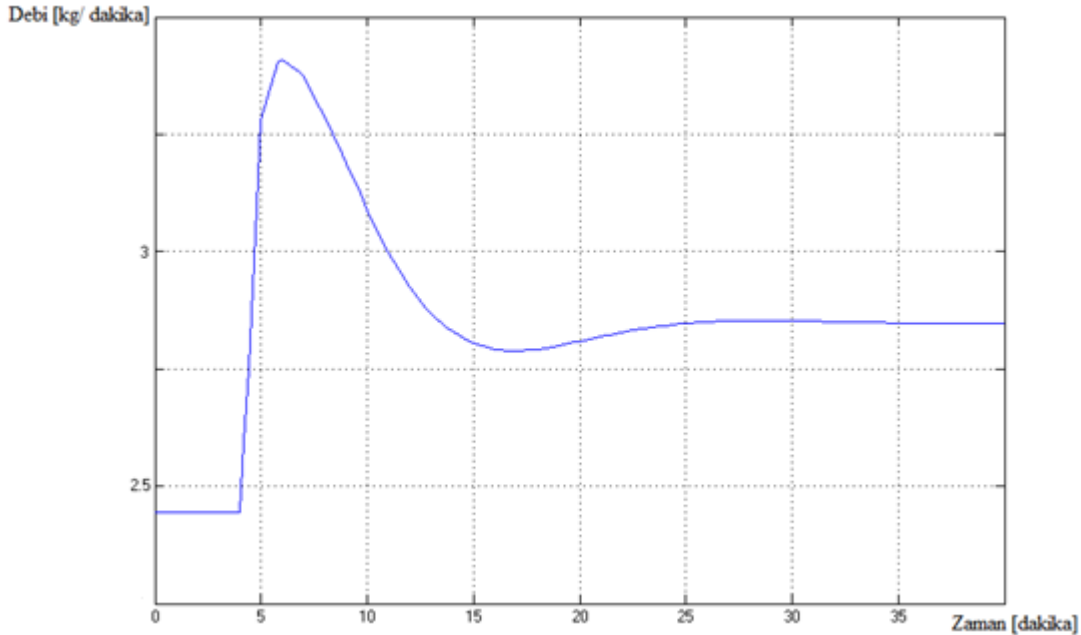
Şekil 6.4 : KE parametreleri $K_C=0.3$ ve $K_I=0.1$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişine cevabı

Şekil 6.4’teki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

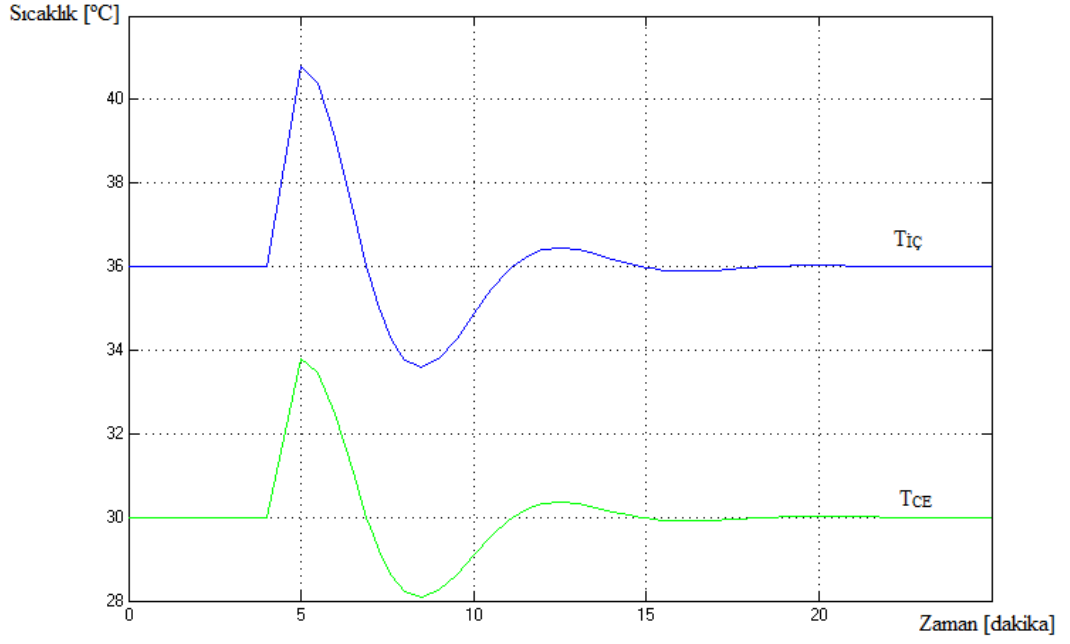
ISE: 50.2

IAE: 20.31

ITAE: 186.6



Şekil 6.5 : KE parametreleri $K_C=0.3$ ve $K_I=0.1$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.



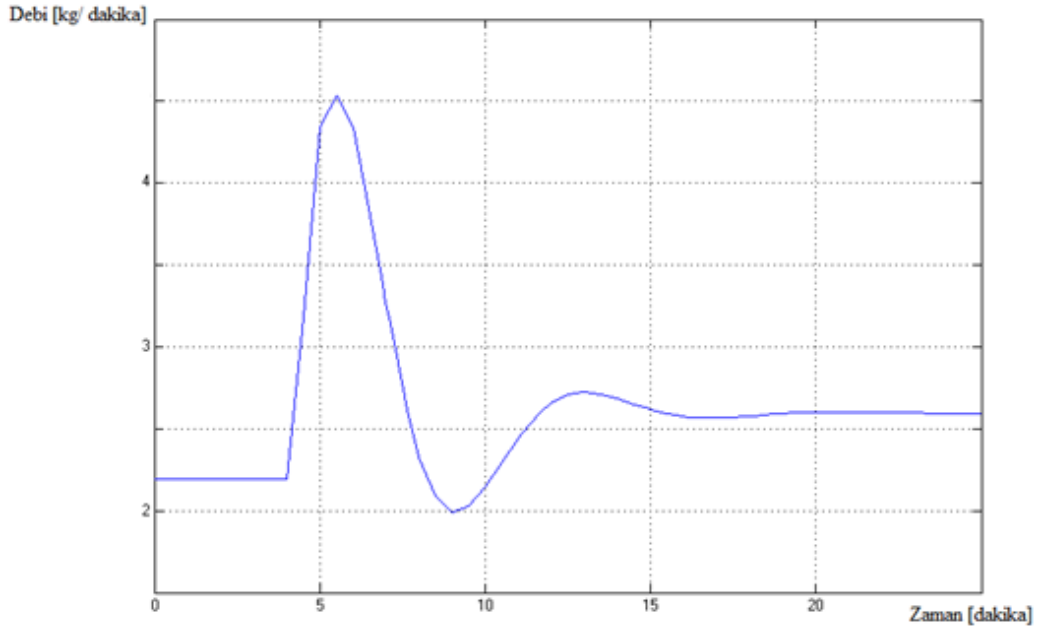
Şekil 6.6 : KE parametreleri $K_C=0.75$ ve $K_I=0.3$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişine cevabı.

Şekil 6.6'daki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

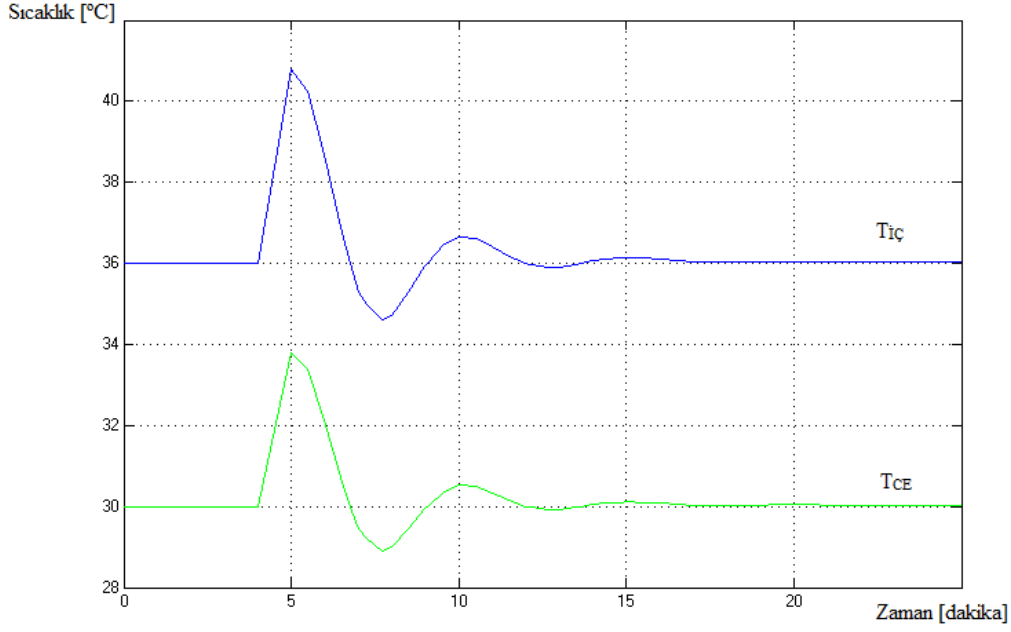
ISE: 40.22

IAE: 15.51

ITAE: 116.40



Şekil 6.7 : KE parametreleri $K_C=0.75$ ve $K_I=0.3$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.



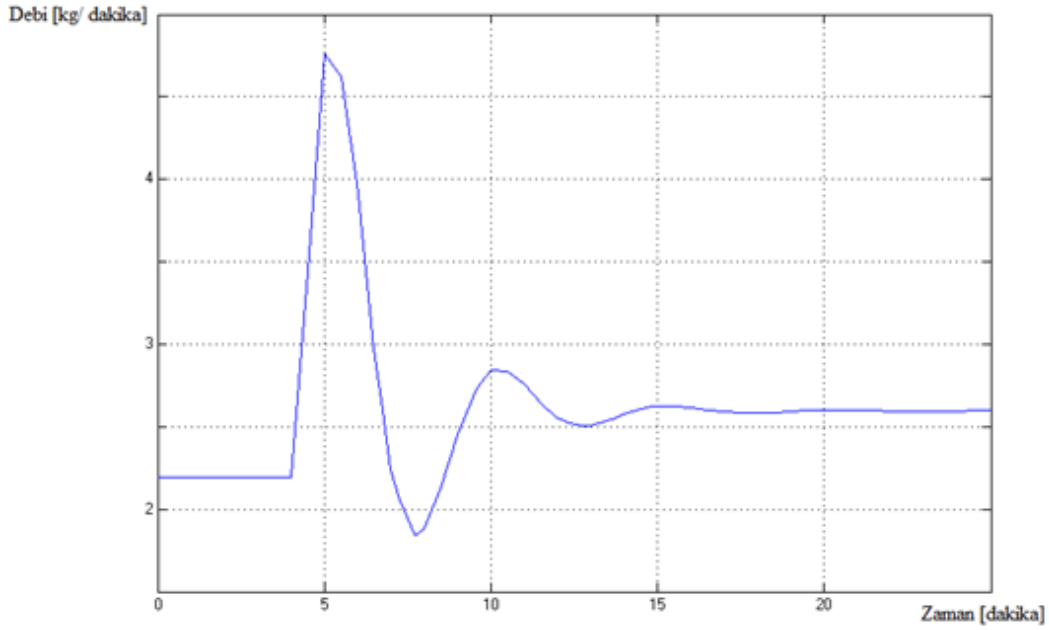
Şekil 6.8 : KE parametreleri $K_C=1.02$ ve $K_I=0.11$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişine cevabı.

Şekil 6.8'deki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

ISE: 28.99

IAE: 11.56

ITAE: 86.58



Şekil 6.9 : KE parametreleri $K_C=1.02$ ve $K_I=0.11$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki basamak girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.

Şekil 6.4'te de görüldüğü gibi KE parametreleri düşük değerde olduğunda sisteme belirli bir bozan etken uygulandığında sistem kararlı hale gelmekte fakat dengeye gelme zamanı biraz uzun olmaktadır. Dengeye gelme zamanını kısaltmak için KE parametrelerinin değerlerini büyüttüğümüzde sistemin daha çabuk kararlı hale geldiği fakat cevabın daha büyük titreşim gösterdiği görülmektedir (Şekil 6.6).

Bazı hassas proseslerde bu gibi dalgalanmalar ürüne veya prosese zarar verebilir. Bu gibi güvenli sınırlar içinde kalınması gereken durumlarda yüksek KE değerleriyle çalışmak sakıncalı olabilir. Öte yandan belli miktarda dalgalanmaya izin veren (çok hassas olmayan) sistemlerde daha hızlı cevap alınabilmesi için büyük değerlerin kullanılması uygun olabilir.

Şekil 6.8'deki KE parametreleri kullanıldığında sistemin daha hızlı cevap verdiği ve kararlı hale geldiği görülmektedir.

Yapılan birçok denemeden sonra integral hata değerlerine göre en uygun PID KE parametrelerinin Şekil 6.8'de kullanılan parametreler olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.5, Şekil 6.7 ve Şekil 6.9'da sisteme sonradan verilen basamak girişini kompanse etmek üzere KE'nin ayarladığı F_{SU} debisinin zaman bağlı değişimleri görülmektedir.

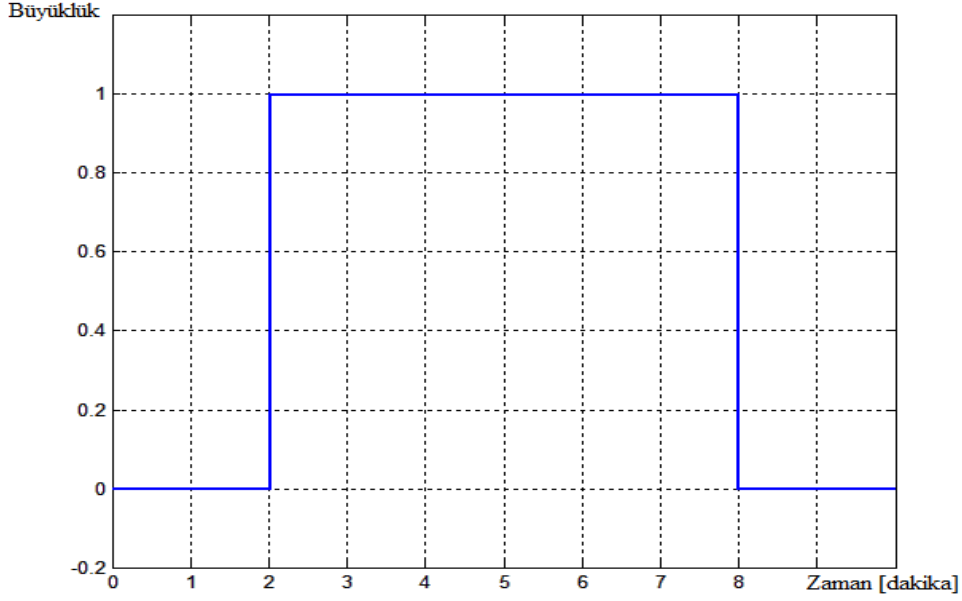
6.1.2 Dikdörtgen darbe girişine karşı kapalı çevrim sistemin cevabı

KE performansının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılabilmesi için basamak girişinden sonra bozan etken olarak dikdörtgen darbe girişi altında sistemin verdiği cevap incelenebilir.

Dikdörtgen darbenin basamak girişinden farkı pozitif bozucu etkinin yanında bu pozitif etkinin geri alınması suretiyle negatif bir etkiyi de içermesidir.

Bu bağlamda dikdörtgen darbe birbirine zıt yönlü iki basamak etkisinin birleşik hali olarak da düşünülebilir.

Tipik bir dikdörtgen darbe girişinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.10'da verilmektedir.



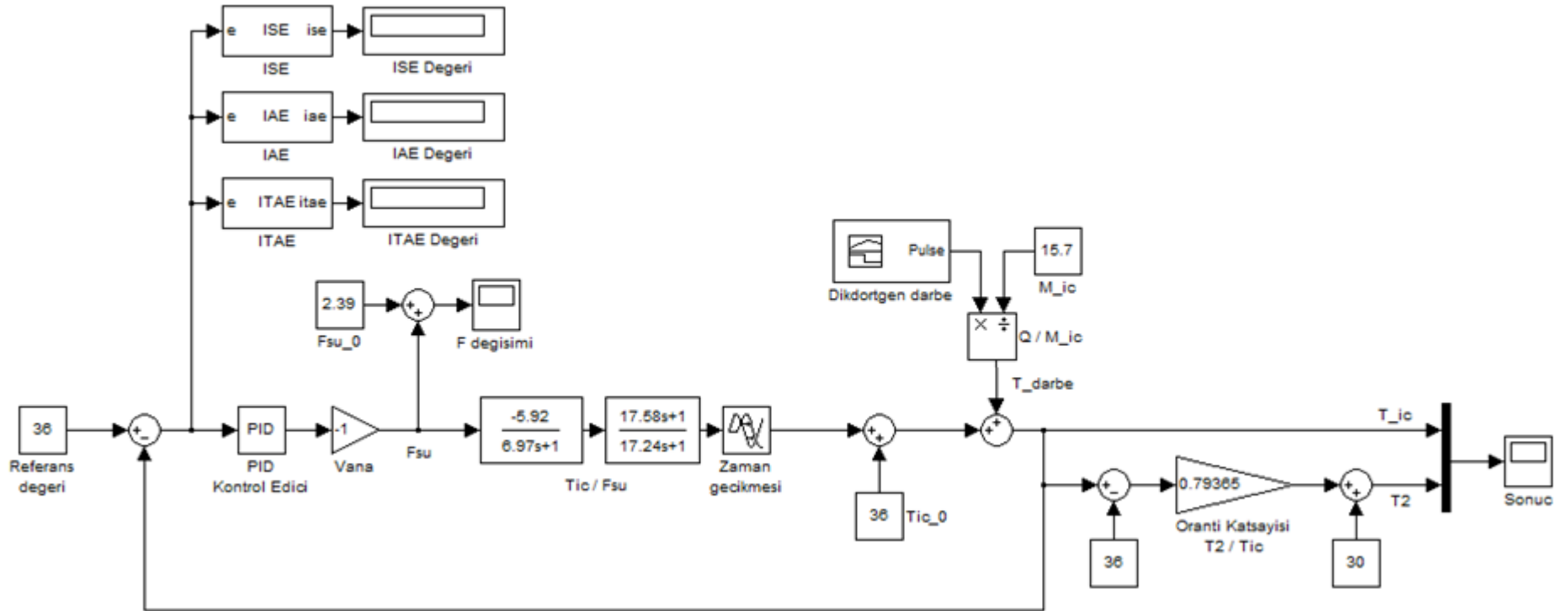
Şekil 6.10 : Dikdörtgen darbe girişinin zamana bağlı değişiminin grafiği.

Böylece yukarıda incelenen pozitif basamak girişinden farklı olarak, pozitif basamak girişiyle negatif basamak girişi birlikte incelenebilir.

Farklı KE parametreleri kullanıldığı durumlarda sistemin bozan etken olarak dikdörtgen darbe girişine karşı cevabının bilgisayar ortamında incelenebilmesi için oluşturulan simulink diyagramı Şekil 6.11’de gösterilmektedir.

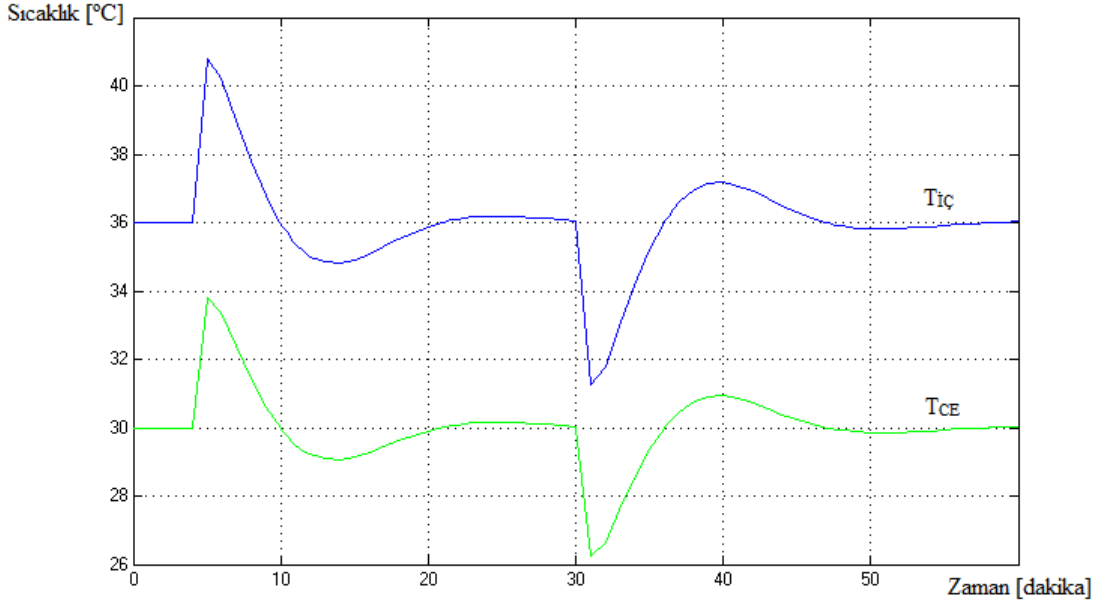
Şekil 6.11’in Şekil 6.3’ten farkı bozan etken olarak basamak değişimi yerine dikdörtgen darbe veren simulink bloğunun kullanılmasıdır. Dikdörtgen darbeyi veren bloğun nasıl oluşturulduğu ve ayarlandığı EK C.1’de detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

Gerçek sistemde bulunan ısıtıcı devreye alındıktan yaklaşık 1 dakika sonra maksimum ısısına ulaştığı ve devreden çıkarıldıktan sonra da yaklaşık 1 dakika sonra tam olarak soğuduğu için simulink blok diyagramındaki dikdörtgen darbe girişi de 1 dakikada maksimum değerine ulaşmakta ve 1 dakikada tekrar eski haline gelmektedir.



Şekil 6.11 : Kapalı çevrim sistemde dikdörtgen darbe girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.

Yukarıdaki blok diyagramında farklı KE parametreleri kullanıldığı durumlarda sisteme ait cevap eğrileri Şekil 6.12, Şekil 6.14, Şekil 6.16 ve Şekil 6.18’de gösterilmektedir.



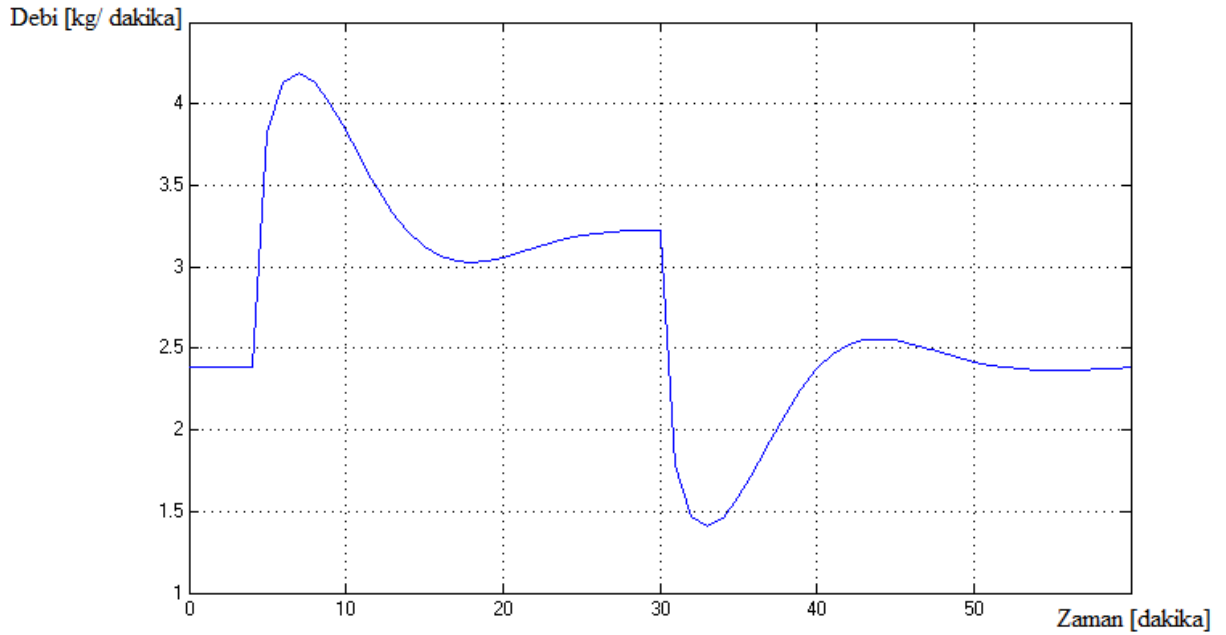
Şekil 6.12 : KE parametreleri $K_C=0.25$ ve $K_I=0.1$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişine cevabı.

Şekil 6.12’deki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

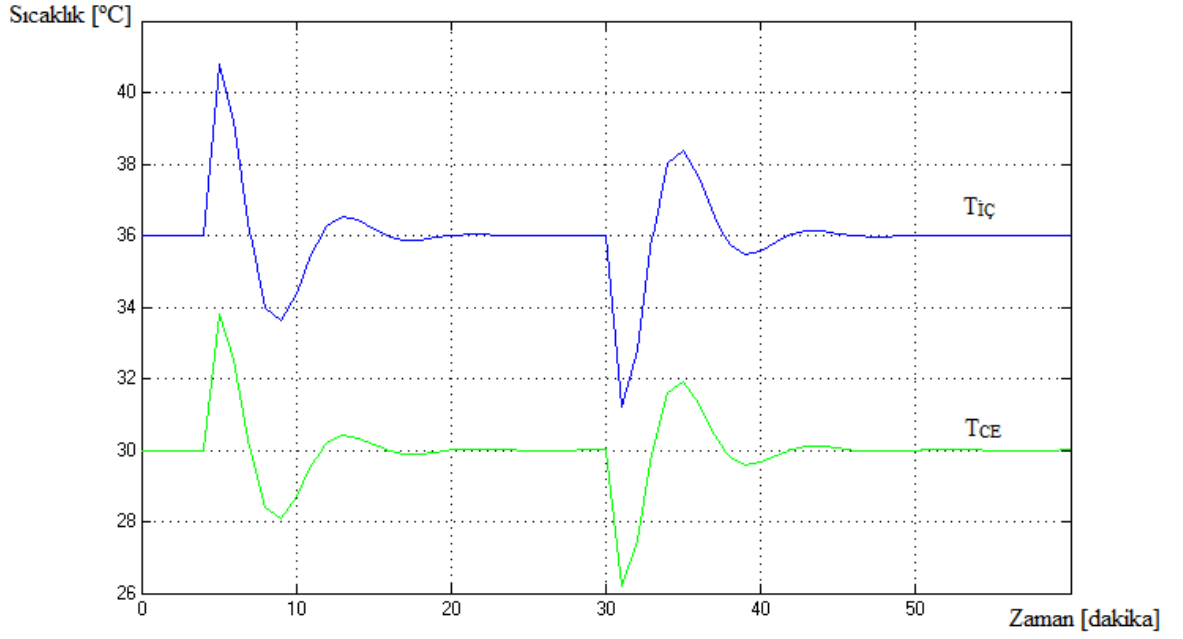
ISE: 111.7

IAE: 46.82

ITAE: 1077



Şekil 6.13 : KE parametreleri $K_C=0.25$ ve $K_I=0.1$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.



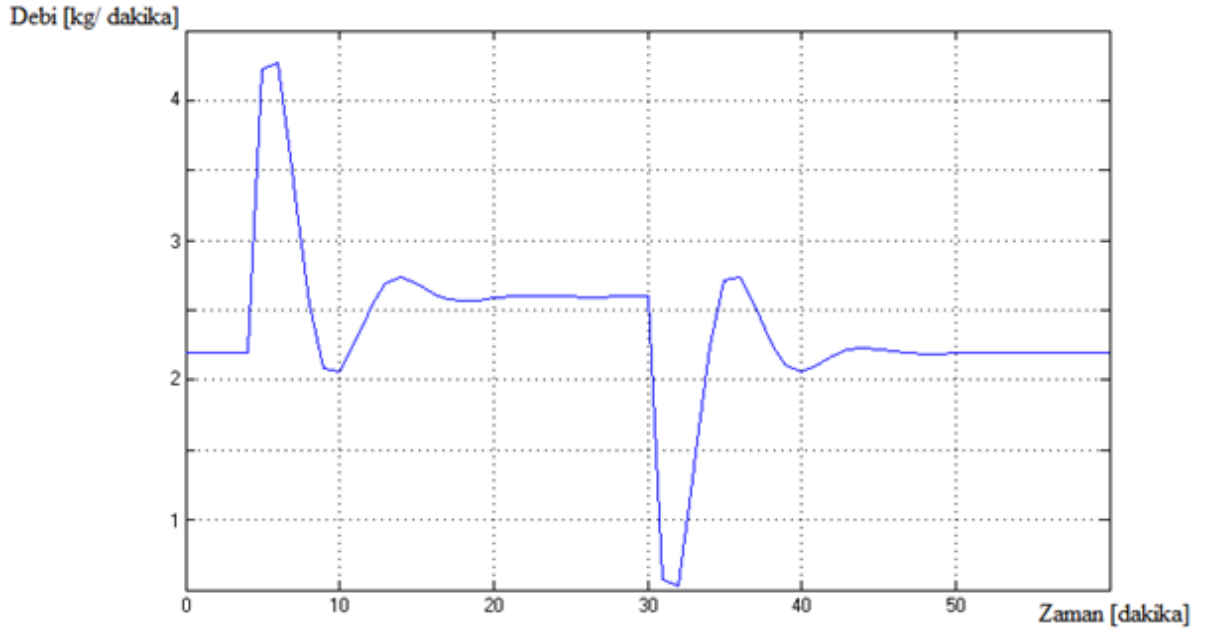
Şekil 6.14 : KE parametreleri $K_C=0.7$ ve $K_I=0.3$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişine cevabı.

Şekil 6.14'deki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

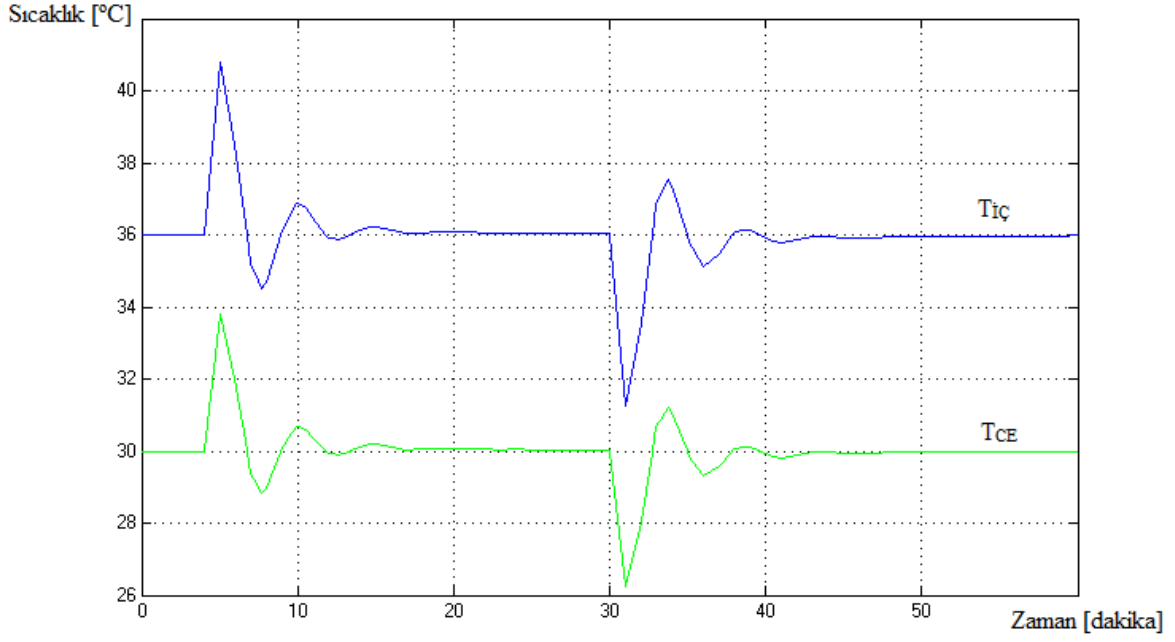
ISE: 78.63

IAE: 32.45

ITAE: 678



Şekil 6.15 : KE parametreleri $K_C=0.75$ ve $K_I=0.3$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.



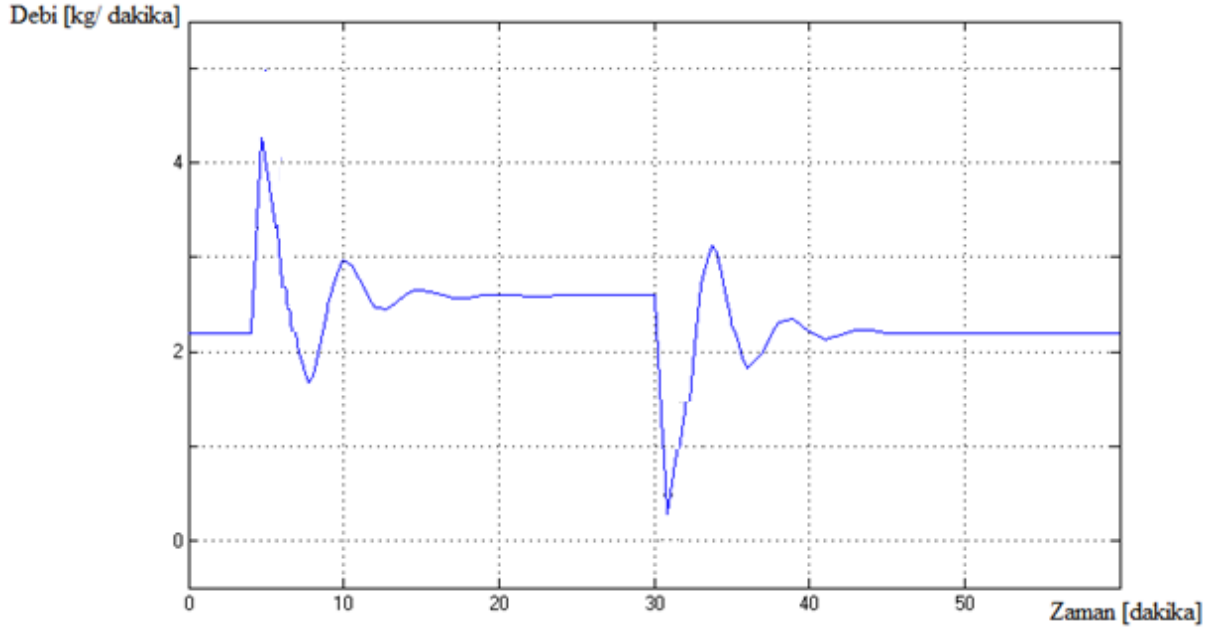
Şekil 6.16 : KE parametreleri $K_C=1.11$ ve $K_I=0.12$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişine cevabı.

Şekil 6.16'daki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

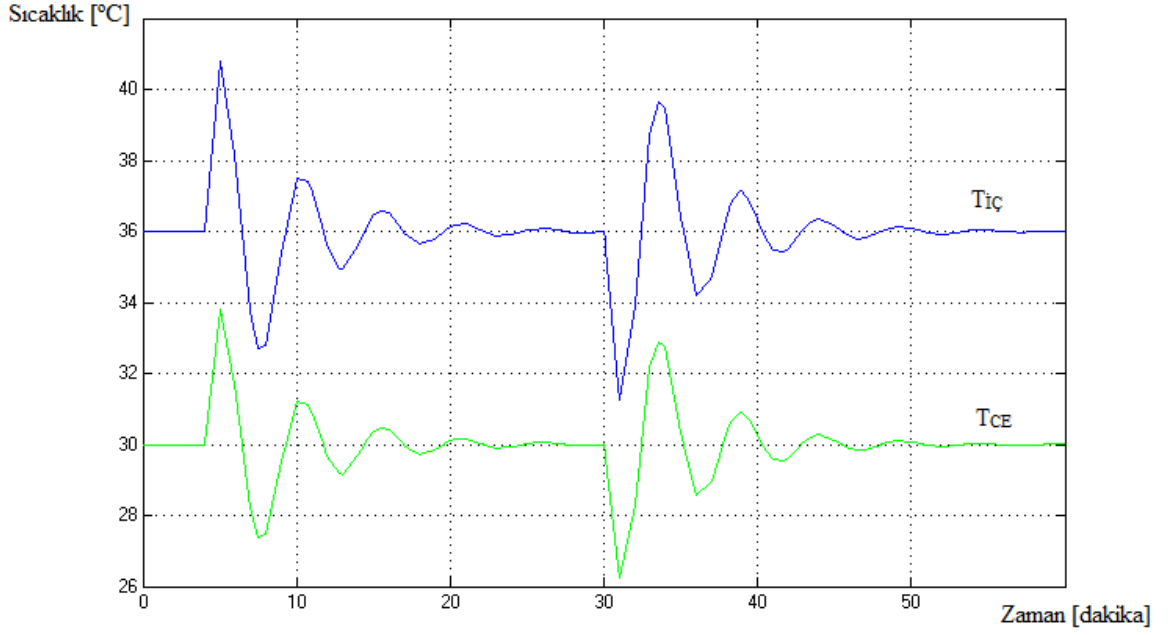
ISE: 52.08

IAE: 23.71

ITAE: 497.7



Şekil 6.17 : KE parametreleri $K_C=1.11$ ve $K_I=0.12$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.



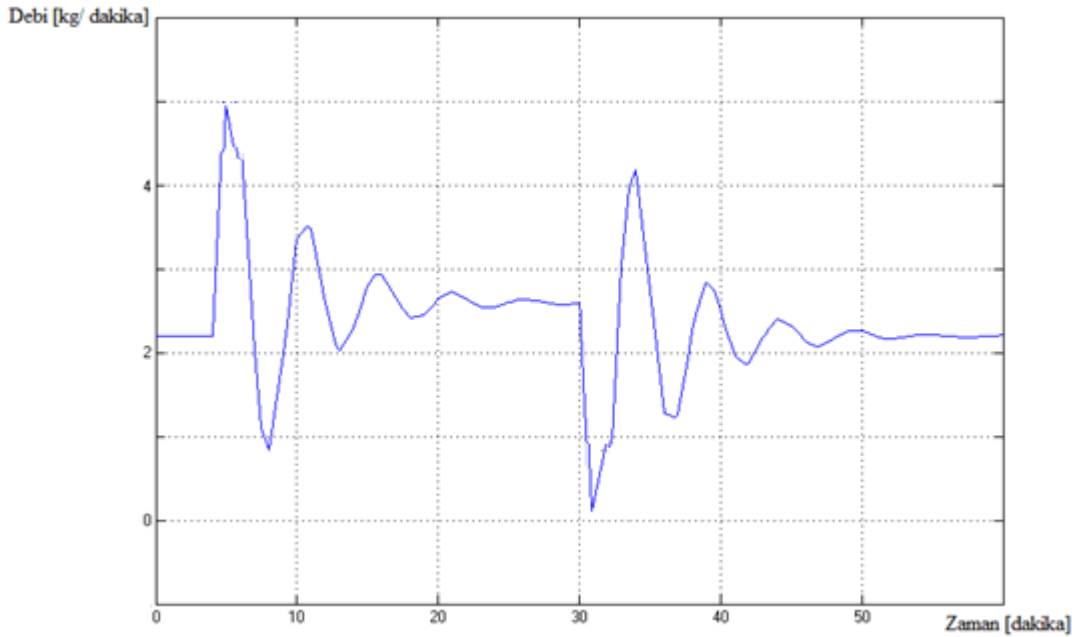
Şekil 6.18 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.4$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişine cevabı.

Şekil 6.18'deki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

ISE: 88.81

IAE: 38.42

ITAE: 867



Şekil 6.19 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.4$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] şiddetindeki ve 25 dakika süren dikdörtgen darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.

Yukarıdaki tüm cevaplarda, kullanılan KE parametrelerinin belirli bir şiddetteki dikdörtgen darbe girişine karşı, sistemi darbenin verildiği ve geri alındığı iki durumda da kararlı hale getirebildiği görülmektedir.

Şekil 6.12 ve Şekil 6.14 birlikte incelendiğinde KE parametrelerinin bir miktar artırılması ile sistemin aynı şiddetteki dikdörtgen darbe girişine cevabının hızlandığı fakat meydana gelen aşmanın da büyüdüğü görülmektedir.

Şekil 6.16'da KE parametrelerinin biraz daha değiştirilmesi sonucunda sistem cevabının daha az titreşimli olduğu ve sistemin kararlı hale oturma süresinin kısaldığı görülmektedir.

Şekil 6.18'de KE parametrelerinin daha da artırılması sonucunda sistem cevabının Şekil 6.16'ya göre daha fazla aşama gösterdiği ve kararlı hale oturma süresinin biraz daha uzun olduğu görülmektedir.

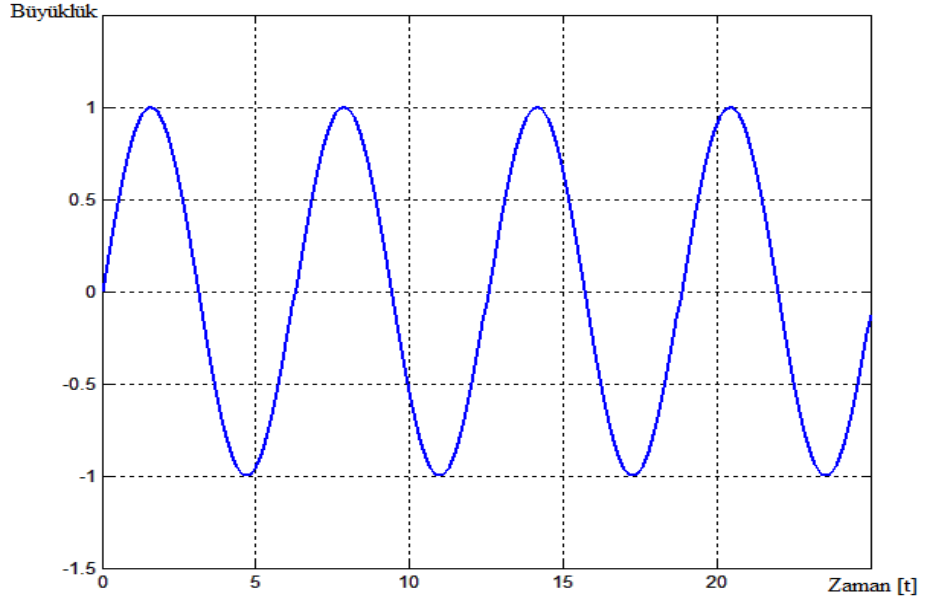
Yapılan birçok denemeden sonra integral hata değerlerine göre en uygun PID KE parametrelerinin Şekil 6.16'da kullanılan parametreler olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.13, Şekil 6.15, Şekil 6.17 ve Şekil 6.19'da sisteme sonradan verilen dikdörtgen darbe girişini kompanse etmek üzere KE'nin ayarladığı F_{SU} debisinin zaman bağlı değişimleri görülmektedir.

6.1.3 Sinüsoidal darbe girişine karşı kapalı çevrim sistemin cevabı

KE performansının incelenmesinde önceki bölümlerde bozan etken olarak uygulanan basamak ve dikdörtgen darbe girişinden sonra daha ileri bir çalışma olarak sistemin bozan etken olarak sinüsoidal darbe girişine verdiği cevap incelenebilir.

Tipik bir dikdörtgen darbe girişinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.20'de verilmektedir.



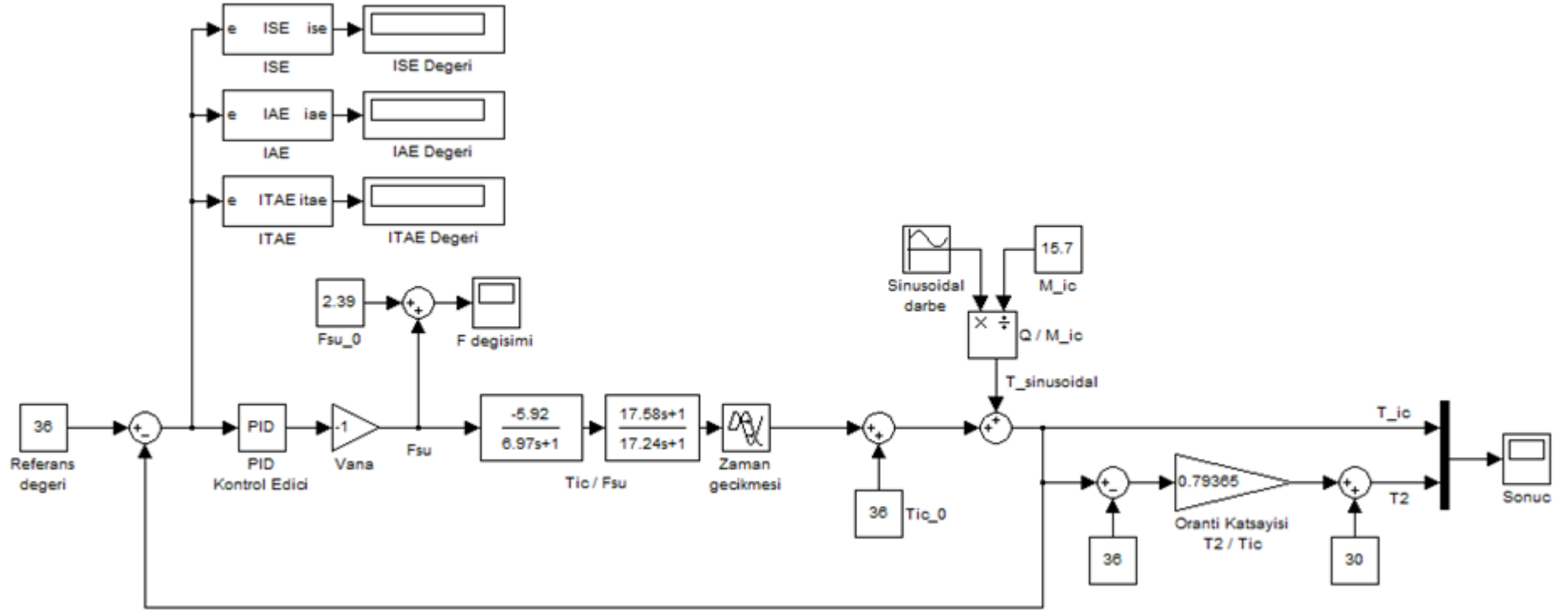
Şekil 6.20 : Sinüsoidal darbe girişinin zamana bağlı değişiminin grafiği.

Şekil 6.20’de görüldüğü gibi sinüsoidal darbe belli bir genliği ve periyodu olan sinüs dalgası şeklinde bir giriştir.

Sisteme bozan etken olarak sinüsoidal darbe girişi verildiği zaman darbenin periyoduna bağlı olarak cevap eğrisi elde edilir. Eğer giriş darbesinin periyodu hızlıysa sistem cevabı da giriş değişimi gibi sürekli değişir ve bir sinüs dalgası verir. Öte yandan giriş darbesinin periyodu daha yavaşsa sistem cevabı verilen darbeye bağlı olarak daha yayvan bir şekilde tekrarlayan bir eğri verir.

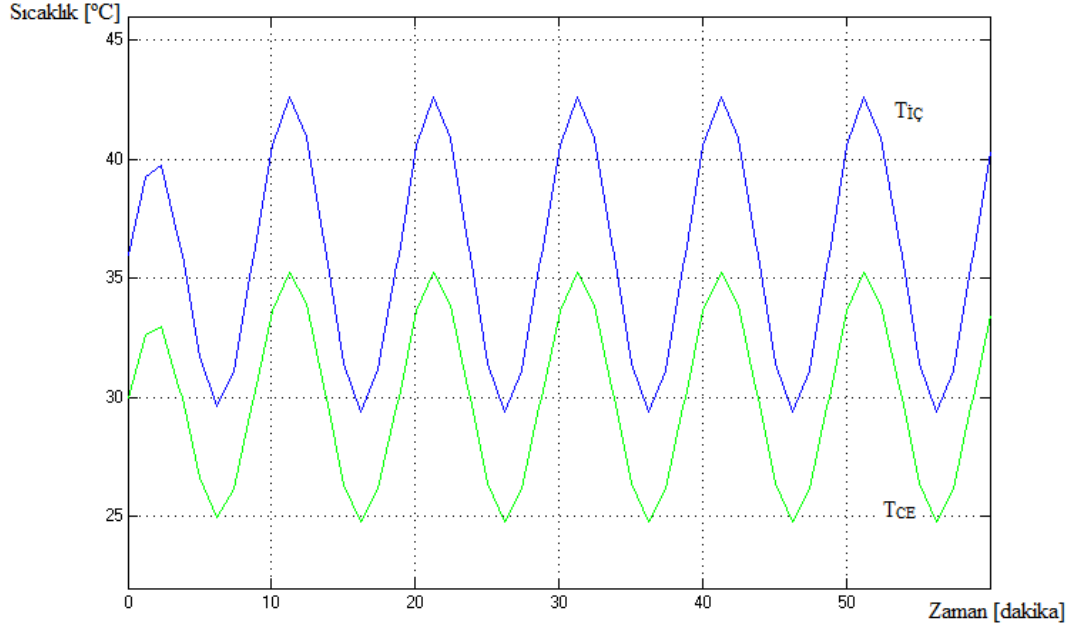
Bozan etken olarak sinüsoidal darbe girişi uygulandığı durumlarda sistemin cevabının bilgisayar ortamında incelenebilmesi için oluşturulan simulink blok diyagramı Şekil 6.21’de gösterilmektedir.

Şekil 6.21’deki blok diyagramda Şekil 6.3 ve Şekil 6.11’den farklı olarak sinüsoidal darbe girişi veren bozan etken kullanılmıştır.



Şekil 6.21 : Kapalı çevrim sistemde sinüsoidal darbe girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.

Yukarıdaki blok diyagramında farklı KE parametreleri ve sinüsoidal darbe değerleri kullanıldığı durumlarda sisteme ait cevap eğrileri Şekil 6.22, Şekil 6.24 ve Şekil 6.26'da gösterilmektedir.



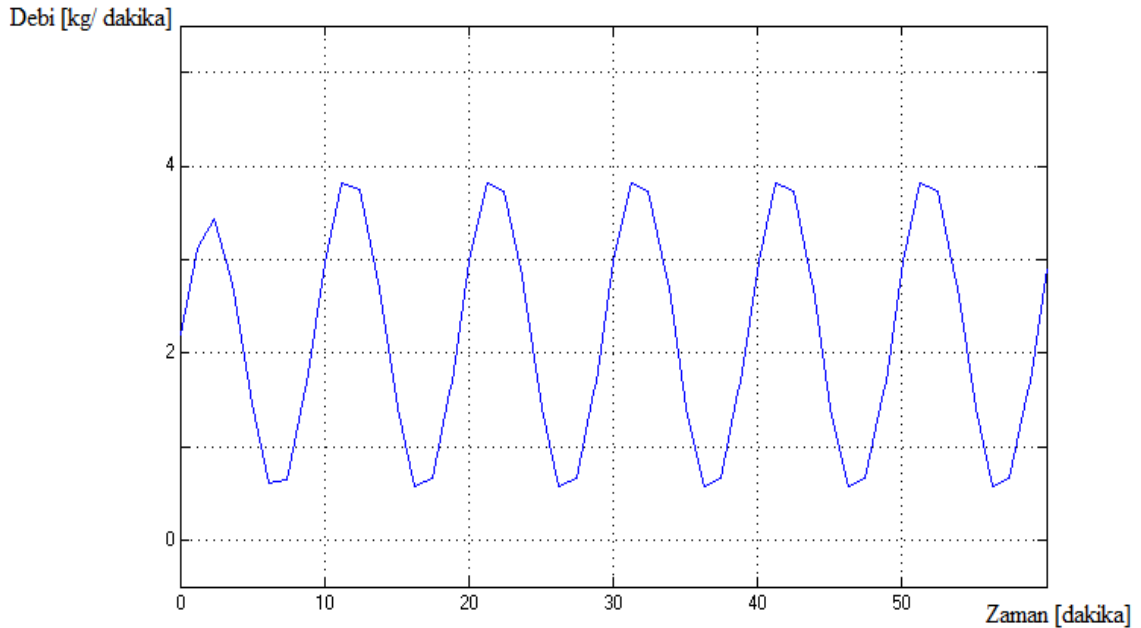
Şekil 6.22 : KE parametreleri $K_C=0.5$ ve $K_I=0.1$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.1 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişine cevabı.

Şekil 6.22'deki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

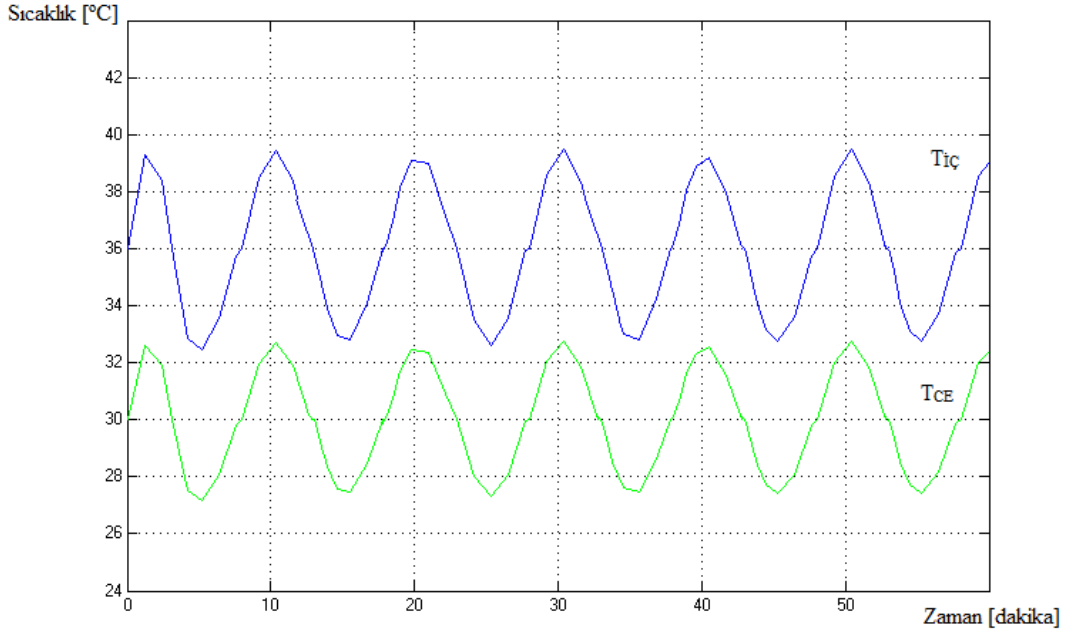
ISE: 1123

IAE: 231.2

ITAE: 7055



Şekil 6.23 : KE parametreleri $K_C=0.5$ ve $K_I=0.1$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.1 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.



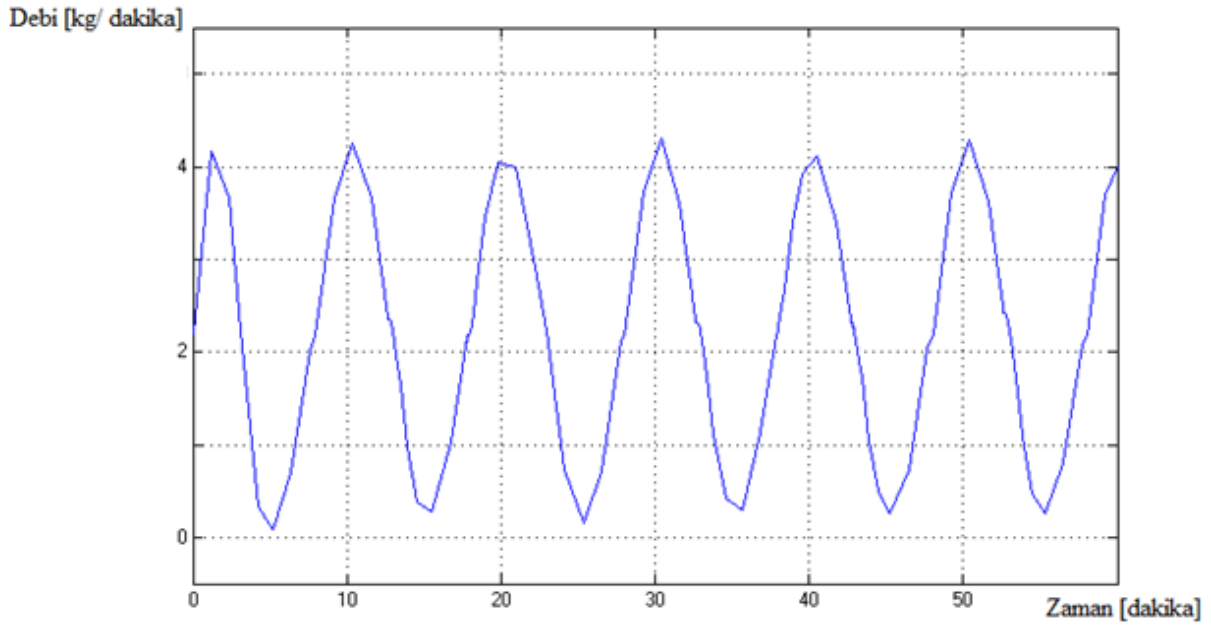
Şekil 6.24 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.01$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.1 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişine cevabı.

Şekil 6.24'deki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

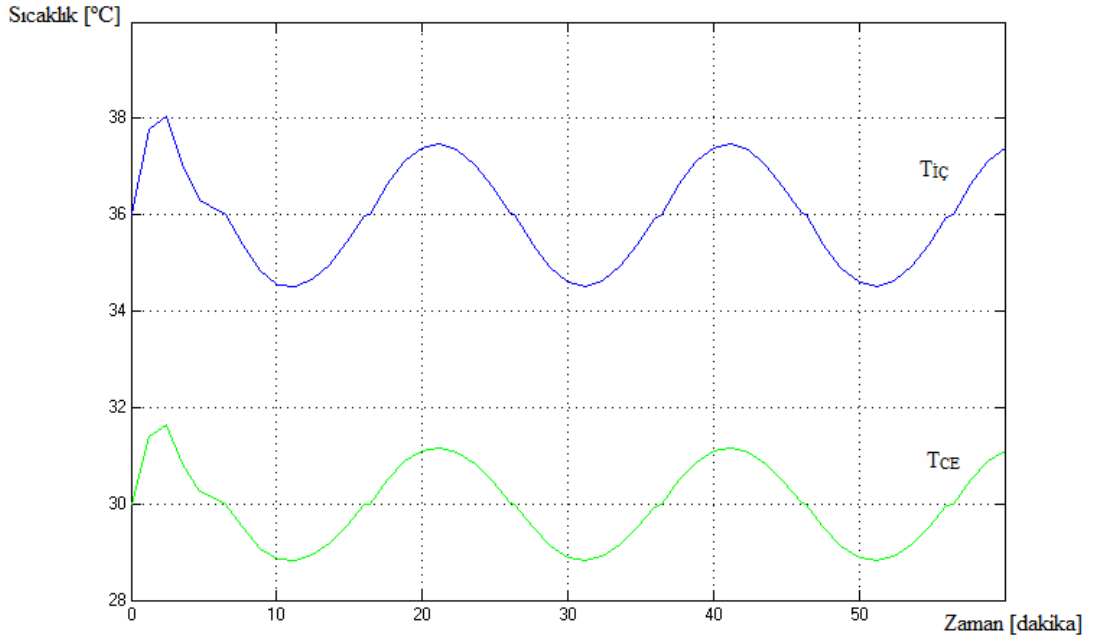
ISE: 317.7

IAE: 123.6

ITAE: 3664



Şekil 6.25 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.01$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.1 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.



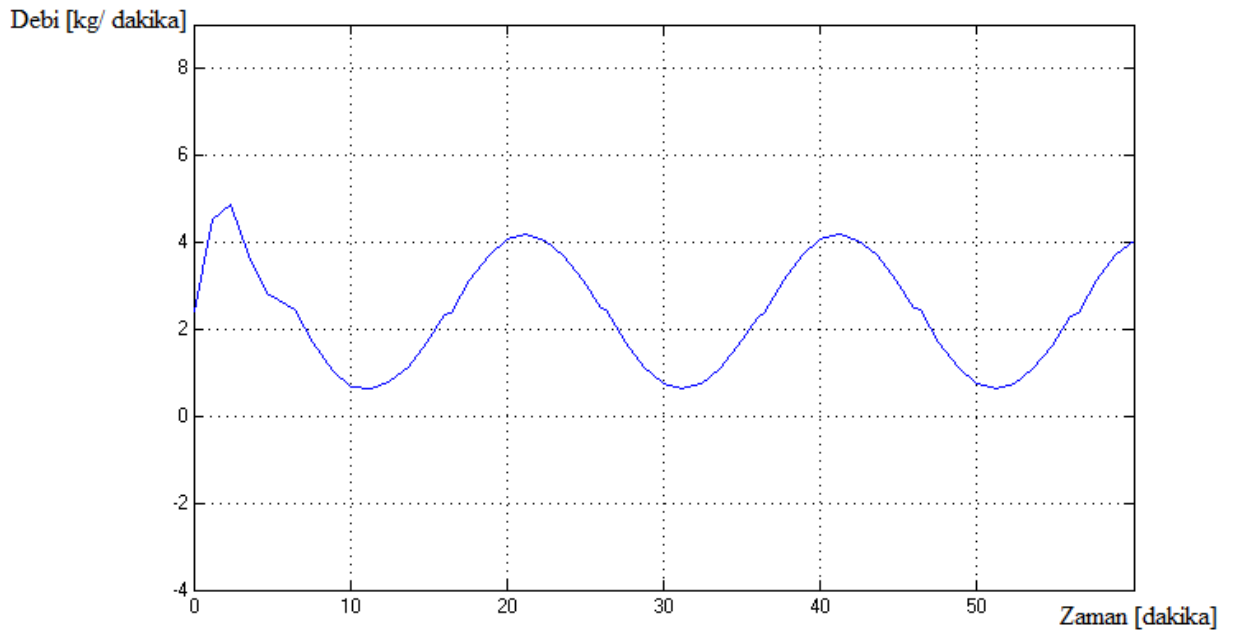
Şekil 6.26 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.01$ iken sistemin 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.05 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişine cevabı.

Şekil 6.26'daki grafiğe göre hesaplanan hata integrali değerleri şunlardır:

ISE: 66.54

IAE: 56.12

ITAE: 1652



Şekil 6.27 : KE parametreleri $K_C=1.2$ ve $K_I=0.01$ iken sisteme uygulanan 75 [kcal/dakika] genliğindeki ve 0.05 [döngü/dakika] frekansındaki sinüsoidal darbe girişi durumunda F_{SU} değerinin zamana göre değişimi.

Şekil 6.22 ve Şekil 6.24 birlikte incelediğinde daha büyük KE parametrelerinin kullanıldığı Şekil 6.24'teki durumda sistemin cevap eğrisinin genliğinin daha düşük olduğu periyodunun ise hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

Şekil 6.24 ve Şekil 6.26'ya baktığımızda ise aynı KE parametreleri kullanıldığında, sisteme genliği aynı fakat periyodu daha yavaş olan bir sinüsoidal darbe girişinde sistemin cevap eğrisinin genliğinin daha düşük ve periyodunun daha yavaş olduğu (daha yayvan) görülmektedir.

Yapılan birçok denemeden sonra integral hata değerlerine göre en uygun PID KE parametrelerinin Şekil 6.24'te kullanılan parametreler olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.23, Şekil 6.25 ve Şekil 6.27'de sisteme sonradan verilen sinüsoidal darbe girişini kompanse etmek üzere KE'nin ayarladığı F_{SU} debisinin zaman bağlı değişimleri görülmektedir.

6.2 Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi İçin Önerilen Çalışmalar

Kontrol çalışmalarında prosesi temsil etmek üzere denklem (5.52)'deki transfer fonksiyonu kullanılmaktadır. Ancak kullanılan bu transfer fonksiyonu sadece seçilen çalışma noktası için oluşturulmuştur. Yapılan doğrusallaştırma işlemi sebebiyle transfer fonksiyonu bu çalışma noktası etrafındaki yerel bir çözümdür.

Kullanılan parametre değerlerinde ve çalışma koşullarındaki değişiklikler transfer fonksiyonunu doğrudan etkileyecektir. Transfer fonksiyonundaki değişiklik, kullanılan PID katsayılarının da değişmesi anlamına gelmektedir.

Çalışma şartlarındaki değişikliklere bağlı olarak proses ve KE parametrelerini kendi kendine sürekli ayarlayan bir sistemde daha doğru ve hassas kontrol yapılabileceği düşünülmektedir.

Kontrol sisteminin geliştirilmesinde yapılabilecek diğer bir katkı olarak da kaskat kontrol kullanılması düşünülebilir.

Klasik geri beslemeli kontrol çevriminde F_{SU} değeri $T_{IÇ}$ sıcaklığından alınan sinyale bağlı olarak kontrol edilir. Bu çevrim $T_{IÇ}$ sıcaklığındaki değişimleri dengelemek için daha etkin T_{CE} 'deki değişimleri dengelemek içinse daha az etkin bir biçimde çalışır. T_{CE} 'deki değişimleri de hızla dengelemeye çalışacak bir düzenleme ile kontrol daha iyi hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

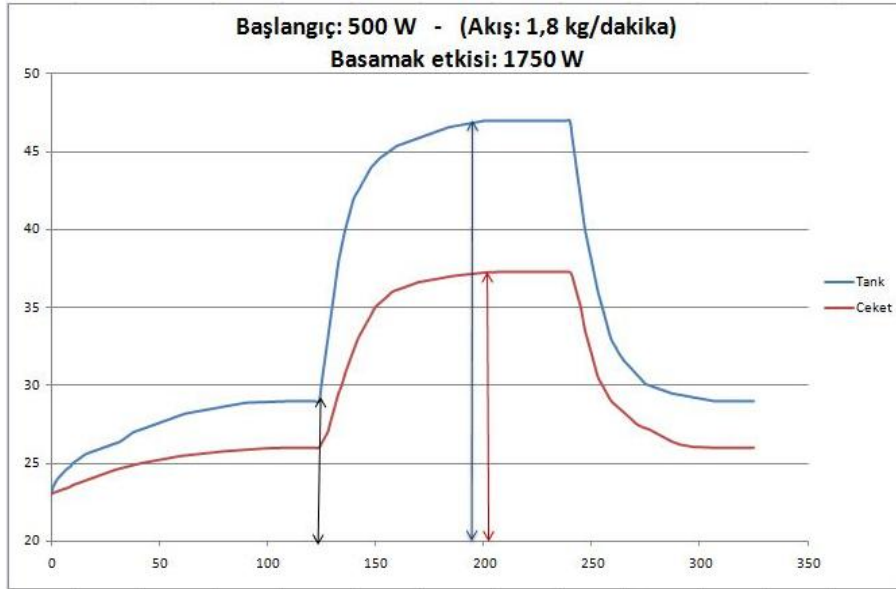
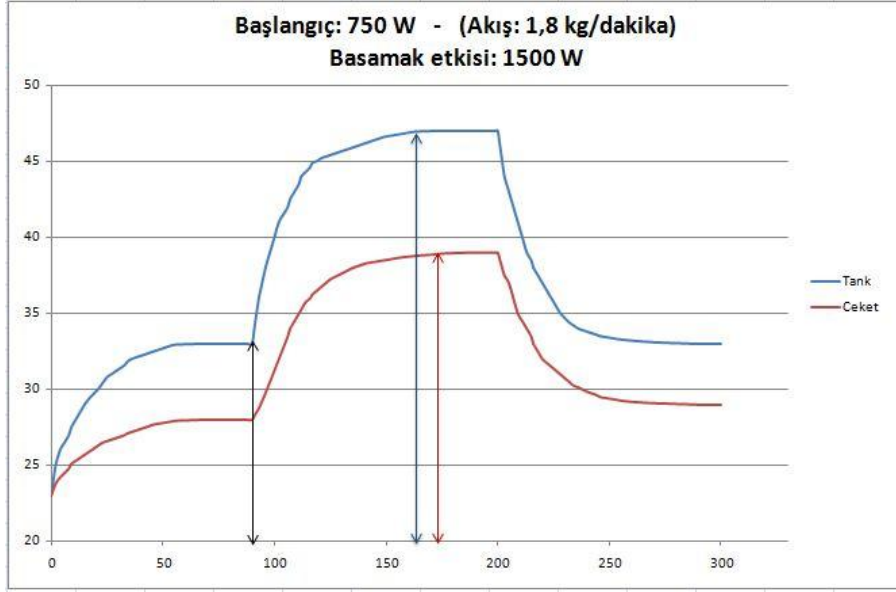
- [1] **Smith, C. A.**, 2002. Automated Continuous Process Control, New York.
- [2] **Wang, L., Cluett, W. R.**, 2000. From Plant Data to Process Control: Ideas for Process Identification and PID Design, England.
- [3] **Sung, S. W., Lee, J., Lee, I.**, 2009. Process Identification and PID Control, Singapore.
- [4] **Matter, E.**, 2010. History of Automatic Control System, University of Bahrain, Bahrain.
- [5] **Url-1** <<http://www.nd.edu/~isis/history.html>>, alındığı tarih 16.03.2010
- [6] **Bennett, S.**, 1996. A Brief History of Automatic Control, England
- [7] **Dorf, R. C., Bishop, R. H.**, 2008. Modern Control Systems, New Jersey
- [8] **Nagrath, I. J.**, 2006. Control Systems Engineering, Delhi.
- [9] **Singh, S. K.**, 2009. Industrial Instrumentation and Control, Delhi.
- [10] **Luyben, W. L.**, 1989. Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers, New York.
- [11] **Url-2** <http://tr.wikipedia.org/wiki/Otomatik_kontrol>, alındığı tarih 08.04.2010
- [12] **Stephanopoulos, G.**, 1984. Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice, New Jersey.
- [13] **Şaşmaz, D. A.**, 1998. Proses Kontrol, İstanbul.
- [14] **Seborg, D. E.**, 2003. Process Dynamics and Control, New York.
- [15] **Luyben, W. L.**, 1996. Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers, Pennsylvania.
- [16] **Murrill, P. W.**, 2000. Fundamentals of Process Control Theory, England.
- [17] **Coughanowr, D. R.**, 1991. Process Systems Analysis and Control, New York.
- [18] **Gao, Z.**, 2000. From Linear To Nonlinear Control Means: A Practical Progression, Ohio.
- [19] **Aström, K. J., Hagglund, T.**, 1995. PID Controllers Theory Design And Tuning Method, New York.
- [20] **Gerişkovan, İ.**, 1995. PID, Fuzzy ve Fuzzy-PID Kontrol. Algoritmalarına Genel Bir Bakış, *Otomasyon Dergisi*, İstanbul, Sayı **36**, s. 68-72.
- [21] **Luyben, W. L., Luyben, M. L.**, 1997. Essentials of Process Control, Florida.
- [22] **Alli, H., Kaya, M.**, 2001. A Genetic Algorithm Approach for Determination of PID Control Parameters, *Journal of Science and Engineering*, Elazığ.

- [23] **Lee, J.**, 1999. On-line PID Controller Tuning from A Single, Closed-Loop Test, Korea.
- [24] **Bequette B. W.**, 2003. Process Control, Modeling, Design and Simulation, New Jersey.
- [25] **Dreinhofer, L. H.**, 1988. Controller Tuning For a Slow Nonlinear Process, New York.
- [26] **Åström, K. J.**, 2006. Adaptive Control, New Jersey.
- [27] **Luyben, W. L., Luyben, M. L., Tyreus, B. D.**, 1998. Plantwide Process Control, New York.
- [28] **Smith, C. L., Murrill, P. W.**, 1989. Process-Control Systems. Application, Design, and Tuning, New York.
- [29] **Chau, C. P.**, 2002. Process control: a first course with MATLAB, England.
- [30] **Denbigh, K.G.**, 1984. Chemical Reactor Theory, Cambridge University Press, USA.
- [31] **Luyben, W. L.**, 2007. Chemical Reactor Design and Control, New York.
- [32] **Neuman, E. B.**, 2001. Chemical Reactor Design, Optimization, and Scaleup, New York.
- [33] **Url-3** <infogaufire.googlepages.com/3.Batch_reactor.ppt>, alındığı tarih 25.04.2010
- [34] **Ogata, K.**, 2001. Modern Control Engineering, New Jersey.
- [35] **Donald, R. C.**, 2001. Process Systems Analysis and Control, Philadelphia.
- [36] **Yuwana, M., Seborg, D. E.**, 1992. A New Method for On-line Controller Tuning, *American Journal of Chemical Engineering*, Chicago.
- [37] **Holman, J. P.**, 2001. Heat Transfer, New York.
- [38] **Yucai, Z.**, 2001. Multivariable System Identification for Process Control, Eindhoven.
- [39] **Mikles, J., Fika. M.**, 2007. Process Modelling, Identification, and Control, Bratislava.
- [40] **Şaşmaz, D. A.**, 1993. Proses Kontrol, İstanbul.
- [41] **Ahmed, S., Huang, B., Shah, S. L.**, 2006. Novel identification method from step response, Department of Chemical and Materials Engineering, Canada.
- [42] **Fedele, G.**, 2007. A new method to estimate a first-order plus time delay model from step response, Italy.
- [43] **Url-4** <http://www.engineeringtoolbox.com/unit-converter-d_185.html>, alındığı tarih 20.07.2010
- [44] **Kealy, T., O'Dwyre, A.**, 2002. Comparison of open and closed loop process identification techniques in the time domain, Conference Papers, Dublin Institute of Technology, Dublin.
- [45] **Mohd-Mokhtar, R., Wang, L.**, 2008. 2-Stage approach for continuous time identification using step response estimates, Australia.

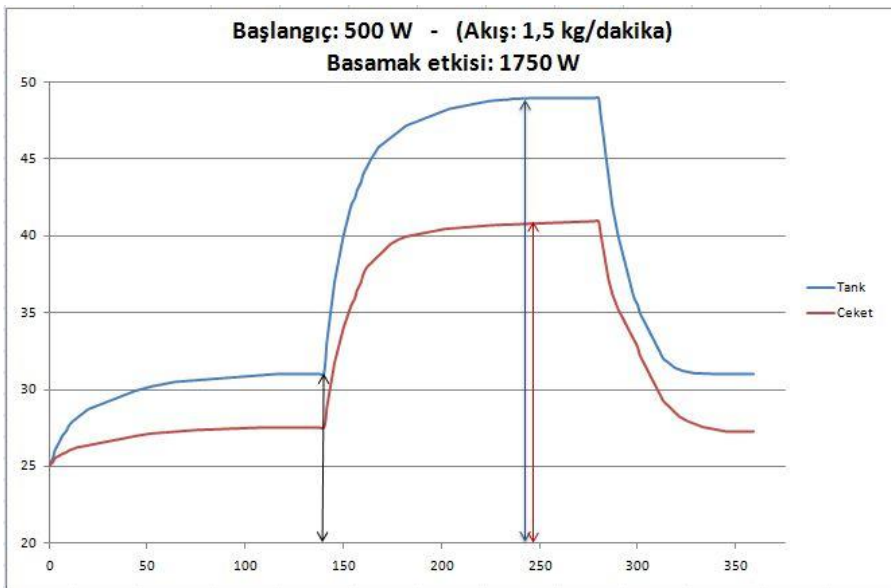
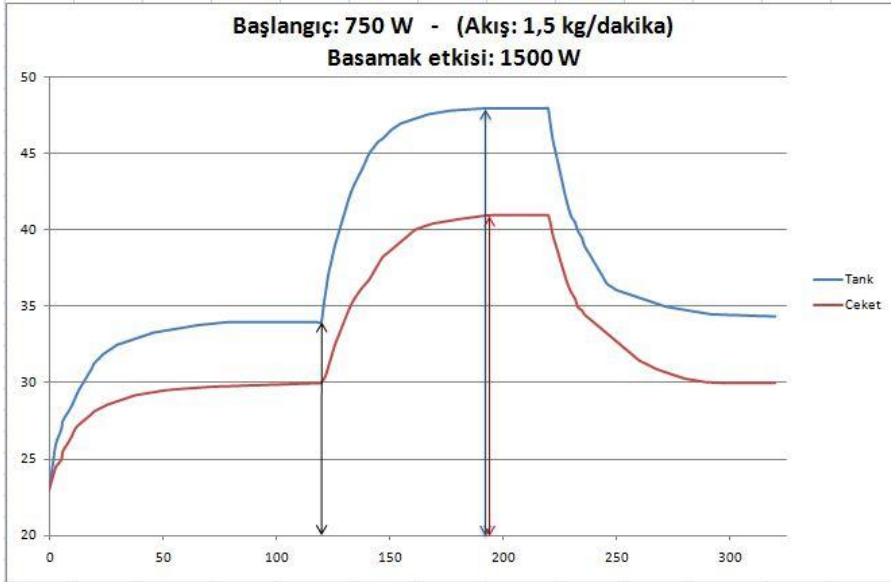
- [46] **Ikonen, E., Najim, K.**, 2002. Advanced Process Identification and Control, Finland.
- [47] **Bi, Q., Cai, W., Lee, E., Wang, Q., Hang, C, Zhang, Y.**, 1998. Robust identification of first-order plus dead-time model from step response, Singapore.
- [48] **Carlos, A. S., Armanoo, B. C.**, 1997. Principles and Practice of Automatic Process Control, South Florida.
- [49] **Ishak, A. A., Ahmad, A.**, 2002. Application of numerical technique in tangent analysis of a discrete step response verification, Department of Chemical Engineering University Technology of MARA, Malaysia.
- [50] **Chen, C. L.**, 1999. A Simple Method for On-line Identification and Controller Tuning, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, p. 2037-2039, Taiwan.
- [51] **Nishikavva, Y., Sannomiya, N., Ohta, T., Tanaka, H.**, 1994. A Method for Auto-tuning of PID Control Parameters, *A Journal of International Federation of Automatic Control*, p. 321-332, Singapore.
- [52] **Kern, D. Q.**, 2002. Process Heat Transfer, New York.
- [53] **Url-5** <http://www.engineeringtoolbox.com/heat-transfer-coefficients-exchangers-d_450.html>, alındığı tarih 24.05.2010
- [54] **Url-6** <http://www.roymech.co.uk/Related/Thermos/Thermos_Heat_Transfer.html>, alındığı tarih 25.05.2010

EKLER

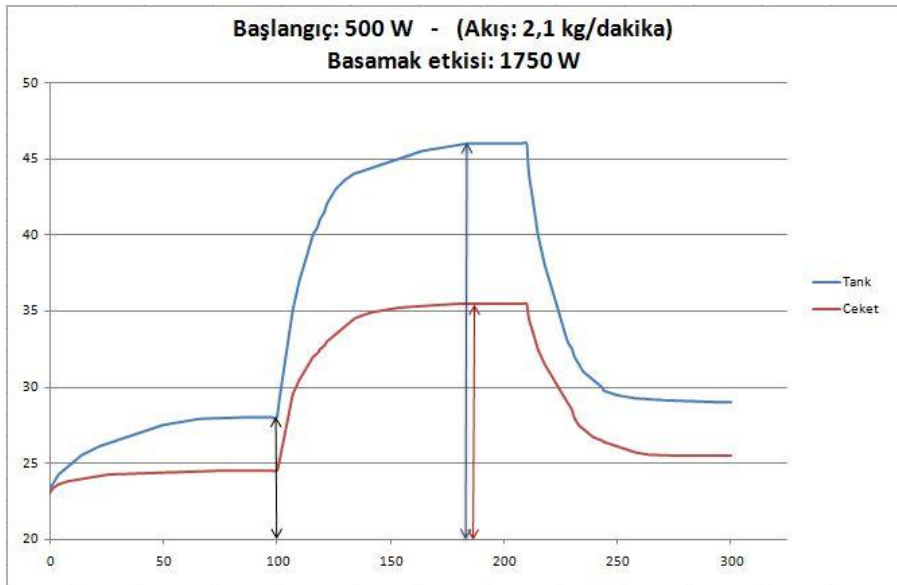
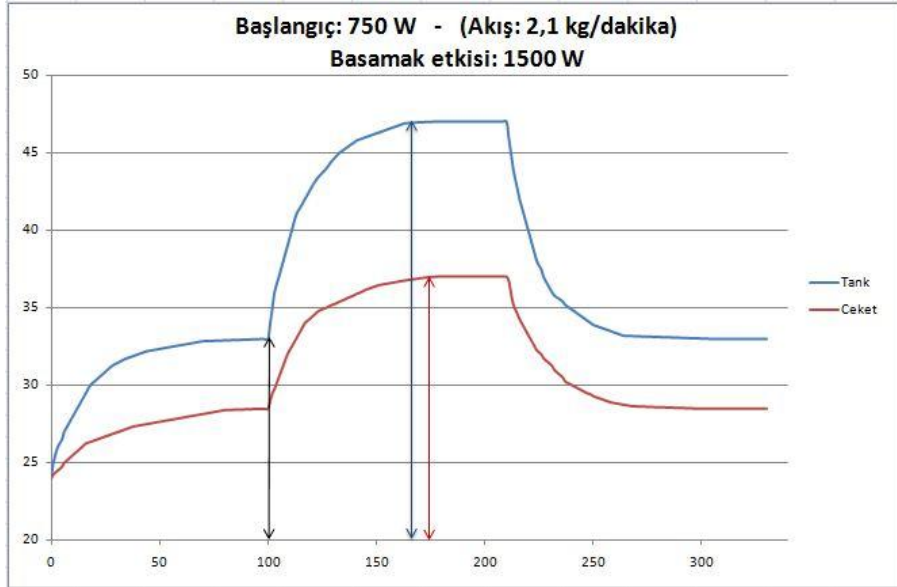
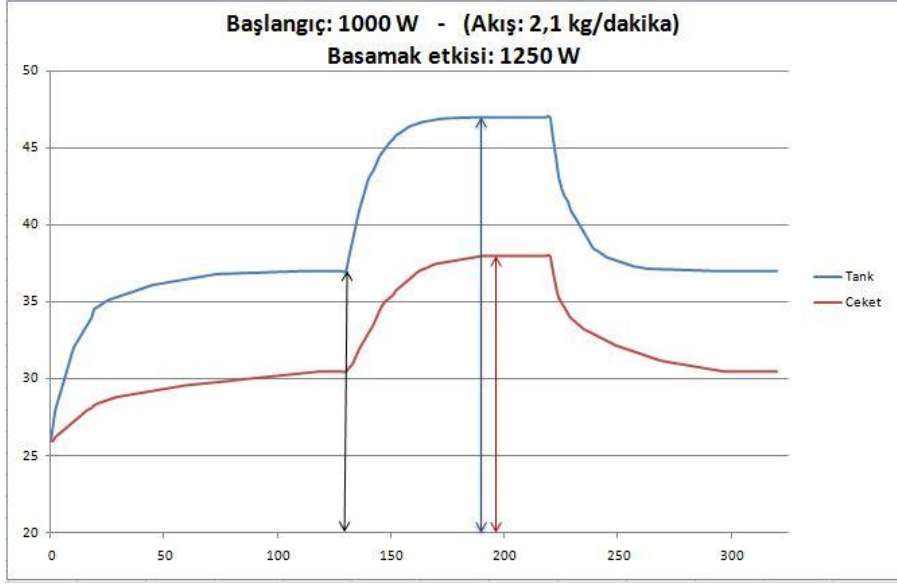
EK A.1: Soğutma suyu debisi F_{SU} ve iç tanka verilen basamak şiddeti (Q) değerleri değiştirilerek elde edilen diğer reaksiyon eğrileri.



Şekil A.1 : Farklı değerlerle oluşturulan diğer reaksiyon eğrileri.



Şekil A.1 (devam) : Farklı değerlerle oluşturulan diğer reaksiyon eğrileri.



Şekil A.1 (devam) : Farklı değerlerle oluşturulan diğer reaksiyon eğrileri.

EK A.2: Deneysel U katsayıları.**Çizelge A.2 : Çizelge 5.2'nin daha ayrıntılı gösterimi.**

Deneysel No	T _{iç}		T _{ceket}		ΔT _{iç}	ΔT _{ceket}	ΔT _{log}	Debi	Güç		Zaman	Verilen Isı	Tankın Aldığı Isı	Ceketin Aldığı Isı	U*A	U
	İlk	Son	İlk	Son	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/dakika]	[W]	[kcal/dakika]	[Dakika]	[kcal]	[kcal]	Q=U*A*ΔT [kcal/dakika]	[kcal/dakika*°C]	[kcal/m ² *dakika*°C]
1	36	48	30	38	12	8	9,87	1,8	1250	17,94	35	627,99	188,40	12,56	1,27	4,24
2	33	47	28	38	14	10	11,89	1,8	1500	21,53	50	1076,56	219,80	17,14	1,44	4,80
3	29	47	26	37	18	11	14,21	1,8	1750	25,12	75	1883,97	282,60	21,35	1,50	5,01
4	37	48	31,5	39,75	11	8,25	9,56	1,5	1250	17,94	45	807,42	172,70	14,10	1,48	4,92
5	34	48	30	40,5	14	10,5	12,17	1,5	1500	21,53	60	1291,87	219,80	17,87	1,47	4,90
6	31	49	27,5	40,75	18	13,25	15,50	1,5	1750	25,12	92	2311,00	282,60	22,05	1,42	4,74
7	37	47	30,5	37,25	10	6,75	8,27	2,1	1250	17,94	38	681,82	157,00	13,81	1,67	5,57
8	33	47	28,25	36,75	14	8,5	11,02	2,1	1500	21,53	65	1399,52	219,80	18,15	1,65	5,49
9	28	46	24,5	35,5	18	11	14,21	2,1	1750	25,12	84	2110,05	282,60	21,76	1,53	5,10

EK B.1: Şekil 5.10'daki Bode diyagramının çizilmesi için yazılan Matlab kodu ve çıkan sonuçlar.

Matlab kodu:

```
G1=tf(-5.92,[6.97 1],'InputDelay',1);
G2=tf([17.58 1],[17.24 1]);
G=G1*G2;
Kc=1;
[mag,phase,w]=bode(G*Kc);
subplot(2,1,1),loglog(w,squeeze(mag),[0.001 100],[0.18 0.18],'-');
axis([0.1 50 0.01 100])
subplot(2,1,2),semilogx(w,squeeze(phase),[0.001 100],[-180 -180],'-');
axis([0.1 50 -240 240])
[Gm,Pm,Wco,Wpm]=imargin(squeeze(mag),squeeze(phase),w)
```

Sonuçlar:

Gm = 5.4718

Pm = -129.3415

Wco = 4.7369

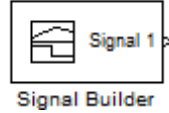
Wpm = 0.8540

EK C.1: Simulink programı kullanılarak dikdörtgen darbe bloğu oluşturulması ve ayarlanması.

Simulink programında dikdörtgen darbe girişini veren bloğa ana Matlab penceresindeyken aşağıdaki yolu izleyerek ulaşılabilir:

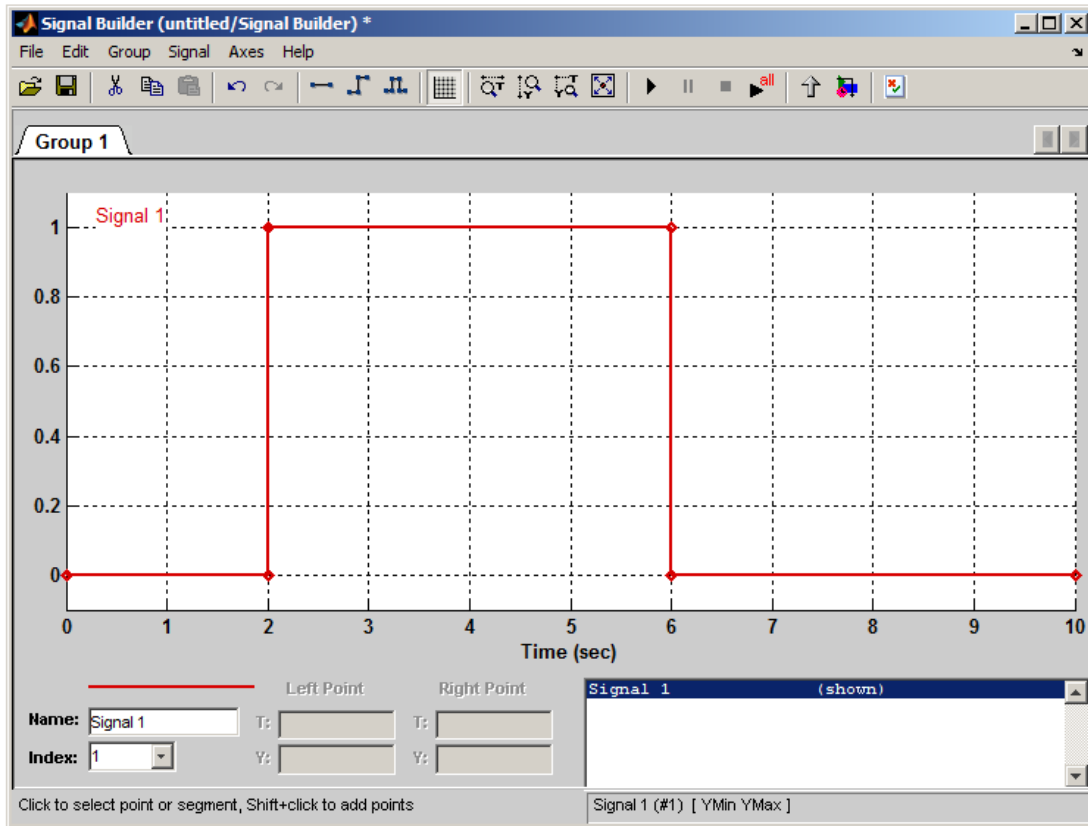
Matlab → Simulink Library Browser → Simulink → Sources → Signal Builder.

Signal Builder bloğunun genel görüntüsü Şekil C.1’de görülmektedir.



Şekil C.1 : Simulink Signal Builder bloğu.

Bu sinyal bloğuna çift tıkladığında sinyalin şiddetini ve süresini ayarlamaya yarayan aşağıdaki gösterilen ayar penceresine ulaşılır (Şekil C.2).



Şekil C.2 : Signal Builder bloğu ayar penceresi.

Şekil C.2 ile gösterilen pencerede darbenin şiddeti ve uygulanma süresi gösterilmektedir.

Darbe sinyalinin şiddeti ve süresi gibi özelliklerini ayarlamak için grafiğin gerekli parçası fare yardımıyla tutulup sürüklenir.

Örneğin darbenin şiddetini değiştirmek için kırmızı çizginin üstteki yatay çizgisi aşağı yukarı sürüklenerek ayarlanır. Yine aynı şekilde darbenin başlangıç ve bitiş süresini ayarlamak için kırmızı çizginin dikey duran sağ ve sol parçaları istenilen değere getirilir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Onur UYSAL
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1985
Lise Pertevniyal Anadolu Lisesi
Lisans Üniversite: İstanbul Üniversitesi