

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DURUM UZAY METODU İLE EKZOTERMİK (ISI YAYAN) KİMYASAL
REAKTÖRÜ SİMÜLE EDEN ISIL SİSTEMİN PARAMETRELERİNİN
TESPİTİ VE GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil BALCI

(506111010)

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

KASIM 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DURUM UZAY METODU İLE EKZOTERMİK (ISI YAYAN) KİMYASAL
REAKTÖRÜ SİMÜLE EDEN ISIL SİSTEMİN PARAMETRELERİNİN
TESPİTİ VE GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil BALCI

(506111010)

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Dursun Ali ŞAŞMAZ

KASIM 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Halil BALCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Durum Uzay Metodu İle Ekzotermik (Isı Yayan) Kimyasal Reaktörü Simüle Eden Isıl Sistemin Parametrelerinin Tespiti ve Geri Beslemeli Kontrolü” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Dursun Ali ŞAŞMAZ**

Istanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Serdar YAMAN**

Istanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hasan USLU

Beykent Üniversitesi

Teslim Tarihi : **26 Kasım 2015**

Savunma Tarihi : **28 Aralık 2015**

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 bilgi, deneyim ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli abim Mustafa BALCI, kardeşim Zehra BALCI ve arkadaşım Sahand FARAJI'ye,

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

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

Kasım 2015

Halil BALCI

(Kimya Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
2. OTOMATİK KONTROL	5
2.1 Otomatik Kontrolün Tarihi	5
2.2 Kontrol Sistemleri	8
2.2.1 Açık çevrim sistemler	9
2.2.2 Kapalı çevrim sistemler.....	10
2.3 Kontrol Ediciler	10
2.3.1 Oransal (P) kontrol edici	11
2.3.2 Oransal integral (PI) kontrol edici	12
2.3.3 Oransal integral türevsel (PID) kontrol edici	13
2.4 Kontrol Edicilerin Gelişmiş Ayar Yöntemleri	17
2.4.1 Frekans cevaplarından yararlanılarak geri beslemeli kontrol çevrimlerinin tasarımı	17
2.4.2 Ziegler Nichols ayar yöntemi.....	20
2.4.3 Cohen – Coon ayar yöntemi	25
2.4.4 Tyreus – Luyben ayar yöntemi	25
2.4.5 İntegral ilişkisi ile ayarlama	26
2.4.6 IMC (Internal model control) yöntemi	28
3. DURUM UZAY YÖNTEMİ İLE KONTROL SİSTEMLERİNİN ANALİZİ 31	
3.1 Durum Uzay Yöntemiyle Tanımlanan Matematiksel Modelin Değişkenleri ..	31
3.1.1 Durum değişkenleri (State variables).....	31
3.1.2 Giriş değişkenleri	32
3.1.3 Parametre	32
3.2 Bir Sistemin Dinamik Modeli ve Durum Uzay Metoduna Uyarlanması.....	32
3.3 Durum Uzay Analizi İfade Biçimleri	35
3.3.1 Durum uzayı kanonik biçimler ile gösterme.....	35
3.4 Kontrol Edilebilirlik ve Gözlenebilirlik Kavramları.....	39
3.4.1 Kontrol edilebilirlik	39
3.4.2 Vektörlerin lineer bağımsızlığı	41
3.4.3 Gözlenebilirlik	41
4. DENEYSEL YÖNTEM	45
4.1 Deney Düzenegi	45
4.1.1 Karıştırıcı	46
4.1.2 Dalgıç ısıtıcı	46
4.1.3 Varyak.....	46

4.1.4 Termoçift ve önyükseltici.....	46
4.1.5 Soğutma suyu deposu.....	47
4.2 Deney Yöntemi.....	47
4.2.1 Reaktörün kararlı hal tespiti	48
4.2.2 Basamak etkisine reaktörün verdiği cevabın incelenmesi.....	48
4.2.3 Sistemde ısı kaybının tespiti.....	50
4.3 Dinamik İnceleme	52
4.3.1 Reaktör için enerji denkliği ve ısı iletim katsayısının tespiti	52
4.3.2 Isıl sistemin durum uzay modeline uyarlanması ve transfer fonksiyonlarının elde edilmesi.....	55
4.3.3 Isıl sistemin geri beslemeli kontrolü	59
4.3.4 PID kontrol edicinin parametre değerlerinin tesbiti	63
4.3.5 Sisteme basamak etkisi verilip pid kontrolör yardımıyla sistemin regülatör (düzenleyici) kontrolü.....	63
4.3.6 Sistemin servo (izleyici) kontrolü	66
4.3.7 Sinüsoidal darbe girişine karşı kapalı çevrim sistemin cevabı.....	69
5. SONUÇ.....	73
KAYNAKLAR.....	75
EKLER.....	77

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 karıştırılmalı tank reaktörler (Continuous stirred tank reactor)
PFR	: Piston akışlı reaktör (Plug flow reactor)
PB	: Oransal bant (Proportional band)
P	: Oransal denetleyici
I	: İntegral denetleyici
D	: Türevsel denetleyici
KE	: Kontrol edici

SEMBOL LİSTESİ

K_p	: Proses kazanç sabiti
τ_p	: Proses zaman sabiti
θ	: Proses zaman gecikmesi (ölü zaman)
G	: Proses transfer fonksiyonu
e	: Hata değeri
y	: 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
Q	: Sisteme verilen ısı miktarı
Q_{Tnk}	: Tankın içine giren ısı miktarı
Q_{Ckt}	: Ceket soğutma suyunun aldığı ısı miktarı
U	: Toplam ısı transfer katsayısı
A	: Isı transfer alanı
F_{ckt}	: Soğutma suyu debisi
C_P	: Reaktördeki çözeltinin ısı kapasitesi
C_{PCkt}	: Soğutma suyunun ısı kapasitesi
V_{Tnk}	: Tank hacmi
V_{Ckt}	: Ceket hacmi
M_{Tnk}	: Tankın içindeki su kütlesi
M_{Ckt}	: Ceketin içindeki su kütlesi
$T_{Tnk,0}$: Başlangıçtaki reaktör iç sıcaklığı
T_{Tnk}	: Reaktör iç sıcaklığı
$T_{Ckt,0}$: Başlangıçtaki soğutma suyu giriş sıcaklığı
T_{Ckt}	: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı
ΔT_{log}	: Reaktör ile ceket soğutma suyu sıcaklık farkının logaritmik ortalaması

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: P, I ve D kontrol modlarının 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.	26
Çizelge 2.7: Hata integrali yöntemi ile KE ayarlamasında PID parametreleri hesabı için yararlanılacak A ve B sabitleri.	28
Çizelge 4.1: Her bir deneye ait basamak testi koşulları ve elde edilen sonuçlar.....	49
Çizelge 4.2: Çeşitli koşullarda yapılan deneylerden hesaplanan U değerlerinin deney koşulları ile birlikte gösterimi	54
Çizelge 4.3: PID kontrol edici parametreleri ve değerleri.....	63

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).....	27
Şekil 4.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan reaktör ve boyutları.....	45
Şekil 4.2: Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği.....	47
Şekil 4.3: 0.50 kg/dk tank debisi, 1.20 kg/dk soğutma suyu debisi ve 1750W basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.....	49
Şekil 4.4: 1250 W ısıtıcı gücüyle ısı kayıplarının tespiti için yapılan deneye ait elde edilen sıcaklık – zaman grafiği.....	50
Şekil 4.5: Isıl sistemin şematik görünümü.....	52
Şekil 4.6: Sistemin, durum uzay modeline uyarlanmış şematik şekli.....	55
Şekil 4.7: Isıl sistem için önerilen geri beslemeli kontrol çevrimi şeması.....	60
Şekil 4.8: Geri beslemeli kontrol çevriminin simulink ortamında çizilmiş blok diyagramı.....	62
Şekil 4.9: Kapalı çevrim sistemde basamak girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.....	65
Şekil 4.10: Bozucu etkenlerin %10'u değerinde sisteme uygulanan basamak testine ısıl sistemin cevabı.....	64
Şekil 4.11: Basamak etkisine karşı Fckt soğutma suyundaki değişim.....	64
Şekil 4.12: Kapalı çevrim sistemde servo kontrol için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.....	67
Şekil 4.13: Ttnk referans sıcaklığının 5 derece yükseltilmesi sonrası sistemin cevabı ve servo kontrolü.....	66
Şekil 4.14: Ttnk referans sıcaklığının 5 derece yükseltilmesi sonrası Fckt soğutma suyundaki değişim.....	68
Şekil 4.15: Ttnk referans sıcaklığının 5 derece düşürülmesi sonrası sistemin cevabı ve servo kontrolü.....	68
Şekil 4.16: Ttnk referans sıcaklığının 5 derece düşürülmesi sonrası Fckt soğutma suyundaki değişim.....	69

Şekil 4.17: Kapalı çevrim sistemde sinüsoidal darbe girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.....	71
Şekil 4.18: Sistemin 0.1 rad/dk frekansındaki sinüsoidal darbe girişine cevabı.....	70
Şekil 4.19: Sisteme uygulanan 0.1 rad/dk frekansındaki sinüsoidal darbe girişi durumunda Fckt değerinin zamana göre değişimi.	70
Şekil A. 1: 0.50 kg/dk tank debisi, 1.20 kg/dk soğutma suyu debisi ve 1000W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.	78
Şekil A. 2: 0.50 kg/dk tank debisi, 1.20 kg/dk soğutma suyu debisi ve 750W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.	78
Şekil A. 3: 0.75 kg/dk tank debisi, 1.80 kg/dk soğutma suyu debisi ve 1750W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.	79
Şekil A. 4: 0.75 kg/dk tank debisi, 1.80 kg/dk soğutma suyu debisi ve 1000W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.	79
Şekil A. 5: 0.75 kg/dk tank debisi, 1.80 kg/dk soğutma suyu debisi ve 750W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.	80
Şekil B. 1: Q ısıtıcı ve Ftnk bozan etkenleriyle 0.05 rad/dk sinüsoidal darbe uygulandığında sistemin vermiş olduğu sıcaklık değişim cevabı.....	81
Şekil B. 2: Q ısıtıcı ve Ftnk bozan etkenleriyle 0.05 rad/dk sinüsoidal darbe uygulandığında sistemin vermiş olduğu Fckt soğutma suyu değişim cevabı.	81

DURUM UZAY METODU İLE EKZOTERMİK (ISI YAYAN) KİMYASAL REAKTÖRÜ SİMÜLE EDEN ISIL SİSTEMİN PARAMETRELERİNİN TESPİTİ VE GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ

ÖZET

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 veren PID kontrol edicidir fakat parametrelerinin hesaplanması diğerlerine göre daha zordur.

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 dinamik 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. Elde edilen değerler ve matematiksel denklemler kullanılarak sistemin durum uzay 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 ve sinüsoidal darbe

girişleri verilerek sistemin tepkisi incelenmiş ve sistem için uygun kontrol edici parametreleri tespit edilmiştir.

Isıl sistemin geri beslemeli kontrol çevrimi simulink ortamında oluşturulmuş ve bu çevrime uygulanan bozan etkenler(Q ısıtıcı ve F_{tnk}) regülasyon kontrol ile belli bir süre sonra sistemin tekrar dengeye gelmesi sağlanmıştır. Son olarak ısıl sisteme belli bir sıcaklık referans değeri verilmiş olup, sistemin bu referans değerine ulaşması servo kontrol ile sağlanmıştır.

DETERMINATION OF THE THERMAL SYSTEM PARAMETERS WHICH SIMULATES AN EXOTHERMIC CHEMICAL REACTOR WITH STATE SPACE METHOD AND FEEDBACK CONTROL

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 disperses 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.

Today real systems are considered in industrial applications, there are multiple-input and output system in general. For multiple- input and output systems, state space method can be used commonly. A state-space representation is a mathematical model of a physical system as a set of input, output and state variables related by first-order differential equations. The state-space representation (also known as the "time-domain approach") provides a convenient and compact way to model and analyze systems with multiple inputs and outputs.

Compared with traditional control theory and state-space control method ; traditional control theory in general providing system design by trial and error method while in modern control theory held by state space method, it can be easily obtained transfer functions and easily created of the closed loop system. In Modern control theory system designed with space method, system's dynamics is important for mathematical definitions.

There are many situations in chemical process. Expressing the conditions in a meaningful way is important for stability of the processes. Many chemical processes are multivariate, nonlinear and continuous. Chemical processes defined by mathematical equations with the first order differential equation and differential equations can be combined in the vector matrix. The vector used is a highly simplified version of the matrix representation of the mathematical definition of equation system. Increasing the number of input or output variable does not make the mathematical equation complicated. Control of the system set out in the light of the mathematical definition, static and dynamic characteristics of the system are identified and provided with the system requirements for creating good models of the systems.

Mathematical model of the variables defined by state space method; are expressed state variables, input variables and parameters.

State variables of a physical system are created during dynamic material and energy balances of composing. These are measuring variables that can be located in dynamic model of the system as an accumulation term (derivative term). The state variables of the system should be selected observable like the system's temperature (T) and the concentration (C). In the system, the state variables can be observed with respect to time.

Input variables are also called disturbances. These variables are not included derivative form in differential equation. Flow rate (F) entering a system or out of the system may be input variables of the system. The system parameters are more or less independent from the physical system variables.

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 state space model of the system was created with the obtained values and the used 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 and sinusoidal pulse inputs are examined on the system and the most suitable controller parameters were found for the system.

Feedback control loop of the thermal system was created in Simulink environment and distorting factors applied to this cycle (Q heating and F_{tank}) after a certain time the stability has been brought back with regulation control system. Finally, a certain temperature value is assigned the thermal system, to reach this reference value is provided by the servo control system.

1. GİRİŞ

Reaktörler çalışma prensiplerine göre kesikli reaktör, sürekli karıştırmalı tank reaktör (CSTR) ve piston akışlı reaktör (PFR) olmak üzere 3 ana gruba ayrılır. Reaktörler dış ortamlarla olan ısı alış-verişlerine göre de ısı alan (endotermik) ve ısı yayan (ekzotermik) reaktörler olmak üzere gruplandırılırlar. Ekzotermik (ısı yayan) reaktörler kendi kendine dengeye gelememeleri nedeniyle dışarıdan dengeleyiciye ihtiyaç vardır.

Ekzotermik karakterdeki reaksiyonlarda, 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 üretilebilmesi 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, bilgisayar ortamında simüle edilebilir. Bilgisayar ortamında simüle edilen sisteme, daha karmaşık testler uygulanabilir ve bu da kontrol tasarımcısına büyük avantaj sağlar. Yapılan bütün testlerin sonuçları bir araya getirilip yorumlanmasıyla, sistemin en doğru modeli oluşturulabilir. Böylece 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 fonksiyonunun, deneysel veya teorik biçimde elde edilip, açık çevrim basamak cevabının incelenmesi ve analiz edilmesi esasına dayanan yöntemdir [3].

Bu çalışmada, dış ceketli soğutucuya sahip içinde elektrikli ısıtıcı bulunan karıştırıcılı tank reaktörü, elektrikli ısıtıcının gücü (sisteme verdiği ısı debisi) değiştirilerek, ekzotermik reaksiyon şartları sağlanmıştır.

Deneysel çalışmada, sistem üzerinde çeşitli testler uygulanmış ve durum uzay modeli yardımıyla sistemin transfer fonksiyonu bulunmuştur. Farklı soğutma suyu ve ürün 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.

Sistem için elde edilen transfer fonksiyonu bilgisayar ortamında Matlab programı kullanılarak kapalı çevrimi oluşturulmuş, sistem basamak ve sinüsoidal darbe girişine maruz bırakılmıştır. Bu çevrimlerin dinamik davranışları incelenmiş ve çıkan sonuçlar analiz edilerek çeşitli yaklaşımlar yardımıyla seçilen kontrol edicinin parametreleri hesaplanmıştır.

Belirlenen kontrol edici parametreleri kullanıldığında, sistemin bozan etken girişlerine verdiği cevapların zamana karşı grafiği çizilmiş ve sonuçlar karşılaştırılıp tartışılmıştır. PID kontrol ediciyle ısı sistemini regülatör ve servo kontrolü de yapılmıştır.

Bu çalışma ile ısı bir prosesin durum uzay yöntemiyle modellenip tanınması ve kontrol edilmesi için gerekli olan teorik ve pratik bilgilere ulaşılması amaçlanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

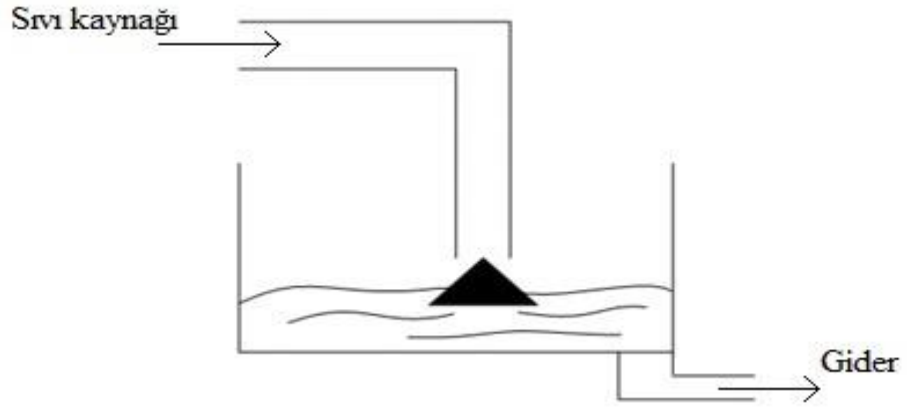
Bu çalışmanın amacı, ekzotermik reaktörleri benzeştiren bir ısı sistemini basamak ve darbe değişimlerine cevapları alınarak dinamik modelin transfer fonksiyonlarının durum uzay yardımıyla elde edilmesi, sistem için uygun PID kontrol parametreleri

saptanması ve uygun kontrol şartlarının bulunmasıdır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler ile teorik bilgiler, beraber kullanılarak, üretilen bilgilerden etkin bir şekilde yararlanılması ve dijital ortamda simülasyon çalışmaları yapılarak, yeni bilgilerin üretilmesi amaçlanmıştır.

2. OTOMATİK KONTROL

2.1 Otomatik Kontrolün Tarihi

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. Burada kontrol sisteminin amacı, kaptan ne kadar sıvı alınırsa alınsın kaptaki sıvı seviyesini sabit 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.

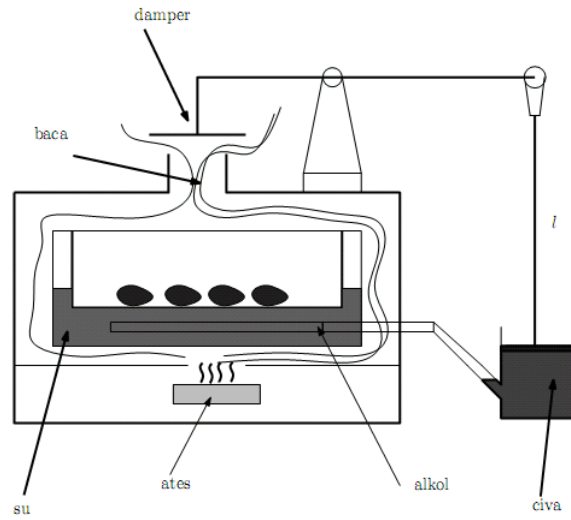


Şekil 2.1: Sıvı düzeyi kontrol sistemi.

Önemli kontrol gelişmelerinden biri, Cornelis Drebbel tarafından 1620 yılında üretilen kuluçka makinesidir (**Error! Reference source not found.**). 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 ısısı arttığında alkol ve cıva içeren cam borudaki sıvı karışımı genişler ve 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 artırılmaktadır. Sistemin referans sıcaklığını ayarlayan ise pistonun uzunluğudur.



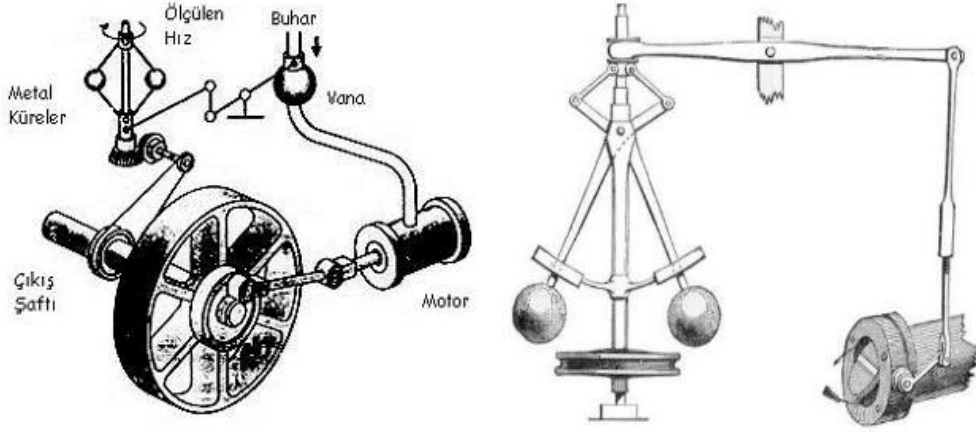
Şekil 2.2:Kuluçka makinesi.

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].

Elektronik devrelerin keşfedilmesinden önce mekanik mühendisliğe bağlı olan kontrol teknolojisi, yüksek hızda ve doğrulukta işlem yapabilen bilgisayarların kullanımıyla birlikte hızlı bir gelişme göstermiştir. 2. Dünya savaşında otomatik kontrol teorisi ve uygulamaları oldukça önem kazanmıştır. Uçak otomatik pilotlarının, silah hedefleme sistemlerinin, radar anten kontrol sistemlerinin ve birçok diğer geri beslemeli yapıdaki savunma sistemlerinin tasarlanması ve üretilmesi bu alandaki hızlı ilerlemelere neden olmuştur. 1940'lardan itibaren, kontrol uygulamalarının sayısı artmış, bu uygulamalara ilişkin matematik ve analitik yöntemler gelişmiş ve kontrol mühendisliği kendi kurallarına kavuşmaya başlamıştır.

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, frekans analizi teknikleri, kontrol mühendisliğinin ana uğraşı haline gelmiştir. Bu dönemin önde gelen yaklaşımı, kompleks fonksiyonlar yöntemi ve özellikle kök-yer-eğrisidir (root-locus). 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 sistemlerini kararlı kılmak ve istenen performans ölçütlerini yerine getirmektir. Burada kararlılık en önemli unsurdur. Kararsız bir sistem istenilen şekilde çalışmaz ve böyle bir sistem istenilen performans ölçütlerini yerine getiremez. Kararlı sistemlerden istenen performans ölçütleri üç ana grupta toplanabilir:

- 1) Belli bir referans yörüngesinin izlenmesi (tracking problem). Referans bir yörüngesinin 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].

- 2) Sabit bir referans değerin izlenmesi (regulator problem). Bir derin soğutucunun referans sıcaklığının -20°C olarak sabit kalması istenirken, bir güdümlü füze sisteminin yörüngesinin, zamanla değişiyor olması, belli bir rotayı izlemesi istenir [8].
- 3) Sisteme etkiyen bozan etkenlerin etkilerinin yok edilmesi (disturbance rejection problem). Bozan etkenlerin etkilerinin yok edilmesi konusu da çok önemlidir. Bir güdümlü füze sisteminin yörüngesine etki eden bozucuların, izlenen rotayı etkilememesi istenir. Bu rotayı takip ederken bozan etkenlerin referans üzerindeki etkisi de hesaba katılarak beklenen rotada ilerlemesi sağlanmalıdır. Böyle sistemlerde bozucu bastıran kontrol edicilerden yararlanır.

Dünya üzerinde kontrol sistemlerinin kullanılmadığı yerler hemen hemen yok gibidir. Bazı otomatik kontrol sistemlerinin çamaşır makinesi, fırın, kettle, otomatik hız kontrol sistemleri, otomatik iniş sistemleri gibi varlığı son kullanıcı için bilinmesine rağmen, el kamerasında görüntünün titreşmesini engelleyen steady-shot mekanizması, yeni nesil bir cep telefonunda görüntü-ses uyumunu sağlayan faz kilitlemeli devreler gibi otomatik kontrol sistemleri gizli olarak bazı sistemlerin içinde yer alır.

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 gereksinim 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 vasitanın 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 birini verebilir. Bu örnekte sürücünün duyu organlarından ve beyninden kaynaklanan bir geri besleme olayı söz konusudur.

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

P, PI, PID tipi kontrol edicilerin tanımlamaları yapılacak ve çalışmada PID tip kontrol ediciler kullanılacaktır.

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

$y(t)$: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.

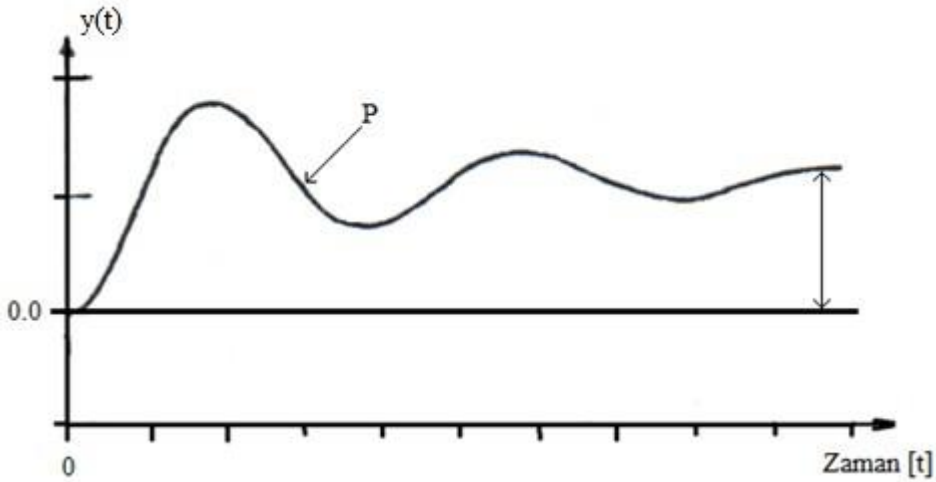
$$PB = \frac{100}{K_c} \quad (2.3)$$

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 [10, 13].

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 [10, 13].

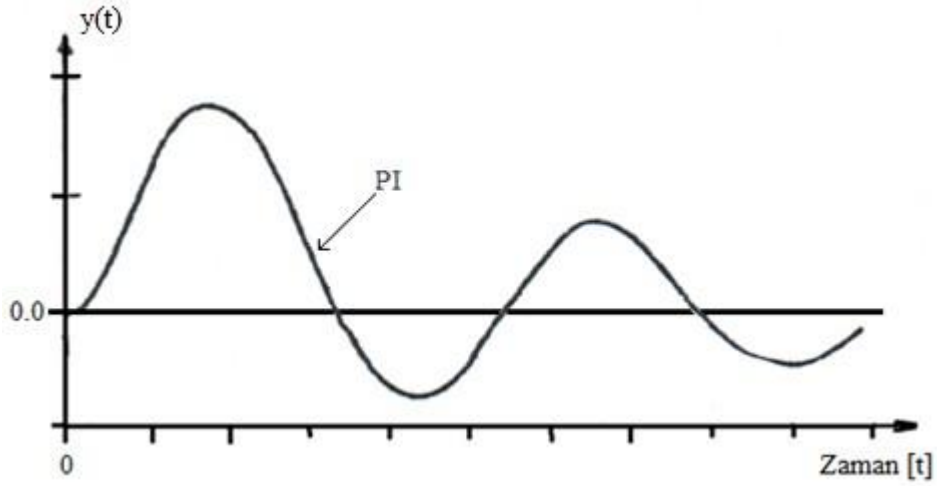
$$y(t) = \bar{y} + K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_1} \int e(t). dt \right] \quad (2.4)$$

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 [15].

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

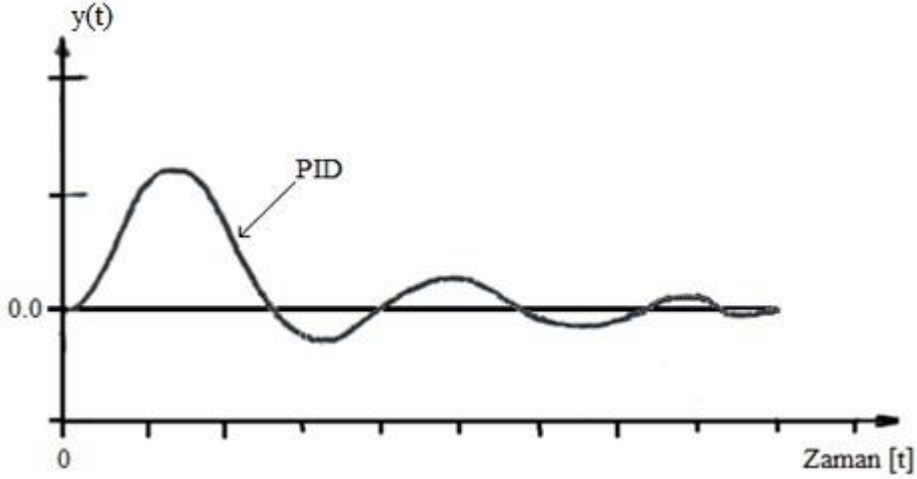


Şekil 2.5: Bir prosesin PI tipi kontrol edici ile kapatılmış geri beslemeli kontrol çevriminin, girişteki birim basamak yük değişimine cevabı.

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, 16].

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 [17].

Çok geniş bir uygulama alanı olmasına rağmen PID denetleyici için standart bir tanımlama yoktur. Ancak en yaygın PID algoritması aşağıdaki gibidir [18]:

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

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 [19].

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

PID denetleyicinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

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

Bazı kaynaklarda (2.7) denklemi aşağıdaki formda da görülebilmektedir:

$$G_C(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = K_C + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (2.8)$$

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.

$$\tau_1 = \frac{K_C}{K_I} \quad (2.9)$$

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

τ_1 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) denkleminde göre hesaplanan hata sinyali PID KE'ye gönderilir ve KE, bu hata değerinin türevini ve integralini, içindeki özel yapılandırılmış elektronik devreler vasıtasıyla hesaplar. KE; çıkış (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 [20].

PID algoritmasının bileşenleri ve kontrol ediciye etkileri şunlardır:

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

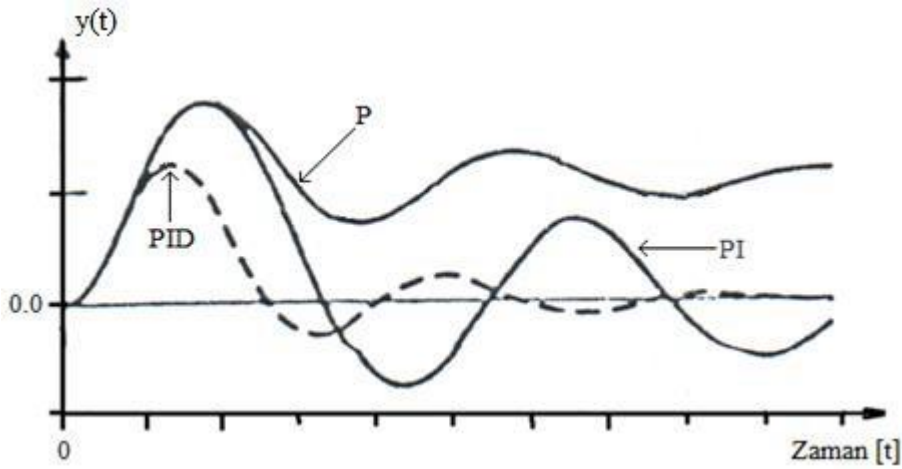
Oransal İşlem: Hata ile orantılı kontrol sinyali üretilmesi.

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 davranış biçiminin kararsızlığa kayma meylini dengeler ve sisteme stabilizasyon kazandırır.

Şekil 2.7'de bir prosesin farklı 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 [16].

Bu çizelgede belirtilenler genel bir yaklaşım olup, her durum için geçerli değildir. Çünkü K_P , K_I ve K_D parametreleri 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 referanstır.

K_P , K_I ve K_D parametrelerinin uygun değerlere ayarlanması ile iyi bir kontrol sağlanabilir. Eğer bu parametreler uygun bir şekilde ayarlanamaz ise, PID KE'nin sağladığı üstünlüklerden yararlanılamaz [21].

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

PID Kontrol edici tasarımında izlenecek temel aşamalar:

- 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 [3].

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 [22]:

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:

- I. Açık çevrim elemanları için oluşturulan Bode diyagramları kullanılarak kapalı çevrimin kararlılığı incelenebilir.
- II. Bir kontrol edicinin ayarlanabilir parametrelerinin en uygun değerlerinin seçiminde yardımcı olur.

Geri beslemeli kontrol çevrimlerinin tasarımında *Bode kararlılık koşulu* olarak bilinen konu incelenmelidir.

2.4.1.1 Bode kararlılık koşulu

Bode kararlılık koşulu, geri beslemeli çevrimlerin kararlılığı ile ilgilidir ve Bode diyagramları ile beraber kullanıldığında kapalı kontrol çevrimleri için uygun tasarım değerleri verir.

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

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

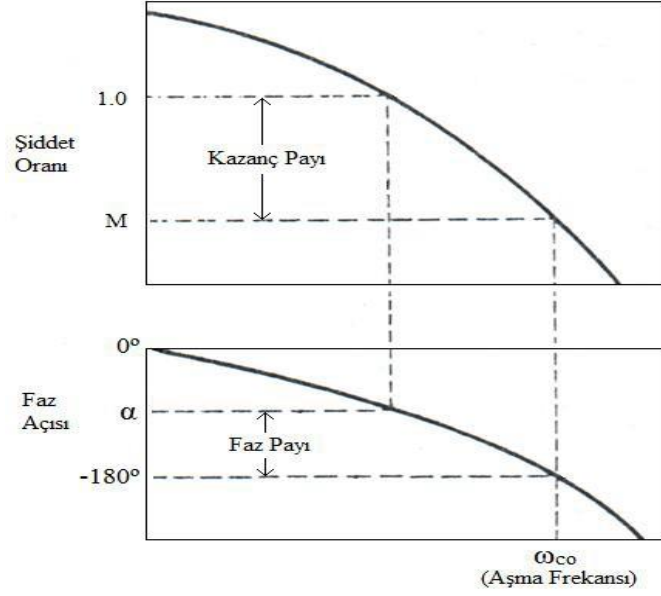
Bu koşulun uygulanması için açık çevrim frekans cevabının çizilmesi (Bode diyagramı) gereklidir. Bu da kuramsal olarak transfer fonksiyonlarının bilinmesi durumunda kolaylıkla çizilebilir. Eğer sistem dinamiği, yani transfer fonksiyonları, kuramsal yoldan elde edilemiyor ise, frekans cevabı değerleri deneysel olarak tespit edilmelidir. Böylece Bode diyagramı deneysel değerlerle 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.



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

Eğer $M > 1$ ise, Bode kararlılık koşuluna göre sistem kararlı değildir. Kararsızlığın başlıca nedeni, sistemde çalışan kontrol edicinin parametre değerlerinin iyi seçilememiş olduğudur. Böyle bir durumda problem, kontrol edici parametrelerinin doğru belirlenememesidir.

$M < 1$ ise sistemin kararlı olduğunu varsayalım. Buradaki problem ise, sistemin ne kadar kararlı olduğunu belirleyebilmektir. Açıktır ki M değeri, 1'den çok az küçük ise, sistem yetersiz kararlıdır. Bu durumda sistemin, kuramsal olarak kararlı olsa bile, ileri derecede titreşimli bir davranış göstermesidir (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.

Şiddet oranı M nin 1 ile oluşturduğu, kazanç payı (gain margin) adı verilen büyüklük:

$$Kazanç Payı = \frac{1}{M} \quad ise \quad M = \frac{1}{Kazanç Payı} \quad (2.11)$$

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, böylece 1'den daha fazla uzaklaşılacağı için yapılan tasarımın kararlılık açısından daha güvenli olacaktır.

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

Özet olarak kazanç payı hakkında şunlar söylenebilir:

- I. Ölü zaman, proses kazancı (zaman sabiti), 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.
- II. 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 açısal frekanstaki faz gecikme açısı arasındaki farktır. Bundan dolayı faz payı, sistemi kararlı bölgeye çekmek için eklenmesi gereken faz gecikme açısı değerini göstermektedir. Faz payı en az 30° tutulmalıdır.

$$Faz\ Payı = 180^\circ - \alpha \quad ve \quad \alpha \geq 30^\circ \quad (2.12)$$

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, Ziegler – Nichols kurallarıdır [10, 20].

2.4.2 Ziegler Nichols ayar yöntemi

Ziegler ve Nichols adlı bilim adamları tarafından önerilen bu yöntem, bir kapalı çevrim yöntemidir. Çok kullanılan Ziegler ve Nichols yönteminin uygulama

şekillerinden, kontrol edilen sistem salınımlı cevap veriyorsa, 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 artırılır. 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 [18].

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 Ziegler ve Nichols 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 değişimindeki 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]. Kapalı çevrim sisteme deneysel olarak titreşimler yaptırmak, sisteme zarar verebilir. Bu nedenle Ziegler ve Nichols yöntemi, günümüzde deneysel olarak değil, dijital simülasyon yapılarak uygulanmaktadır. Simülasyonlar, hazır programlar ile yapılabileceği gibi, doğrudan kapalı çevrim transfer fonksiyonundan yararlanarak da yapılabilir.

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

	K_C	τ_I	τ_D
$\frac{1}{4}$ 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)	$0.33 \cdot K_U$	$\frac{P_U}{2}$	$\frac{P_U}{3}$

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 $s=i \cdot \omega$ değeri yerine konur ve denklemin kökleri hesaplanır.

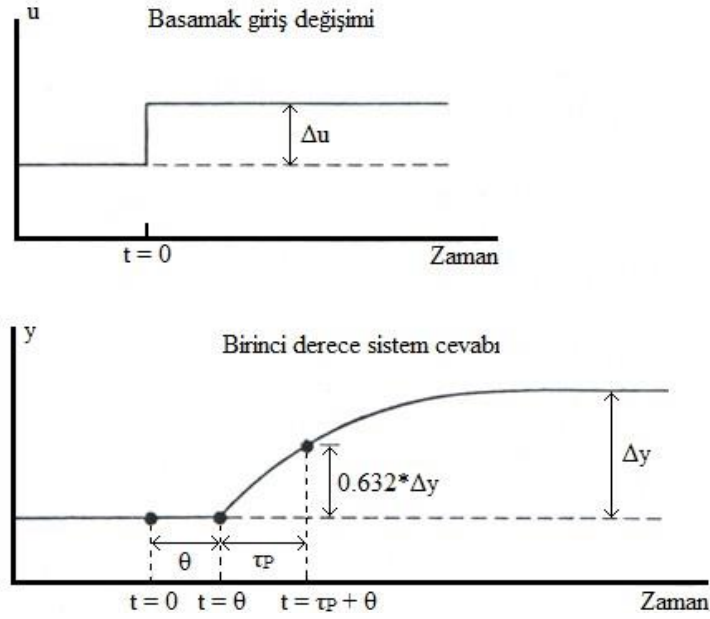
Eğer karakteristik denklemin bütün kökleri kompleks düzlemin negatif tarafında bulunuyorsa sistem kararlı, köklerden herhangi biri pozitif tarafta ise kararsızdır. Bundan dolayı kompleks düzlemin sanal eksenini kararlılık sınırını göstermektedir. Bu eksen üzerinde yer alan köklerin gerçek kısmı sıfır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

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

Titreşimlerin periyotları, Ziegler ve Nichols ayarlama yöntemindeki periyotlarla aynıdır. Anlatılan yöntem, sistemlerin frekans cevaplarının eldesi için uygulanan yöntemle yakından ilişkilidir. Çünkü her iki yöntemde de karakteristik denklemde $s=i.\omega$ 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: Reaksiyon eğrisi yöntemi grafiği.

Şekil 2.9 grafiğinin üzerindeki değerler bulunur.

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

Bu cevaplar, denklem (2.14)'deki gibi birinci dereceden zaman gecikmeli bir fonksiyonun, birim basamak fonksiyonuna verdiği cevaba denktir.

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 [23].

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 [24].

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 $\frac{1}{4}$ aşma oranı yanında minimum offset değeri elde edilir. Cohen – Coon 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 $\theta \approx 0$ yaklaştıkça K_C değeri büyür ve sistemde salınımlara neden olur [25].

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 [26].

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

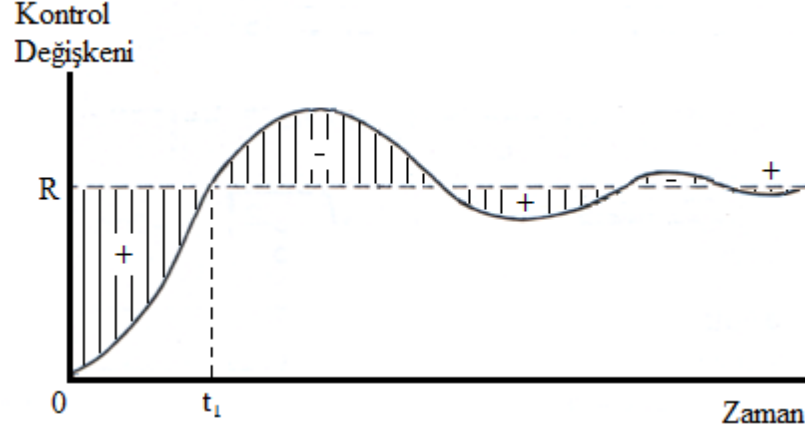
Minimum integral hata yöntemi Louisiana State Üniversitesinde Profesör Paul W. Murrill ve Profesör Cecil L. Smith tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin geliştirilmesinde de, birinci derece ve ölü zamanlı bir proses transfer fonksiyonu esas alınmıştır. Bu yöntemde, kontrol edilmekte olan değişkenin 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 [27].



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 değer 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 alınırlar. Bu denklemden hesaplanan Y değerlerinden hareketle, PID KE'nin parametreleri aşağıdaki eşitliklere göre belirlenir [28].

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

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

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

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].

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

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

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

3. DURUM UZAY YÖNTEMİ İLE KONTROL SİSTEMLERİNİN ANALİZİ

Günümüzde endüstriyel uygulamalarda ele alınan gerçek sistemler genel olarak çok giriş ve çok çıkışlı (MIMO) sistemlerdir. Çok giriş ve çok çıkışlı (MIMO) sistemlerin tasarımında durum uzay yöntemi kullanılabilir.

Geleneksel kontrol teorisi ve durum uzay metoduyla kontrol karşılaştırıldığında; geleneksel kontrol teorisinde, genelde deneme yanılma metodu ile sistem tasarımı sağlanırken, durum uzay metodu ile gerçekleştirilen modern kontrol teorisinde ise transfer fonksiyonları kolayca elde edilebilir ve sistemin kapalı çevrimi kolaylıkla oluşturulabilir. Modern kontrol teorisi durum uzay metodu ile tasarımda, sistem dinamiklerinin matematiksel tanımları önemlidir.

Kimyasal süreçlerde birçok durum mevcuttur. Bu süreçlerin sabit ve uygun bir şekilde çalışması için durumun anlamlı bir şekilde ifade edilmesi önemlidir. Kimyasal süreçlerin birçoğu çok değişkenli, lineer olmayan ve süreklidirler. Kimyasal süreçlerin matematiksel denklemleri birinci dereceden diferansiyel eşitliklerle tanımlanabilir ve bu diferansiyel eşitlikler vektör matrisinde birleştirilebilir. Kullanılan vektör matrisi gösterimi eşitlik sisteminin matematiksel tanımının oldukça basitleştirilmiş şeklidir. Burada durum değişkenlerinin sayısındaki artış giriş ya da çıkış eşitliklerini karmaşık bir hale getirmez. Bu matematiksel tanımların ışığında belirlenen sistemin kontrolü için, sistemin statik ve dinamik karakteristikleri belirlenebilir ve sistemle ilgili modeller oluşturularak sistemin kontrolü için gereken şartlar sağlanabilir [13, 30].

3.1 Durum Uzay Yöntemiyle Tanımlanan Matematiksel Modelin Değişkenleri

Durum uzay yöntemiyle tanımlanan matematiksel modelin değişkenleri; durum değişkenleri, giriş değişkenleri ve parametreler olarak ifade edilir.

3.1.1 Durum değişkenleri (State variables)

Bir fiziksel sistemin durum değişkenleri, bu sistemin dinamik madde ve enerji dengeleri oluşturuluyorken kullanılan tabii değişkenleridir. Bunlar kavramsal olarak

sistemin ölçülebilir miktar değişkenleridir ve sistemin dinamik model diferansiyel denklemi yazılırken “birikim” terimi (türev terimi) içinde yer alırlar. Genel olarak, sistemin sıcaklık (T) ve derişim (C) gibi büyüklükleri, sistemin durum değişkenleridir. Sistemde, zamanın değişimi ile alacağı değerlerin hesaplanması istenen değişkenler, sistemin durum değişkenleri olarak seçilmelidir [13].

3.1.2 Giriş değişkenleri

Durum değişkeni olmayan, bu nedenle sistemin dinamik model diferansiyel denklemi yazılırken türev olmayan terimleri içinde yer alan sistem değişkenleridir. Bunlara “bozan etken değişkenleri (disturbances)” de denir. Değişim biçimlerine, normal olarak sistemi incelemekte olan mühendis tarafından belirli standartlar içinde karar verilir. Örneğin bir sisteme giren veya bu sistemden çıkan F akış debileri, sistemin giriş değişkenleri olabilir [13].

3.1.3 Parametre

Sistemin değişkenlerinden az-çok bağımsız olan sisteme ait fiziksel büyüklüklerdir.

Örneğin; ρ yoğunluk, U tüm ısı iletim katsayısı, suyun ısı kapasitesinin veya su buharı gizli ısısının sıcaklık ile değişimi, bağıntıları tamamıyla bilinirler ve bu nedenle sistem parametreleridir.

$$C_p=f(T)\text{ve } \lambda=f(T) \quad (3.1)$$

Parametrelerin değerleri genel olarak sabit alınır veya bağımsız değişkenlerin değişmesi ile az miktarda değişebilir. Bu değişimin analitik ifadesi tamamen bilinir. Çünkü böyle ilişkileri denemelerle belirlemek mümkündür. Bu parametreler sistemin serbestlik derecesini arttırmaz [13].

3.2 Bir Sistemin Dinamik Modeli ve Durum Uzay Metoduna Uyarlanması

Bir sistemin dinamik modeli, bu sistemi belirleyen bir veya birkaç tane birinci mertebeden lineer veya lineer olmayan, kapalı ve başlangıç değer biçimde yazılmış adi diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır.

$$\begin{aligned}
\left(\frac{dx_1}{dt}\right) &= f_1(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, p_1, \dots, p_r) \\
\left(\frac{dx_2}{dt}\right) &= f_2(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, p_1, \dots, p_r) \\
&\vdots \\
&\vdots \\
\left(\frac{dx_n}{dt}\right) &= f_n(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, p_1, \dots, p_r) \tag{3.2}
\end{aligned}$$

Bu denklemlerde x_i 'lere durum değişkenleri, u_i 'lere giriş değişkenleri adı verilir. p_i 'ler ise sistem parametreleridir. Buna göre sistem için yazılan n tane bağımsız denklem, n tane durum değişkeni, m tane giriş değişkeni ve r tane de parametre söz konusu olmaktadır.

(3.2) eşitliğindeki diferansiyel denklemler seti,

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) = f[x(t), u(t), p] \tag{3.3}$$

vektör biçiminde yazılabilir.

Burada

x : n tane durum değişkeni vektörü

u : m tane giriş değişkeni vektörü

p : r tane parametre vektörü

(3.3) denkleminin; x ve u değişkenleri sabit ve türev terimi de bunların lineer bir kombinasyonu olarak kabul edilirse, böyle sistemlere “Zaman-Değişmez (Time-Invariant) Sistemler” adı verilir. Zaman-Değişmez adı, esas olarak matrislerin katsayılarının zamandan bağımsız olmalarından ileri gelir. Bunun matris eşdeğeri şu şekilde yazılabilir.

Sistemde:

$n=3$ adet durum değişkeni

$m=2$ adet giriş değişkeni olduğu varsayılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} dx_1/dt \\ dx_2/dt \\ dx_3/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Bu denklem de matris biçiminde

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.5)$$

olarak yazılır.

A ve B matrislerinin elemanları zamana bağlı olmayan sabit değerlerdir.

$$x(t) = [x_1; x_2; \dots \dots x_n] \quad (3.6)$$

(3.6) denklemi n boyutlu kolon vektör olup bilinmeyenler vektörüdür. Bu vektöre durum vektörü de denilmektedir.

$$A = [a_{11} \dots a_{1n}; a_{21} \dots a_{2n}; \dots \dots a_{n1} \dots a_{nn}] \quad (3.7)$$

(3.7) denklemi ile ifade edilen eşitlik, $(n*n)$ boyutlu kare matris olup bilinenler (katsayılar) matrisidir.

$$B = [b_{11} \dots b_{1m}; b_{21} \dots b_{2m}; \dots \dots b_{p1} \dots b_{pm}] \quad (3.8)$$

(3.8) denklemi $(n*m)$ boyutlu matris olup, bu matris bilinen bozucular matrisidir.

$$u(t) = [u_1; u_2; \dots \dots u_m] \quad (3.9)$$

(3.9) denklemi m boyutlu kolon vektör olup bozan etken giriş vektörü olarak isimlendirilir.

Kontrol mühendisliği açısından, kuşkusuz durum değişkenlerinin değişimi önemlidir fakat bundan daha önemlisi sistemin çıkış değişkenlerinin $y(t)$ değişimine yansımadır. Böylece durum değişkenleri (x) ile çıkış değişkenleri (y) arasında bir ilişki bulunması gerektiği ortaya çıkar. Bu ilişkinin pratik olarak matris biçiminde yazılışı (3.10) denkleminde görülmektedir.

$$y(t) = C^*x(t) + D^*u(t) \quad (3.10)$$

$$y(t) = [y_1; y_2; \dots; y_m] \quad (3.11)$$

(3.11) denklemini m boyutlu çıkış vektörü olan kolon vektörüdür.

$$C = [c_{11} \dots c_{1n}; c_{21} \dots c_{2n}; \dots c_{n1} \dots c_{nm}] \quad (3.12)$$

(3.12) denklemini $(m \times n)$ boyutlu çıkış matrisi olan dikdörtgen matristir.

$$D = [d_{11} \dots d_{1m}; d_{21} \dots d_{2m}; \dots d_{n1} \dots d_{nm}] \quad (3.13)$$

(3.13) denklemini ön besleme veya beslemeden ileri gelen matris olup, $(m \times r)$ boyutlu dikdörtgen matristir. Sistem doğrudan bir ön besleme ihtiva etmiyorsa D matrisi sıfır değerindedir.

Eğer çıkış değişkenleri, doğrudan doğruya durum değişkenlerinin kendisi ise

$$[x(t) = y(t)] \quad (3.14)$$

ve bozan etkenlerin çıkış değerlerine ayrıca bir etkisi yoksa, uygun boyutlarda olmak üzere C matrisi uygun boyutlu bir birim matris ve D matrisi de sıfır matris olarak alınabilirler.

(3.3) denklemlerinin oluşturduğu matris denklemlerine, lineer sistemin “durum-uzay (state-space) denklemi” adı verilir [13].

3.3 Durum Uzay Analizi İfade Biçimleri

Durum uzayı analizinde durum uzayı; kontrol edilebilirlik, gözlenebilirlik, köşegen veya Jordan kanonik biçimi ile ifade edilebilir [30].

3.3.1 Durum uzayı kanonik biçimler ile gösterme

Sistemin;

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0^{(n)} u + b_1^{(n-1)} \dot{u} + \dots + b_{n-1}^{(n)} \ddot{u} + b_n u \quad (3.15)$$

şeklinde tanımlandığını varsayıp, (3.15) denkleminde u girişi y ise çıkışı ifade etmektedir. Eşitliği s domaini için düzenlersek eşitlik;

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_{n-1} s + b_n}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (3.16)$$

haline gelir [30].

3.3.1.1 Kontrol edilebilir kanonik biçim

Sistemin;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (3.17)$$

$$y = [b_n - a_n b_0 : b_{n-1} - a_{n-1} b_0 : \dots : b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilebilen durum uzay gösterimi kontrol edilebilir kanonik biçim olarak

adlandırılır. Kontrol edilebilir kanonik biçim, kontrol sistemi tasarımında kutup ataması yöntemi kullanılacaksa, önemlidir [30].

3.3.1.2 Gözlenebilir kanonik biçim

Sistemin;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_n & -a_n b_0 \\ b_{n-1} & -a_{n-1} b_0 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ b_1 & -a_1 b_0 \end{bmatrix} u \quad (3.19)$$

$$y = [0 \quad 0 \quad \dots \quad \dots \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilebildiği durum uzay gösterimi gözlenebilir kanonik biçim olarak adlandırılır[30].

3.3.1.3 Köşegen kanonik biçim

Eşitlik (3.16) ile tanımlanan sistem denkleminin paydasının yalnızca birinci dereceden

kökleri içermesiyle oluşan kanonik biçimdir.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_{n-1} s + b_n}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} = b_0 + \frac{c_1}{s+p_1} + \frac{c_2}{s+p_2} + \dots + \frac{c_n}{s+p_n} \quad (3.21)$$

şeklinde ifade edilir [30].

Sistemin durum uzay gösteriminin köşegen kanonik biçimi denklem (3.22) ve (3.23)'te görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -p_2 & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdot & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -p_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (3.22)$$

$$y = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u \quad (3.23)$$

3.3.1.4 Jordan kanonik biçim

Eşitlik (3.16) ile tanımlanan sistem denkleminin paydasının çok katlı kökleri içermesiyle oluşan kanonik biçimdir. Köşegen kanonik biçiminin geliştirilmiş şeklidir [30].

Örnek:

p_i değerlerinin ilk üçü hariç ($p_1 = p_2 = p_3$) diğer köklerinin birbirinden farklı olduğunu varsayarsak;

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_{n-1} s + b_n}{(s + p_1)^3 (s + p_4) \dots (s + p_n)} \quad (3.24)$$

(3.16) denklemi (3.24) halini alır. (3.24) denklemi kısmi kesirlere ayrılırsa;

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = b_0 + \frac{c_1}{(s + p_1)^3} + \frac{c_2}{(s + p_1)^2} + \frac{c_3}{(s + p_1)} + \frac{c_4}{(s + p_4)} + \dots + \frac{c_n}{(s + p_n)} \quad (3.25)$$

(3.25) eşitliği elde edilir. Sistemin durum uzay gösteriminin köşegen kanonik biçimi denklem (3.26) ve (3.27)'de görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ x_1 \\ \cdot \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \cdot \\ x_{n-1} \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -p_1 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & -p_1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdot & -p_4 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -p_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (3.26)$$

$$y = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u \quad (3.27)$$

3.4 Kontrol Edilebilirlik ve Gözlenebilirlik Kavramları

3.4.1 Kontrol edilebilirlik

Herhangi bir x_0 ve x_1 durumları ile t_0 başlangıç anı için sistemin; $x(t_0) = x_0$ başlangıç durumundan $x(t_1) = x_1$ nihai durumuna getirebileceği bir $t_1 > t_0$ zamanı mevcut ise, dinamik sistemin durum değişkenleri modeline, tamamen durum kontrol edilebilir model denir. Diğer bir ifade ile eğer bir sistemin t_0 anında kontrol edilebilirliğinden bahsedilebiliyorsa, bu sistemi belli bir başlangıç durumu olan $x(t_0)$ noktasında başka bir noktaya sonlu bir zaman içinde taşıyacak bilinen bir kontrol vektörünün bulunabiliyor olmasıdır [30].

Sistemi tanımlayan uzay denklemleri;

$$\hat{x} = Ax + Bu \quad (3.28)$$

$$y = Cx \quad (3.29)$$

(3.28) ve (3.29) olsun. Bu eşitliklerde;

x = Durum Vektörü

u = Kontrol sinyali

$A = n \times n$ boyutunda matris

$B = n \times l$ boyutunda matris

olup (3.28) denklemin çözümü;

$$x(t) = e^{At} x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (3.30)$$

ile ifade edilir. $x(t_1) = 0$ alınması genelliğe zarar vermez. Bu durumda;

$$x(t_1) = 0 = e^{At_1} x(0) + \int_0^{t_1} e^{A(t_1-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (3.31)$$

(3.31) eşitliği elde edilir. Buradan;

$$x(0) = - \int_0^{t_1} e^{-At} B u(\tau) d\tau \quad (3.32)$$

(3.32) denklemini elde edilir. Bu eşitlikteki e^{-At} ifadesinin yerine

$$e^{-At} = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k(\tau) A^k \quad (3.33)$$

(3.33) denklemini yazılırsa,

$$x(0) = \sum_{k=0}^{n-1} A^k B \int_0^{t_1} \alpha_k(\tau) u(\tau) d\tau \quad (3.34)$$

(3.34) eşitliği elde edilir.

(3.34) eşitliğindeki $\int_0^{t_1} \alpha_k(\tau) u(\tau) d\tau$ ifadesi

$$\beta_k = \int_0^{t_1} \alpha_k(\tau) u(\tau) d\tau \quad (3.35)$$

olarak tanımlanabilir. (3.34) eşitliğinde β_k yerine yazılırsa;

$$x(0) = - \sum_{k=0}^{n-1} A^k B \beta_k \quad (3.36)$$

$$x = - \begin{bmatrix} B; AB; \dots; A^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

(3.36) ve (3.37) eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlik, sistemin kontrol edilebilirliği varsayımı sonucu elde edilmiştir. Bu eşitliğin her $x(0)$ için sağlanması ancak $n \times n$ 'lik $[BAB \dots A^{n-1}B]$ matrisin rankı n 'e eşitse mümkündür. Bu şart sistem için kontrol edilebilirlik kriteridir [30].

3.4.2 Vektörlerin lineer bağımsızlığı

x_1, x_2, \dots, x_n vektörlerinin birbirinden bağımsız olabilmesi için;

$$c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n = 0 \quad (3.38)$$

(3.38) denkleminde sadece c_1, c_2, \dots, c_n sabit katsayıları sıfır olduğu durumda ($c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0$) sağlanıyor olması gerekir. Bir başka ifade ile x_n vektörlerinden herhangi birisi diğer vektörler cinsinden ifade edilemiyorsa;

$$x_i \neq - \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad i \neq j \quad (3.39)$$

ise x_1, x_2, \dots, x_n vektörleri topluluğu lineer bağımsızdır [30].

3.4.3 Gözlenebilirlik

Herhangi bir t_0 başlangıç anı için, $x(t_0)$ başlangıç durumu vektörü $t_0 \leq t \leq t_1$ aralığında bilinen $y(t)$ çıkış vektörü ile $u(t)$ giriş vektöründen belirlenebiliyorsa dinamik sistemin durum değişkenleri modeli tamamen durum gözlenebilir olarak adlandırılır. Diğer bir ifade ile sistemin gözlenmek istendiği t_0 anında sistem durum değişkeni $x(t_0)$ 'ın bir gözlemci tarafından sonlu bir zaman içerisinde belirlenebilir olmasıdır. Gözlenebilirlik ve kontrol edilebilirlik kavramları durum uzay gösterimindeki kontrol sistemleri tasarımında oldukça önemli bir yer teşkil eder.

Kontrol edilebilirlik ve gözlenebilirlik durumları kontrol sistem tasarımı probleminin olabilirliği hakkında oldukça önemli bilgiler sunmaktadır. Bir sistemin hangi koşullar altında kontrol edilebilir ve gözlenebilir olduğunun bilinmesi oldukça önemlidir [30, 33].

Sistemi tanımlayan uzay denklemleri;

$$\hat{x} = Ax + Bu \quad (3.40)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.41)$$

(3.40) ve (3.41) için, (3.42) ve (3.43) genel çözüm formülleri kullanılabilir.

$$x(t) = e^{At}x(0) + \int_0^{t_1} e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau \quad (3.42)$$

$$y(t) = Ce^{At}x(0) + C \int_0^{t_1} e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau + Du \quad (3.43)$$

Burada A , B , C , D matrisleri ve $u(t)$ değerleri bilinmektedir. Bu yüzden (3.43) denkleminde son iki terim de bilinmektedir. Son iki terim $y(t)$ 'den çıkarılabilir. Bu takdirde

$$y(t) = Ce^{At}x(0) \quad (3.44)$$

(3.44) ifadesindeki $x(0)$ bilgisinin $y(t)$ 'den elde edilebilirliğini göstermek yeterli olacaktır.

(3.33) denklemiyle

$$e^{-At} = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k(\tau)A^k \quad (3.45)$$

olduğunu görmüştük. Bu eşitliği $y(t)$ de kullanırsak

$$y(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k(\tau)CA^k x_0 \quad (3.46)$$

$$y(t) = \alpha_0(t)C_x(0) + \alpha_1(t)CAx(0) + \dots + \alpha_{n-1}(t)CA^{n-1}x(0) \quad (3.47)$$

elde edilir. Burada $y(t)$ 'den $x(0)$ 'ın belirlenmesi için

$$\begin{bmatrix} C \\ CA \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

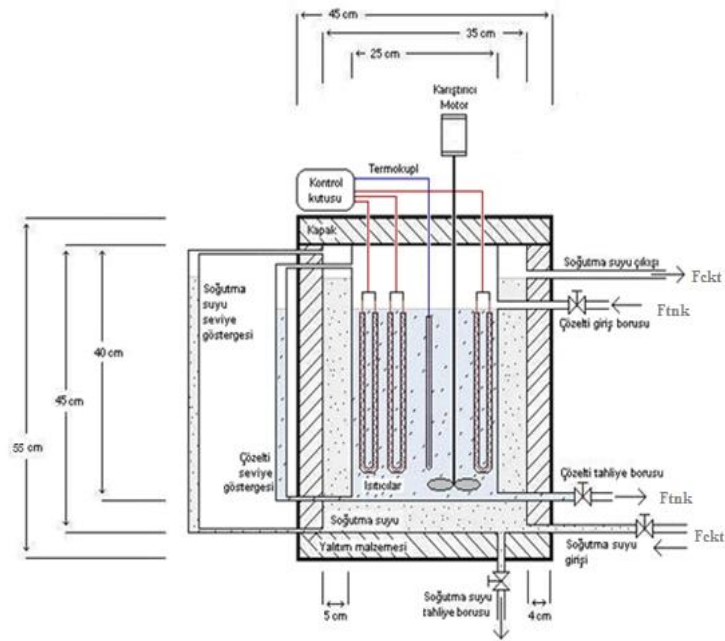
matrisinin rankının n olması gereklidir. Bu şart gözlenebilirlik kıstası olarak adlandırılır[30].

4. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada yapılan deneyler yardımıyla soğutma ceketli bir ekzotermik reaktörün dinamik yapısı incelenmiş, gerekli matematiksel denklemler türetilip bu denklemler durum uzay yöntemi yardımıyla çözümlenmiş ve reaktörün arzu edilen sıcaklıklarda çalışması için sistem parametreleri elde edilerek bir tank sıcaklık kontrol sistemi tasarımı yapılmıştır.

4.1 Deney Düzenegi

Çalışma, içinde ısı yayan (ekzotermik) soğutma ceketli sürekli bir reaktörle yapılmıştır. Bu reaktör paslanmaz çelikten olup iç hacmi 15.7 L, soğutma ceketi hacmi, 17.5 L'dir. Reaktörün iç çapı 25 cm, yüksekliği ise 40 cm'dir. Soğutma ceketi çapı, 35 cm'dir. Reaktör içi ile ceket soğutma suyu arasındaki ısı iletim alanı 0.3 m^2 'dir. Reaktörün çevreyle olan ısı alışverişini engellemek için soğutma ceketini dış cidar arasına 5 cm kalınlığında içi cam yünü ile doldurularak yalıtılmıştır. Şekil 4.1'de reaktör ve boyutları gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan reaktör ve boyutları.

4.1.1 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 mil ile bağlı bulunmaktadır. Karıştırıcı reaktörde etkin bir karıştırma sağlamak amacıyla, reaktörün tabanına mümkün olduğunca yakın olacak şekilde konumlandırılmıştır.

4.1.2 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.

4.1.3 Varyak

Reaktör 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.

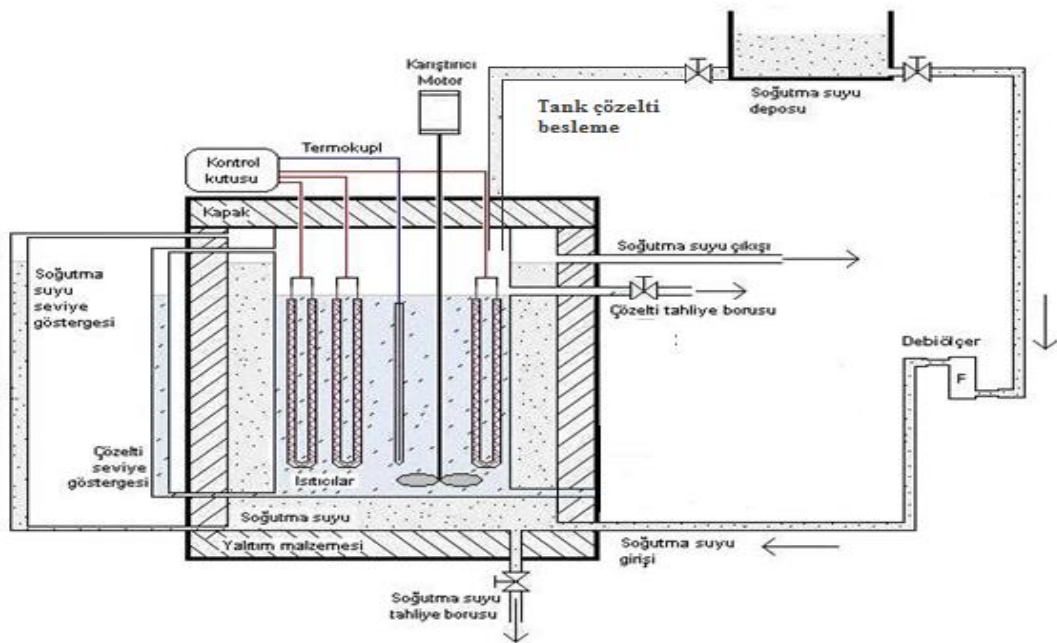
4.1.4 Termoçift ve önyükseltici

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.

4.1.5 Soğutma suyu deposu

Reaktör ceketinden soğutma suyunun sürekli olarak aynı debide geçirilebilmesi için reaktörden daha yüksek bir yere yerleştirilmiş geniş tabanlı bir su deposu kullanılmıştır. Su deposunun geniş tabanlı yapılmasının nedeni soğutma suyu debisinin, suyun seviye yüksekliğine bağlı değişimlerinden en az şekilde etkilenmesi içindir. Tankın içerisine yapılan besleme de yine soğutma suyu deposundan bir vana yardımıyla istenilen debide alınmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan ve ayrıntılı olarak anlatılan deney düzeneği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği.

4.2 Deney Yöntemi

Reaktörün başlangıçta kararlı hale gelmesi sağlanmış, çözelti çıkış debisi, soğutma suyu debisi ve ısıtıcı gücü sabit tutularak belirli zaman aralıklarında reaktör içi ve soğutma suyu çıkış sıcaklıkları ölçülmüş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Kararlı haldeki reaktöre 500-750-1000 Watt çeşitli kombinasyonlarla sisteme basamak etkisi olarak uygulanmış, reaktör kararlı hale gelince basamak etkisi geri alınmış, sistem tekrar dengeye ulaşıncaya deneyler sonlandırılmıştır. Sonuçlar reaktör için ve ceket soğutma suyu için sıcaklık – zaman grafiklerine aktarılmıştır.

4.2.1 Reaktörün kararlı hal tespiti

Reaktör ve ceket bölümü su ile tam doldurulmuş ve reaktörde homojen sıcaklık dağılımını sağlamak için tanka monte edilmiş olan karıştırıcı çalıştırılmıştır. Reaktör sıcaklığı reaktöre eklenmiş olan termočiftler yardımıyla ve soğutma suyu çıkışına eklenmiş olan termometreyle ölçülmüş olup sıcaklıklar sabit bir hal aldığında sistem basamak etkisine hazır hale gelmiştir. Sistemin sıcaklık ölçümleri 3 dakika aralıklarla yapılmış olup alınan değerlerle sıcaklık-zaman grafikleri çizilmiştir. Genel olarak akış debileri ayarlandıktan sonra sisteme başlangıçta 500 watt verilmiş sistem dengeye ulaştığında basamak testine hazır hale gelmiştir.

4.2.2 Basamak etkisine reaktörün verdiği cevabın incelenmesi

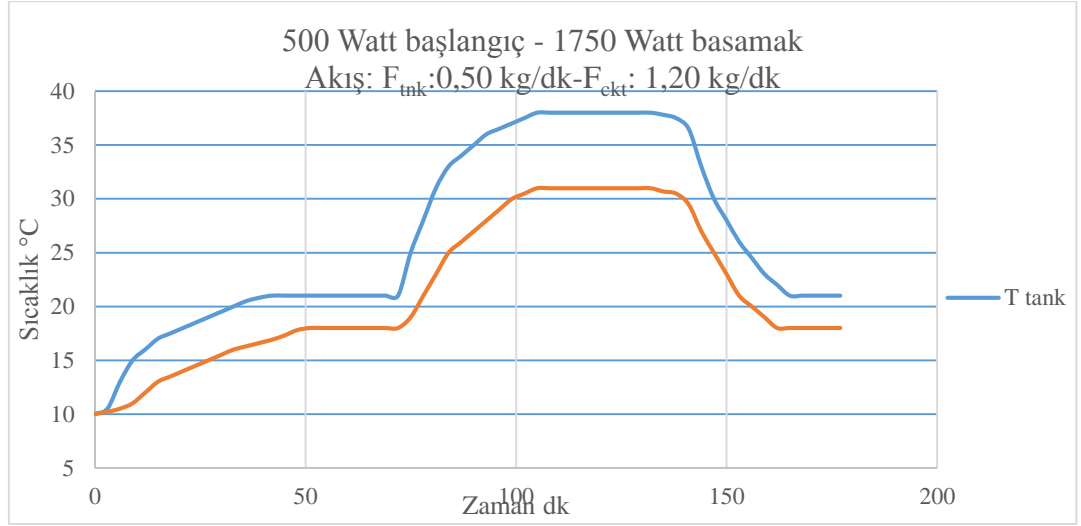
Reaktörün basamak etkisine verdiği cevabın incelenmesi için öncelikle tankın ve soğutma suyunun debileri ayarlanmıştır. Bu ayarlamadan sonra sisteme başlangıçta 500 Watt güç uygulanmış, sistem dengeye ulaştığında basamak etkisine maruz bırakılmıştır. Kararlı haldeki reaktöre basamak olarak 750, 1000 ve 1750 Watt uygulanmış olup deney sonuçları üçer dakika aralıklarla kayıt edilmiştir. Böylece verilen basamak etkisinin reaktöre ve soğutma suyuna etkisi incelenmiştir. Bu deneyler çeşitli tank akışları ve sabit ceket soğutma suyu debisinde çeşitli kombinasyonlarla yapılmıştır.

Yapılan deneylerde tank her seferinde $M=15.7$ kg su ile doldurulmuştur. Deneye başlama esnasında tankın sıcaklığı ve soğutma suyunun sıcaklığı aynı değerde olup T_0 dır. Deneylerin her safhasında homojen bir sıcaklık dağılımını sağlamak amacıyla karıştırıcı açık tutulmuştur. Sisteme verilen basamak etkisiyle tank ve ceket yeniden dengeye gelirler ki dengedeki sıcaklıkları sırasıyla T_{tank} (T_{tnk})ve T_{ceket} (T_{ckt}) dir. Ulaşılan yeni dengede sistemin basamak etkisine verdiği cevap $\Delta T_{\text{tnk}}=T_{\text{tnk}} - T_{\text{tnk},0}$ ve $\Delta T_{\text{ckt}}=T_{\text{ckt}} - T_{\text{ckt},0}$ olarak kayıt edilmiştir. Sistem, uygulanan pozitif basamak etkisiyle kararlı hale geldikten sonra, sonradan devreye alınan ısıtıcı(lar) kapatılmış ve sistemin basamak etkisine maruz bırakılmadan önceki haline geri dönüşü gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde bu geri dönüşün beklenen değerlere geldiği görülmüştür. Sabit su hacminde, soğutma ceketine beslenen F_{ckt} soğutma suyu debisi, tanktan alınan ürün F_{tnk} ve tank içine verilen Q ısıtma debisi değiştirilerek yapılan deneylerden alınan sonuçların sıcaklık-zaman grafikleri çizilmiştir. Bu deneylerden tank debisi 0.50 kg/dk, soğutma suyu debisi 1.20kg/dk olan ve başlangıç gücü 500W,

basamak etkisi 1750 W olan deneyin sıcaklık–zaman grafiği hesaplamalar yapılmak üzere aşağıda verilmiştir.

Tank debisi F_{tnk} , soğutma suyu debisi F_{ckt} ve i tanka verilen basamak şiddeti (Q) değerleri değiştirilerek elde edilen diğer reaksiyon eğrileri de EK A‘de verilmektedir.

Basamak testlerinin sonucu izelge 4.1‘de görülmektedir.



şekil 4.3: 0.50 kg/dk tank debisi, 1.20 kg/dk soğutma suyu debisi ve 1750W basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.

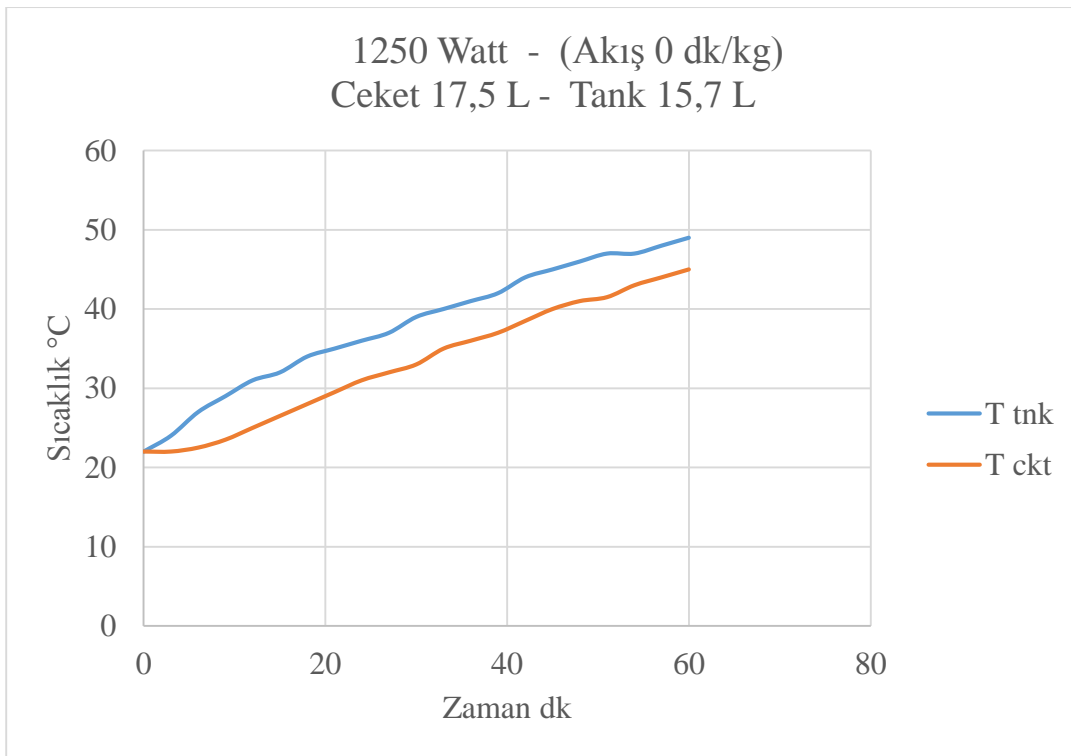
Çizelge 4.1: Her bir deneye ait basamak testi koşulları ve elde edilen sonuçlar.

Deney No	T tnk [C]		T ckt [C]		ΔT_{tnk} [C]	ΔT_{ckt} [C]	Debi Tank [kg/dk]	Debi Ceket [kg/dk]	G	
	ilk	son	ilk	son					[Watt]	[kcal/dk]
1	21	29	18	23,7	8	5,7	0,50	1,2	750	10,77
2	21	31	18	25,5	10	7,5	0,50	1,2	1000	14,35
3	21	38	18	31	17	13	0,50	1,2	1750	25,12
4	19	26	17	22,5	7	5,5	0,75	1,8	750	10,77
5	20	29	17	24	9	7	0,75	1,8	1000	14,35
6	20	36	17	28	16	11	0,75	1,8	1750	25,12

4.2.3 Sistemde ısı kaybının 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.

Bu deneyde 500 W, 750 W ve 1000 W gücündeki rezistanslardan 500 W ve 750 W gücündeki rezistanslar birlikte çalıştırılarak 1250 W ısıtıcı gücüyle deney yapılmıştır. Tank içi ve ceket suyu sıcaklıkları ölçülmüş ve deney için sıcaklık–zaman grafiği Şekil 4.4’de çizilmiştir



Şekil 4.4: 1250 W ısıtıcı gücüyle ısı kayıplarının tespiti için yapılan deneye ait elde edilen sıcaklık – zaman grafiği.

60 dakika sürdürülen bu deney sonunda tank sıcaklığı 22°C’den 49°C’ye, ceket suyu sıcaklığı ise 22°C’den 45°C’ye yükselmiştir. Klasik ısıtma formülüne göre;

$$Q = M \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

Tankın aldığı ısı miktarı:

$$Q_{tnk} = M_{tnk} \cdot C_{psu} \cdot (T_{tnk} - T_{tnk,0}) \quad (4.2)$$

Ceketin aldığı ısı miktarı:

$$Q_{ckt} = M_{ckt} \cdot C_{psu} \cdot (T_{ckt} - T_{ckt,0}) \quad (4.3)$$

Sistemin aldığı toplam ısı miktarı:

$$Q_{alınan} = Q_{tnk} + Q_{ckt} \quad (4.4)$$

Sisteme ısıtıcı tarafından verilen ısı miktarı:

$$Q_{verilen} = \text{Isıtıcıgücü} \cdot \text{Zaman} \quad (4.5)$$

Sistemden kaybedilen ısı miktarı:

$$Q_{kaybedilen} = Q_{verilen} - Q_{alınan} \quad (4.6)$$

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

$$\text{Dakikada kaybedilen ısı miktarı} = \frac{Q_{Kaybedilen}}{\text{Zaman}} \quad (4.7)$$

şeklinde hesaplanır.

Isıl sistemin ısı kaybı:

$$Q_{mk} = 15.7 \cdot 1 \cdot (49 - 22) \quad Q_{mk} = 432.9 \text{ kcal} \quad (4.8)$$

$$Q_{ckt} = 17.5 \cdot 1 \cdot (45 - 22) \quad Q_{ckt} = 402.5 \text{ kcal} \quad (4.9)$$

$$Q_{Verilen} = 17.94 \cdot 60 \quad Q_{Verilen} = 1076.4 \text{ kcal} \quad (4.10)$$

$$Q_{Kaybedilen} = 1076.4 - (432.9 + 402.5) \quad Q_{Kaybedilen} = 241 \text{ kcal} \quad (4.11)$$

Bulunan $Q_{Kaybedilen}$ değeri deney süresine bölüldüğünde dakikada kaybedilen ısı miktarı elde edilmiş olur.

$$Q_{Kaybedilen} = \frac{241 \text{ kcal}}{60 \text{ dk}} = 4.02 \frac{\text{kcal}}{\text{dk}} \quad (4.12)$$

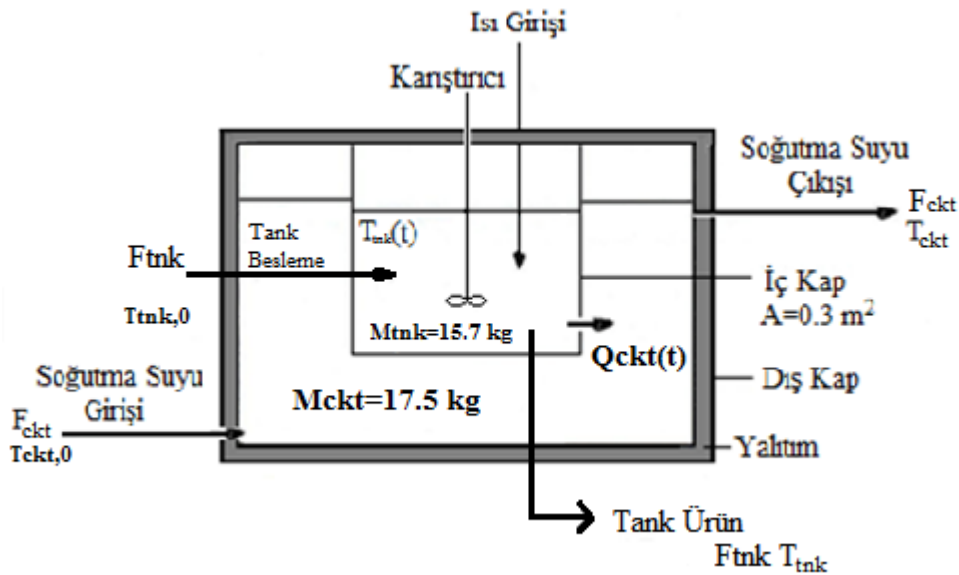
olarak hesaplanmıştır.

4.3 Dinamik İnceleme

Isıl sistem şematik olarak Şekil 4.5’de gösterilmektedir. İç tanka verilen ısının bir kısmı, soğutma ceketine aktarılmakta olduğu için bu ısıl sistemde, iç tank ve etrafındaki soğutma ceketinin ısıl davranışları birbirinden etkilenir. Dinamik sistemin değişkenleri $Q_{ckt}(t)$, $T_{tnk}(t)$ ve $T_{ckt}(t)$ değerleridir.

4.3.1 Reaktör için enerji denkliği ve ısı iletim katsayısının tespiti

Deneyde kullanılan reaktörün tank kısmı ve soğutma suyu arasındaki cidarın ısı iletim katsayısı deneysel verilerden enerji denkliği yardımıyla tespit edilmiştir. Isıl sistemin şematik Şekli 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5: Isıl sistemin şematik görünümü.

Bu sistemde ceket için dinamik ısıl denkliği yazacak olursak:

$$\frac{dT_{ckt}}{dt} V_{ckt} \rho_{su} C_{P_{su}} = F_{ckt} \rho_{su} C_{P_{su}} T_{ckt,0} + UA(T_{tnk} - T_{ckt}) - F_{ckt} \rho_{su} C_{P_{su}} T_{ckt} \quad (4.13)$$

$(T_{tnk} - T_{ckt})$ yerine daha anlamlı sonuçlar elde etmek için ΔT_{log} alınırsa,

$$\frac{dT_{ckt}}{dt} V_{ckt} \rho_{su} C_{P_{su}} = F_{ckt} \rho_{su} C_{P_{su}} T_{ckt,0} + UA \Delta T_{log} - F_{ckt} \rho_{su} C_{P_{su}} T_{ckt} \quad (4.14)$$

denklemini elde edilir.

Bu denklemde:

T_{ckt} = Çeketteki suyun son sıcaklığı(°C)

V_{ckt} = Çeketteki suyun hacim(L)

ρ_{su} = Suyun yoğunluğu (kg/L)

$C_{P_{su}}$ = Suyun ısı kapasitesi(kcal/kg* °C)

F_{ckt} = Çeketteki suyun debisi(kg/dk)

T_0 = soğutma suyu veya tanka beslenen suyun ilk sıcaklığı(°C)

A= ısı transfer alanı(m²)

$\Delta T_{log} = \frac{\Delta T_{tnk} - \Delta T_{ckt}}{\ln \frac{\Delta T_{tnk}}{\Delta T_{ckt}}}$ Reaktör ile çeket soğutma suyu sıcaklık farkının logaritmik

ortalaması(°C)

U=Isı iletim katsayısı(kcal/m²*dk*°C)

Yukarıdaki denklemi $V_{ckt}\rho_{su}C_{P_{su}}$ 'ye bölünüp

$$\frac{dT_{ckt}}{dt} = \frac{F_{ckt}}{V_{ckt}} T_{ckt,0} + \frac{UA\Delta T_{log}}{V_{ckt}\rho_{su}C_{P_{su}}} - \frac{F_{ckt}}{V_{ckt}} T_{ckt} \quad (4.15)$$

ve tekrar düzenlenirse

$$\frac{\Delta T_{ckt}}{\Delta t} = \frac{F_{ckt}}{V_{ckt}} T_{ckt,0} + \frac{UA\Delta T_{log}}{V_{ckt}\rho_{su}C_{P_{su}}} - \frac{F_{ckt}}{V_{ckt}} T_{ckt} \quad (4.16)$$

denklemini elde edilmiş olur.

Bu denklemde U hariç bütün parametrelerin değerleri deneysel olarak bilinmektedir.

Bu değerler denklemde yerine konulmuş ve ısı iletim katsayısı elde edilmiştir.

Her bir deneyin çalışılma parametreleri farklı olduğu için hesaplanan U katsayıları az-çok farklı elde edilmişlerdir. Hesaplanan U değerlerinin aritmetik ortalaması

alınarak tüm hesaplamalarda kullanılmak üzere $U=6.28\left[\frac{kcal}{m^2 * dakika * ^\circ C}\right]$ değeri tespit edilmiştir.

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 $150 - 300 \frac{Btu}{ft^2.h.^{\circ}C}$, bazı kaynaklara göre de $250-500 \frac{Btu}{ft^2.h.^{\circ}C}$ olarak belirtilmektedir [29, 30].

$$1 \frac{Btu}{ft^2.h.^{\circ}C} = 4.882 \frac{kcal}{m^2.h.^{\circ}C} = 0.0813 \frac{kcal}{m^2.dakika.^{\circ}C} \quad (4.17)$$

Bu çalışmada kullanılan cihazın hesapladığımız ısı iletim katsayısını (4.17) denklemine göre $77.21 \frac{Btu}{ft^2.h.^{\circ}C}$ olduğu görülmektedir [31]. Çizelge 4.2’de çeşitli koşullarda yapılan deneylerden hesaplanan U değerleri deney koşulları ile birlikte gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: Çeşitli koşullarda yapılan deneylerden hesaplanan U değerlerinin deney koşulları ile birlikte gösterimi.

Deney No	ΔT_{tnk} [$^{\circ}C$]	ΔT_{ckt} [$^{\circ}C$]	Debi Tank F_{tnk} [kg/dk]	Debi Ceket F_{ckt} [kg/dk]	Hesplanan U Değerleri
1	8	5,7	0,5	1,2	5,75
2	10	7,5	0,5	1,2	5,61
3	17	13	0,5	1,2	5,20
4	7	5,5	0,75	1,8	7,45
5	9	7	0,75	1,8	7,36
6	16	11	0,75	1,8	6,28

Isıl sistemde tank için ısıl denkliği yazacak olursak:

$$\frac{dT_{\text{tnk}}}{dt} V_{\text{tnk}} \rho_{\text{su}} C_{\text{Psu}} = F_{\text{tnk}} \rho_{\text{su}} C_{\text{Psu}} T_{\text{tnk},0} + Q - UA \Delta T_{\text{log}} - F_{\text{tnk}} \rho_{\text{su}} C_{\text{Psu}} T_{\text{tnk}} \quad (4.18)$$

Yukarıdaki denklemi $V_{\text{tnk}} \rho_{\text{su}} C_{\text{Psu}}$ 'ye bölersek

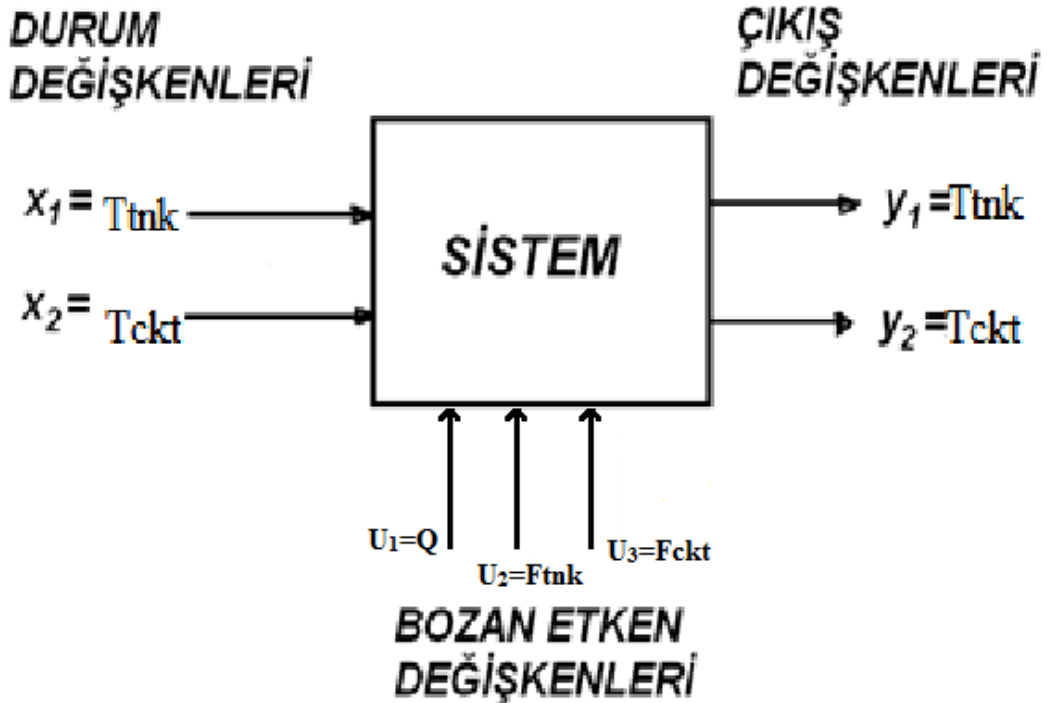
$$\frac{dT_{\text{tnk}}}{dt} = \frac{F_{\text{tnk}}}{V_{\text{tnk}}} T_{\text{tnk},0} + \frac{Q}{V_{\text{tnk}} \rho_{\text{su}} C_{\text{Psu}}} - \frac{UA \Delta T_{\text{log}}}{V_{\text{tnk}} \rho_{\text{su}} C_{\text{Psu}}} - \frac{F_{\text{tnk}}}{V_{\text{tnk}}} T_{\text{tnk}} \quad (4.19)$$

denklemini elde edilmiş olur.

Denklem (4.15) ve (4.19) ile ısıl sistemin dinamik değişkenleri olan T_{tnk} ve T_{ckt} için dinamik denklemler elde edilmiştir.

4.3.2 Isıl sistemin durum uzay modeline uyarlanması ve transfer fonksiyonlarının elde edilmesi

Deneysel sistemin durum uzay modeline uyarlanmış şematik şekli, Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6: Sistemin, durum uzay modeline uyarlanmış şematik şekli.

Sistemin 2 adet durum değişkeni [$x_1 = T_{tnk}$ ve $x_2 = T_{ckt}$], 3 adet bozan etken değişkeni [$u_1 = Q$ $u_2 = F_{tnk}$ ve $u_3 = F_{ckt}$], 2 adet de çıkış değişkeni [$y_1 = T_{tnk}$ ve $y_2 = T_{ckt}$] bulunmaktadır.

Bozucu etkilerin ve sabit olan değerlerin bilinmesiyle,

$$f_1 : \frac{dT_{tnk}}{dt} = \frac{F_{tnk}}{V_{tnk}} T_{tnk,0} + \frac{Q}{V_{tnk} \rho_{su} C_{Psu}} - \frac{UA \Delta T_{log}}{V_{tnk} \rho_{su} C_{Psu}} - \frac{F_{tnk}}{V_{tnk}} T_{tnk} \quad (4.20)$$

$$f_2 : \frac{dT_{ckt}}{dt} = \frac{F_{ckt}}{V_{ckt}} T_{ckt,0} + \frac{UA \Delta T_{log}}{V_{ckt} \rho_{su} C_{Psu}} - \frac{F_{ckt}}{V_{ckt}} T_{ckt} \quad (4.21)$$

(4.20) ve (4.21) denklemlerindeki T_{tnk} ve T_{ckt} değerleri, bu denklemlerin eş anlı çözümleriyle hesaplanabilir.

Bu denklemlerden A bilinenler matrisi;

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$a_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} = \frac{\partial f_1}{\partial T_{tnk}} = -\frac{UA}{V_{tnk} \rho_{su} C_{Psu}} - \frac{F_{tnk}}{V_{tnk}} = -\frac{6.28*0.3}{15.7*1*1} - \frac{0.50}{15.7} = -0.1518 \quad (4.23)$$

$$a_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \frac{\partial f_1}{\partial T_{ckt}} = \frac{UA}{V_{tnk} \rho_{su} C_{Psu}} = \frac{6.28*0.3}{15.7*1*1} = 0.12 \quad (4.24)$$

$$a_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} = \frac{\partial f_2}{\partial T_{tnk}} = \frac{UA}{V_{ckt} \rho_{su} C_{Psu}} = \frac{6.28*0.3}{17.5*1*1} - \frac{0.50}{17.5} = 0.1076 \quad (4.25)$$

$$a_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = \frac{\partial f_2}{\partial T_{ckt}} = -\frac{UA}{V_{ckt} \rho_{su} C_{Psu}} - \frac{F_{ckt}}{V_{ckt}} = -\frac{6.28*0.3}{17.5*1*1} - \frac{1.20}{17.5} = -0.1762 \quad (4.26)$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.1518 & 0.12 \\ 0.1076 & -0.1762 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

olarak elde edilmiş olur.

B bozucu etkenler matrisi

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$b_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial u_1} = \frac{\partial f_1}{\partial Q} = \frac{1}{V_{\text{tnk}} \rho_{\text{su}} C_{\text{Psu}}} = \frac{1}{15.7 * 1 * 1} = 0.0636 \quad (4.29)$$

$$b_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial u_2} = \frac{\partial f_1}{\partial F_{\text{tnk}}} = \frac{T_{\text{ckt},0}}{V_{\text{tnk}}} - \frac{T_{\text{tnk}}}{V_{\text{tnk}}} = \frac{10}{15.7} - \frac{38}{15.7} = -1.7834 \quad (4.30)$$

$$b_{13} = \frac{\partial f_1}{\partial u_3} = \frac{\partial f_1}{\partial F_{\text{ckt}}} = 0 \quad (4.31)$$

$$b_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial u_1} = \frac{\partial f_2}{\partial Q} = 0 \quad (4.32)$$

$$b_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial u_2} = \frac{\partial f_2}{\partial F_{\text{tnk}}} = 0 \quad (4.33)$$

$$b_{23} = \frac{\partial f_2}{\partial u_3} = \frac{\partial f_2}{\partial F_{\text{ckt}}} = \frac{T_{\text{ckt},0}}{V_{\text{ckt}}} - \frac{T_{\text{ckt}}}{V_{\text{ckt}}} = \frac{10}{17.5} - \frac{31}{17.5} = -1.2 \quad (4.34)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0636 & -1.7834 & 0 \\ 0 & 0 & -1.2 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

olarak elde edilmiş olur.

C matrisi uygun boyutlu bir birim matristir.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Sistem doğrudan bir ön besleme ihtiva etmediği için, D matrisi sıfır olarak alınmıştır.

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$A = [-0.1518 \ 0.12; 0.1076 \ -0.1762] \quad B = [0.0636 \ -1.7834 \ 0; 0 \ 0 \ -1.2] \quad (4.38)$$

$$C = [1 \ 0; 0 \ 1] \quad D = [0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0] \quad (4.39)$$

Sistemi belirleyen durum-uzay matris denklemlerinin transfer fonksiyonları, Matlab Command Window ortamında, aşağıdaki deyimden faydalanılarak elde edilebilir.

```
>> a = [-0.1518 0.12; 0.1076 -0.1762];
```

```
b = [0.0636 -1.7834 0; 0 0 -1.2]; c = [1 0; 0 1];
```

```
d = [0 0 0; 0 0 0];
```

```
>> [pay, payda] = ss2tf(a,b,c,d,1)
```

```
pay =
```

```
0 0.0637 0.0112
```

```
0 0 0.0069
```

```
payda =
```

```
1.0000 0.3281 0.0138
```

```
[pay, payda] = ss2tf(a,b,c,d,2)
```

```
pay =
```

```
>> 0 -1.7834 -0.3143
```

```
0 0 -0.1920
```

```
payda =
```

```
1.0000 0.3281 0.0138
```

```
>> [pay, payda] = ss2tf(a,b,c,d,3)
```

```
pay =
```

```
0 0 -0.1440
```

```
0 -1.2000 -0.1822
```

```
payda = 1.0000 0.3281 0.0138
```

```
>> sys = ss([[-0.151847 0.12; 0.107657 -0.176229],  
[0.063694 -1.783439 0; 0 0 -1.2], [1 0; 0 1], [0 0 0; 0 0 0]]); tf(sys)
```

```
ans =
```

Transfer function from input 1 to output...

$$\frac{T_{\text{mk}}(s)}{Q(s)} = \frac{0.06369 s + 0.01122}{s^2 + 0.3281 s + 0.01384} \quad (4.40)$$

$$\frac{T_{ckt}(s)}{Q(s)} = \frac{0.006857}{s^2 + 0.3281s + 0.01384} \quad (4.41)$$

Transfer function from input 2 to output...

$$\frac{T_{tnk}(s)}{F_{tnk}(s)} = \frac{-1.783s - 0.3143}{s^2 + 0.3281s + 0.01384} \quad (4.42)$$

$$\frac{T_{ckt}(s)}{F_{tnk}(s)} = \frac{-0.192}{s^2 + 0.3281s + 0.01384} \quad (4.43)$$

Transfer function from input 3 to output...

$$\frac{T_{tnk}(s)}{F_{ckt}(s)} = \frac{-0.144}{s^2 + 0.3281s + 0.01384} \quad (4.44)$$

$$\frac{T_{ckt}(s)}{F_{ckt}(s)} = \frac{-1.2s - 0.1822}{s^2 + 0.3281s + 0.01384} \quad (4.45)$$

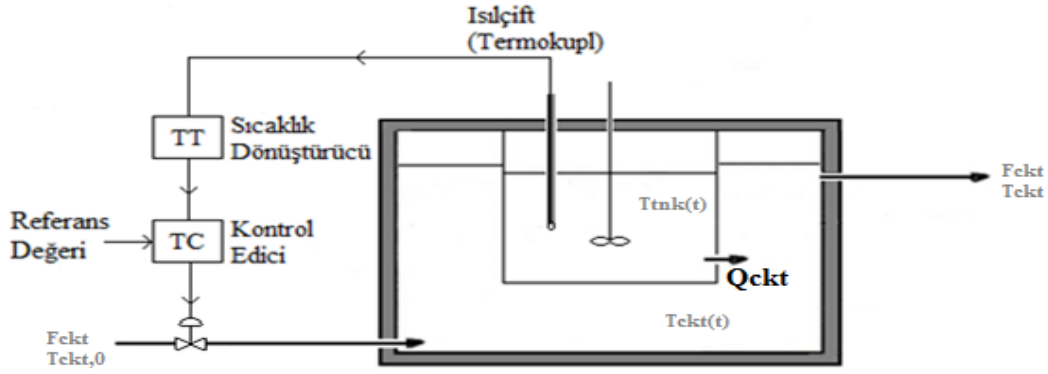
Böylelikle sistemin dinamik değişkenleri olan T_{tnk} ve T_{ckt} ile bozucu etken değişkenleri olan Q , F_{tnk} ve F_{ckt} arasındaki ilişki transfer fonksiyonları biçiminde elde edilmiştir.

Tank içerisindeki su sıcaklığı, ceket suyunun debisiyle ayarlanacağı için sistemin transfer fonksiyonu olarak (4.44) denklemi alınmıştır.

4.3.3 Isıl sistemin geri beslemeli kontrolü

Geri beslemeli kontrol çevrimi, sistemdeki iç kaptaki bulunan suyun sıcaklığına (T_{tnk}) bağlı olarak dış kaba verilen soğutma suyu miktarını (F_{ckt}) ayarlayacak biçimde çalışır.

Isıl sistemin kontrolü için önerilen geri bildirmeli kontrol çevrimi şeması, Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7: Isıl sistem için önerilen geri beslemeli kontrol çevrimi şeması.

Deneysel sistem için önerilen geri beslemeli kontrol sisteminin simulink çizimi de Şekil 4.8’de görülmektedir. Kontrol sisteminde Q iç kaba verilen ısı miktarı ve F_{tnk} iç kaba giren çözelti debisi bozan etken olarak etki ederler. Bunların değişiminin, iç kabın T_{tnk} sıcaklığına etkisi transfer fonksiyonları üzerinden yansıtılmıştır. Kontrol sisteminin giriş değişkeni F_{ckt} cekte temin edilen soğutma suyu ve çıkış değişkeni de T_{tnk} iç kabın sıcaklığıdır.

Geri besleme yapılırken iç kap sıcaklığı bir katsayı ile çarpılarak soğutma suyu debisine dönüştürülmektedir.

Geri besleme yoluyla gelen soğutma suyu debi değişimi sinyali ile referans sinyal arasındaki fark saptandıktan sonra, soğutma suyu debisindeki değişimler, bir PID kontrol ediciye beslenir. Vana üzerinden alınan kontrol edici çıkışı, yine uygun transfer fonksiyonundan yararlanılarak iç kap sıcaklığına yansıtılır. İç kap sıcaklığındaki değişimlere bozan etken değişimleri, kendi dinamik davranışları üzerinden etki ettirilir. Sonra geri besleme yolunda iç kap sıcaklığı, bir kazanç katsayısı ile çarpılarak soğutma suyu debisine dönüştürülür ve kontrol çevrimi tamamlanmış olur.

T_{tnk} 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.

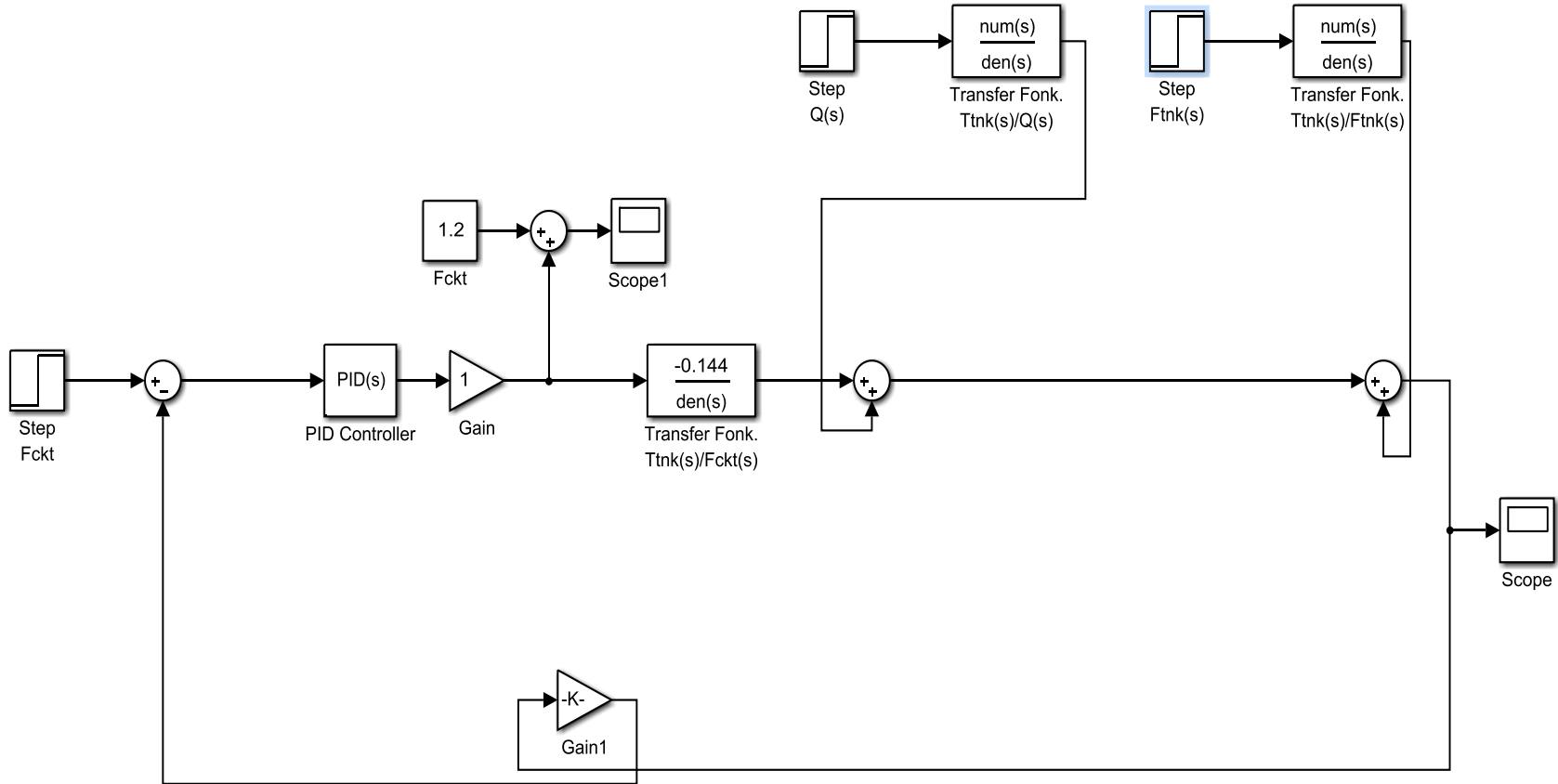
Dışarıdan gelen bir bozan etken (distürbans) etkisiyle veya başka nedenle sistemde referans değerinden sapma meydana gelirse F_{ckt} değeri kontrol edilerek tekrar kararlı hale ulaşılmaya çalışılır.

Türevsel zaman sabiti ise İntegral zaman sabitinin $1/4$ ’ü olan 2.96 alınmıştır.

$$\tau_I = \frac{3.59 + 20.12}{2} = 11.86 \quad (4.46)$$

$$\tau_D = \frac{\tau_I}{4} = 2.96 \quad (4.47)$$

Proses kazancı olan K_p , simülasyon ortamında çeşitli değerler verilerek simule edilmiş ve uygun değer olan $K_p=0.1$ değeri deneme yanılma yöntemiyle tespit edilmiştir.



Şekil 4.8: Geri beslemeli kontrol çevriminin simulink ortamında çizilmiş blok diyagramı.

PID kontrol edicinin, simulink ortamında geçerli olan integral ve türevsel kazançlarını bulmak için aşağıdaki eşitlikler kullanılır.

$$K_I = \frac{K_P}{\tau_I} = \frac{0.1}{11.86} = 0.0084 \quad (4.48)$$

$$K_D = K_P * \tau_D = 0.1 * 2.96 = 0.296 \quad (4.49)$$

PID kontrol edici için bulunan parametre değerleri Çizelge 4.3' de görülmektedir.

Çizelge 4.3: PID kontrol edici parametreleri ve değerleri.

Kontrol edici parametreleri	Parametre değerleri
τ_I	11.86
τ_D	2.96
K_P	0.1
K_I	0.0084
K_D	0.296

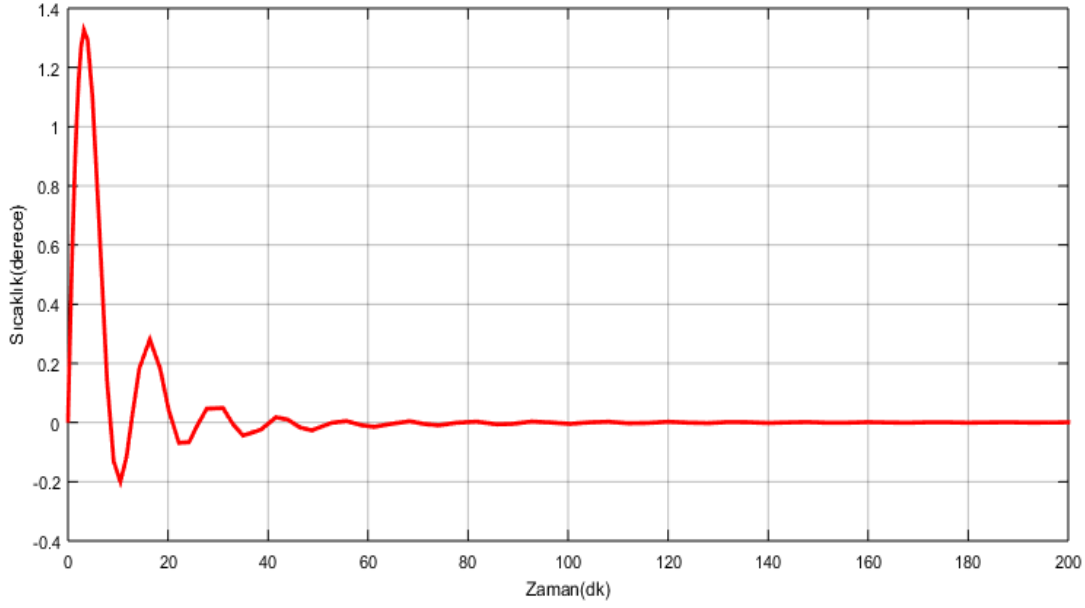
4.3.4 Sisteme basamak etkisi verilip pid kontrolör yardımıyla sistemin regülatör (düzenleyici) kontrolü

Regülatör kontrol, kontrol çevrimlerinin referans değerinin değiştirilmediği çalışma biçimidir. Bu tip kontrolden beklenen, bozan etken değişimlerinin kontrol edilen büyüklüğe etkilerini kabul edilebilir bir değişim biçimi ile belirli bir süre sonunda ortadan kaldırmak veya bunları dengelemektir.

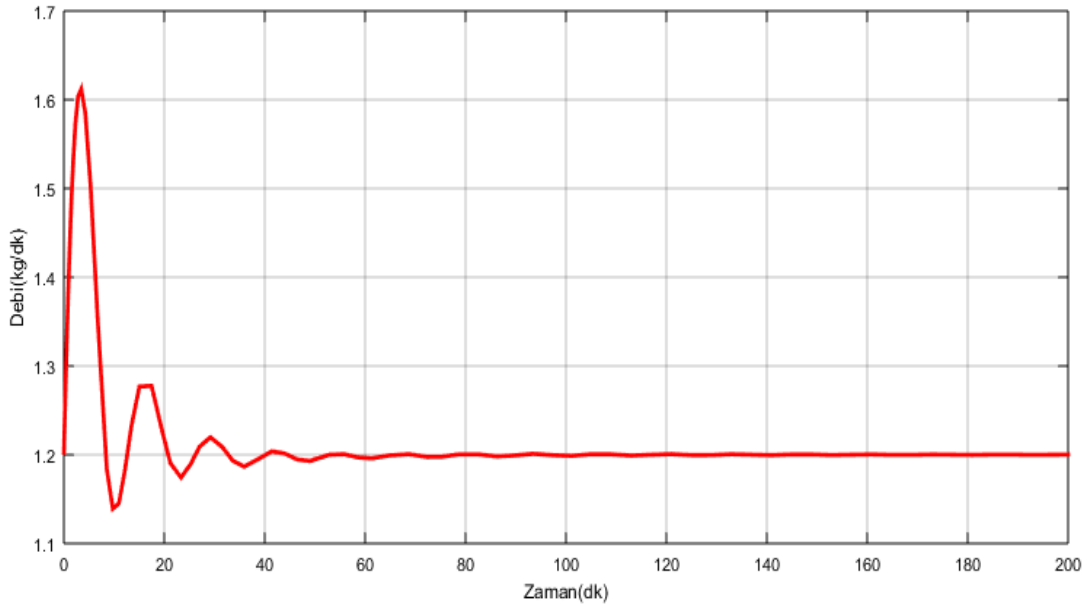
Simule edilen ısı sistemine bozan etkenler olan Q ısıtıcı ve tanka verilen akış debisi F_{mk} değerine, başlangıç (nominal) değerlerinin % 10'u kadar basamak değişimi verilmiştir. Uygulanan basamak değişimleri testinin blok diyagramı Şekil 4.11'da görülmektedir.

Isıl sisteme uygulanan basamak değişimi, PID kontrol ediciyle belli bir süre sonra tamamen yok edilmiş ve sistem tekrar dengeye gelmiştir. Basamak değişiminin sistemde oluşturduğu sıcaklık değişimi şekil 4.9'daki grafikte görülmektedir.

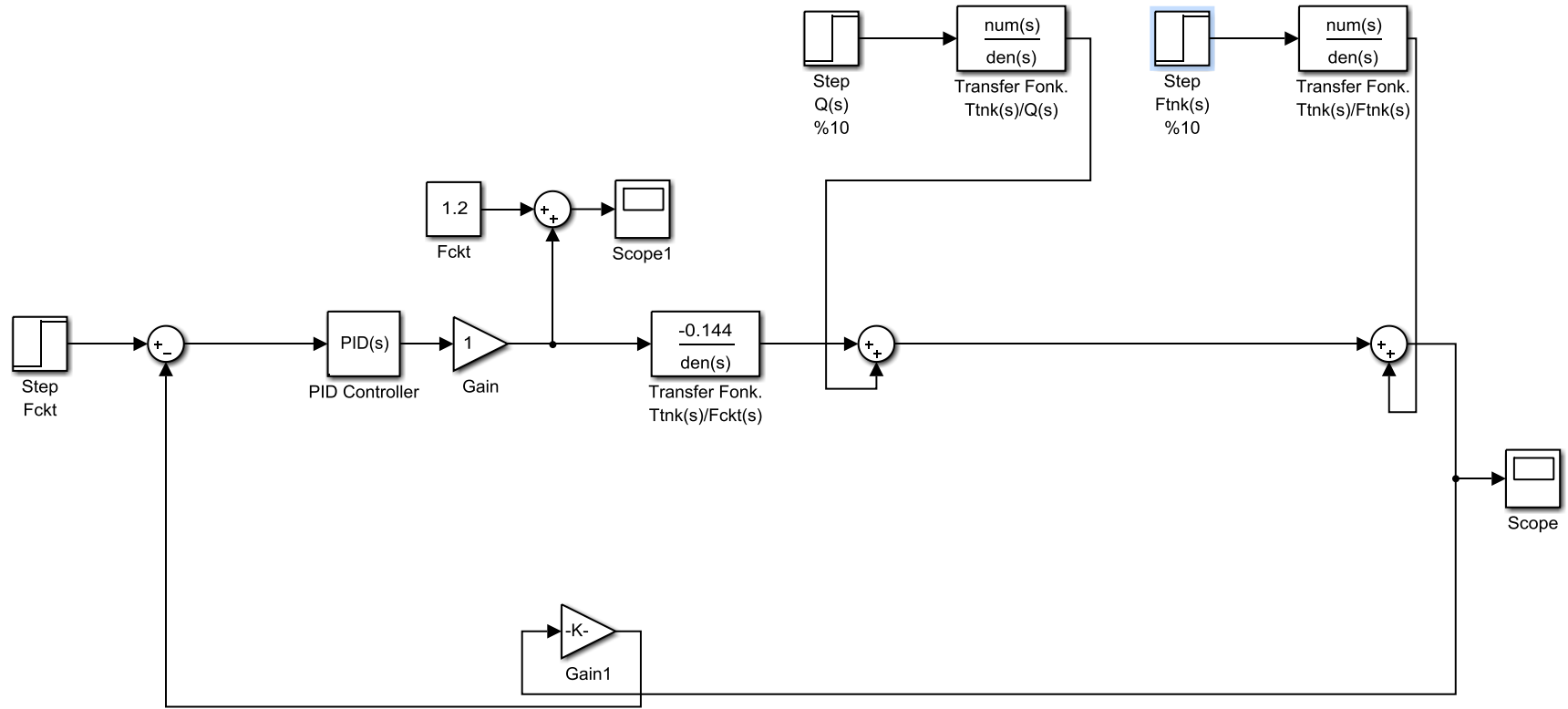
Sistemde meydana gelen sıcaklık değişimini kopmansa etmek üzere PID kontrol edici tarafından ayarlanan Fckt soğutma suyu debisindeki değişim şekil 4.10'de görülmektedir.



şekil 4.9: Bozucu etkenlerin %10'u değerinde sisteme uygulanan basamak testine ısıl sistemin cevabı.



şekil 4.10: Basamak etkisine karşı Fckt soğutma suyundaki değişim.

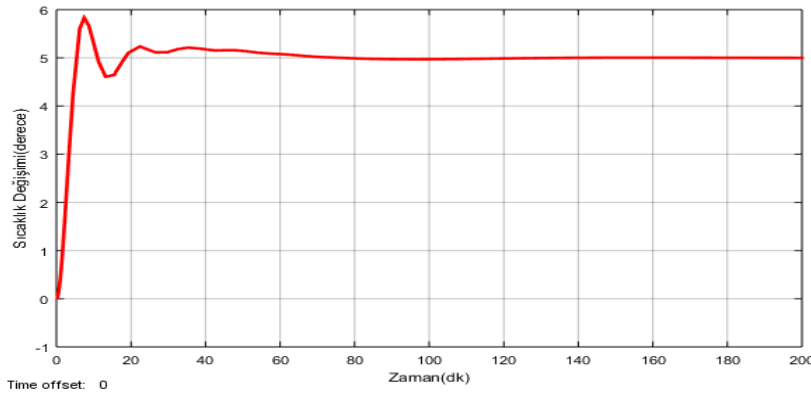


Şekil 4.11: Kapalı çevrim sistemde basamak girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.

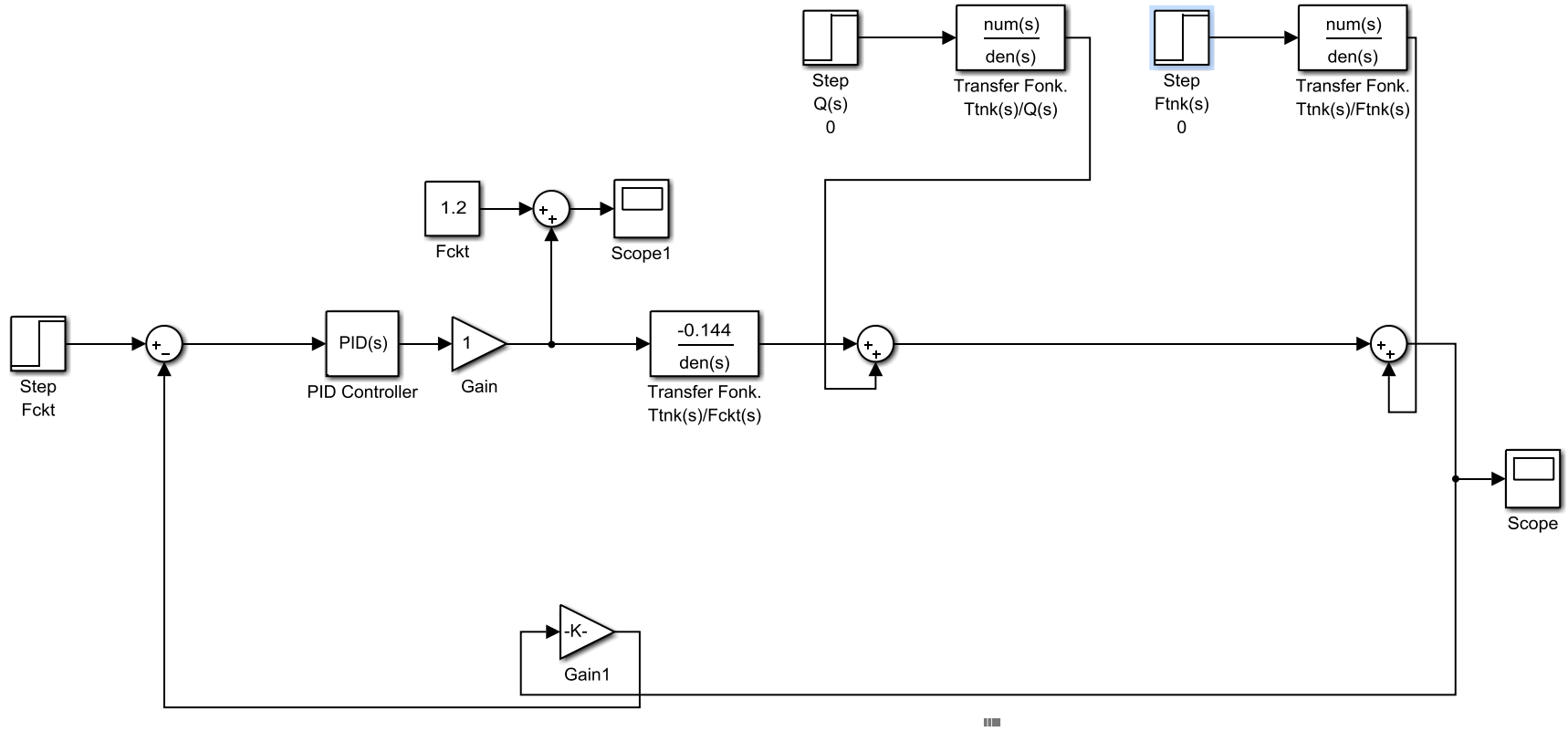
4.3.5 Sistemin servo (izleyici) kontrolü

Referans değerin, öngörülen bir kurala bağlı olarak veya önceden kararlaştırılmış herhangi bir şekilde değişmesi sırasında yapılan kontrol işlevine servo kontrol (izleyici kontrol) adı verilir. Burada kontrol sisteminden beklenen, kontrol edilen büyüklüğün zamanla değişiminin, referans değer değişimini mümkün olduğu kadar yakından izlemesi ve onunla beraber kabul edilebilir bir süre sonunda yeni kararlı hal değerine ulaşmasıdır.

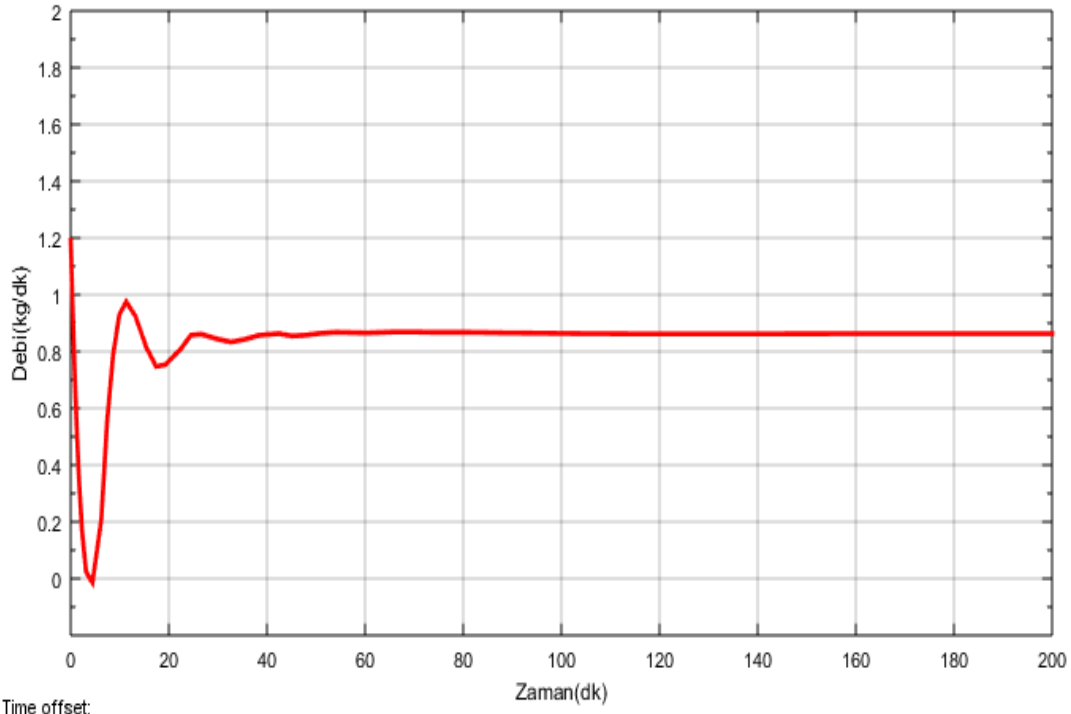
Isıl sistemin servo kontrolünde, bozan etken(ler)' in sabit kaldığı varsayıldığı için ısıl sistemde bulunan Q ısıtıcı ve F_{tnk} bozan etkenler sıfır olarak alınmıştır. Bozan etkenlerin olmadığı durumda sistemin daha önceden ayarlanmış T_{tnk} referans sıcaklık değerini 5 derece yükseltmek için PID kontrol edici ayarlanmış ve sistemin vermiş olduğu cevap gözlenmiştir. PID kontrol edici yardımıyla sistem yaklaşık bir saatlik zaman diliminde F_{ckt} soğutma suyu debisini 1.2 kg/dk akış hızından 0.85 kg/dk' ya düşürerek sistemi ayarlanan +5 derece sıcaklığa yükseltmiştir. Uygulanan servo kontrole ait simülasyon ortamında oluşturulan blok diyagramı şekil 4.13'de görülmektedir. Isıl sistemde T_{tnk} referans sıcaklığı +5 °C'ye ayarlanıp sistemin vermiş olduğu cevap ve servo kontrolü Şekil 4.12'de görülmektedir. F_{ckt} soğutma suyundaki değişim de Şekil 4.14'de görülmektedir. Benzer şekilde sistemin T_{tnk} referans sıcaklığının 5 derece düşürülmesi için yapılan çalışmada, PID kontrol edici bu sefer F_{ckt} akış hızını 1.2 kg/dk'dan 1.7 kg/dk'ya yükseltmiş ve yaklaşık 50 dakika sonra sitem kararlı hale ulaşmıştır. Yapılan bu çalışmaya ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 4.15'de görülmektedir. F_{ckt} akış hızındaki değişimi gösteren grafik ise Şekil 4.16'da görülmektedir.



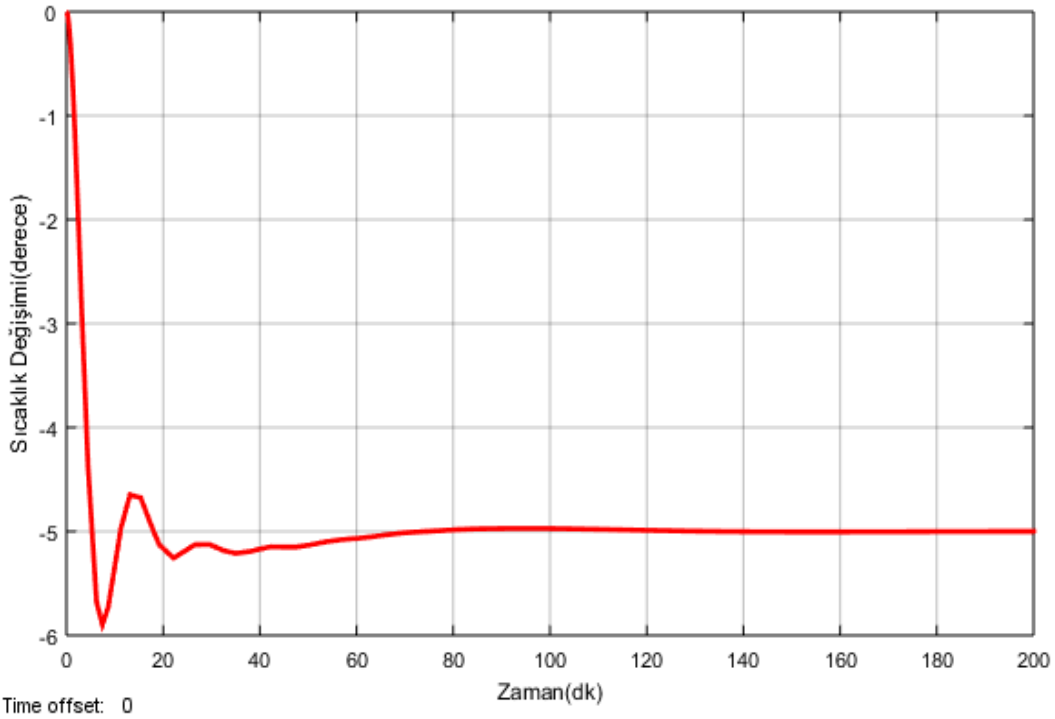
Şekil 4.12: T_{tnk} referans sıcaklığının 5 derece yükseltilmesi sonrası sistemin cevabı ve servo kontrolü.



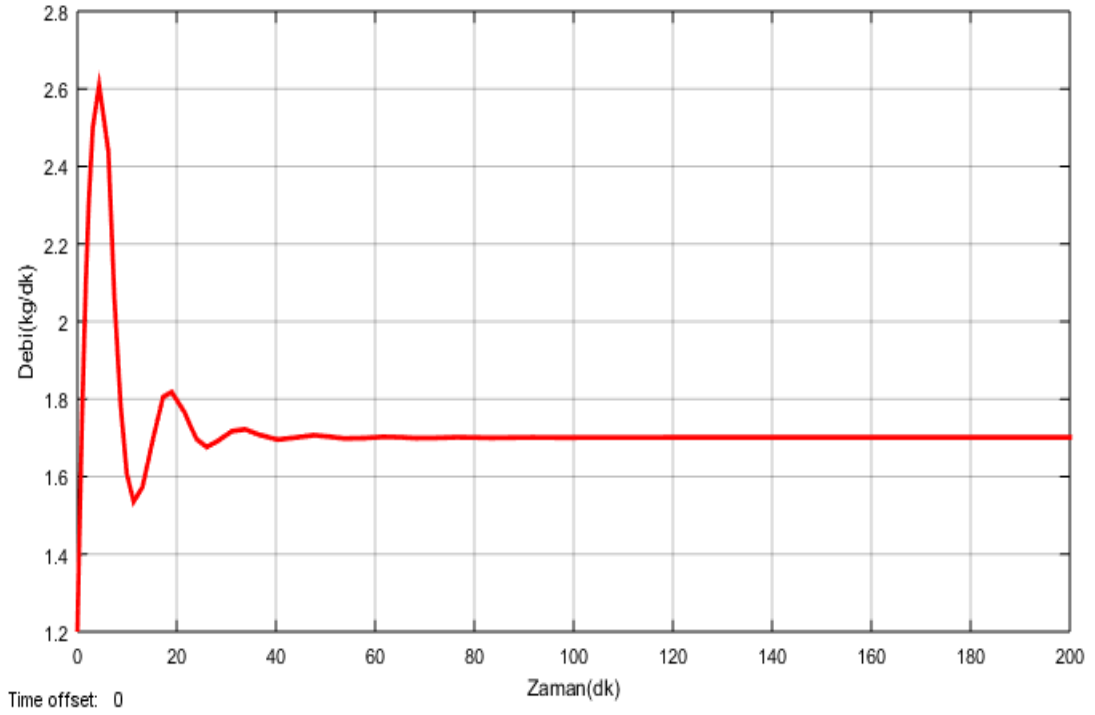
Şekil 4.13: Kapalı çevrim sistemde servo kontrol için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.



Şekil 4.14: Ttnk referans sıcaklığının 5 derece yükseltilmesi sonrası Fekt soğutma suyundaki değişim.



Şekil 4.15: Ttnk referans sıcaklığının 5 derece düşürülmesi sonrası sistemin cevabı ve servo kontrolü.



Şekil 4.16: Ttnk referans sıcaklığının 5 derece düşürülmesi sonrası Fckt soğutma suyundaki değişim.

4.3.6 Sinüsoidal darbe girişine karşı kapalı çevrim sistemin cevabı

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

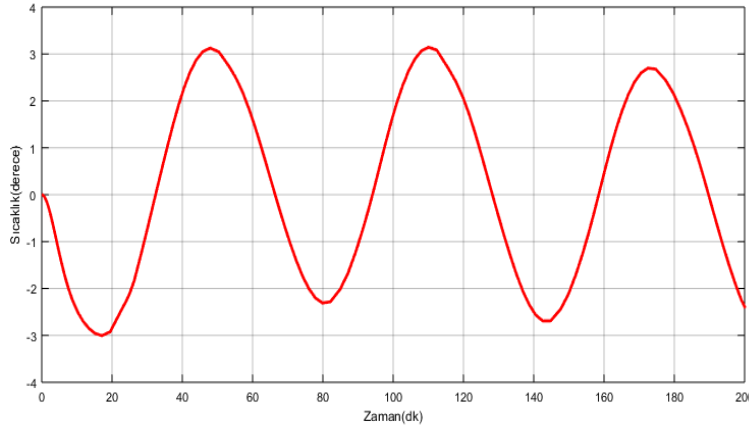
Sinüsoidal darbe belli bir genliği ve periyodu olan sinüs dalgası şeklinde bir giriştir. Sisteme bozan etken olarak sinüsoidal darbe girişi verildiği zaman darbenin periyoduna bağlı olarak cevap eğrisi elde edilir. Eğer giriş darbesinin periyodu hızlıysa sistem cevabı da giriş değişimi gibi sürekli değişir 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 4.19’de görülmektedir.

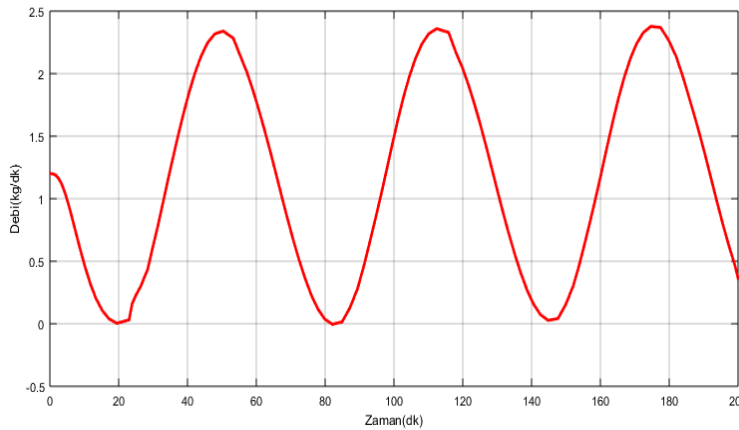
Şekil 4.19’deki blok diyagramda Şekil 4.9’den farklı olarak sinüsoidal darbe girişi veren bozan etkenler kullanılmıştır.

Şekil 4.17’de, bozan etkenlerin sinüsoidal biçimde değişimlerine karşı KE’nin ısı sistemi kontrol etmek üzere harekete geçtiği görülür. Ancak sinüs dalgaları belli periyotla sürekli tekrar ettiği için, sıcaklık değişimi cevabı da sinüsoidal biçimde elde edilmektedir. PID kontrol edicinin vermiş olduğu sinüsoidal cevap neticesinde Fckt soğutma suyundaki değişimler de aynı şekilde sinüsoidal olmaktadır. Fckt soğutma suyundaki değişimler Şekil 4.18’da görülmektedir.

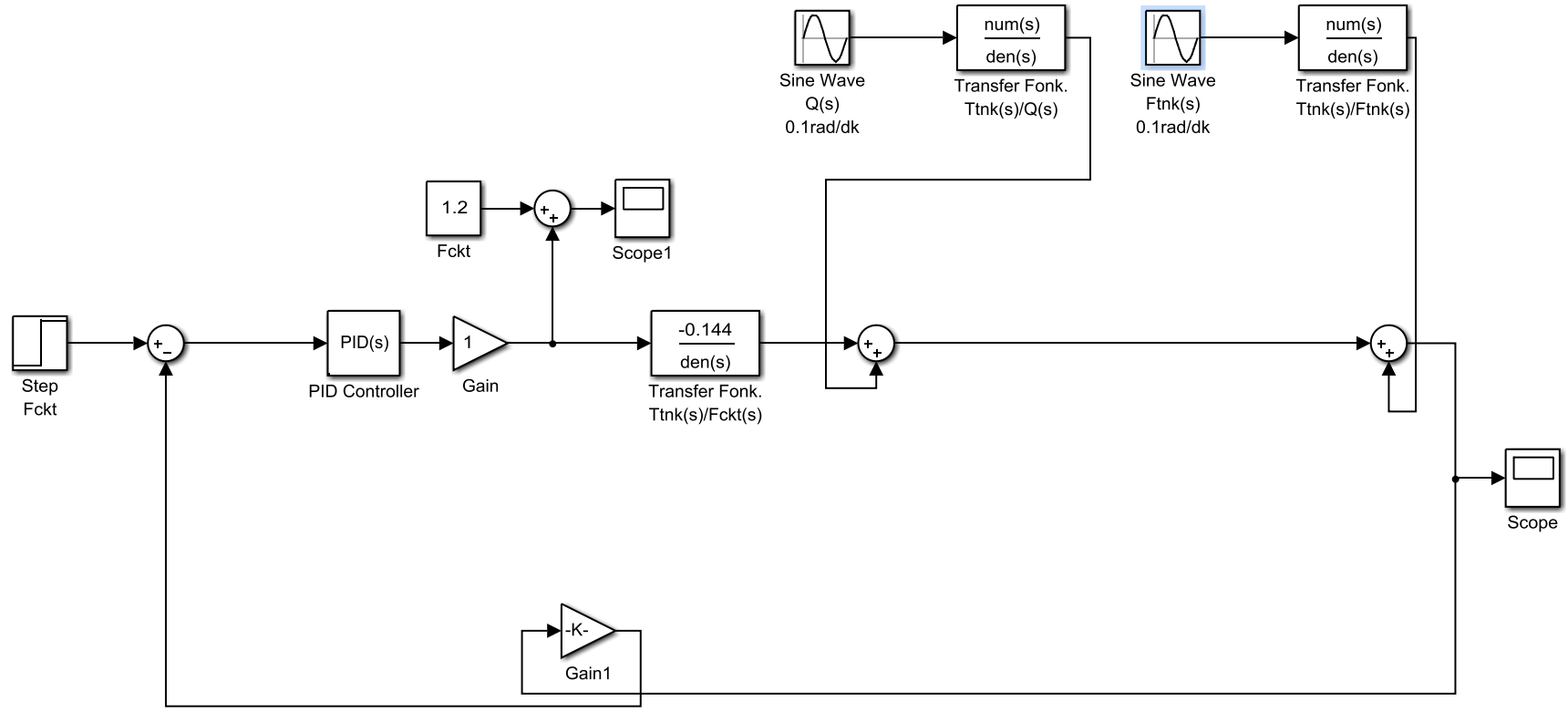
Isıl sisteme Q ısıtıcı ve Ftnk bozan etkenleriyle 0.05 rad/dk sinüsoidal darbe uygulandığında sistemin vermiş olduğu sıcaklık değişim cevabı ve Fckt soğutma suyundaki debisel değişim cevabının, darbenin periyodu azalması sebebiyle daha yavaş olduğu EK B1 de görülmektedir.



Şekil 4.17: Sistemin 0.1 rad/dk frekansındaki sinüsoidal darbe girişine cevabı.



Şekil 4.18: Sisteme uygulanan 0.1 rad/dk frekansındaki sinüsoidal darbe girişi durumunda Fckt değerinin zamana göre değişimi.



Şekil 4.19: Kapalı çevrim sistemde sinüsoidal darbe girişine karşı kontrol edici performansının incelenmesi için bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı.

5. SONUÇ

Bu çalışma ekzotermik reaktörleri benzeştiren bir ısı sistem üzerine yapılmıştır. Deneysel çalışmada ısı sistemine kararlı hale ulaştıktan sonra, iç kaba verilen ısı miktarı basamak biçiminde artırılarak, basamak testleri uygulanmış ve sonuçları sıcaklık-zaman grafiklerine aktarılmıştır. Bu deneysel sonuçlar ile, iç kaptan soğutma suyuna ısı iletiminde etkin olan ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır. Sonrasında sistemin dinamik modeli (zaman değişimli) oluşturulmuş ve elde edilen diferensiyel denklemler, durum uzay yöntemi uyarlanarak çözülmüş, sistemin transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Transfer fonksiyonları elde edilen sistemin kontrolü için bir PID tipi kontrol edici tasarlanmaya çalışılmış ve bu kontrol elemanının parametre değerleri tespit edilmiştir. Sistemin transfer fonksiyonları ve PID parametreleriyle Matlab simulink ortamında sistemin geri beslemeli blok kontrol diyagramı çizilmiştir. Blok diyagramı çizilen sisteme basamak ve sinüsoidal testler uygulanmış ve sistemin dinamik davranışı simülasyon ortamında gözlemlenmiştir. Son olarak ısı sisteminin simülasyon ortamında regülasyon ve servo kontrolü yapılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Smith, C. A.** (2003). *Automated continuous process control*. John Wiley & Sons.
- [2] **Wang, L., & Cluett, W. R.** (2000). *From plant data to process control : ideas for process identification and PID design*. London ; New York ; Taylor & Francis, cop.
- [3] **Sung, S. W., Lee, J., & Lee, I.-B.** (2009). *Process identification and PID control*. John Wiley & Sons.
- [4] **Mattar, E. A.** (2010). *History of Automatic Control System*. Bahrain: University of Bahrain.
- [5] **Url-1**<<http://www3.nd.edu/~isis/history.html>>. (2015). *alındığı tarih 22.11.2015*.
- [6] **Bennett, S.** (1996). A brief history of automatic control. *IEEE Control Systems Magazine*, 16(3), 17–25.
- [7] **Dorf, R. C., & Bishop, R. H.** (2011). *Modern control systems*. Pearson.
- [8] **Nagrath, I. J.** (2006). *Control systems engineering*. New Age International.
- [9] **Singh, S. K.** (2003). *Industrial Instrumentation & Control, 2e*. Tata McGraw-Hill Education.
- [10] **Luyben, W. L.** (1989). *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*. McGraw-Hill Higher Education.
- [11] **Url-2** <http://tr.wikipedia.org/wiki/Otomatik_kontrol>. (2015). *alındığı tarih 22.11.2015*.
- [12] **Asbjornsen, O. A.** (1985). Chemical process control: An introduction to theory and practice: George Stephanopoulos. *Automatica*, 21(4), 502–504.
- [13] **Şaşmaz, D. A.** (1998). *Proses kontrol*. Istanbul: İTÜ.
- [14] **Seborg, D. E., Mellichamp, D. A., Edgar, T. F., & Doyle III, F. J.** (2010). *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons.
- [15] **Murrill, P. W.** (2000). *Fundamentals of process control theory*. Isa.
- [16] **Coughanowr, D. R., & Koppel, L. B.** (1965). *Process systems analysis and control (Vol. 3)*. McGraw-Hill New York.
- [17] **Gao, Z.** (2002). From linear to nonlinear control means: a practical progression. *ISA transactions*, 41(2), 177–189.
- [18] **Astrom, K. J.** (1995). PID controllers: theory, design and tuning. *Instrument society of America*.
- [19] **Gerişkovan, İ.** (1995). PID, Fuzzy ve Fuzzy-PID Kontrol. Algoritmalarına Genel Bir Bakış. *Otomasyon Dergisi*, 36, 68–72.
- [20] **Luyben, M. L., & Luyben, W. L.** (1997). *Essentials of process control*.

McGraw-Hill College.

- [21] **Alli, H., & Kaya, M.** (2001). A Genetic Algorithm Approach for Determination of PID Control Parameters. *Science and Engineering Journal of Firat University*, 13(1), 1–8.
- [22] **Lee, J.** (1989). On- line PID controller tuning from a single, closed- loop test. *AICHE journal*, 35(2), 329–331.
- [23] **Bequette, B. W.** (2003). *Process control: modeling, design, and simulation*. Prentice Hall Professional.
- [24] **Dreinhofer, L. H.** (1988). Controller tuning for a slow nonlinear process. *Control Systems Magazine, IEEE*, 8(2), 56–60.
- [25] **Åström, K. J., & Wittenmark, B.** (2013). *Adaptive control*. Courier Corporation.
- [26] **Luyben, M. L., Tyreus, B. D., & Luyben, W. L.** (1997). Plantwide control design procedure. *AICHE journal*, 43(12), 3161–3174.
- [27] **Smith, C. L., & Murrill, P. W.** (1989). *Process-Control Systems. Application, Design, and Tuning*. NewYork.
- [28] **Chau, P. C.** (2002). *Process control: a first course with MATLAB*. Cambridge University Press.
- [29] **Kern, D. Q.** (2002). *Process heat transfer*. NewYork: Tata McGraw-Hill Education.
- [30] **Holman, J. P.** (2001). *Heat transfer, Eighth SI Metric Edition*. McGraw-Hill Inc.
- [31] **Url-3**<http://www.engineeringtoolbox.com/unit-converter-d_185.html>. (2015). *alındığı tarih 01.11.2015*.
- [32] **Ogata Katsuhiko**, “Modern Control Engineering”, 3rd Edition, Prentice Hall 1997.
- [33] **Kuo Benjamin C.**, “Otomatik Kontrol Sistemleri”, Yedinci Baskı, Prentice Hall 1995.

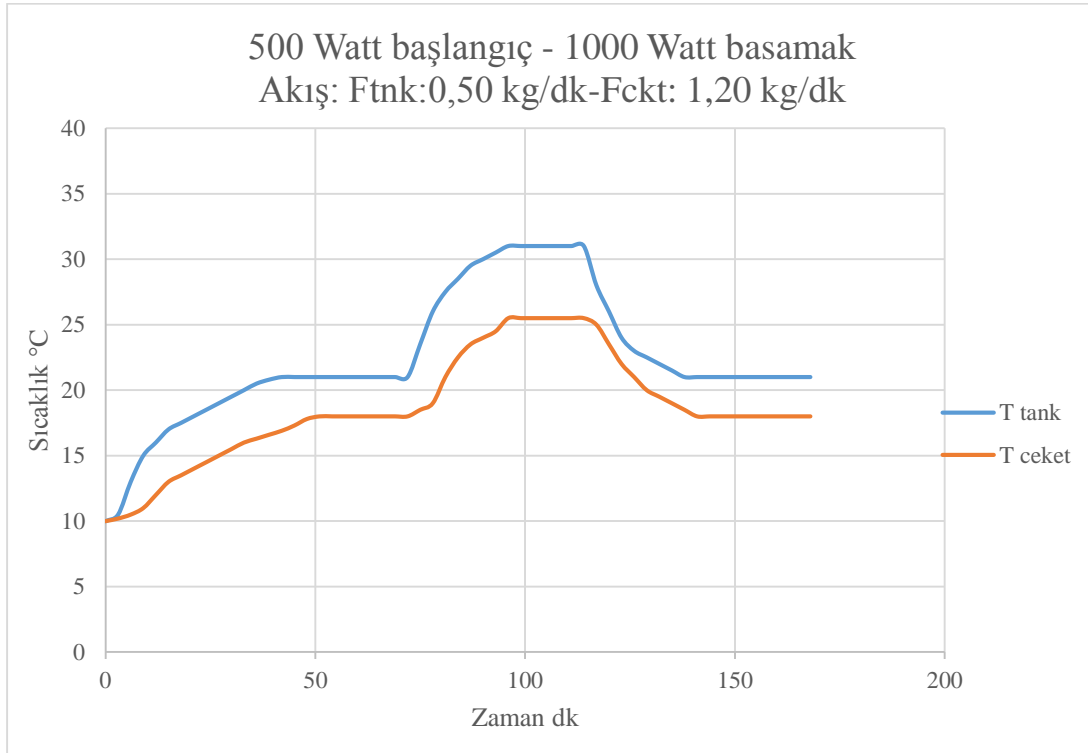
EKLER

EK A1: Yapılan diğer deneylerin sıcaklık-zaman grafikleri.

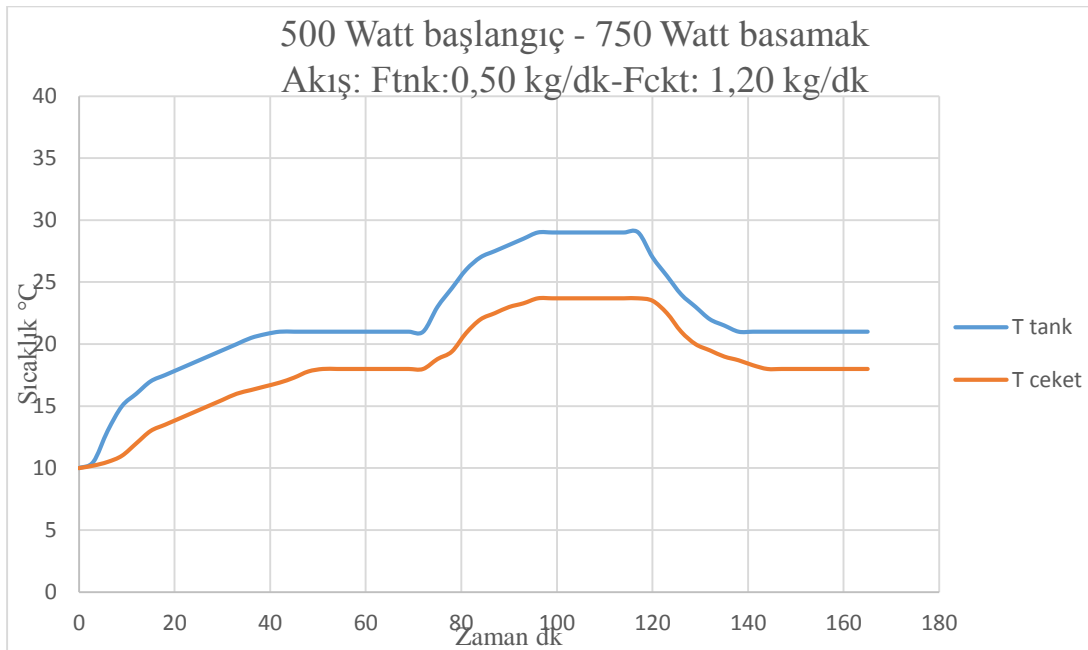
EK B1: Isıl sisteme Q ısıtıcı ve $F \sin \omega t$ bozan etkenleriyle 0.05 rad/dk sinüsoidal darbe uygulandığında sistemin vermiş olduğu cevaplara ilişkin grafikler.

EK A1:

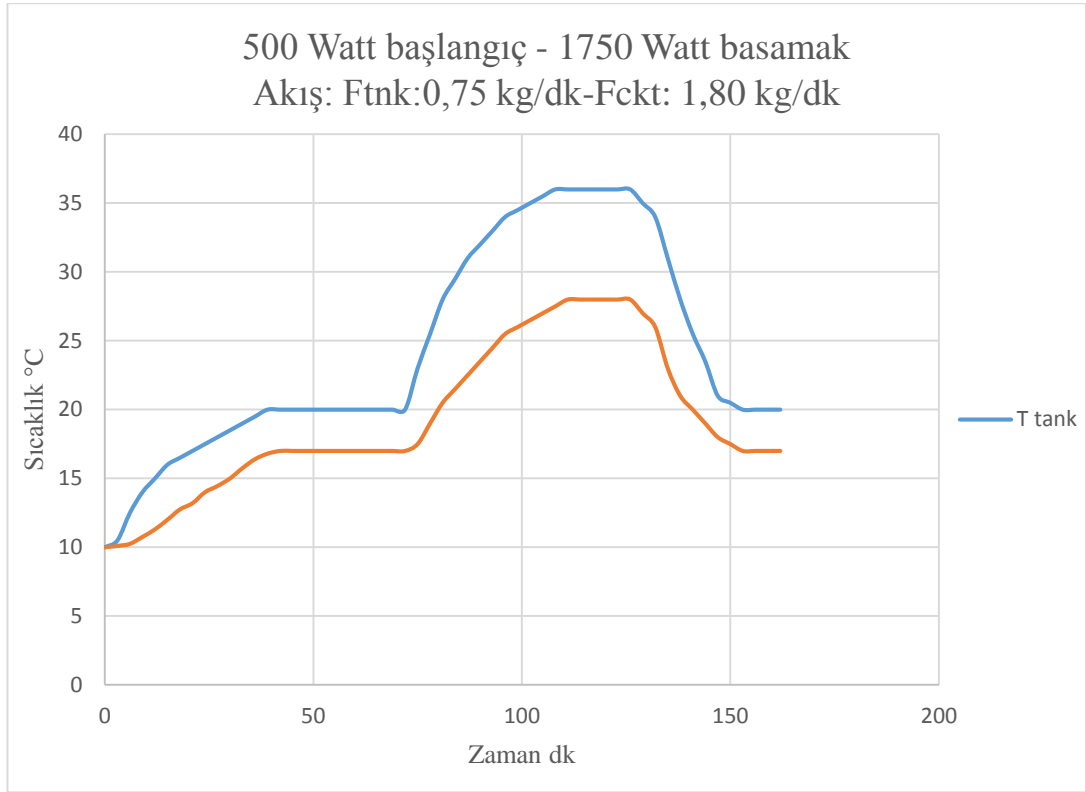
YAPILAN DİĞER DENEYLERİN SICAKLIK-ZAMAN GRAFİKLERİ



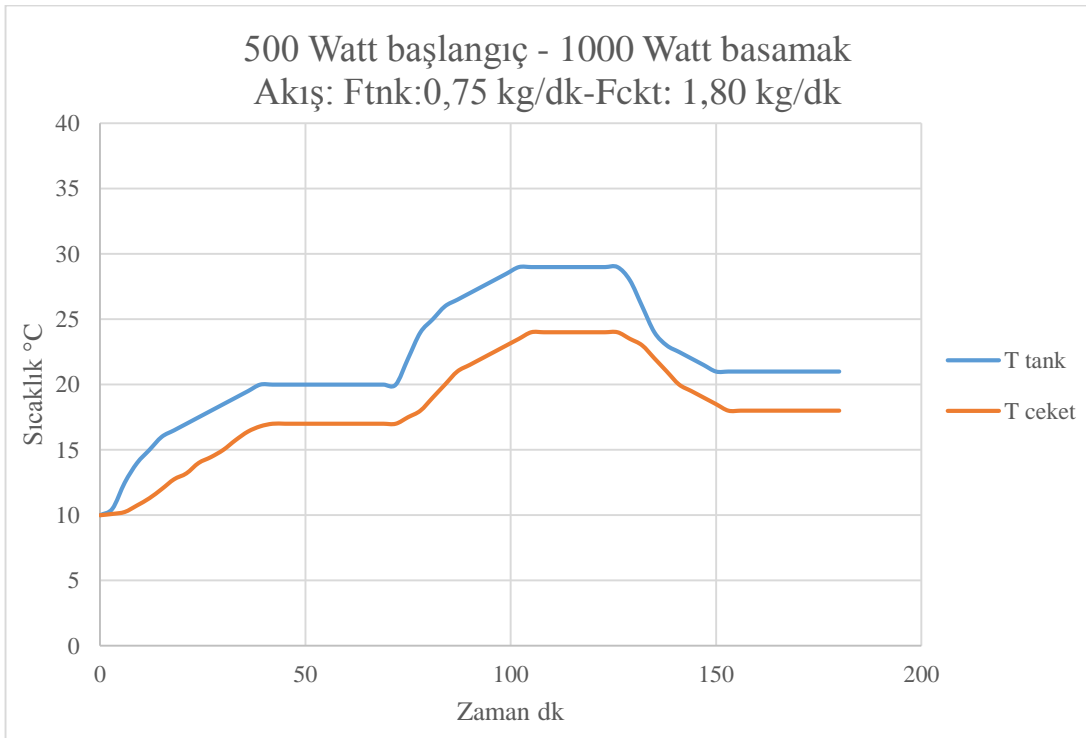
Şekil A. 1: 0.50 kg/dk tank debisi, 1.20 kg/dk soğutma suyu debisi ve 1000W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.



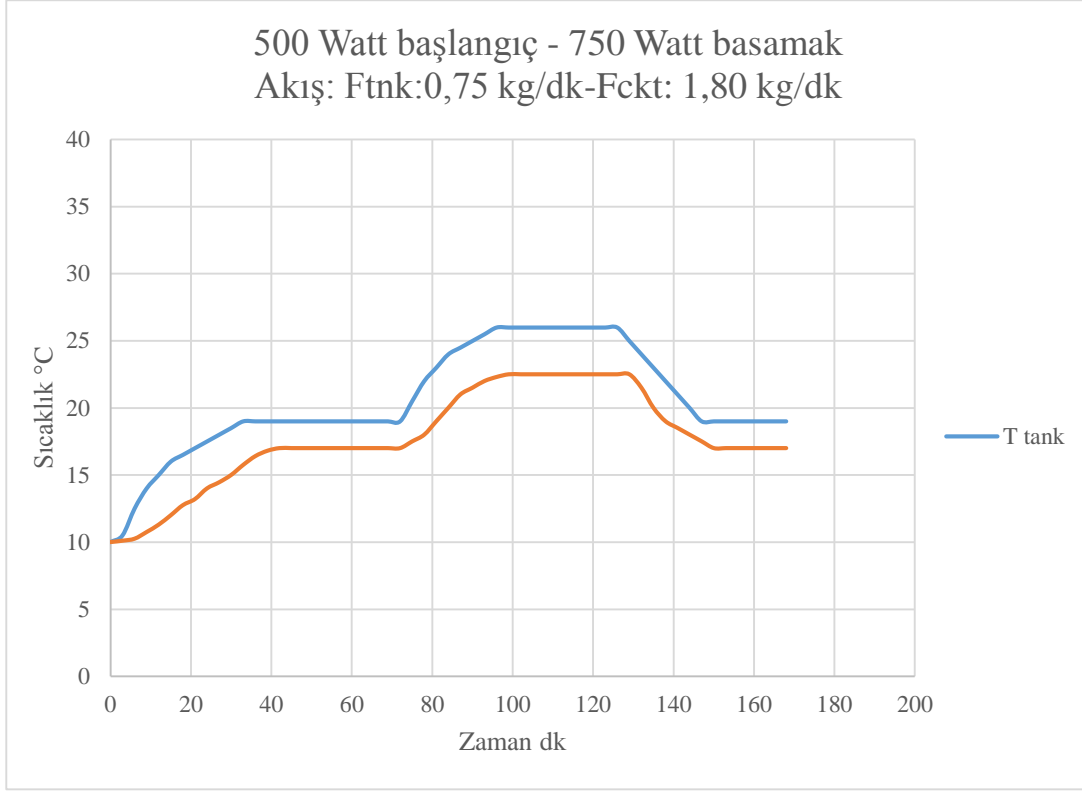
Şekil A. 2: 0.50 kg/dk tank debisi, 1.20 kg/dk soğutma suyu debisi ve 750W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.



Şekil A. 3: 0.75 kg/dk tank debisi, 1.80 kg/dk soğutma suyu debisi ve 1750W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.



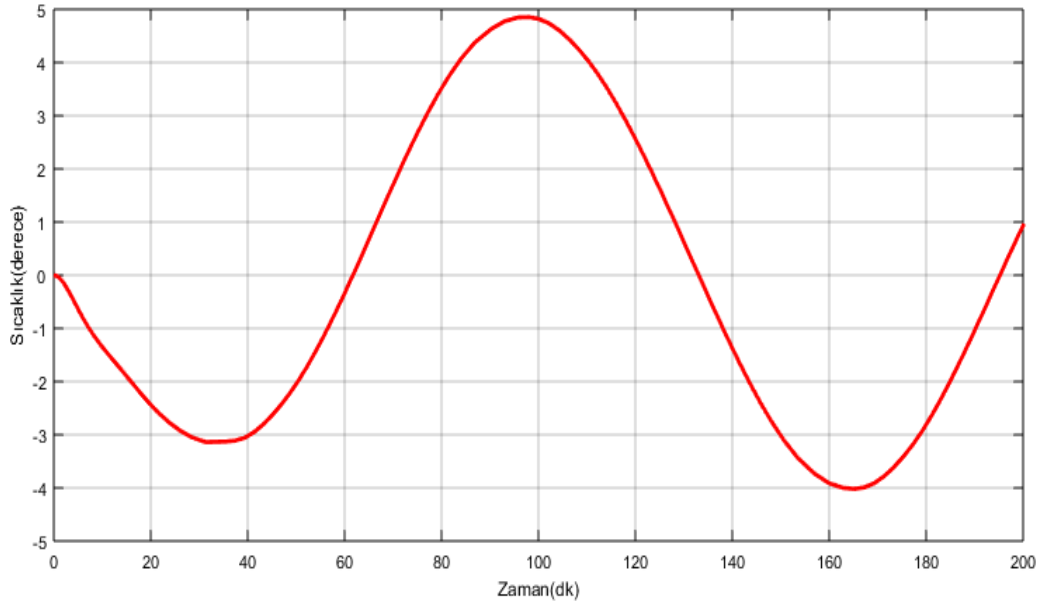
Şekil A. 4: 0.75 kg/dk tank debisi, 1.80 kg/dk soğutma suyu debisi ve 1000W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.



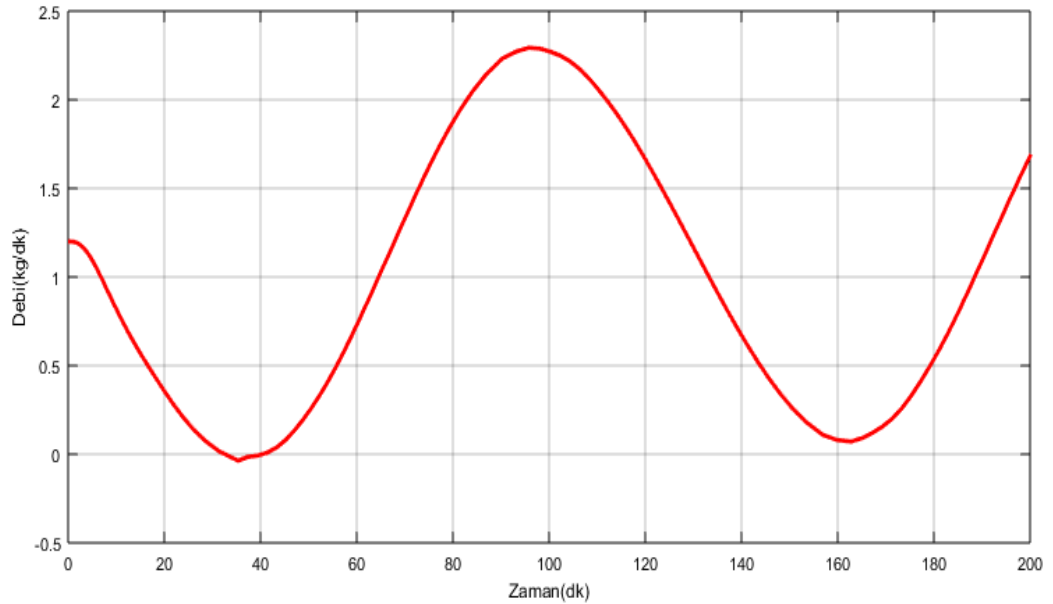
Şekil A. 5: 0.75 kg/dk tank debisi, 1.80 kg/dk soğutma suyu debisi ve 750W Basamak girişine ait yapılan deneyin sıcaklık–zaman grafiği.

EK B1

Isıl sisteme Q ısıtıcı ve F_{tnk} bozan etkenleriyle 0.05 rad/dk sinüsoidal darbe uygulandığında sistemin vermiş olduğu cevaplara ilişkin grafikler.



Şekil B. 1: Q ısıtıcı ve F_{tnk} bozan etkenleriyle 0.05 rad/dk sinüsoidal darbe uygulandığında sistemin vermiş olduğu sıcaklık değişim cevabı.



Şekil B. 2: Q ısıtıcı ve F_{tnk} bozan etkenleriyle 0.05 rad/dk sinüsoidal darbe uygulandığında sistemin vermiş olduğu F_{ckt} soğutma suyu değişim cevabı.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Halil BALCI
Doğum Yeri ve Tarihi: Kula/Manisa,1985
Lisans 1 : Gazi Üniversitesi (2010)
Lisans 2 : Anadolu Üniversitesi (2012)
Yüksek Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi (2015)
Mesleki Deneyim : Maliye Bakanlığı Vergi Müfettişi
E-Posta : halil.balci@vdk.gov.tr