

**T.C.
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BEŞ TAM KARIŞTIRMALI AKIM REAKTÖRLERİNİN RAMP
ETKİSİNDE DİNAMİĞİ VE KONTROLU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Araş. Gör. SÜLEYMAN KAYTAKOĞLU

**MÜHENDİSLİK - MİMARLIK FAKÜLTESİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

ESKİŞEHİR, 1983

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım esnasında bana büyük destek olan ve yardımlarını esirgemeyen hocam Doç.Dr. Mustafa Alpbaz'a, çalışmalarım için imkan sağlayan ve yardımcı olan dekanımız Prof.Dr. Musa Şenel'e, bilgisayar ile çalışmalarımda yardımcı olan Anadolu Üniversitesi Bilgi İşlem Merkezi personeli'ne, büyük yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşlarıma, teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Bu çalışmada, beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin dinamiği ve kontrolü üzerinde araştırmalar yapılmıştır.

Alpbaz {1}, aynı sistemin giriş değişkenlerine verilen kademe etkisinde dinamik özelliklerini kademeli-parametreli sistemler olarak ifade etmiştir. Alpbaz, aynı etki altındaki sisteme geri ve ileri beslemeli kontrol sistemlerini ilave ederek çıkış değişkenlerinin zamana göre değişimini sayısal bilgisayarda hesaplamıştır.

Bu araştırmada, birinci mertebeden tek yönlü ekzotermik bir reaksiyon içeren beş tam karıştırmalı akım reaktörleri kullanılmıştır. Bu sistemin, dinamik ve kontrol hesaplamaları için önce besleme akış hızına kademe etkisi verildiğinde sistemin dinamiği incelenmiş ve sonra ileri ve geri beslemeli kontrol ilavesi ile çıkış değişkenlerinin zamana göre değişimleri hesaplanmıştır. Sayısal bilgisayar programlarında ramp çalışmaları için değişiklikler yapılmıştır.

Sistemin giriş besleme akımında verilen çeşitli değerlerde kesikli ve kesiksiz ramp değişiminin çıkış değişkenlerine etkisi dinamik çalışmalar olarak hesaplanmış ve sonra ileri ve geri beslemeli kontrol sistemlerinin ilavesiyle aynı değişkenlerin istenen değere gelişleri incelenmiştir.

ABSTRACT

In this work, the dynamics and control of the five continuous flow stirred tank reactors are investigated.

Alpbaz {1}, has described the dynamic properties of the similar system under the effect of the step change given to the input variables to be lumped-parameter system. Alpbaz, introducing feedback and feedforward controls to the system which is under the similar effect has calculated the change of the output variables respect to the time on a digital computer.

In this research, five continuous flow stirred tank reactors having exothermic first order irreversible reaction are used. For the calculation of the dynamics and control of this system, the dynamics of the system when the step change was given to the feed flow rate was examined initially and then with addition of feedback and feedforward controls, the changes of the output variables respect to the time are calculated. The digital computer programs are changed for ramp studying.

The effect of the several values of the continuous and discontinuous ramp variables given to the feed flow rate of the system to the output variables are examined for dynamic studying and then with introducing feedback and feedforward controls, the approaches of the similar variables to the desired values are investigated.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SEMBOLLER	vii
<u>BÖLÜM 1 GİRİŞ</u>	1
<u>BÖLÜM 2 TEORİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</u>	4
2.1 Tam karıştırmalı ve borusal akım reaktörleri üzerinde yapılan çalışmalar	4
2.2 Dağılımlı-parametreli sistemler	5
2.3 Kademeli-parametreli sistemler	6
2.4 Dağılımlı ve kademeli-parametreli sistemlerin ramp etkisinde dinamiği	6
2.5 Dağılımlı ve kademeli-parametreli sistemlerin kontrolü	7
2.5.1 Geri beslemeli kontrol	7
2.5.2 İleri beslemeli kontrol	10
2.5.3 İleri ve Geri beslemeli kontrol	11
<u>BÖLÜM 3 MATEMATİK MODELLEME</u>	14
3.1 Tam karıştırmalı akım reaktörlerinin yataşkın ve yataşkın olmayan-hal denklemleri	14
3.2 Borusal akım reaktörünün yataşkın ve yataşkın olmayan-hal denklemleri	17

<u>BÖLÜM 4</u>	<u>MATEMATİK MODELİN ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ</u>	19
4.1	Analitik çözüm yöntemleri	19
4.2	Sayısal bilgisayar ile çözüm	21
4.2.1	Yatışkın-hal çözümü	21
4.2.2	Yatışkın olmayan-hal çözümü	24
4.2.3	Kontrol çözümü	25
4.3	Analog bilgisayar ile çözüm	27
4.4	Hibrid bilgisayar ile çözüm	29
<u>BÖLÜM 5</u>	<u>SAYISAL BİLGİSAYAR ÇÖZÜMLERİNDEN</u>	
	<u>ELDE EDİLEN KURAMSAL SONUÇLAR</u>	30
5.1	Sayısal bilgisayar çözümlerinde kullanılan parametrelerin değerleri	30
5.2	Sayısal bilgisayar ile elde edilen çözüm sonuçları	32
5.2.1	Yatışkın-hal sonuçları	32
5.2.2	Yatışkın olmayan-hal sonuçları	33
5.2.2.1	Kademe etkisinde	33
5.2.2.2	Ramp etkisinde	34
5.2.3	Kontrol sonuçları	35
5.2.3.1	Kademe etkisinde	35
5.2.3.2	Ramp etkisinde	35
<u>BÖLÜM 6</u>	<u>SONUÇLAR VE ÖNERİLER</u>	74
6.1	Sonuçlar	74
6.2	İleri çalışmalar için öneriler	75
<u>EKLER</u>		
EK 1	Soğutma suyu için enerji denkliği	77

EK 2	Yatışkın-hal denklemlerinin sayısal bilgisayar ile çözümleri	79
EK 3	Yatışkın olmayan-hal denklemlerinin sayısal bilgisayar ile çözümleri	86
EK 4	Kontrol hesapları için sayısal bilgisayar çözümleri	92
REFERANSLAR		102

SEMBOLLER

A	Isı transfer yüzeyi (cm^2)
A_c	Reaktör kesit alanı (cm^2)
A_s	Soğutma yüzeyi (cm^2)
A_3	Soğutma kesit alanı (cm^2)
B	Ramp fonksiyonunun eğimi
C_o	Besleme giriş derişimi (mol/lt)
C_n	n.Tankın çıkış derişimi (mol/lt)
C_{p1}	Besleme ısı kapasitesi ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$)
C_{p2}	Soğutma suyu ısı kapasitesi ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$)
D	Difüzyon katsayısı (cm^2/dak)
e	Hata
E	Aktivasyon enerjisi (cal/mol)
h	İntegrasyon zaman artışı
ΔH	Reaksiyon ısısı (cal/mol)
$k(T)$	Reaksiyon hız sabiti ($1/\text{sn}$)
k_{11}, k_{21}	Runge-Kutta sabitleri
K_c	Oransal kontrol sabiti
K_v	Vana sabiti (cm^3/sn)
L	Zaman sabiti (sn)
LMTD	Logaritmik ortalama sıcaklık farkı
M_c	Ceket içindeki su kütlesi (g)
$M(Z)$	Reaktörün dZ kesitindeki ortalama doğrusal akışkan hızı

n	İterasyon sayısı
N	Başlangıç yataşkın-hal değerleri
P	Kontrol çıkış basıncı
R	İdeal gaz sabiti (cal/mol $^{\circ}\text{K}$)
S	Laplace operatörü
t	Zaman (sn), (dak)
T	Borusal akım reaktörünün çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_o	Besleme giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_n	n.Tankın çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_{c1}	Hesaplanan yüksek sıcaklık limiti ($^{\circ}\text{C}$)
T_{c2}	Hesaplanan düşük sıcaklık limiti ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Ger}	Sıcaklığın gerçek değeri ($^{\circ}\text{C}$)
TEMPA	En düşük sıcaklık limiti ($^{\circ}\text{C}$)
TEMPB	En yüksek sıcaklık limiti ($^{\circ}\text{C}$)
T_D	Türevsel hareket zamanı (sn)
T_R	Integral hareket zamanı (sn)
U	Isı transfer katsayısı (cal/cm ² sn $^{\circ}\text{C}$)
V	Bir tankın hacmi (cm ³), (lt)
V_C	Bir tankın ceketinin hacmi (cm ³)
V_1	Reaktöre giren akışkan hızı (lt /dak)
V_2	Soğutma suyu akış hızı (lt/dak)
Z	Reaktör girişinden olan uzaklık (cm)

Yunan Alfabeti

4

θ	Borusal akım reaktörü için t zamanında soğutma suyu sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
θ_o	Soğutma suyu giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
θ_n	n.Tanktaki soğutma suyu sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
ρ_1	Besleme yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_2	Soğutma suyu yoğunluğu (g/cm^3)
W_n	Ağırlıklı sıcaklık ölçüm katsayıları
X	Sistemin bağımlı değişkeni (Sıcaklık veya derişim)

BÖLÜM I

GİRİŞ

Isı değıştiricileri ile ekstraksiyon, absorbsiyon ve destilasyon işlemlerinin yapıldığı dolgulu kolonların dinamik özellikleri kuramsal olarak dağılımlı-parametreli sistemler (Distributed-parameter system) olarak tanımlanırlar. Bu tür işlemler zaman ve uzay değışkenlerine bağılı olarak, kısmi türevli differansiyel denklemler ile ifade edilirler.

Yukarıda belirtilen sistemlere karşın, tepsi tipi destilasyon kolonlarının dinamik özelliklerine benzer yapıda olanlar kademeli-parametreli sistemler (Lumped-parameter system) olarak tanımlanırlar. Bu işlemlerde birçok fiziksel özellikler kademeler içinde homojen olarak dağılırlar ve bir adi türevli differansiyel denklem dizisi ile ifade edilirler.

Literatürde, dağılımlı ve kademeli-parametreli sistemlerin dinamiğı ve kontrolü üzerine, kuramsal ve deneysel olarak yapılmış birçok araştırmaya rastlanır {2-7} . Bu araştırmalarda, bir sistemin kontrolü için yapılan tasarım hesaplarında, aynı sistemin dinamik bulgularından yararlanılması gerektiğı vurgulanmış, ayrıca geri beslemeli kontrol sistemleri için ölçümlerin alındığı yerlerin önemi ve kontrol sistemlerinin etkinliğı üzerinde de durulmuştur. Bu tip çalışmalarda, kademeli-parametreli sistemlerin matematiksel çözüm yöntemleri, dağılımlı-parametreli sistemlerden daha kolay olduğundan, eşit kademelere bölme yöntemi ile hesapla-

malar yapılmıştır. Beş tam karıştırmalı akım reaktörleri borusal akım reaktörleri davranışları için bir yaklaşım yöntemidir.

Beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin dinamiği ve kontrolü üzerine araştırmalara literatürde pek rastlanmamaktadır. Alpbaz {1}, aynı sistemin giriş madde akış hızına verilen kademe etkisinde dinamik özelliklerini kademeli-parametreli sistemler olarak ifade etmiş buna ilaveten geri ve ileri beslemeli kontrol sistemleri kullanarak sayısal bilgisayarda hesaplamalar yapmıştır.

Bu araştırmada birinci mertebeden tek yönlü ekzotermik bir reaksiyon içeren beş tam karıştırmalı akım reaktörleri kullanılmıştır. Bu sistemin ramp etkisinde dinamik ve kontrol çalışmaları için Alpbaz {1}, in araştırmalarında kullanıldığı bilgisayar programları ile ön çalışma olarak giriş değişkenine verilen kademe etkisinde sistemin dinamiği ve kontrolü hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda sayısal bilgisayar programlarında bir takım değişiklikler yapılarak ramp etkisi hesaplamaları için çalışır hale getirilmiştir.

Sistemin giriş besleme akımında verilen kesikli ve kesiksiz ramp değişiminin çıkış değişkenlerine etkisi dinamik çalışmalar olarak hesaplanmıştır. Önce, besleme akış hızında kesiksiz ramp girişinin sistem dinamiğine etkileri incelenmiştir. Bu değişim için çeşitli eğimlerde ramp girişleri kullanılmıştır.

Dinamik çalışmaların bir diğeri de, belirli zamanlarda kesilen kesikli ramp değişimlerinin incelenmesidir.

Kontrol çalışmalarında, besleme akış hızında verilen kesikli ve kesiksiz ramp değişimlerinin etkisini yok etmek için, ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri kullanılmıştır. Geri ve ileri beslemeli kontrol sistemleri, beraberce ve bazı çalışmalarda ise ayrı ayrı incelenmişlerdir. Çeşitli ramp değişimlerine karşı, kontrol sistemlerinin etkisi altındaki çıkış değişkenlerinin istenen değere yaklaşımı sayısal bilgisayarda hesaplanarak incelenmiştir.

BÖLÜM 2

TEORİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, yapılan araştırma için gerekli olan bazı temel kuramsal kavramlar ile dağılımlı ve kademeli-parametrelili sistemlerin dinamik ve kontrolü ile ilgili araştırmalar üzerinde durulmuştur.

2.1. Tam Karıştırmalı ve Borusal Akım Reaktörleri Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Kimya mühendisliği endüstrisinde, ideal olmayan tam karıştırmalı ve borusal akım reaktörlerine çok rastlanır. İdeal şartlarda akım reaktörlerinin limit halleri, iyi karışma ve piston akış olarak iki özellik gösterir. İyi karıştırılan bir reaktörde girdi akımları hemen karışarak ürünü oluştururlar. Buna karşın piston akışlarında ise girdiler reaktör içersinde ilerledikçe reaksiyonu oluştururlar ve geri karışma yoktur. Bu iki ideal tip arasında kalan reaktörlerin yapısı ideallikten sapmayı belirler ve birçok araştırmaya konu olmuşlardır.

Denbigh {8}, borusal ve tam karıştırmalı akım reaktörleri için seçimin nasıl yapılacağını göstermiştir.

Cholette, Cloutier{9-11}, reaktör tiplerinin seçimi üzerine birçok araştırma yapmışlardır.

Manning, Wilhelm {12}, araştırmalarında ideal karışmanın karıştırmalı akım tankları için iyi bir yaklaşım olacağını göstermişlerdir.

Levenspiel [13], ideal olmayan piston akışlı reaktörlerde geri karışmayı gözlemiş ve bu özelliği dağılımlı piston akışı olarak tanımlamıştır. Bu tanım ideal olmayan reaktör tiplerinin hangi limit özelliğine yaklaştığını verir.

Alpbaz [1], bu çalışmada kullanılan beş tam karıştırma akım reaktörlerinde ideale yakın tam karıştırmanın oluştuğunu göstermiştir.

Ercüment [14], tam karıştırma tanklar ile ilgili dinamik ve kontrol problemlerini kuramsal olarak incelemiştir.

Franks [15], tam karıştırma akım reaktörlerinin dinamik ve kontrol çalışmaları için bilgisayar programları önermiştir.

2.2. Dağılımlı-Parametrelili Sistemler

Bu tip sistemler, zaman ve uzaysal değişimlerde kısmi türevli differansiyel denklemler ile ifade edilirler. Bir boru içinde akan akışkanda oluşan fiziksel olaylar bu tip sistemlere bir örnektir.

$$- D \frac{\partial^2 X}{\partial Z^2} + M(Z) \frac{\partial X}{\partial Z} + \frac{\partial X}{\partial t} = f(t) \quad (2.1)$$

Piston akışlı proseslerde geri karışma ve difüzyon katsayısı ihmal edilirse (2.1) denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$M(Z) \frac{\partial X}{\partial Z} + \frac{\partial X}{\partial t} = f(t) \quad (2.2)$$

2.3. Kademeli-Parametrelili Sistemler

Bu tip sistemler, bir dizi adi türevli differansiyel denklemlerle ifade edilirler. Kademeli parametrelili sistemlerin matematiksel çözüm yöntemleri, dağılımlı-parametrelili sistemlerden daha kolay olduğundan, dağılımlı parametrelili sistemlere eşit kademelere bölme suretiyle yaklaşılr. Piston akışlı bir borusal reaktöre n-tam karıştırmalı akım reaktörleri ile yaklaşılr.

Kummel {16}, dağılımlı-parametrelili sistemleri analog bilgisayarda yukarıdaki yaklaşım yardımıyla çözmüştür.

Jorganen, Kummel {17}, bir önceki simulasyon tekniğini, dolgulu kolon ve akışkanlaştırılmış yataklardaki gaz-sıvı absorpsiyonu için uygulamışlardır.

2.4. Dağılımlı ve Kademeli-Parametrelili Sistemlerin Ramp Etkisinde Dinamiği

Literatürde, dağılımlı ve kademeli-parametrelili sistemlerle ramp etkisi üzerinde çalışmalara pek rastlanmamaktadır. Bu konu ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Himmelblau, Bischoff {18}, kuramsal olarak birinci mertebeden sistemlere ramp girişini örnek olarak vermişlerdir.

Ercüment {14}, tam karıştırmalı bir tanka ramp etkisini incelemiş ve bu etkene karşı geri beslemeli kontrol sistemini kullanmıştır.

Bir ramp girişi, matematiksel olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t > 0 \end{cases} = t u(t) \quad (2.3)$$

$u(t)$: Birim kademe fonksiyonu

Eğer bu fonksiyonun Laplace dönüşümü alınırrsa;

$$L \{ f(t) \} = L \{ t u(t) \} = \frac{1}{s^2} \quad (2.4)$$

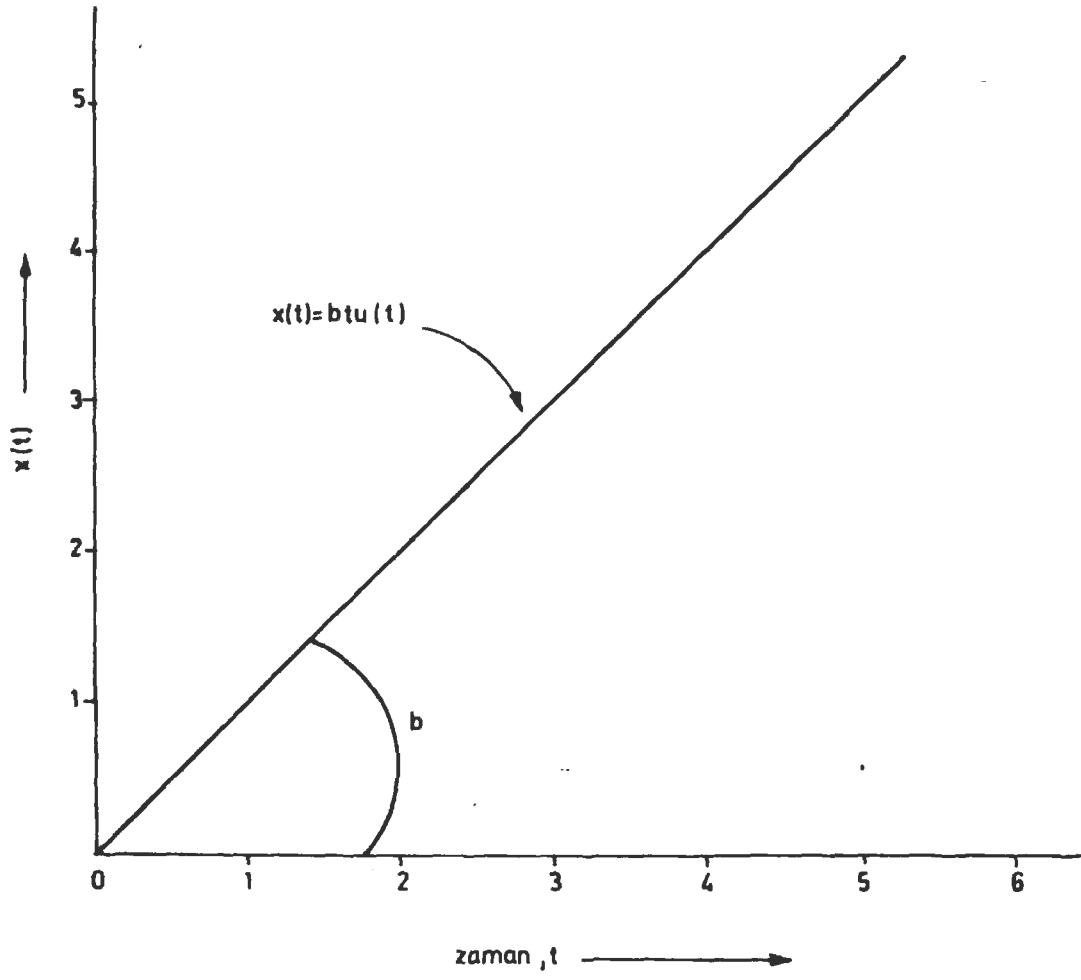
Ramp girişi grafiksel gösterimi Şekil 2.1. de verilmiştir.

2.5. Dağılımlı ve Kademeli-Parametrelı Sistemlerin Kontrolu

Bu kısımda, kuramsal olarak önce kontrol sistemleri hakkında temel açıklamalar yapıldıktan sonra konu ile ilgili literatür verilmiştir.

2.5.1. Geri Beslemeli Kontrol

Temel olarak, geri beslemeli kontrol sistemlerinde, proses çıkış değişkeninin değeri bir ölçüm elemanı ile ölçülerek o değişkenin istenen değeri ile karşılaştırılır. İstenen değer ile ölçüm değeri arasındaki fark (hata) kontrol sistemine gelir. Hata ile orantılı olan kontrol edici çıkış sinyali, kontrol vanasına gelerek bir proses girdisinin miktarını değiştirir. Bu değişkenin yardımıyla ölçülen çıkış değişkeni istenen değere gelir.



Şekil 2.1. : $btu(t)$ şeklindeki ramp girişi .

Genel olarak kontrol sistemleri üç kısımdan meydana gelmektedir.

Oransal kontrol, hata sinyali ile orantılı P çıkış sinyali üretir.

$$P = K_C \cdot e \quad (2.5)$$

K_C : Oransal kontrol sabiti

e : hata (istenen değer-ölçülen değer)

Türevsel kontrol, hatanın türeviyle orantılı sinyal üretir.

$$P = K_C \cdot T_D \cdot \frac{de}{dt} \quad (2.6)$$

T_D : Türevsel hareket zamanı

Integral kontrol, hatanın integralini alarak orantılı sinyal gönderir.

$$P = \frac{K_C}{T_R} \int_0^t e \, dt \quad (2.7)$$

T_R : Integral hareket zamanı

Üç terimli kontrol sistemi aşağıda verilmiştir.

$$P = K_C \left(e + T_D \frac{de}{dt} + \frac{1}{T_R} \int_0^t e \, dt \right) \quad (2.8)$$

Genel olarak, bir kademe değişiminin etkisi altında kalan sistemin oransal kontrolü ile çıkış değişkeni istenen değere dinamiğinden fazla yaklaştırılır. Bu yaklaşım K_C nin değerine çok bağlıdır. Oransal + integral kontrol ile ölçülen

değer istenen değere gelir. Ama sistemde oransal kontrol-
dakinden daha fazla salınım görülür. Oransal + Integral + Tü-
revsel kontrolde ise ölçülen değer istenen değere bir evvelki
kontrol mekanizmasından daha kısa sürede yaklaşır. İyi bir
kontrol işlemi için K_C , T_R ve T_D nin uygun değerlerde seçil-
mesi gerekir. Bu seçimle ilgili kuramsal hesap yöntemleri
çeşitli kitaplarda bulunabilir {19-20}.

2.5.2. İleri Beslemeli Kontrol

Geri beslemeli kontrol sistemlerinin bazı çalışmalar
için uygun olmayan yönleri vardır. Bunlardan biri; sistemi
bozan etkenler, çıkış değişkenini istenen değerden saptırın-
caya kadar kontrol sisteminin bu etkenleri fark etmemesidir.
Bunun sonucu olarak, bozan etkenleri yok edecek değişkenleri
daha geç oluşturur. Bu dezavantajları yok etmek için ileri
beslemeli kontrol sistemi kullanılır. Bu kontrol sistemi,
bozan etkenleri sisteme gelmeden farkederek gerekli önlem-
leri alır. Örnek olarak; bir proses girdisi olan hammademin
akış hızında görülen azalma veya çoğalmayı ölçüp, proses
etkilenmeden diğer bir girdiyi değiştirerek çıkış değişkeni-
nin istenen değerde tutulmasını sağlar. İleri beslemeli
kontrol sistemi avantajlı gibi görülmüşse, her bozan etken
için bir kontrol edici gerektirir; bu pahalı bir işlemdir
{19-20}.

2.5.3. İleri ve Geri Beslemeli Kontrol

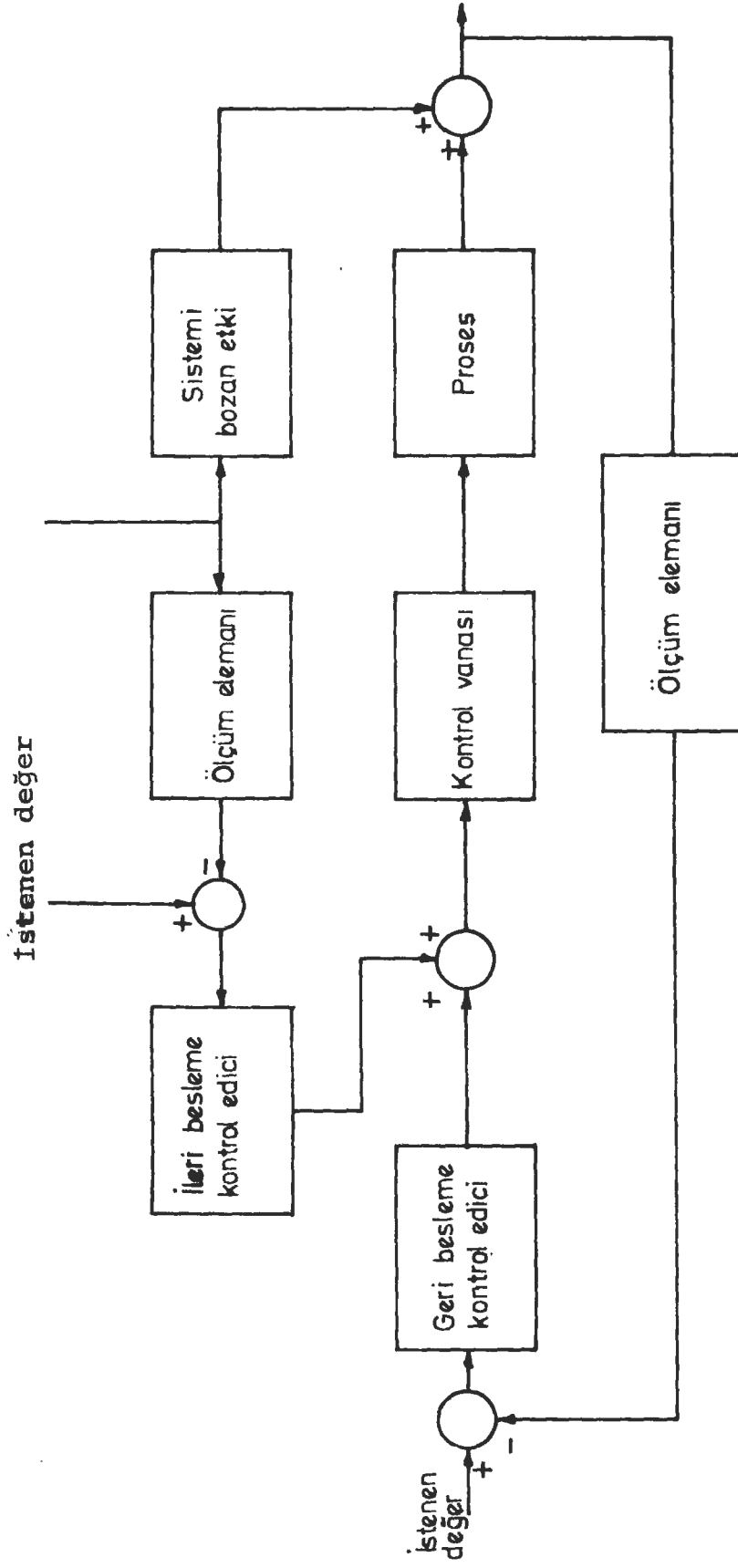
İki kontrol sisteminin uygun olmiyan yönlerini gidermek için ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri birlikte kullanılır. Muhtemel bozan etkenler için, ileri beslemeli kontrol sistemi kullanılırken, bir tane de geri beslemeli kontrol sistemi ilave edilerek daha iyi ve ucuz bir otomatik kontrol sistemi oluşturulur. Her iki kontrol sistemi için üç ayrı kontrol terimi kullanılabilir. Tüm ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri Şekil 2.2.de gösterilmiştir.

Coughanowr, Viscnevetzsky {21}, kontrol sisteminin bir modelini, kompleks bir kimyasal reaksiyonun olduğu borusal akım reaktörü için TAI HYDAC 2400 Hibrid Sayısal-ANALOG bilgisayarda elde etmişlerdir.

Mc Cann {22}, borusal akım reaktörünün tam karıştırma-
lı akım reaktörüne yaklaşmasında, kademe sayısını hesaplamak ve ölçme elemanının yerini en iyi şekilde bulmak için, dağılımlı-parametrelili bir modeli ayrıntılı şekilde incelemiştir.

Mutharason, Coughanowr {23}, adaptive kontrol için sayısal bilgisayarın analog bilgisayar gibi doğrudan doğruya kullanılabileceğini yaptıkları son yayınlarında açıklamışlardır.

Alpbaz {1}, madde akış hızına kademe değişimi vererek, beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin çıkış sıcaklığını ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri kullanarak kontrol etmiştir.



Şekil 2.2. : İleri ve geri beslemeli kontrol sistemleri.

Çınar {24}, katalitik ve ekzotermik bir gaz fazı reaksiyonun gerçekleştirildiği sabit yataklı borusal bir reaktörde çıkış sıcaklığının optimal kontrolunu yapmıştır.

Yukarıda verilen araştırmalarda görüldüğü gibi, ramp değişiminin sistemlere etkisi ve kontrolu hakkında çalışmaya pek rastlanmamaktadır. Bu araştırmada beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinde giriş madde akış hızına ramp etkisi verilerle dinamiği incelenmiş ve sonra bu etkinin altında ileri ve geri beslemeli kontrol mekanizmalarının davranışları hesaplanmıştır.

BÖLÜM 3

MATEMATİK MODELLEME

Bölüm 2'de verilen bulgulardan yararlanarak tam karıştırmalı ve borusal akım reaktörleri için bu araştırmada kullanılan, yataşkın ve yataşkın olmayan-hal denklemleri verilmiştir.

Denklemlerin daha basit ve kullanışlı olabilmesi için bir takım varsayımlar gereklidir.

1. Sistemde birinci mertebeden ekzotermik bir reaksiyon oluşmaktadır.

2. Çevreye olan ısı kayıpları ihmal edilebilecek düzeydedir.

3. Sistemde yoğunluk, ısı kapasitesi ve hacim gibi fiziksel özellikler sabittir.

4. Isı transfer katsayısı, soğutma suyunun akış hızı ile değişmektedir.

3.1. Tam Karıştırmalı Akım Reaktörlerinin Yataşkın ve Yataşkın Olmayan-Hal Denklemleri

Bu varsayım ve açıklamalara ek olarak, kullanılan tam karıştırmalı akım reaktörlerinin tüm kademelerinin çok iyi karıştırıldığı böylece her kademe için sıcaklık ve derişim dağılımının aynı olduğu kabul edilerek, birinci mertebe reaksiyonu için tam karıştırmalı akım reaktörlerinin matematiksel modeli aşağıda verilmiştir.

Şekil 3.1.

i. Tam karıştırmalı akım reaktörü kütle denkliği

Yatışkın olmayan-hal

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{V_1}{V} (C_0 - C_1) - k(T_1) C_1 \quad (3.1)$$

Yatışkın-hal

$$\frac{dC_1}{dt} = 0 \text{ ve } C_1 = C_1^0 \quad (3.2)$$

buradan;

$$C_1^0 = \frac{C_0}{1 + \frac{k(T_1^0) V}{V_1}} \quad (3.3)$$

ii. Enerji denkliği

Yatışkın olmayan-hal

$$\rho_1 V_1 C_{p1} T_0 = \rho_1 V_1 C_{p1} T_1 + \rho_2 V_2 C_{p2} (\theta_5 - \theta_4) - k(T_1) V C_1 (-\Delta H) + \rho_1 V C_{p1} \frac{dT_1}{dt} \quad (3.4)$$

veya

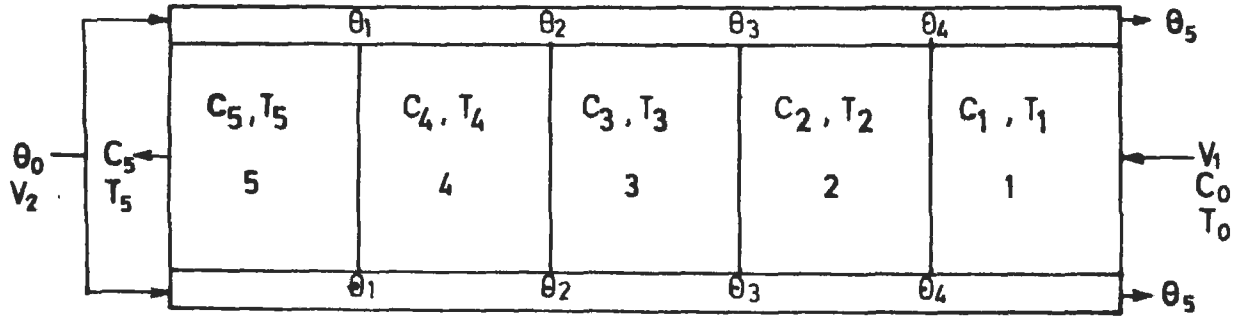
$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{V_1}{V} (T_0 - T_1) - \frac{\rho_2 V_2 C_{p2}}{\rho_1 V C_{p1}} (\theta_5 - \theta_4) - \frac{\Delta H C_1 k(T_1)}{\rho_1 C_{p1}} \quad (3.5)$$

Yatışkın-hal

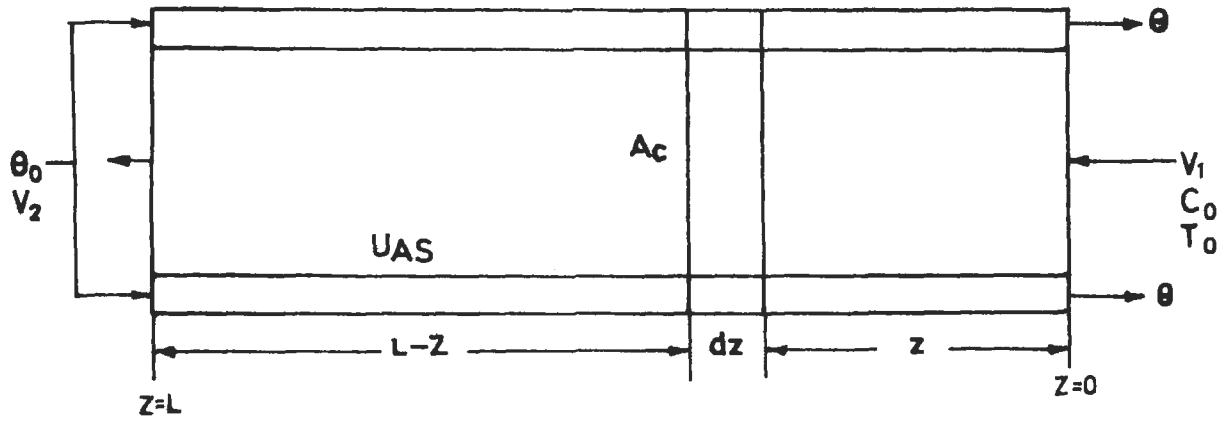
$$\frac{dT_1}{dt} = 0 \text{ ve } T_1 = T_1^0 ; \theta_1 = \theta_1^0 \quad (3.6)$$

buradan;

$$T_1^0 = T_0 - \frac{\rho_2 V_2 C_{p2}}{\rho_1 V_1 C_{p1}} (\theta_5^0 - \theta_4^0) - \frac{k(T_1^0) V \Delta H C_1^0}{\rho_1 V_1 C_{p1}} \quad (3.7)$$



Beş tam karıştırmalı akım reaktörleri



Borusal akım reaktörü

Şekil 3.1. : Yatışkın-halde beş tam karıştırmalı ve borusal akım reaktörleri

veya

$$T_1^O = T_0 - \frac{\rho_2 V_2 C_{p2}}{\rho_1 V_1 C_{p1}} (\theta_5^O - \theta_4^O) - \frac{k(T_1^O) V \Delta H C_0}{\rho_1 V_1 C_{p1} (1 + \frac{k(T_1^O) V}{V_1})} \quad (3.8)$$

iii. Ceket içindeki akışkan için enerji denkliği

Yatışkın olmayan-hal

$$V_2 \rho_2 C_{p2} \theta_4 + UA (T_1 - \theta_5) = V_2 \rho_2 C_{p2} \theta_5 + M_c C_{p2} \frac{d\theta_5}{dt} \quad (3.9)$$

Yatışkın hal

Denklem (3.9)' un zaman sabiti çok küçüktür bu nedenle birikim terimi ihmal edilmiştir, bununla ilgili açıklamalar Ek-1'de verilmiştir.

$$\theta_4 = T_1 - (T_1 - \theta_5) \exp(UA / \rho_2 V_2 C_{p2}) \quad (3.10)$$

3.2. Borusal Akım Reaktörünün Yatışkın ve Yatışkın Olmayan-Hal Denklemleri

Borusal akım reaktörünün matematiksel modeli aşağıda verilmiştir. Şekil 3.1.

i. Borusal akım reaktörü için kütle denkliği

Yatışkın olmayan-hal

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_1}{A_c} \frac{\partial C}{\partial Z} + k(T) C = 0 \quad (3.11)$$

Yatışkın-hal

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0; \quad \frac{dC}{dZ} + \frac{A_c k(T)}{V} C = 0 \quad (3.12)$$

ii. Enerji denkliği

Yatışkin olmayan-hal

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{V_1}{A_c} \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} + \frac{UA_s}{\rho_1 C_{p1} A_c} (T-\theta) + \frac{k(T)\Delta H_c}{\rho_1 C_{p1}} = 0 \quad (3.13)$$

Yatışkin hal

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{dT}{dZ} + \frac{k(T)A_c\Delta H_c}{\rho_1 V_1 C_{p1}} + \frac{UA_s}{\rho_1 C_{p1} V_1} (T-\theta) = 0 \quad (3.15)$$

iii. Ceket içindeki akışkan için enerji denkliği

Yatışkin olmayan hal

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{V_2}{A_3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{UA_s}{\rho_2 C_{p2} A_3} (T-\theta) \quad (3.16)$$

Yatışkin hal

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Z} + \frac{UA_s}{\rho_2 C_{p2} V_2} (T-\theta) = 0 \quad (3.18)$$

Şekil 3.1. den yatışkin-hal için sınır şartları,

$$C(0) = C_0 ; T(0) = T_0 ; \theta(L) = \theta_0$$

Yatışkin olmayan-hal sınır şartları;

$$C(Z,0) = C(Z)_{ss} ; T(Z,0) = T(Z)_{ss} ; \theta(Z,0) = \theta(Z)_{ss}$$

$$C(0,t) = C_0 ; T(0,t) = T_0 ; \theta(L,t) = \theta_0$$

olarak alınabilir. Bu denklemlerin çözüm yöntemleri Bölüm 4' de verilmiştir.

BÖLÜM 4

MATEMATİK MODELİN ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Bir önceki bölümde verilen tam karıştırmalı ve borusal akım reaktörlerinin dinamik modelleri için çeşitli çözüm yöntemleri önerilmiştir. Bu önerilerden Laplace dönüşümü, sayısal, analog ve hibrid bilgisayarlar ile çözüm yöntemleri verilmiştir.

4.1. Analitik Çözüm Yöntemleri

Sistemlerin dinamik özellikleri adi veya kısmi türevli differansiyel denklemlerle ifade edilebilirler. Sistemleri karakterize eden differansiyel denklemler sabit veya değişken katsayılı olabildiği gibi temelde doğrusal veya doğrusal olmayan differansiyel denklemler şeklinde ikiye ayrılırlar.

Birçok analitik çözüm yöntemleri bu iki grup için geliştirilmiş olup bunlardan biri Laplace dönüşümü yöntemidir.

Laplace dönüşümü doğrusal differansiyel denklemlerin çözümü için çok kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde önce differansiyel denklemin Laplace dönüşümü elde edilir ve bir takım matematiksel işlemlerden sonra çözümü elde edebilmek için ters Laplace dönüşümü yapılır.

Dinamik ve kontrol çalışmalarında, sistemlerin differansiyel denklemlerini sapma değişkenleri cinsinden yazıp Laplace dönüşümlerini alarak blok diyagramları ile göstermek çok yaygındır. Borusal akım reaktörlerinin kademeli-parametreli modelleri blok diyagramları ile kolayca ifade edilebilir.

Doğrusal olmayan differansiyel denklemlerin genel bir çözüm yöntemi olmamakla beraber, özel bir takım yöntemler geliştirilmiştir.

i. Doğrusallaştırma yöntemi

Bu yöntemde doğrusal olmayan differansiyel denklemler Taylor serisine açılarak doğrusallaştırılır. Reaktörün yatışkın-halden uzaklaşması küçük sınırları içinde kaldığı takdirde, reaktör model denklemlerindeki doğrusal olmayan terimlerin yatışkın-hal etrafında doğrusallaştırılması modelin çözümlenmesini ve model ile yapılacak hesaplamaları kolaylaştıracaktır. Doğrusallaştırma işlemi söz konusu terimleri yatışkın-hal etrafında Taylor serisi açılımı biçiminde yazıp, birinci dereceden yüksek terimleri ihmal ederek yapılır.

ii. Faz-düzlemi ile çözüm yöntemi

Bu çözüm yönteminde durum değişkenlerinin yardımı ile zaman elimine edilir. Faz-düzlemi kullanılarak denklemlerin çözüm ve analizleri analog, hibrid ve sayısal bilgisayarlar ile yapılır.

iii. Liapunov'un dolaylı ve dolaysız çözüm yöntemi

Liapunov'un kararlılık ilkesine göre; $V(X_1, X_2)$ fonksiyonu merkezin tek bir nokta (singular) olması; aşağıda verilen şartları sağlaması koşulu halinde kararlıdır denir.

Liapunov'un kararlılık şartları :

a. $V(X_1, X_2)$, X_1 ve X_2 nin her değerinde sıfır veya pozitiftir.

b. $\frac{dV}{dt}$ hiç bir zaman pozitif olamaz. Eğer fonksiyon orijin haricinde sıfır değilse; asimtotik kararlıdır denir.

iv. Tanım fonksiyonu (Discribing function) ile analiz yöntemi; periyodik ve sinüs girdileri için bu yöntem daha uygundur.

v. Doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol sistemleri için geliştirilen teknikler.

Bu teknikler aşağıda sırasıyla sunulmuştur :

- a. Kök geometrisi (Root locus) yöntemi.
- b. Sıklık kuramı ve yöntemi.
- c. Routh ve Hurwitz yöntemi

Yukarıda verilen tüm yöntemler literatürden detaylı olarak bulunabilir [19,25 -27].

4.2. Sayısal Bilgisayar İle Çözüm

Tam karıştırmalı akım reaktörlerinin geliştirilen model denklemleri yatışkın hal, yatışkın olmayan-hal ve kontrol şartları için sayısal bilgisayarda çözülmüştür. Bu şartlar için çözüm yöntemleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

4.2.1. Yatışkın-hal çözümü

Yatışkın olmayan-hal denklemlerinin çözümü için başlangıç şartları gerekmektedir. Tam karıştırmalı akım reaktörlerinin yatışkın-hal denklemleri çözülerek, yatışkın olmayan-halin integrasyonu için başlangıç şartları elde edilir. Bu

işlemede tüm giriş şartlarının belli olması gerekir. Sistemde soğutma suyu ters yönde girmesinden dolayı birinci kademedan çıkan soğutma suyu sıcaklığı belli değildir. Yatışkın-hal denklemlerinin çözümü için çıkış soğutma suyu sıcaklığının bilinmesi gerekir. Bu sıcaklığın ve başlangıç şartlarının hesaplanması için Newton-Raphson iterasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem için soğutma suyunun birinci kademedan çıkış sıcaklığının tahmini değeri Golden-Section Search yöntemi ile bulunmuştur. Bu iki yöntem aşağıda sırası ile verilmiştir.

Yatışkın-hal denklemleri aşağıda tekrar verilirse;

$$C_1^O = \frac{C_0}{1 + \frac{k(T_1^O)V}{V_1}} \quad (3.3)$$

$$T_1^O = T_0 - \frac{\rho_2 V_2 C_{p2}}{\rho_1 V_1 C_{p1}} (\theta_5^O - \theta_4^O) - \frac{k(T_1^O)V \Delta H C_1^O}{\rho_1 V_1 C_{p1}} \quad (3.7)$$

veya

$$T_1^O = T_0 - \frac{\rho_2 V_2 C_{p2}}{\rho_1 V_1 C_{p1}} (\theta_5^O - \theta_4^O) - \frac{k(T_1^O)V \Delta H C_0}{\rho_1 V_1 C_{p1} (1 + \frac{k(T_1^O)V}{V_1})} \quad (3.8)$$

$$\theta_4 = T_1 - (T_1 - \theta_5) \exp(UA/\rho_2 V_2 C_{p2}) \quad (3.10)$$

Newton-Raphson Yöntemi :

Reaktörden çıkan akım sıcaklığının hesaplanması için kullanılır. Birinci tankın çıkış sıcaklığı için yazılırsa;

$$T_1^{(n+1)} = T_1^{(n)} - f(T_1^{(n)}) / f'(T_1^{(n)}) \quad (4.1)$$

n : İterasyon sayısı

$$f(T_1) = -T_1 + T_0 - \frac{\rho_2 V_2 C_{p2}}{\rho_1 V_1 C_{p1}} (\theta_5 - \theta_4) - \frac{k(T_1) V \Delta H_{C1}}{\rho_1 V_1 C_{p1}} \quad (4.2)$$

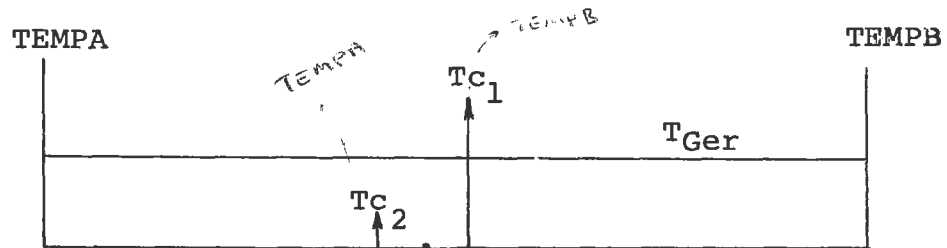
$$f'(T_1) = -1 - \frac{V \Delta H_{C1}}{\rho_1 V_1 C_{p1}} \cdot \frac{d(k(T_1))}{dT_1} \quad (4.3)$$

(4.2, 4.3) eşitlikleri yatışkın-hal denklemlerinden yararlanılarak oluşturulmuştur.

Golden-Section Search Yöntemi :

Birinci kademedan çıkan soğutma suyunun sıcaklığını tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu yöntemde verilen iki limit değer arasında çalışılarak, soğutma suyu sıcaklığı için en uygun değer aşağıdaki eşitlikten faydalanılarak bulunur.

$$\text{Hesaplanan değer} = \text{Alt limit} + \frac{\text{INTVAL} (T_{c1} - T_{c2})}{1.618} \quad (4.4)$$

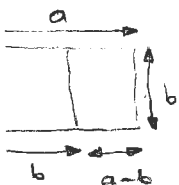


En düşük sıcaklık

En yüksek sıcaklık

Başlangıç şartlarının hesaplanmasında kullanılan işlem sırası aşağıda verilmiştir :

I. Soğutma suyu çıkış sıcaklığı (θ_5) in Golden-Section Search yöntemiyle ön tahmini yapılır.



$$\frac{a}{b} = \frac{b}{a-b}$$

-23-

$$a^2 = ab - b^2 = 0$$

$$\frac{a}{b} = \phi = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{5}) = 1.618$$

- II. (θ_5) değerine uygun olarak birinci kademe çıkış sıcaklığı (T_1^O) içinde varsayım yapılır.
- III. (3.40) denkleminde birinci kademeye giren soğutma suyu sıcaklığı (θ_4) hesaplanır.
- IV. (3.7) denkleminde (T_1^O) hesaplanır.
- V. Hesaplanan reaktör çıkış sıcaklığı değeri, varsayım değerine istenilen yakınlıkta ise ikinci tank hesaplarına geçilir, değilse hesaplanan T_1^O değeri ile iterasyon işleminin başına dönülür.
- VI. Bu işlemler kalan dört kademe için de tekrarlanır.
- VII. Son tanka giren soğutma suyunun (θ_0) hesaplanan ve gerçek değerleri karşılaştırılır, uygunluk yoksa birinci adıma dönülür, varsa iterasyon işlemi bitirilerek yatışkın olmayan-hal başlangıç şartları hesaplanmış olur.

Yatışkın-hal için sayısal bilgisayar çözümü ve akım şeması Ek-2'de verilmiştir.

4.2.2. Yatışkın olmayan-hal çözümü

Sayısal bilgisayar ile yatışkın olmayan-hal denklemlerinin çözümünde 4.dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılmıştır {29}. Bu yöntem için gerekli olan başlangıç şartları yatışkın-hal sayısal bilgisayar çözümünden elde edilmiştir.

Dördüncü dereceden Runge-Kutta eşitlikleri :

$$x_n = x_n^O + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (4.5)$$

Burada;

$$k_1 = hf(t_n^O, x_n^O)$$

$$k_2 = hf(t_n^O + \frac{h}{2}, x_n^O + \frac{k_1}{2})$$

$$k_3 = hf(t_n^O + \frac{h}{2}, x_n^O + \frac{k_2}{2})$$

$$k_4 = hf(t_n^O + h, x_n^O + k_3)$$

Çözümü istenen denklemler Runge-Kutta yöntemine uygun şekilde aşağıda düzenlenmiş olarak yeniden verilmiştir.

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{V_1}{V}(C_0 - C_1) - k(T_1)C_1 \quad (4.6)$$

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{V_1}{V}(T_0 - T_1) - \frac{\rho_2 V_2 C_{p2}}{\rho_1 V C_{p1}}(\theta_5 - \theta_4) + \frac{k(T_1)C_1(-\Delta H)}{\rho_1 C_{p1}} \quad (4.7)$$

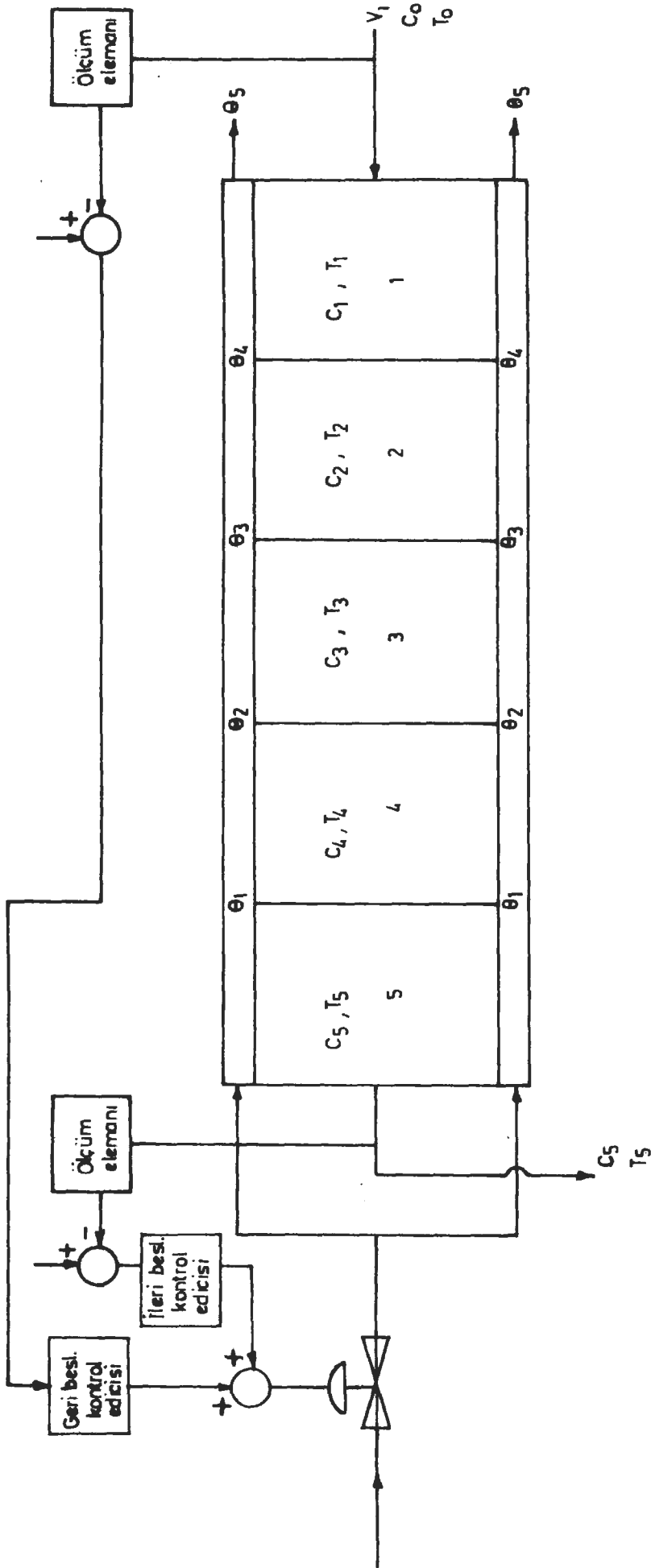
Bilgisayar çözümleri ve listesi Ek-3'de verilmiştir.

4.2.3. Kontrol Çözümü

Kullanılan beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin geri ve ileri beslemeli kontrolü Şekil 4.1. de gösterilmiştir. Kontrol programının çözümünde dinamik hesaplamalar düzeltilmiş (değiştirilmiş) Euler yöntemi ile yapılmıştır {29}.

Düzeltilmiş Euler eşitlikleri :

$$x_n = x_{n-1} + hf(t_{n-1}, x_{n-1}) \quad (4.8)$$



Şekil 4.1.1. : Beş tam karıştırmalı akım reaktörleri dizisinin ileri ve geri beslemeli kontrolü.

$$x'_n = x_{n-1} + h \frac{(f(t_{n-1}, x_{n-1}) + f(t_n, x_n))}{2}$$

Reaktörün çıkış sıcaklığını kontrol etmek için, ileri ve geri beslemeli kontrol yöntemleri kullanılmıştır.

Hesaplanan çıkış sıcaklığını alt program (MEAA) sistem gecikmelerini de gözönüne alarak ölçüm sinyali olarak verir.

Alt program (CNTRLA), ölçüm sinyalini alarak istenilen değerle mukayese ettikten sonra kontrol sinyali haline çevirir.

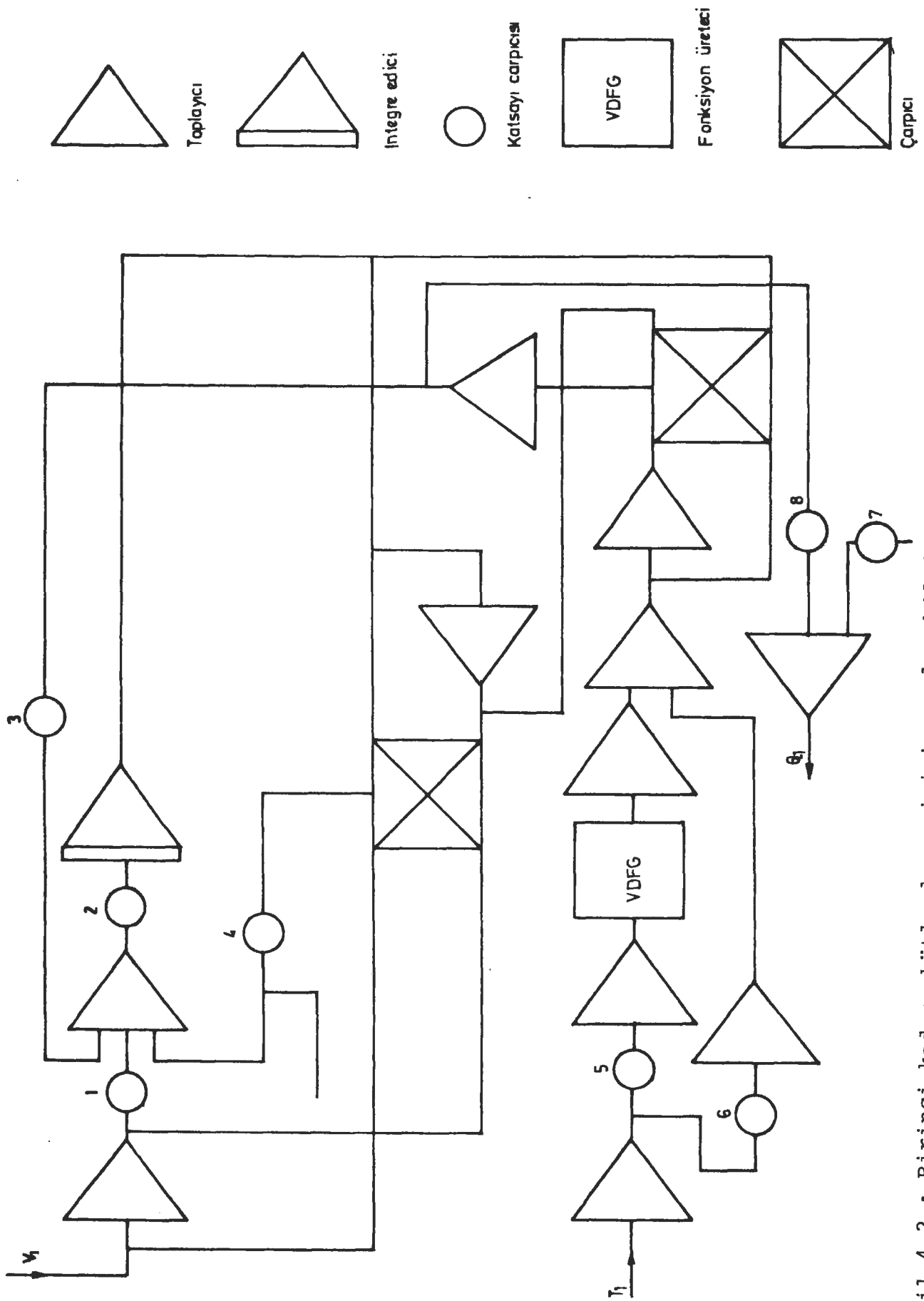
Alt program (VALVEA), kontrol sistemlerinden gelen sinyalleri toplar ve soğutma suyu akış hızını ayarlar.

İleri beslemeli kontrol alt programı (FFCB), sistemin giriş değişkeninde meydana gelen değişmeyi anında ölçerek ileri beslemeli kontrol sinyali olarak alt program (VALVEA)'ya gönderir.

Kontrol hesaplamaları ile ilgili tüm bilgisayar çözümleri ve akış şeması Ek-4'de verilmiştir.

4.3. Analog Bilgisayar İle Çözüm

Analog bilgisayarlar ile kademeli parametrelili sistemlerin çözümlerine literatürde çok rastlanmaktadır. [16, 30]. Kademeli parametrelili bir model olan beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin matematiksel modelleri, analog bilgisayar ile çözülebilirler. Birinci kademe için yapılan, analog bilgisayar ile kütle dengesinin çözümü Şekil 4.2. de gösterilmiştir. Burada VDFG ile gösterilen blok bir fonksiyon üreticisi olup



$k = A \exp (-\Delta H/RT)$ yi T ye karşı oluşturur. Şekil 4.2. de verilen programın beş kez tekrarlanmasıyla beş tam karıştırmalı akım reaktörünün çözümü analog bilgisayarda yapılır.

4.4. Hibrid Bilgisayar ile Çözüm

Analog bilgisayar ile çözümlerde kademe sayısı arttıkça kullanılan integratörlerin sayısı da artmaktadır. Bu ise büyük bir analog bilgisayar gerektirir ve çözüm pahalı bir işlem halini alır. Bunu engellemek için analog bilgisayarlara sayısal bilgisayarlar bağlanarak işlemler hem ucuz olarak ve hem de az integratör kullanılarak yapılır. Yukarıda bahsettiğimiz bu tip bilgisayarlara hibrid bilgisayarlar denir. Beş kademeli tam karıştırmalı akım reaktörlerinin kütle denkliklerinin bir kademesi analog bilgisayarda çözülür ve sayısal bilgisayarın hafızası kullanılarak tüm kademeler için işlem beş kez tekrar ettirilir. Hibrid bilgisayarı ile ilgili konular pek çok kitapta bulunabilir {21, 30}.

BÖLÜM 5

SAYISAL BİLGİSAYAR ÇÖZÜMLERİNDEN ELDE EDİLEN

KURAMSAL SONUÇLAR

Bu bölümde beş kademeli tam karıştırmalı akım reaktörlerinin besleme akış hızında verilen kademe ve ramp değişimlerinin çıkış sıcaklığına etkileri incelenmiştir. Alpbaz {1}, aynı sistemin akış hızındaki kademe değişiminin etkisine ilave olarak geri ve ileri beslemeli kontrol sistemlerinin aynı değişime karşı davranışlarını incelemiştir. Bu araştırmada önce sistemin yatışkın-halleri, kademe değişimi altında dinamiği ve ilave edilen ileri ve geri beslemeli kontrol sistemlerinin etkinliği üzerinde durulmuştur. Bu bilgilerin ışığı altında ramp değişiminin sisteme etkisi incelenmiştir. İleri ve geri beslemeli kontrol sistemlerinin, bu etki altındaki reaktörlerin çıkış sıcaklıklarını nasıl değiştirdiği hesaplanmıştır.

5.1 . Sayısal Bilgisayar Çözümlerinde Kullanılan Parametrelerin Değerleri

Sayısal bilgisayar çözümlerinde kullanılan parametrelerin değerleri aşağıda verilmiştir;

I. Reaksiyon hız sabiti;

$A \xrightarrow{k} B$ şeklinde birinci mertebeden tek yönlü ve ekzotermik bir reaksiyon seçilmiştir. Sıcaklığın bir fonksiyonu olan k reaksiyon hız sabitinin, aşağıdaki gibi olduğu kabul

edilmiştir.

$$k = Z \exp (-E/RT)$$

Z ve E değerleri Aris ve Amundson {28} 'un bir araştırmalarından alınmıştır.

$$Z = 6.3 \cdot 10^{15}; E = 24000 \text{ cal/mol}$$

k reaksiyon hız sabitinin sayısal bilgisayar programlarında kullanılabilmesi için aşağıdaki şekle dönüştürülmüştür.

$$k = \exp (36.49 - 12100/T)$$

II. Reaksiyon Isısı;

Sayısal bilgisayar çözümlerinde reaksiyon ısısı aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$\Delta H = -18600 \text{ cal/mol}$$

III. Besleme akımının derişimi ve sıcaklığı;

Bütün çalışmalarda besleme akımı giriş şartları $T_0 = 23^\circ\text{C}$, $C_0 = 0.5 \text{ mol/lt}$ olarak alınmıştır. Soğutma suyu sıcaklığı $\theta_0 = 5^\circ\text{C}$ olarak verilmiştir.

IV. Akış hızları;

Besleme akışı reaktörler içersinde durgun ve karışmayan bölgelerin oluşumunu engellemek için 1 ve 2 lt/dak hızlarında gönderilir. Soğutma suyu yatışkın-haller için 4 ile 20 lt/dak arasındaki akış hızlarında girer. Besleme akımına ramp etkisi uygulandığında akış hızlarında bir sınırlama yoktur.

V. Tek bir kademenin hacmi;

Bu araştırmada kullanılan birtek reaktörün hacmi $V = 3200 \text{ cm}^3$ olarak alınmıştır. Böylece beş tankın hacmi toplam olarak $V_T = 16000 \text{ cm}^3$ dir.

VI. Reaktör soğutma ceketinin toplam hacmi $V_{CT} = 240 \text{ cm}^3$, toplam soğutma yüzeyi $A_T = 1500 \text{ cm}^2$; birtek reaktör ceketinin hacmi $V_C = 96 \text{ cm}^3$ ve soğutma yüzeyi $A = 300 \text{ cm}^2$ dir.

VII. Isı iletim katsayısı;

Isı iletim katsayısı U nun soğutma suyu akış hızı ile değişimi Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Kullanılan akışkanın ve soğutma suyunun özellikleri aşağıda verilmiştir.

Isı kapasitesi, $C_p = 1.0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$

Yoğunluk, $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$

5.2. Sayısal Bilgisayar İle Elde Edilen Çözüm Sonuçları

5.2.1. Yatışkın-Hal Sonuçları

Beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin belli besleme ve soğutma suyu şartlarında yatışkın-hal denklemleri sayısal bilgisayarda çözümlere hesaplanmıştır. Bu kısımda çözüm sonuçları verilmiştir.

$(V_1 = 1 \text{ lt/dak}), (C_0 = 0,5 \text{ mol/lt}), (T_0 = 23^\circ\text{C})$ besleme akımı ile $(V_2 = 6 \text{ lt/dak}), (\theta_0 = 5^\circ\text{C})$ soğutma suyu beş tam

karıştırmalı akım reaktörlerine girdiği hal için hesaplanan yatışkın-hal şartları ve sonuçları Tablo 5.1. ve şekil 5.2-5.4. de verilmiştir.

Benzer şekilde 2.çalışma şartları Tablo 5.1. de verilmiştir. Bu yatışkın-hal için sayısal bilgisayar çözüm sonuçları şekil 5.5-5.7. de gösterilmiştir.

5.2.2. Yatışkın Olmayan-Hal Sonuçları

Beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin yatışkın olmayan-hal denklemleri besleme akış hızına kademe ve ramp değişimi verildiği iki ayrı hal için sayısal bilgisayarda çözülmüşlerdir. Aşağıda bu çözümler sırasıyla verilmiştir.

5.2.2.1. Kademe Etkisinde

Sistem bir önceki kısımda Tablo 5.1. ve şekil 5.2-5.4. de verilen şartlarda yatışkın-halde iken besleme akış hızında verilen kademe değişimi ile ($V_1 = 1$ lt/dak dan $V_1 = 2$ lt/dak) yatışkın olmayan-hale geçer. Sistemin bütün kademelerinden çıkış sıcaklık ve derişimlerinin ikinci yatışkın-hale geçişleri sayısal bilgisayar ile hesaplanmıştır. Sonuçlar şekil 5.8-5.13. de gösterilmiştir. Tüm sistem yaklaşık 14 dak.sürede Tablo 5.1. de gösterilen 2. yatışkın-hale gelir.

Bu kısımda elde edilen sonuçlara göre sistem bir evvelki kısımda verilen yatışkın-hal şartlarında ve dinamik özelliklerinde kararlılık (stability) göstermektedir.

5.2.2.2. Ramp Etkisinde

Bu kısımda beslemedeki akış hızına ramp etkisi verilerek sistemin dinamik özellikleri incelenmiştir. Çalışmalar kesikli ve kesiksiz olmak üzere iki ayrı ramp etkisinde yapılmıştır.

i. Kesiksiz ramp etkisi

Kısım 6.2.2.de verilen birinci çalışma şartlarında beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin besleme akış hızına verilen kesiksiz ramp etkileri ($B = 1.0, 0.5, 0.1$) altında çıkış değişkenlerinin yatışkın olmayan-hal denklemleri sayısal bilgisayarda çözülmüş sonuçlar Şekil 5.14-5.31.de verilmiştir.

ii. Kesikli ramp etkisi

Bir önceki kısımda kesiksiz ramp etkisinde sistemin ikinci bir yatışkın-hale gelmediği görülmüştür. Bu kısımda ise besleme akış hızında kesikli ramp etkisi kullanılarak sistemin ikinci bir yatışkın-hale gelip gelmediği incelenmiştir.

Beş tam karıştırmalı akım reaktörleri (5.2.1) kısmında verilen birinci yatışkın-hal şartlarında çeşitli ramp etkileri ($B = 1.0$) ve ($t = 8, 4, 2$ dak)'da kesilen besleme akış hızında verilmiştir. Şekil 5.32-5.49.da yatışkın olmayan-hal bilgisayar sonuçları gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sistemin çıkış sıcaklığı ve derişimi 8 dak.süresinde ikinci yatışkın-hale gelmektedirler.

5.2.3. Kontrol Sonuçları

Reaktörler kademe ve ramp etkisi altında iken ileri ve geri beslemeli kontrol sistemlerinin etkileri bu kısımda incelenmiştir.

5.2.3.1. Kademe Etkisinde

Bu kısımda, ileri ve geri beslemeli kontrol sistemlerinin sistem çıkış sıcaklığına etkileri incelenmiştir. Geri beslemeli kontrol sistemi için üç kontrol elemanı (P,I,D); ileri beslemeli kontrol için yalnız oransal kontrol elemanı kullanılmıştır. Sayısal bilgisayar ile hesaplama sonuçları Şekil 5.50-5.53. de verilmiştir. Çıkış değişkeni istenen değere 20 dak. sürede gelmektedir.

5.2.3.2. Ramp Etkisinde

Reaktör dizisinin besleme akış hızına verilen kesikli ve kesiksiz ramp değişimleri ile ileri ve geri beslemeli kontrol sistemlerinin çıkış sıcaklığına etkileri bu kısımda incelenmiştir.

1. Kesiksiz ramp

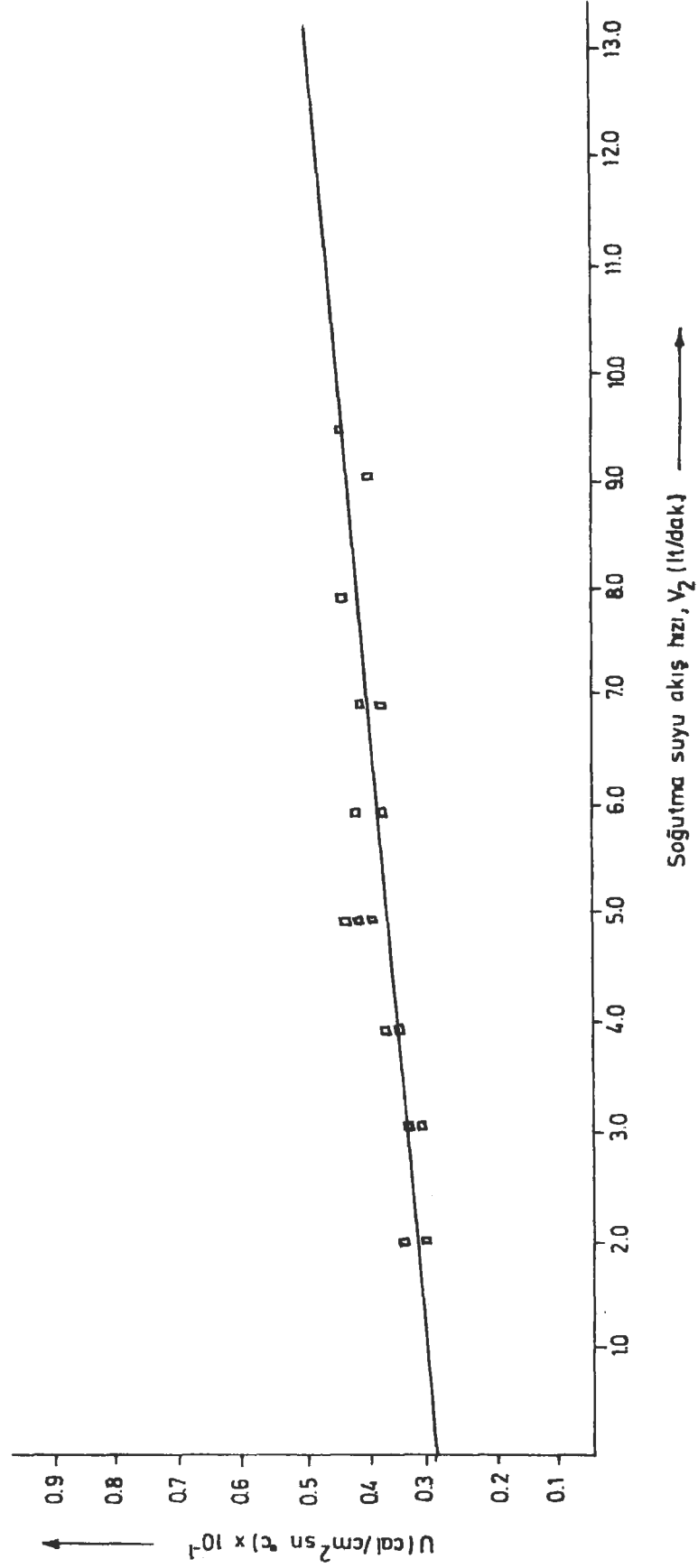
($B = 1.0, 0.5, 0.1$) değerlerine sahip kesiksiz ramp etkisini yok etmek için geri ve ileri beslemeli kontrol sistemleri kullanılmıştır. Hesaplama sonuçları Şekil 5.54-5.56. da gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi reaktör çıkış sıcaklığı istenen değere ulaşamamaktadır; çıkış sıcaklığının istenen değere yaklaşımı ancak kesikli ramp etkileri ile mümkün olacağı anlaşılmıştır. Bir sonraki kısımda kesikli ramp etkilerinde kontrol sistemi incelenmiştir.

ii. Kesikli ramp

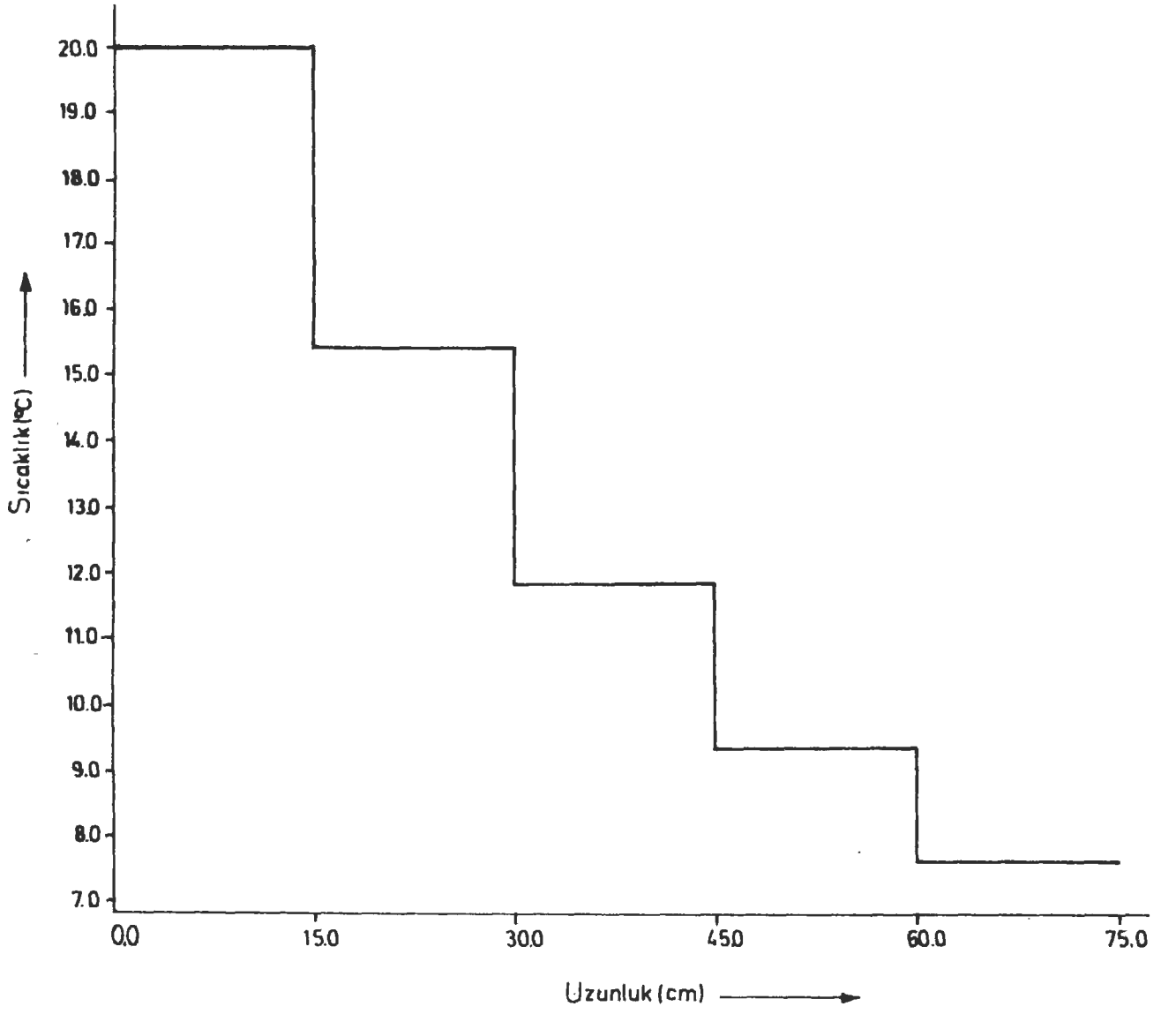
Bu çalışmada, ($B = 1.0, 0.5, 0.1$) değerlerine sahip ramp etkisi 2 dak.da kesilerek kontrol sistemlerinin işlevleri gözlenmiş, Şekil 5.57-5.59. ve çıkış sıcaklığı istenen değere yaklaşmıştır. Ancak ramp kesilme süresi kısaldıkça ve eğim azaldıkça istenen değerle ölçülen değer arasındaki fark küçülmüştür. 2 dak.lık ramp kesilmesinde ve ($B = 0.1$) iken en küçük fark veya en uygun kontrol elde edilmiştir.

Çalışma No	V_1 lt /dak	V_2 lt /dak	C_0 mol /lt	θ_0 °C	T_0 °C	Şekil No
1	1.0	6.0	0.5	5.0	23.0	5.2, 5.3, 5.4
2	2.0	6.0	0.5	5.0	23.0	5.5, 5.6, 5.7

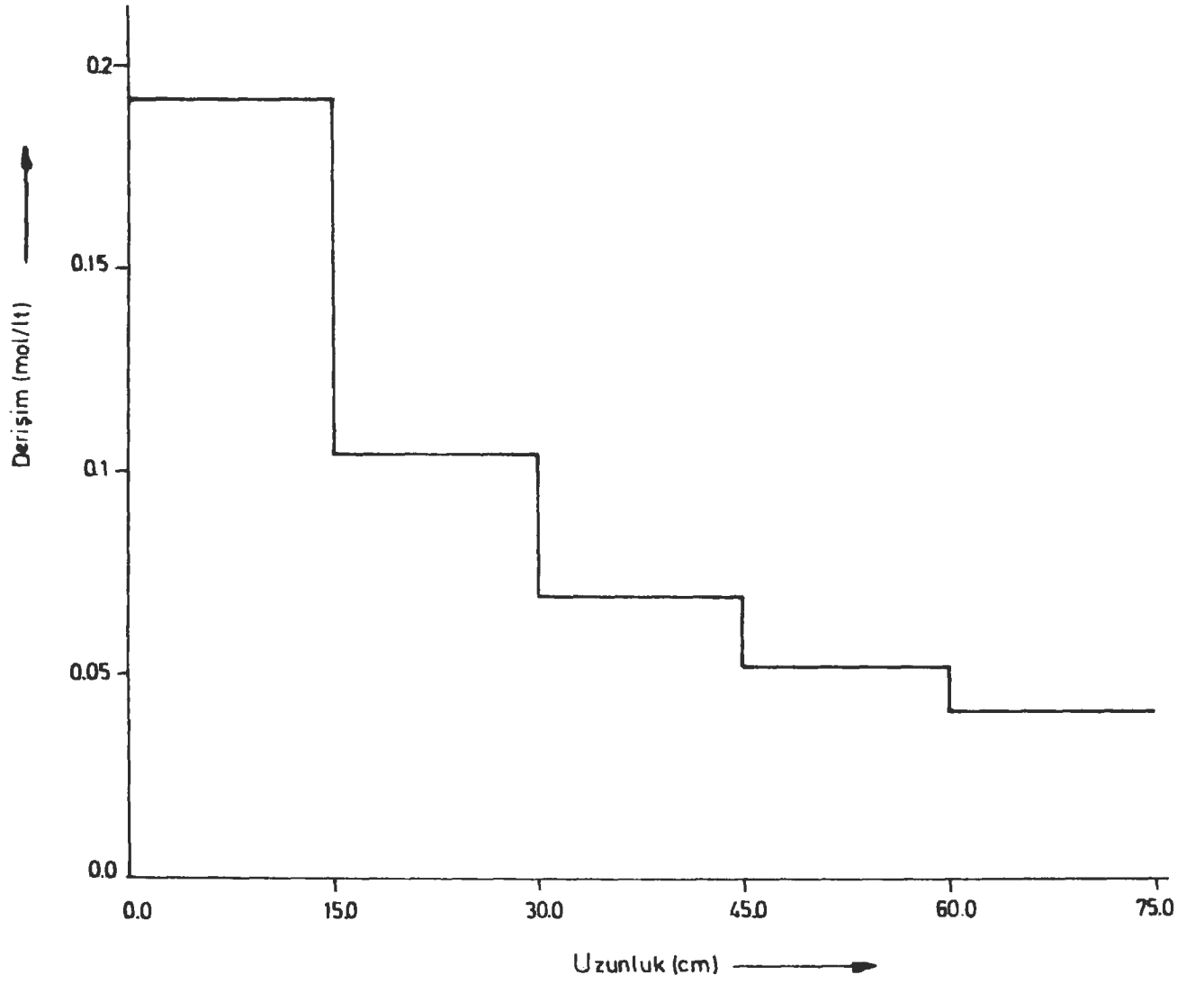
Tablo 5.1. :Yatışkın-halde beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin çalışma şartları.



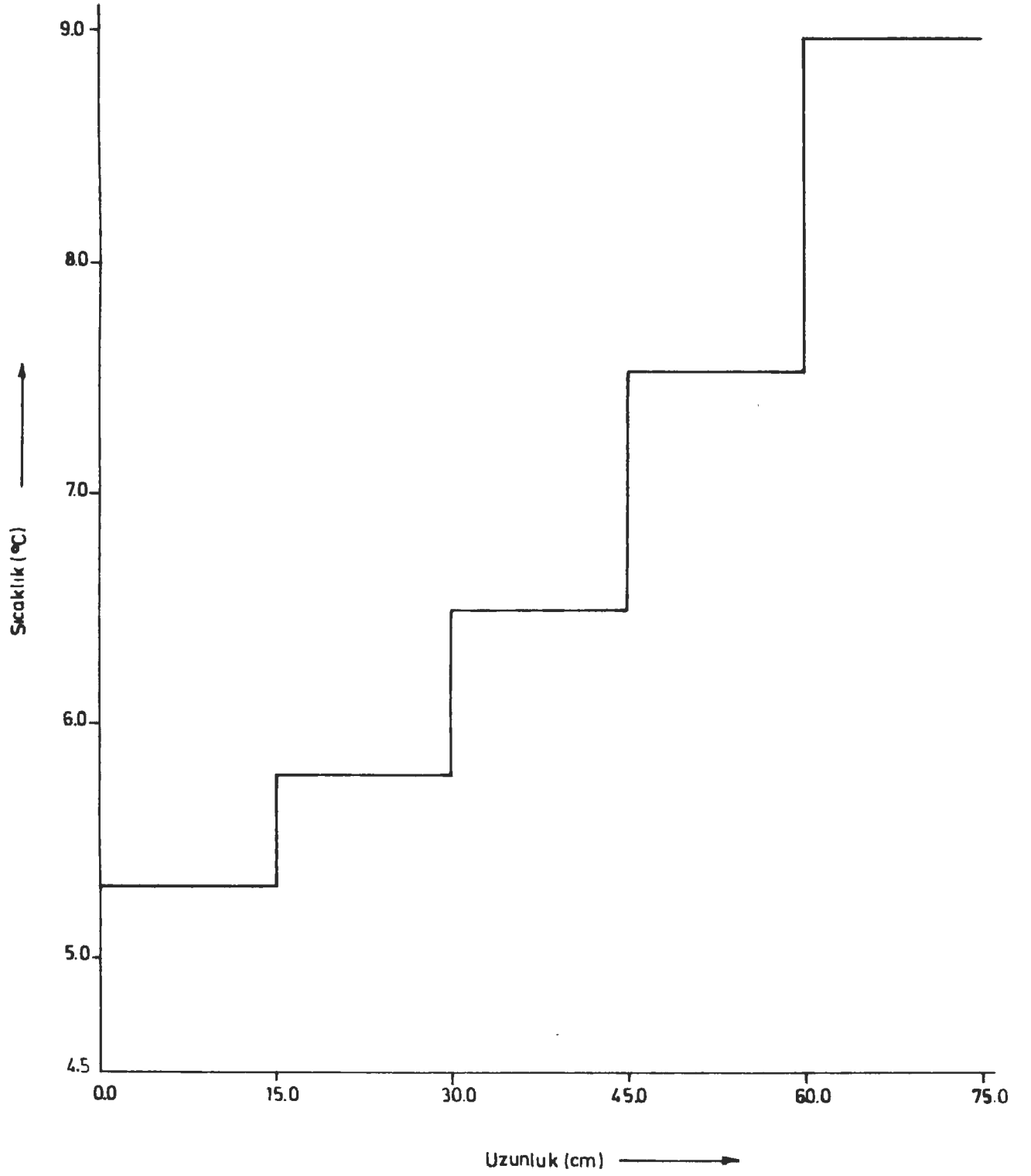
Şekil 5.1. : Isı transfer katsayısının soğutma suyu akış hızı ile değişimi.



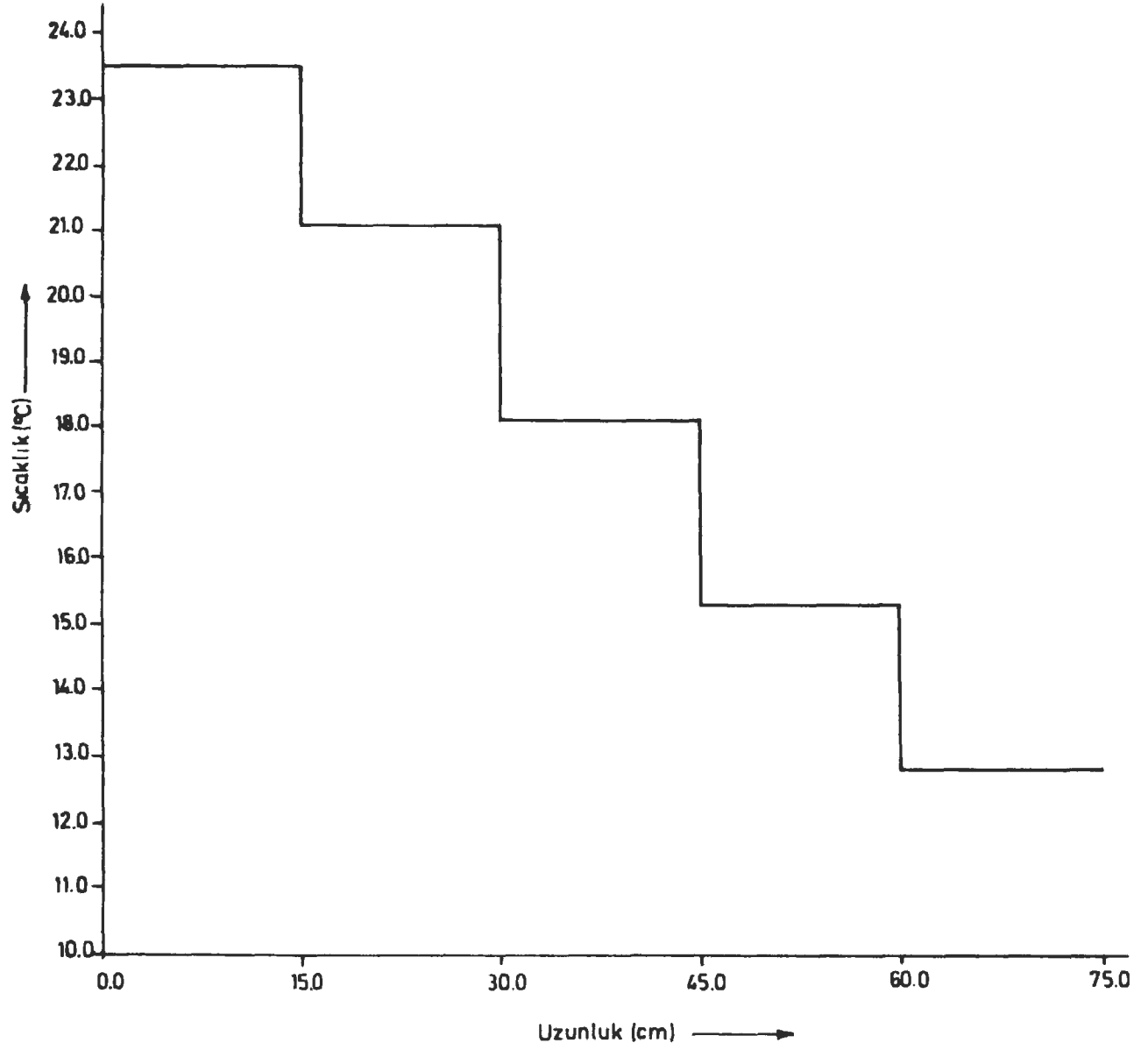
Şekil 5.2. : Yatışkın-halde beş tam karıştırmalı akım reaktörünün sıcaklık profili.



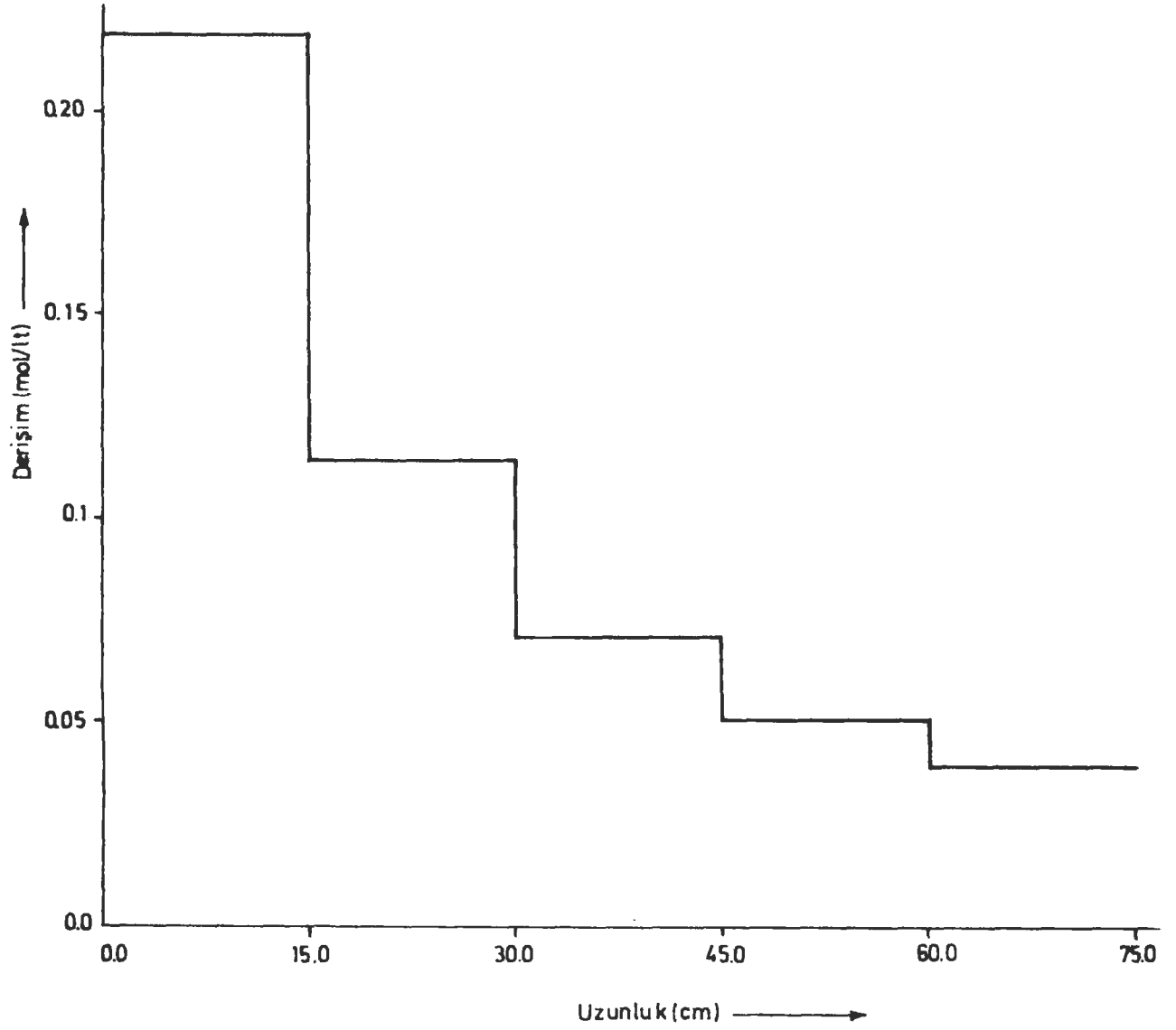
Şekil 5.3. : Yatışkın-halde beş tam karıştırmalı akım reaktörünün derişim profili.



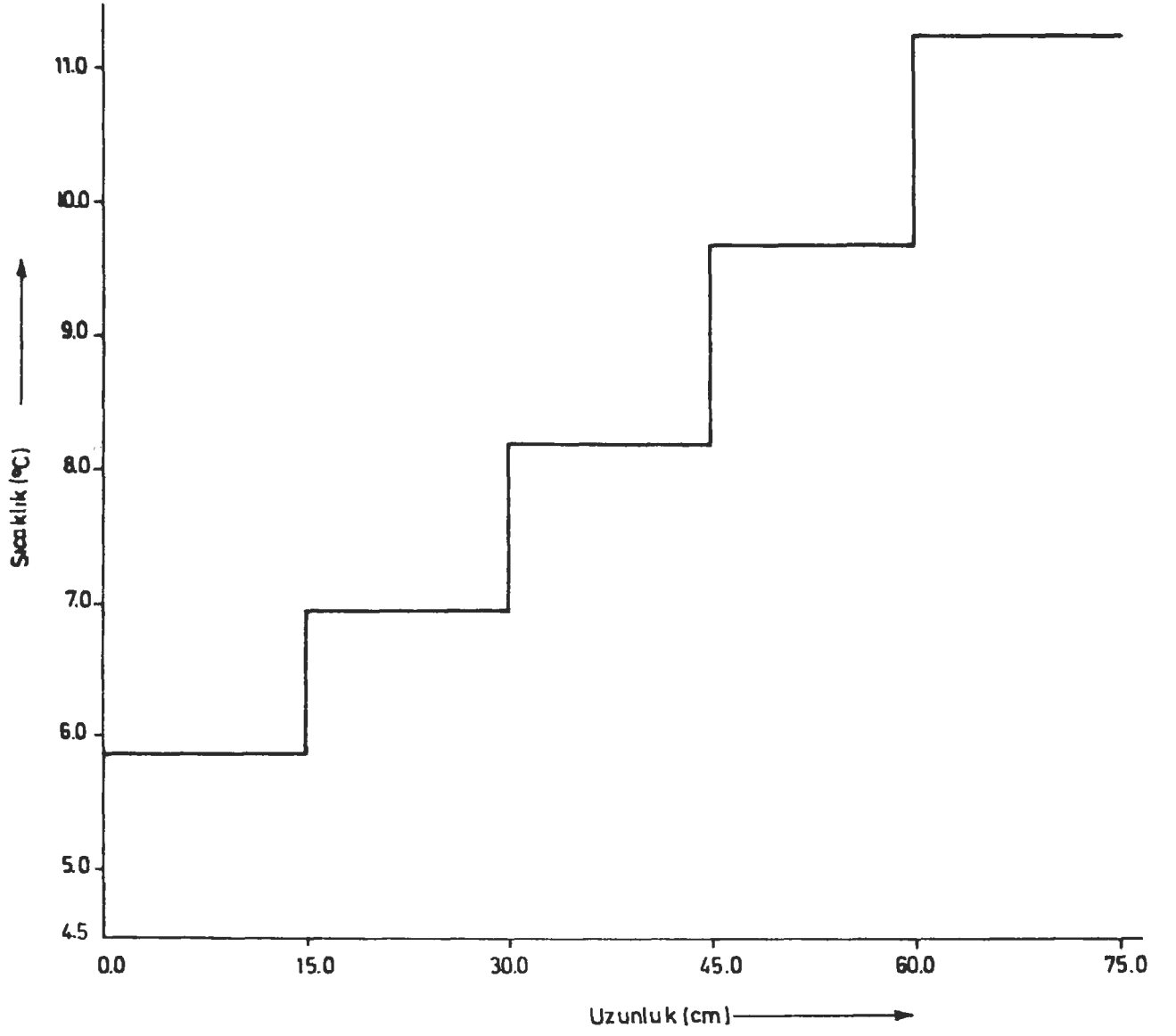
Şekil 5.4. : Yatışkın-halde beş tam karıştırmalı akım reaktörünün soğutma suyu sıcaklığı profili.



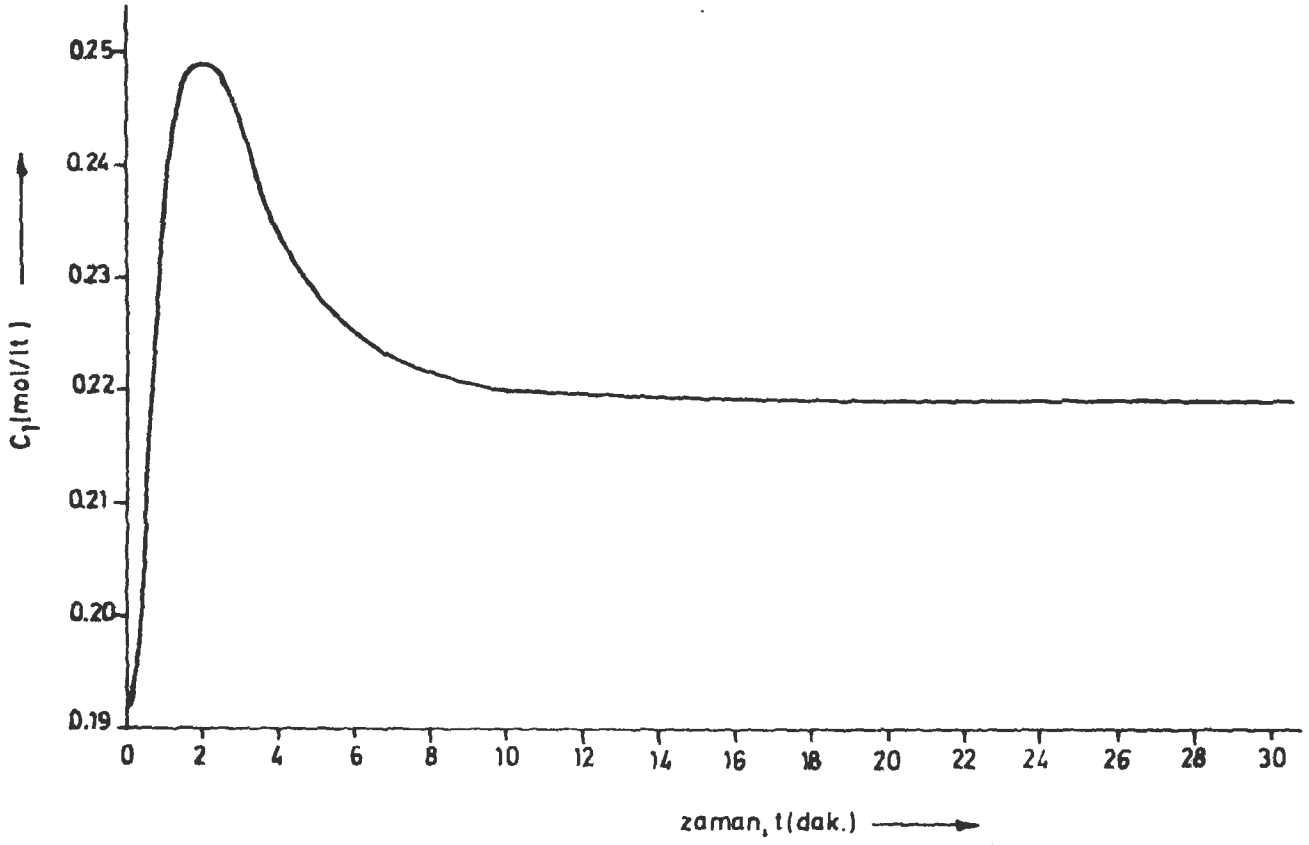
Şekil 5.5. : İkinci Yatışkın-halde beş tam karıştırmalı akım reaktörünün sıcaklık profili.



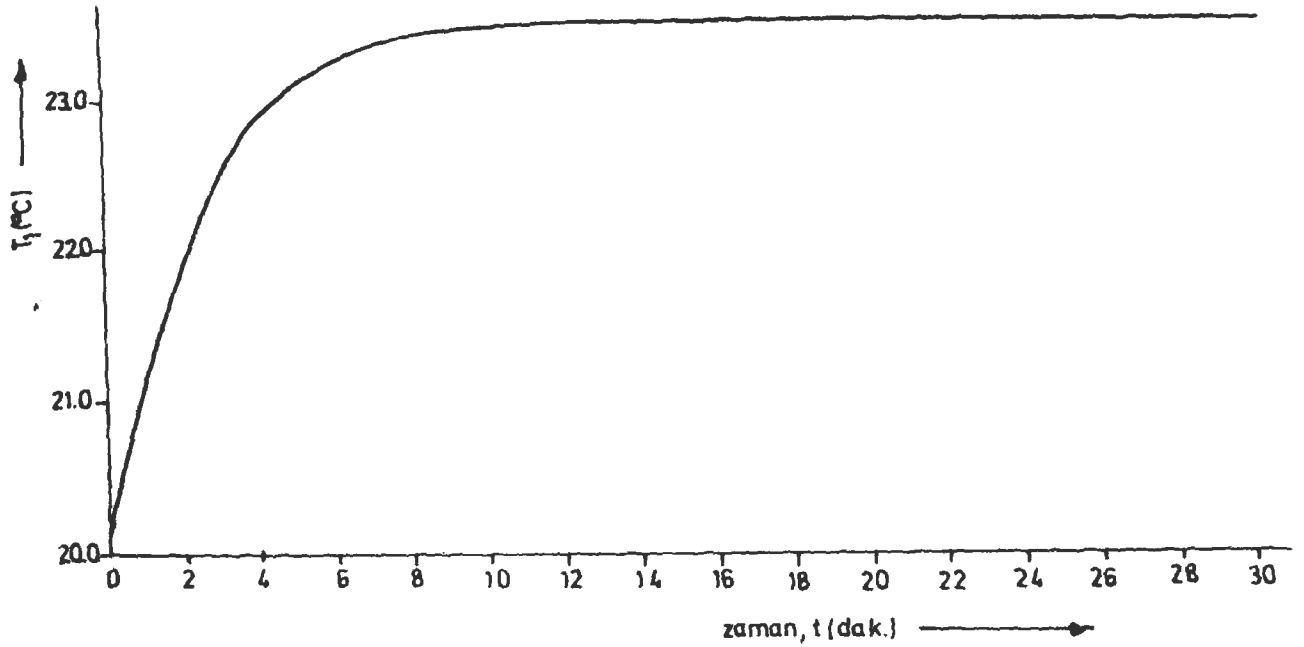
Şekil 5.6.: İkinci Yatışkın-halde beş tam karıştırmalı akım reaktörünün derişim profili.



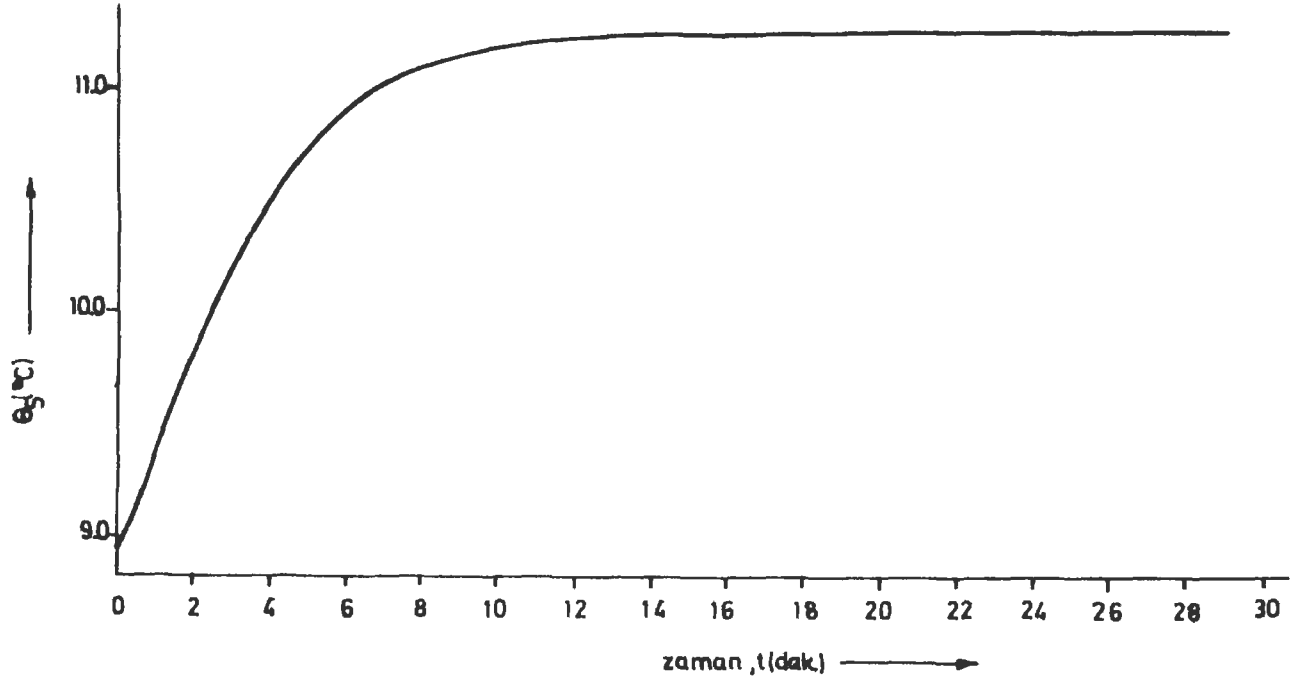
Şekil 5.7.: İkinci Yatışkın-halde beş tam karıştırmalı akım reaktörünün soğutma suyu sıcaklığı profili.



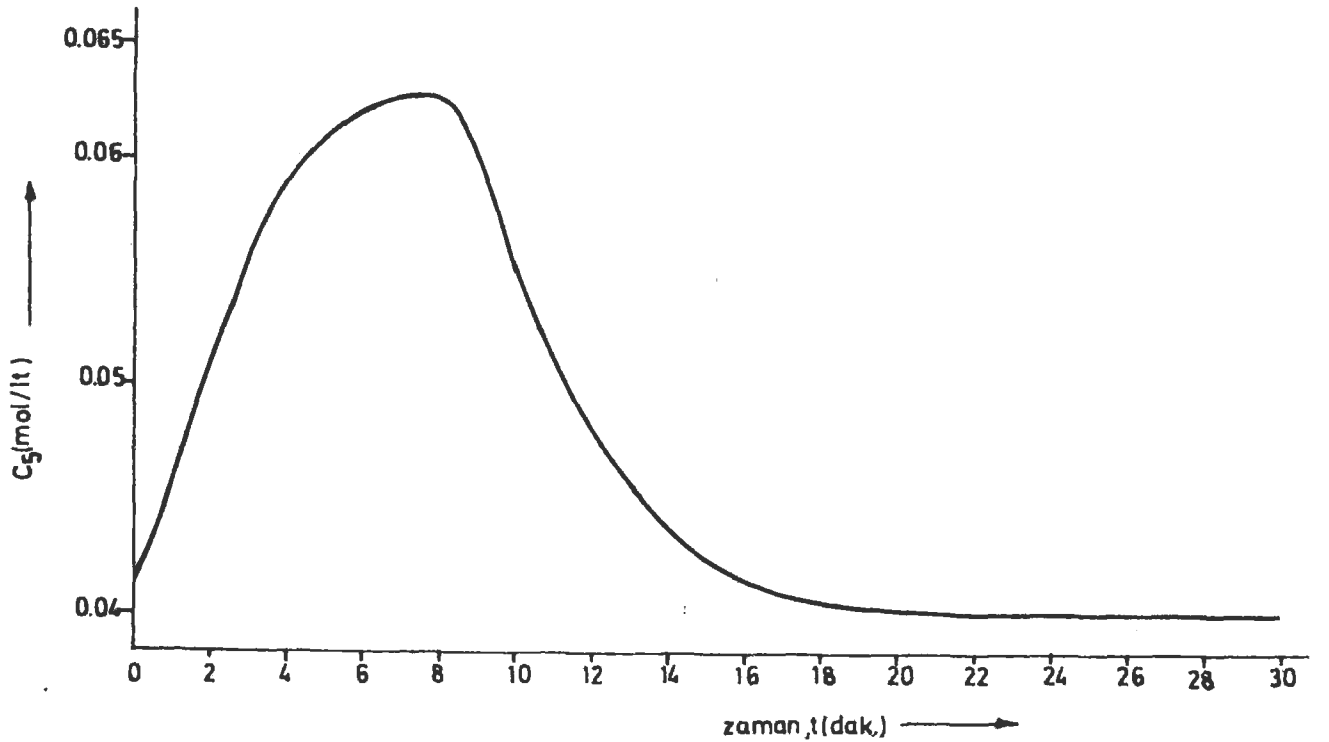
Şekil 5.8.: Besleme akış hızındaki kademe etkisinde, birinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi.



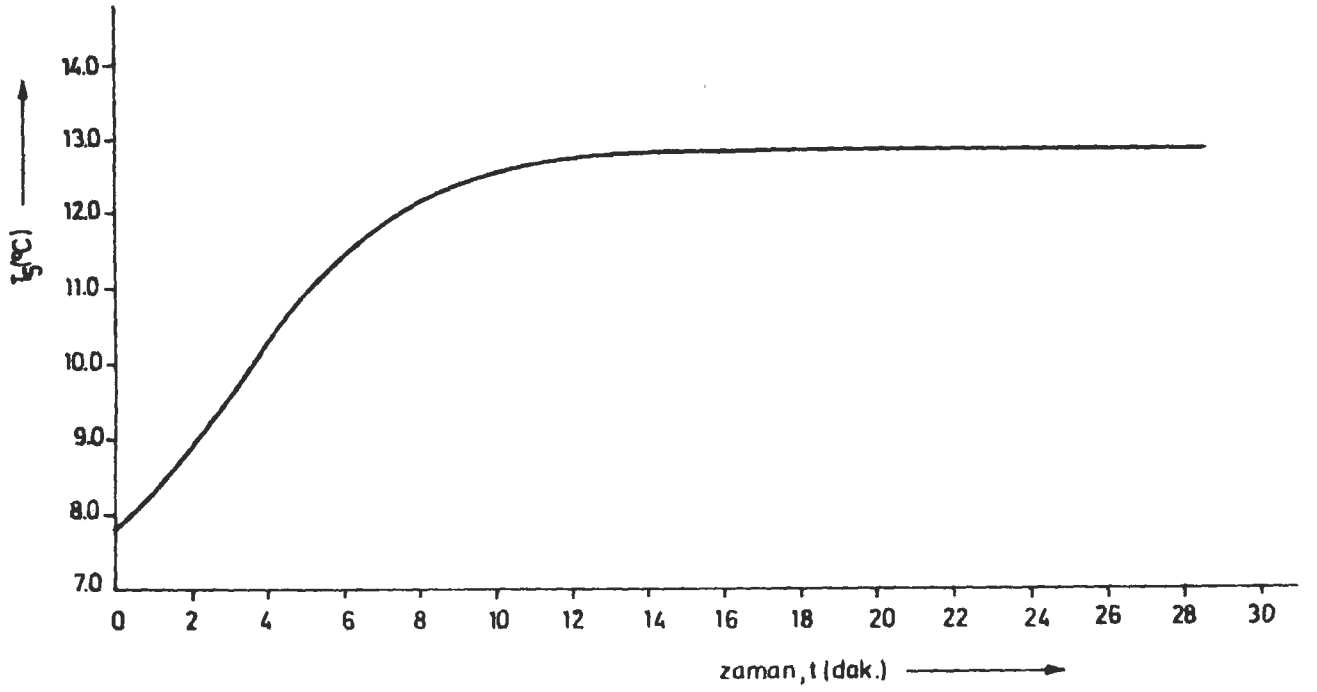
Şekil 5.9.: Besleme akış hızındaki kademe etkisinde, birinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.



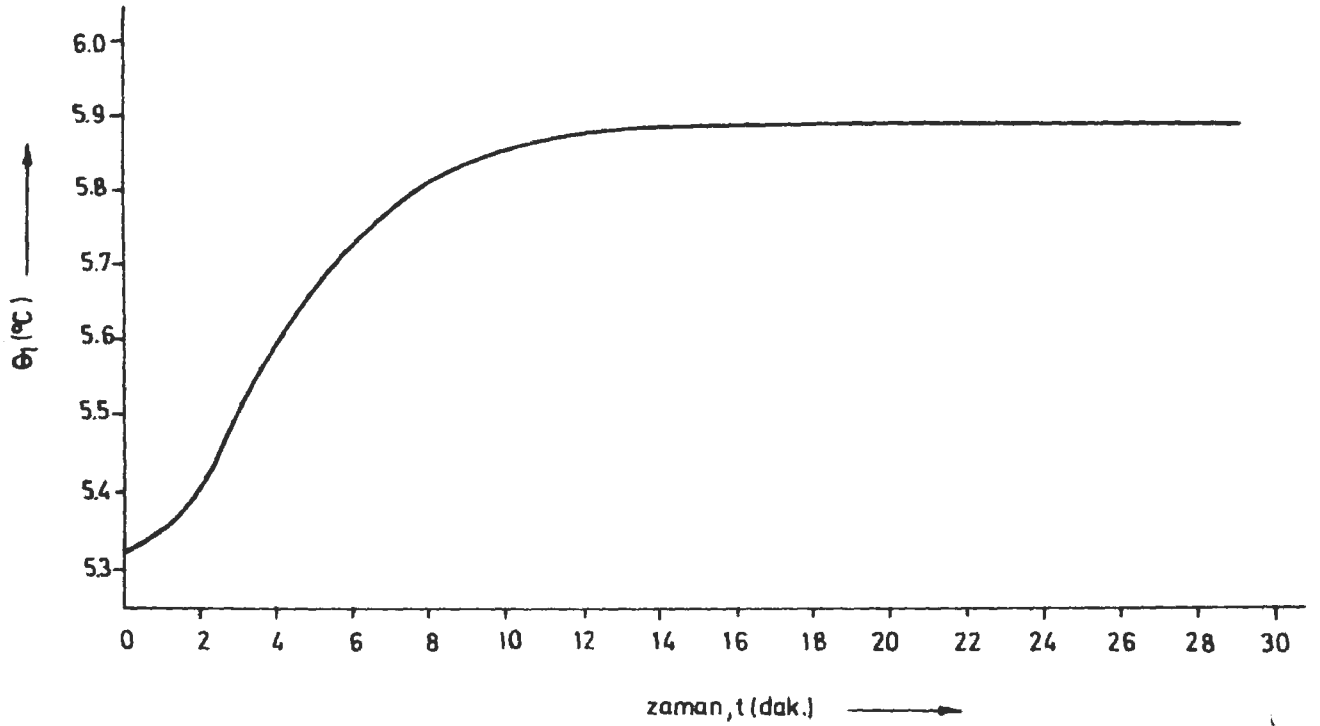
Şekil 5.10.: Besleme akış hızındaki kademe etkisinde, birinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.



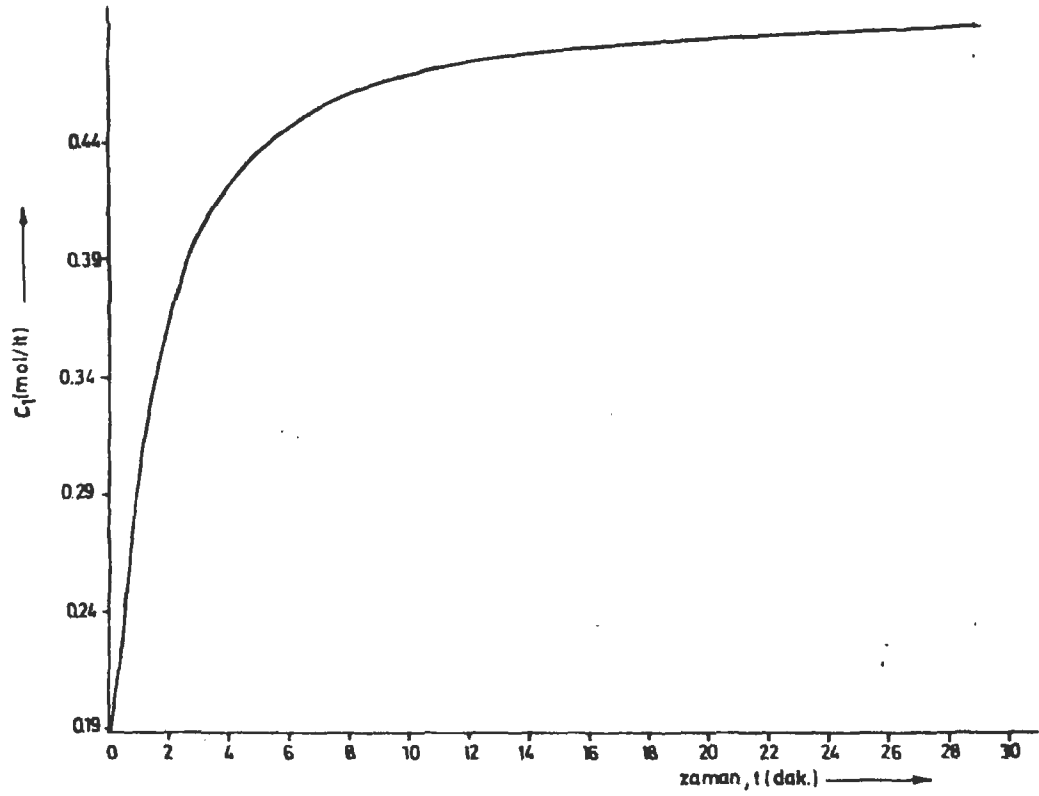
Şekil 5.11: Besleme akış hızındaki kademe etkisinde, beşinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi.



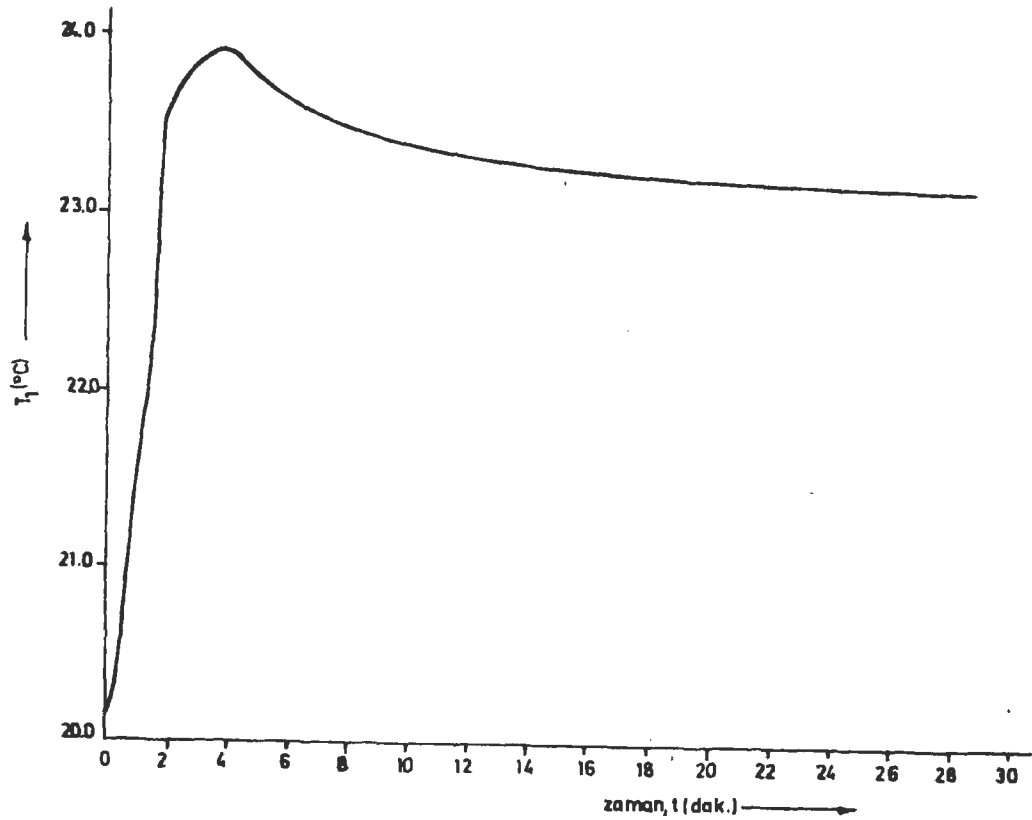
Şekil 5.12.: Besleme akış hızındaki kademe etkisinde, beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.



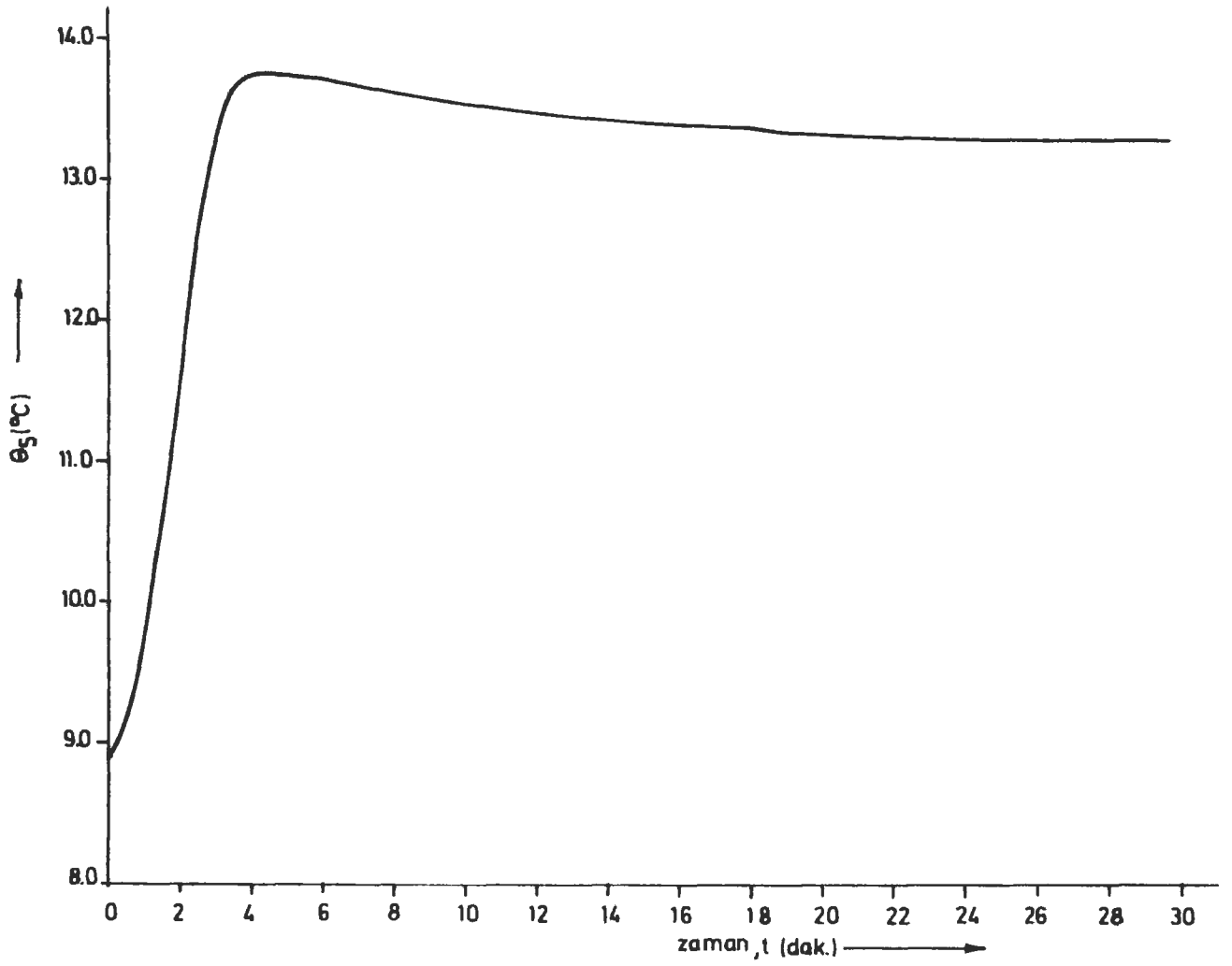
Şekil 5.13.: Besleme akış hızındaki kademe etkisinde, beşinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.



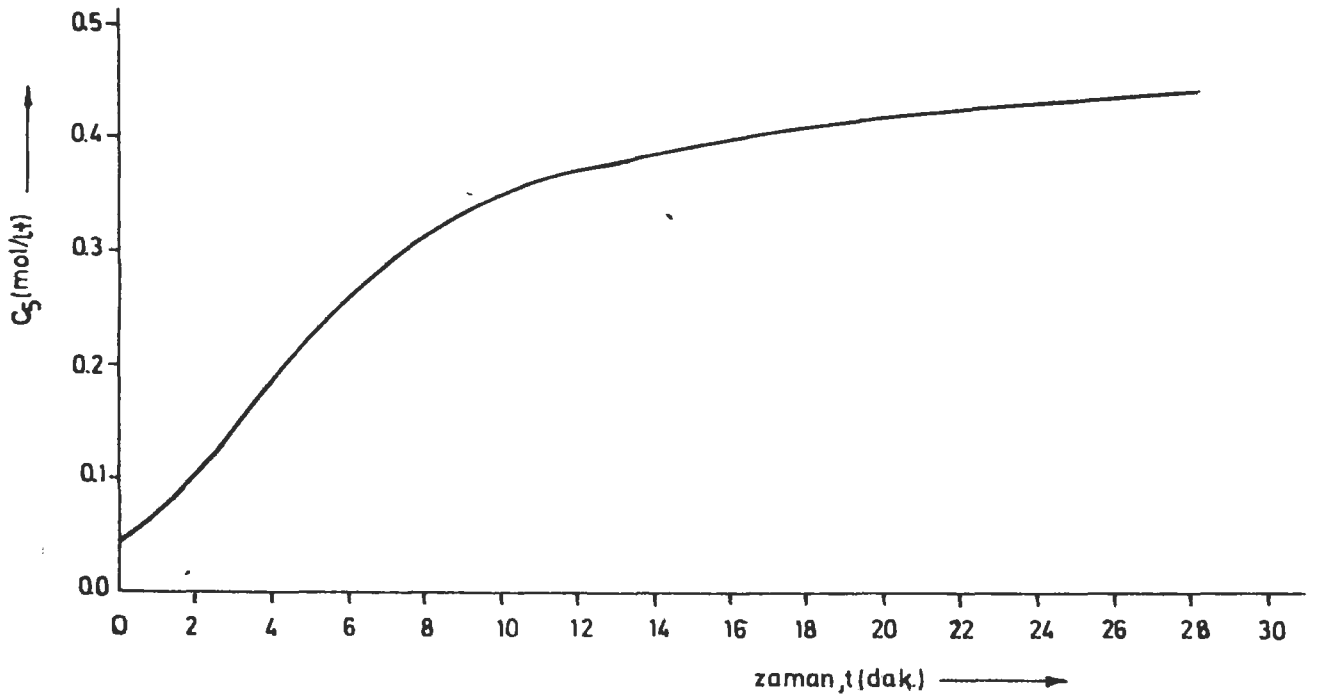
Şekil 5.14.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank çıkış derişiminin zamana göre değışimi ($B=1.0$).



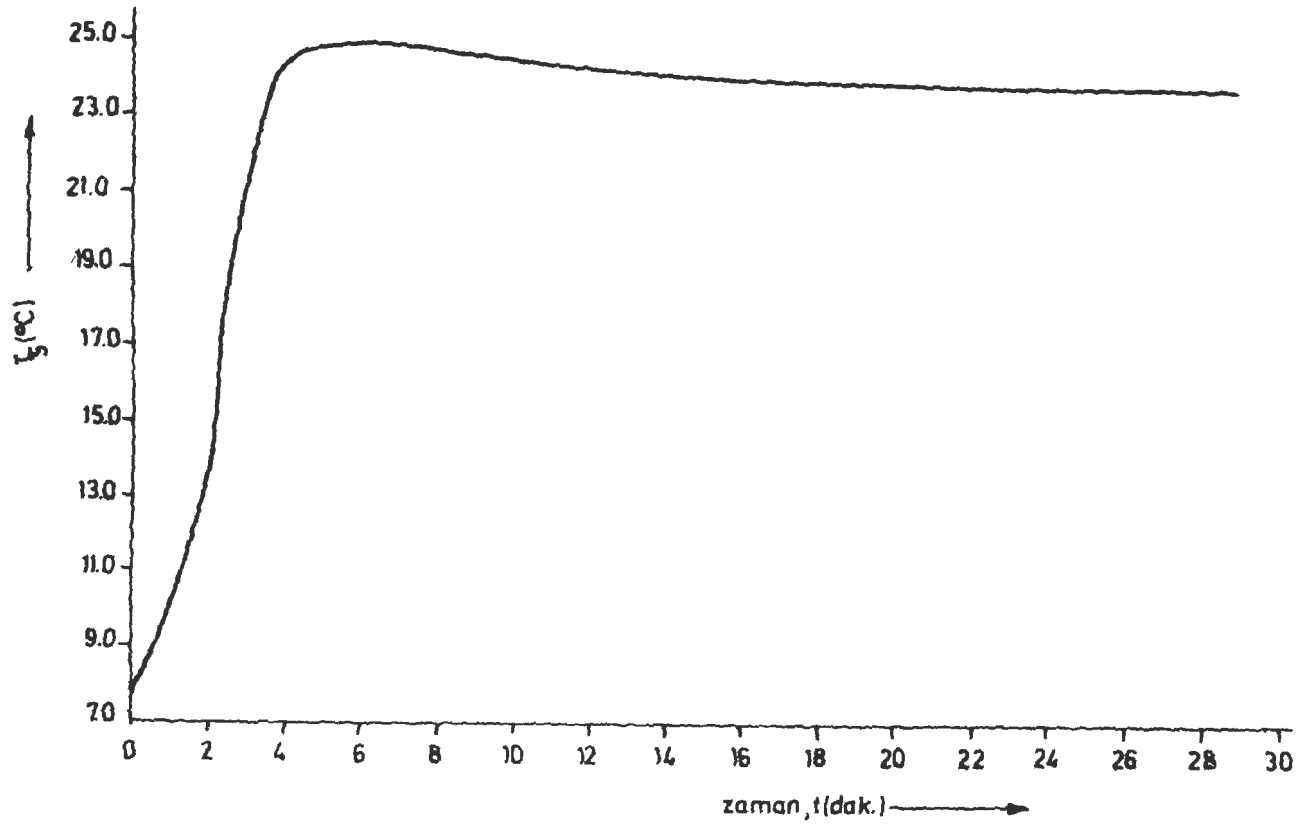
Şekil 5.15.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değışimi ($B=1.0$).



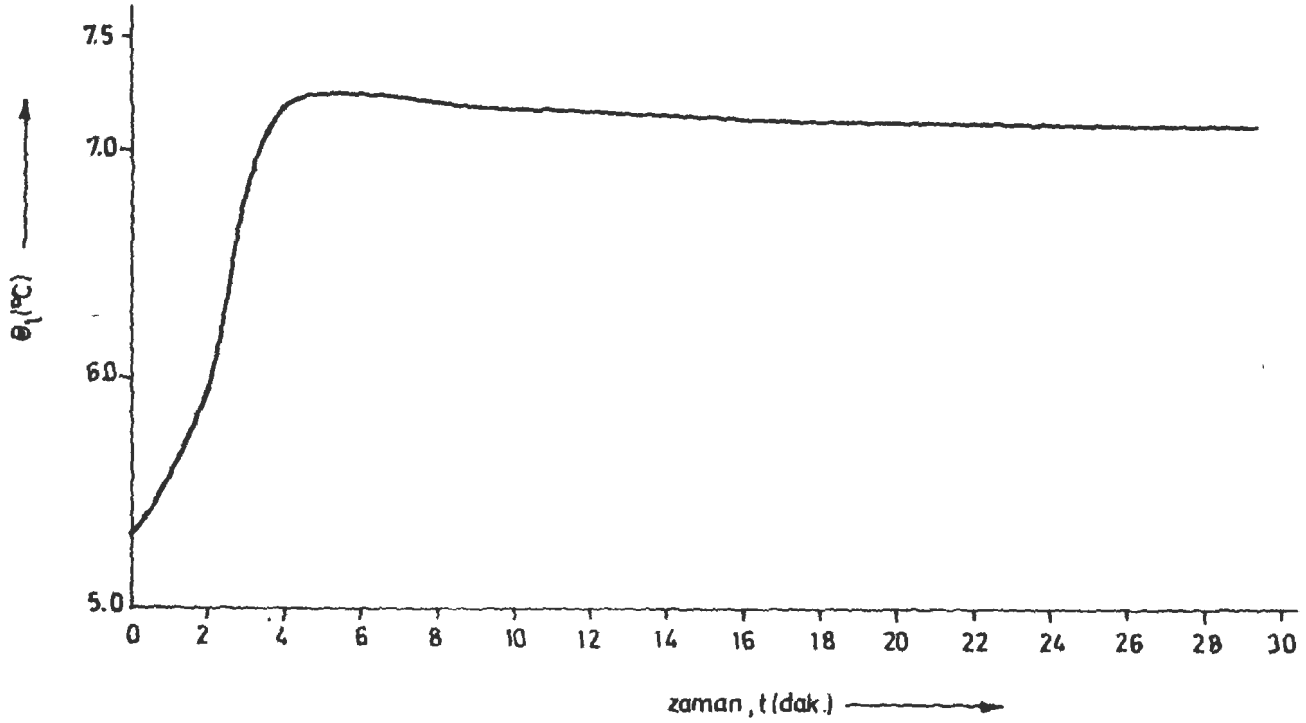
Şekil 5.16.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$).



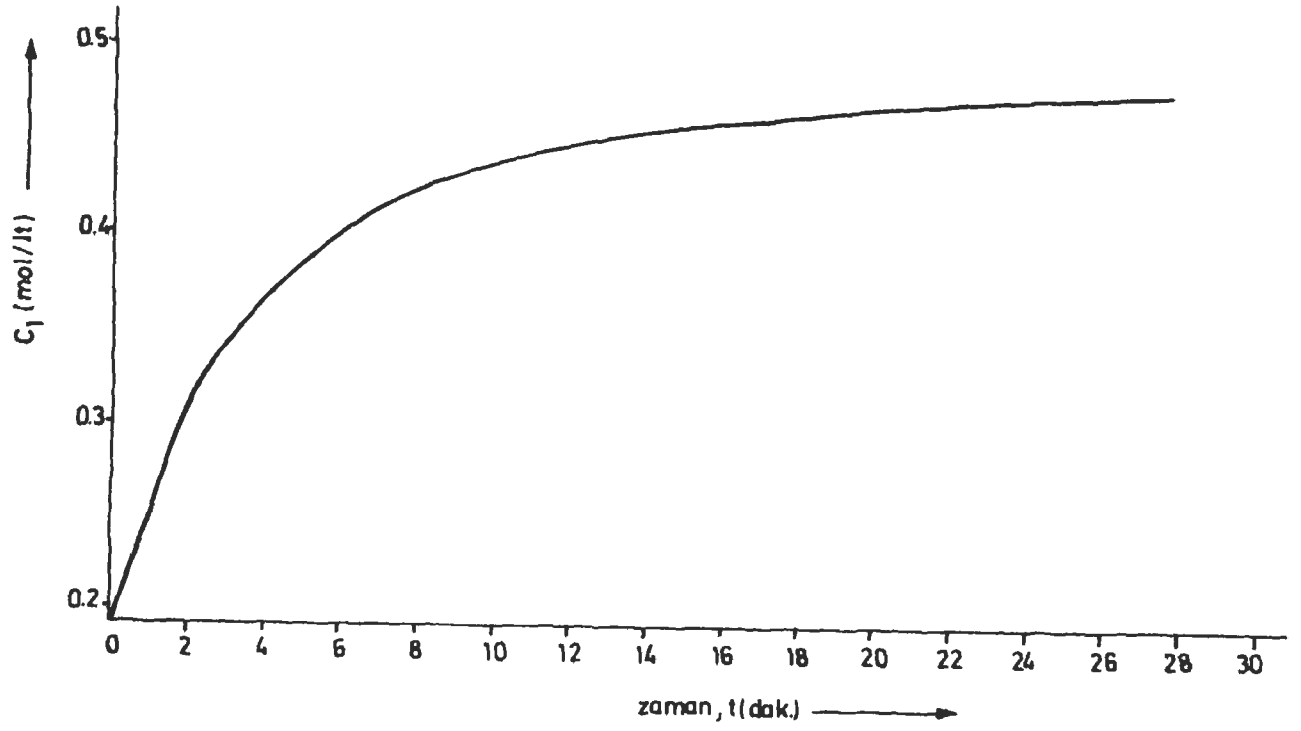
Şekil 5.17.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi ($B = 1.0$).



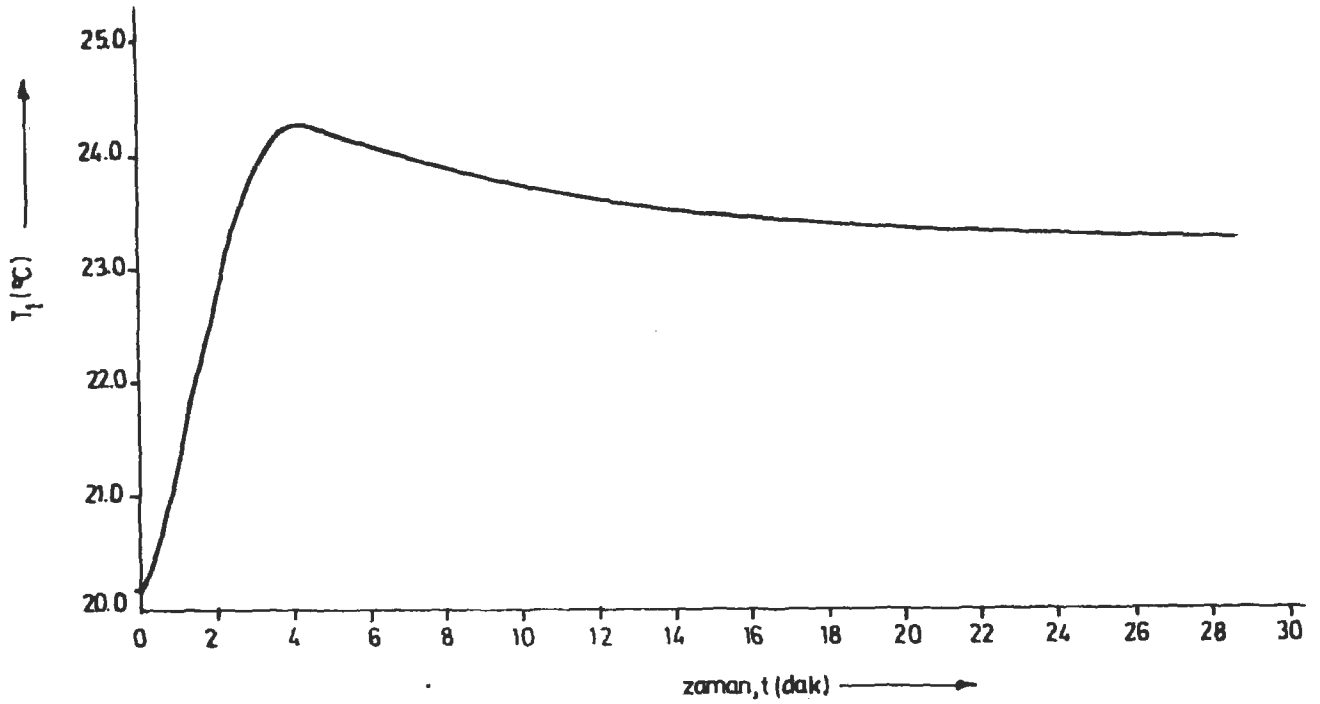
Şekil 5.18.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B \approx 1.0$).



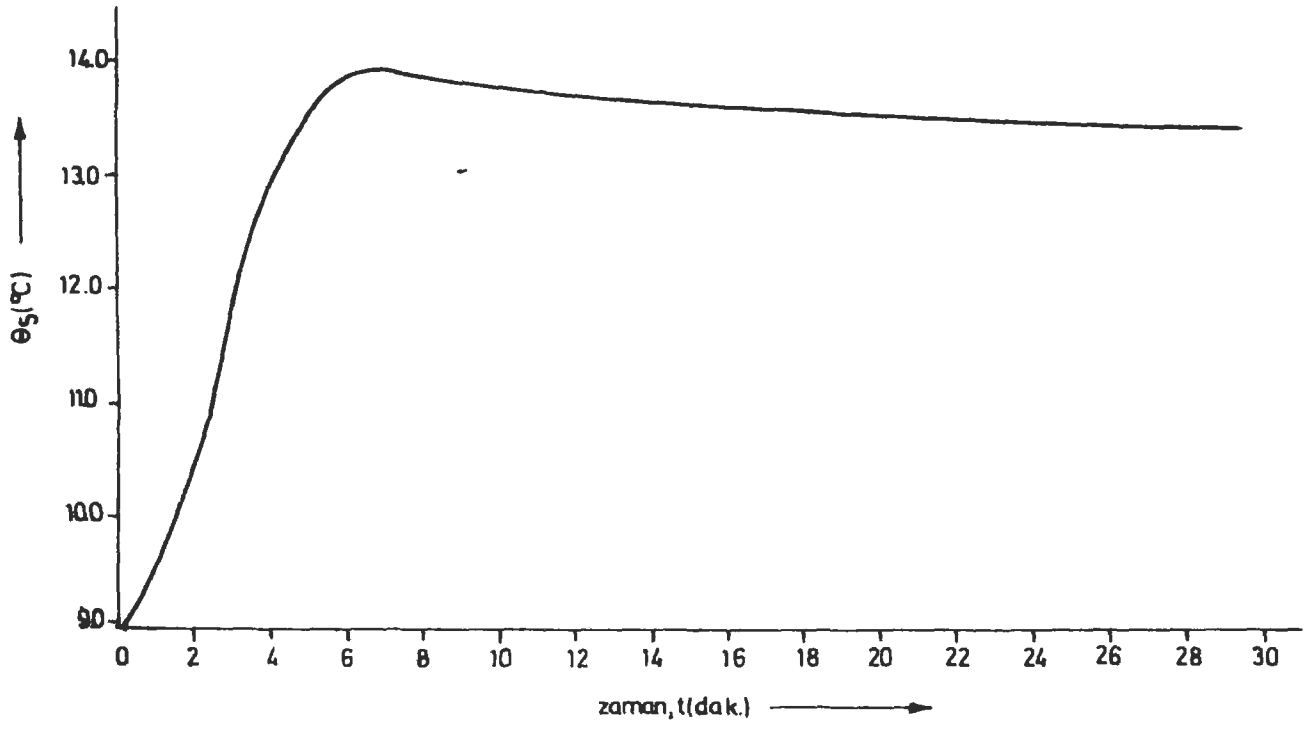
Şekil 5.19.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B \approx 1.0$).



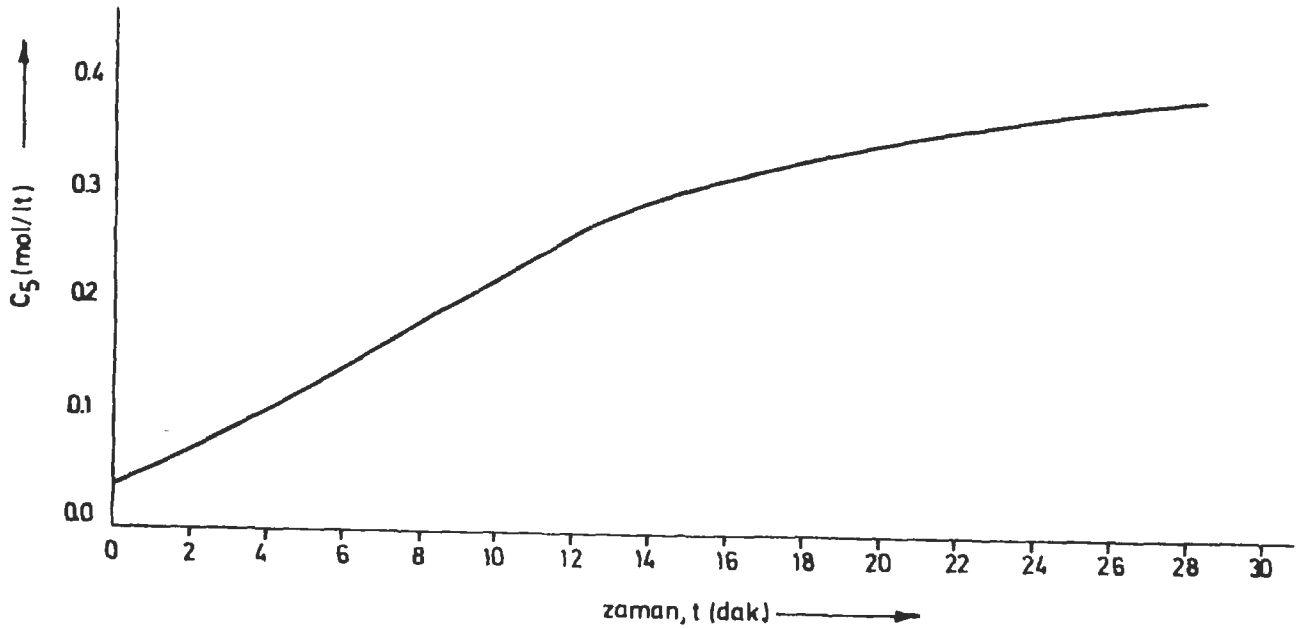
Şekil 5.20.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi ($B = 0.5$).



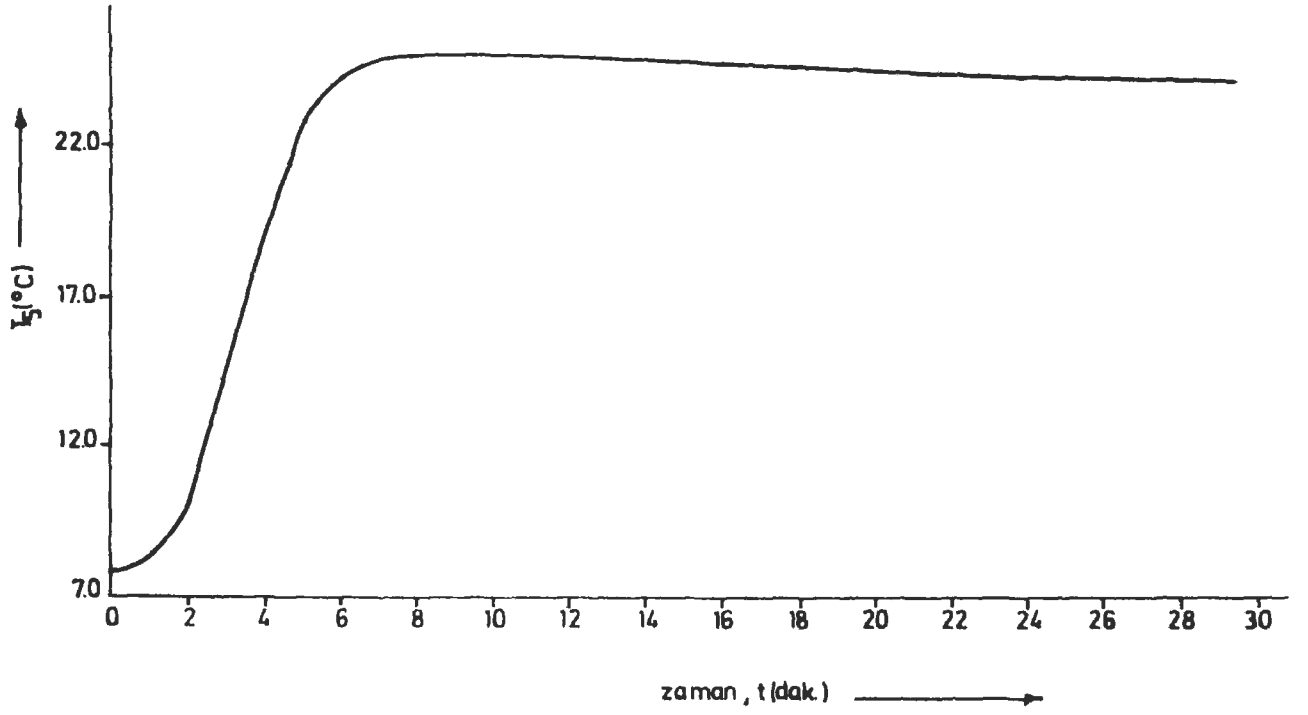
Şekil 5.21.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.5$).



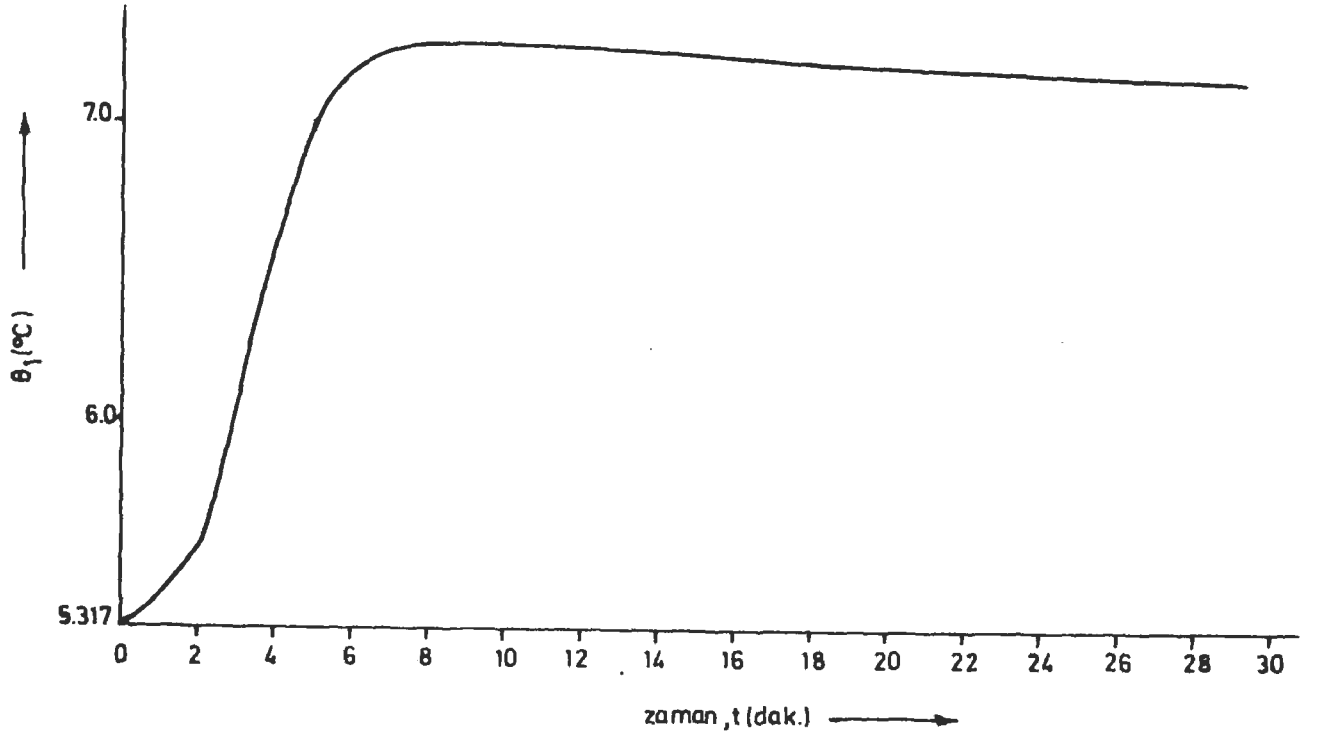
Şekil 5.22.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.5$).



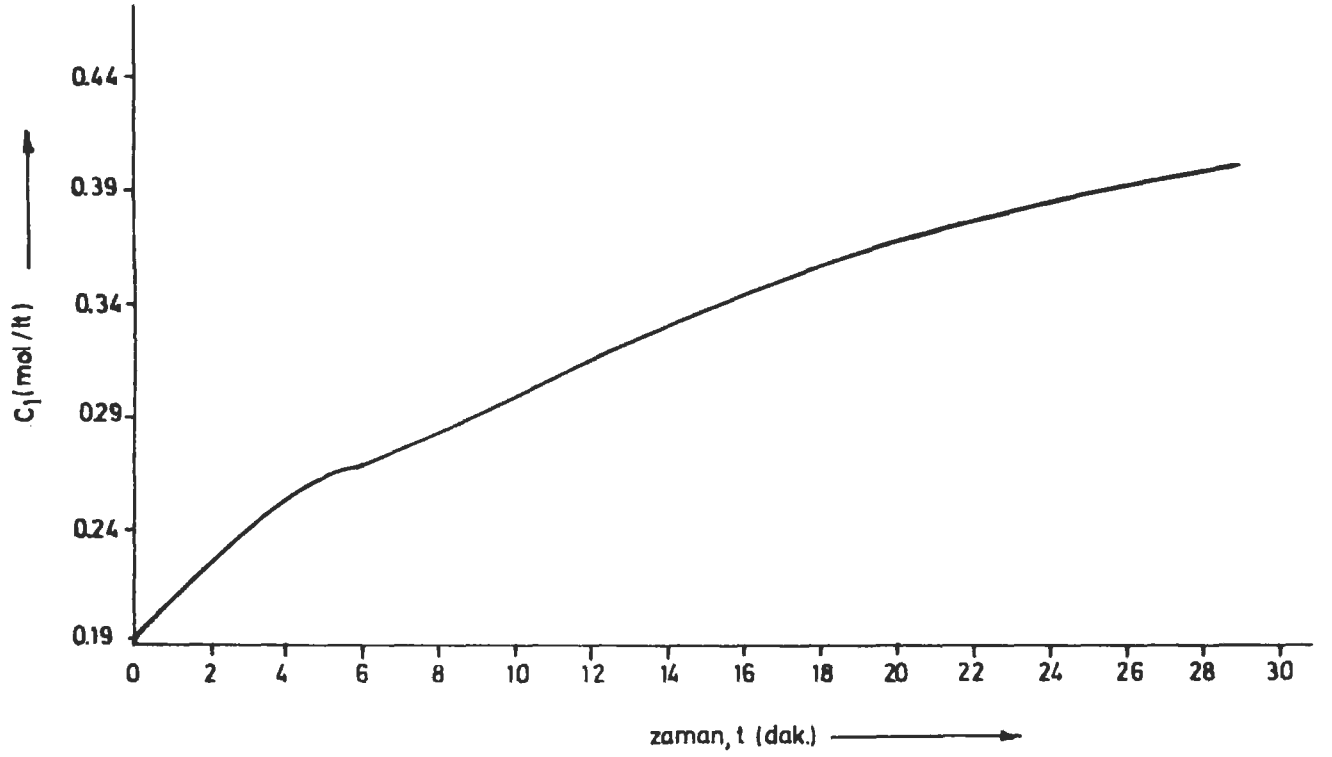
Şekil 5.23.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi ($B = 0.5$).



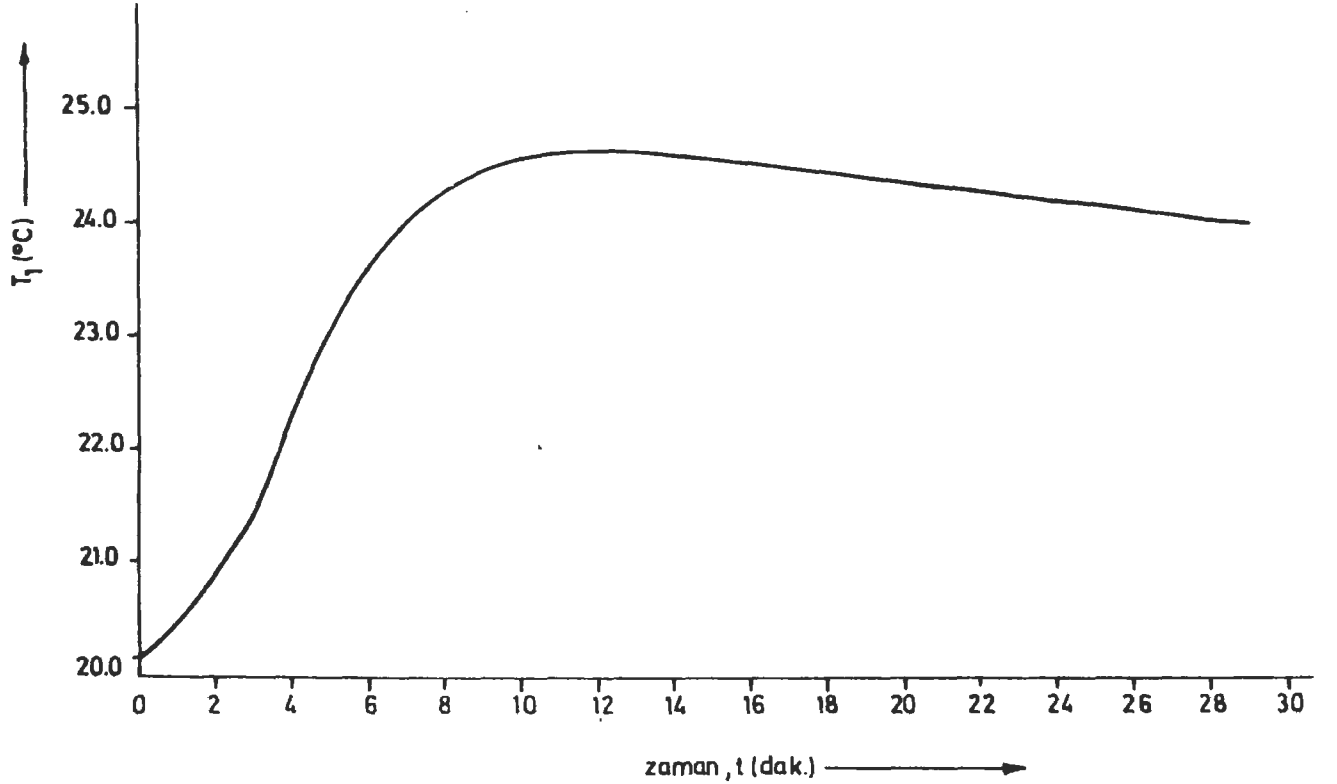
Şekil 5.24.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.5$).



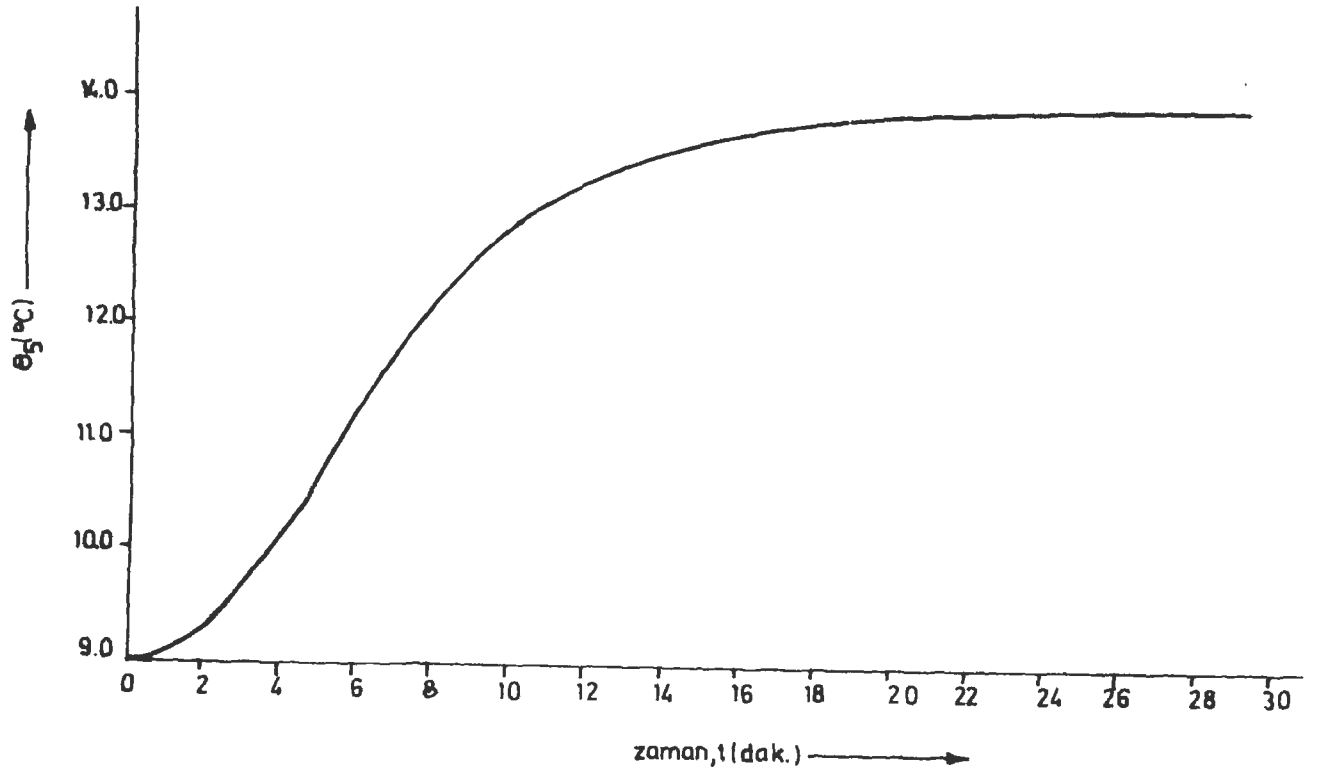
Şekil 5.25.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.5$).



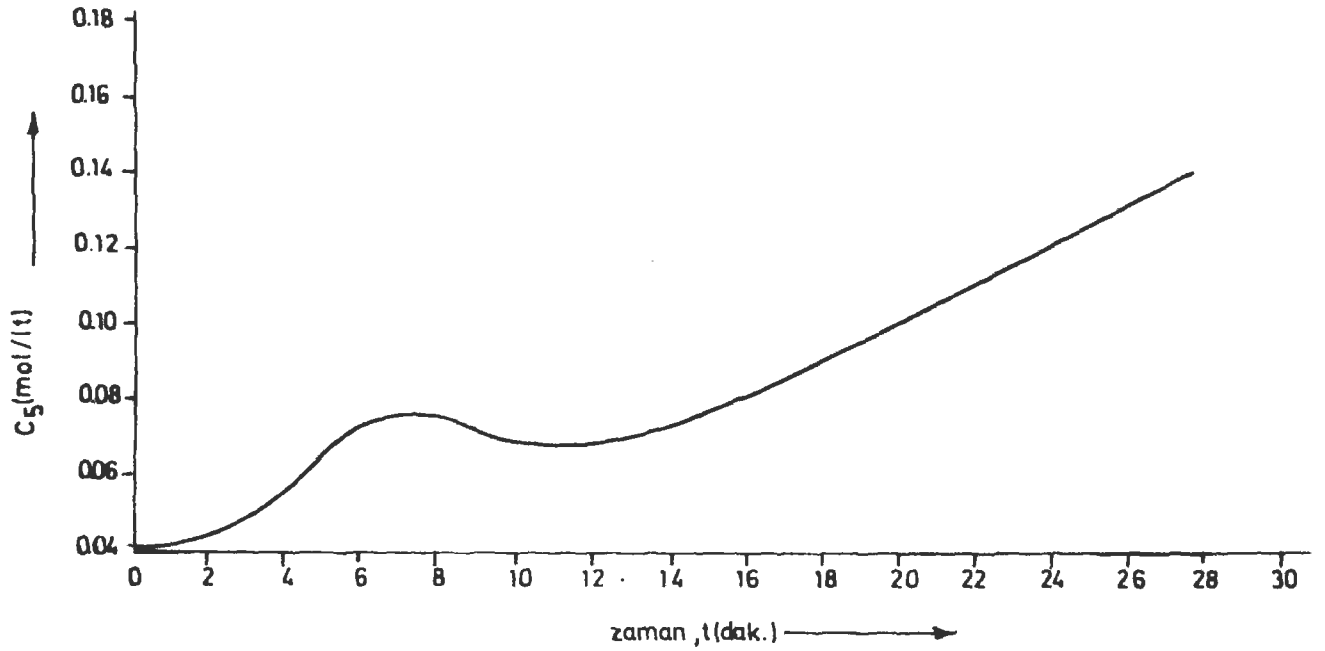
Şekil 5.26.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi ($B = 0.1$).



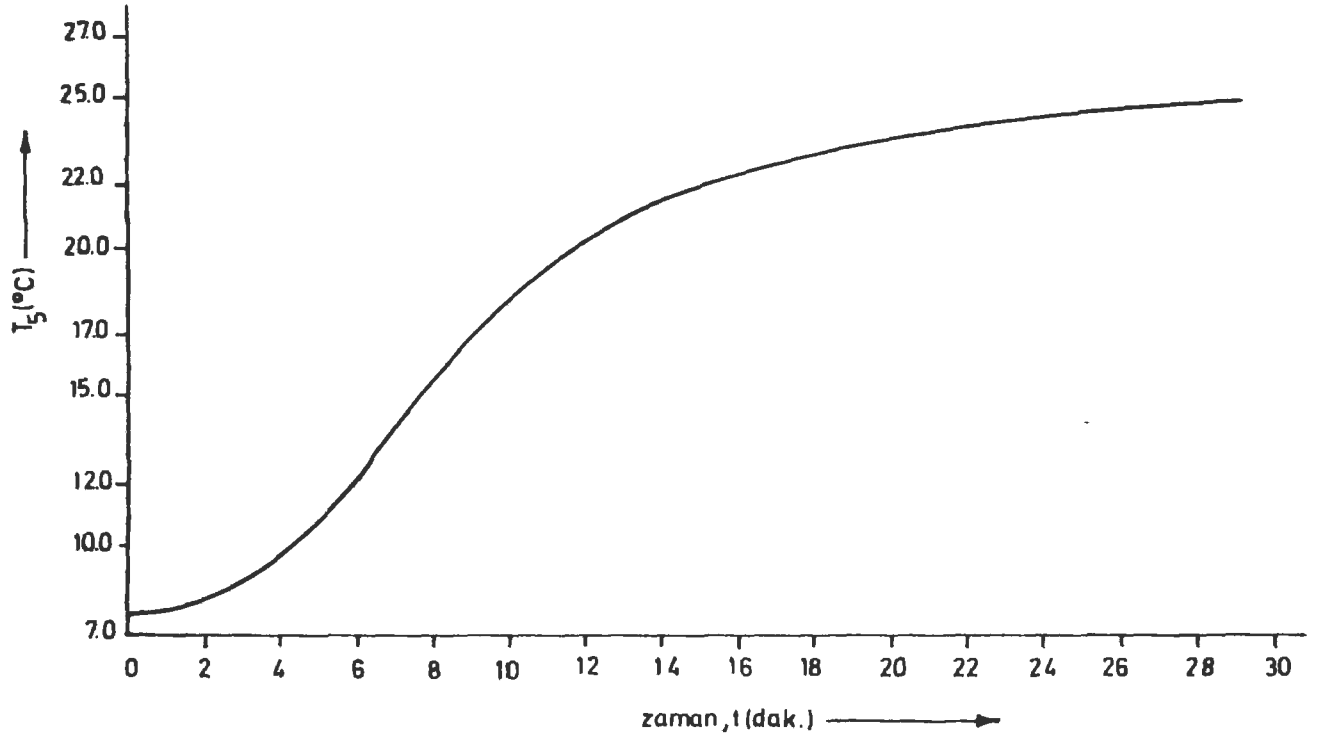
Şekil 5.27.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.1$).



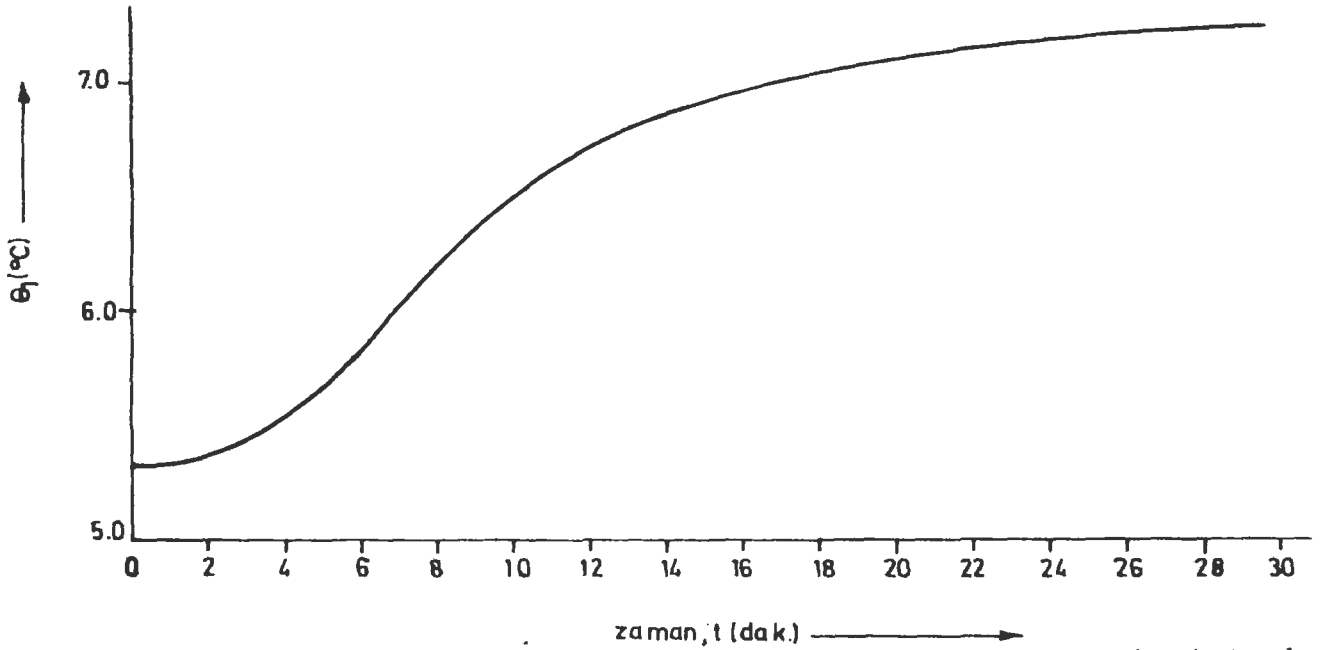
Şekil 5.28.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, birinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.1$).



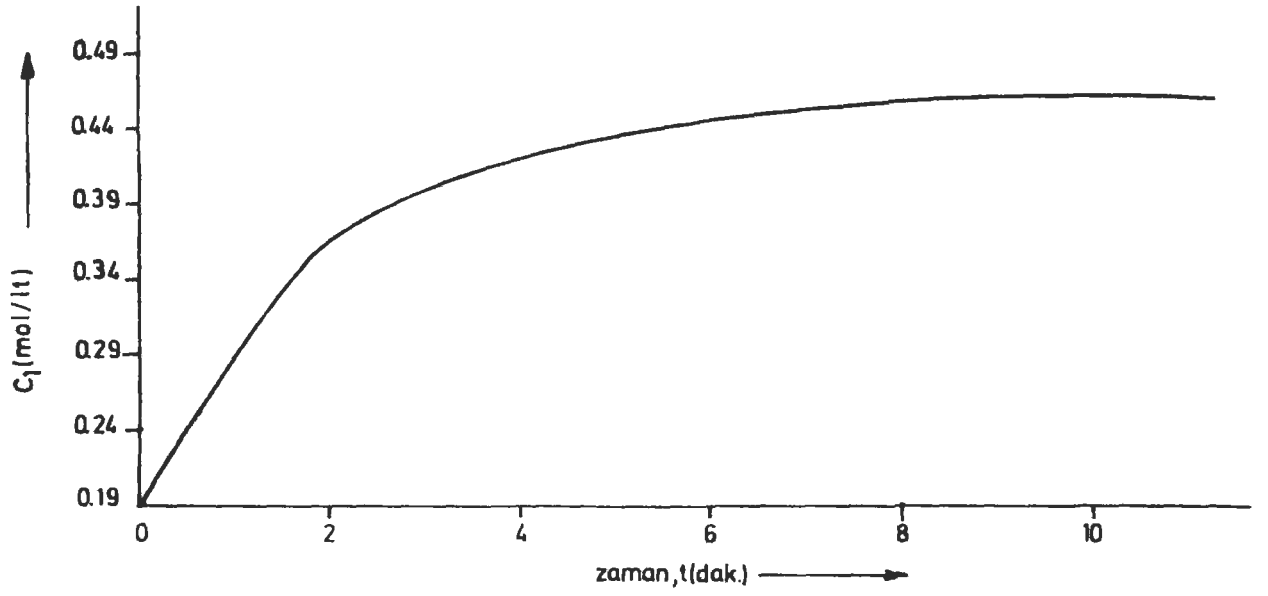
Şekil 5.29.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi ($B = 0.1$).



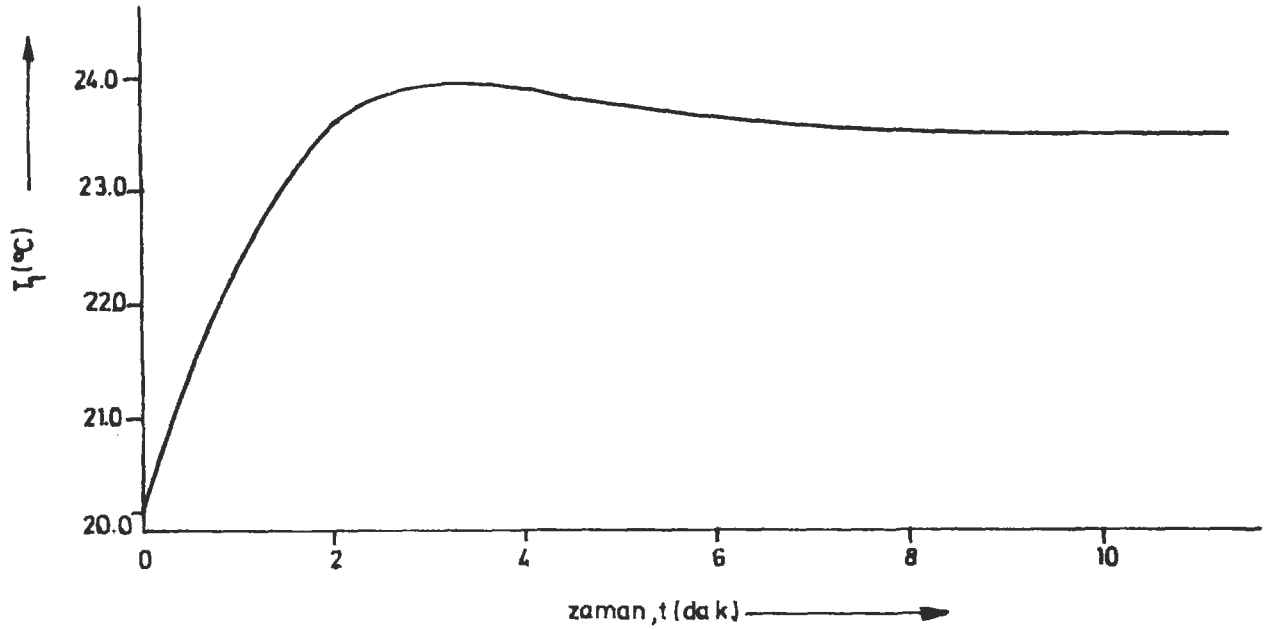
Şekil 5.30.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.1$).



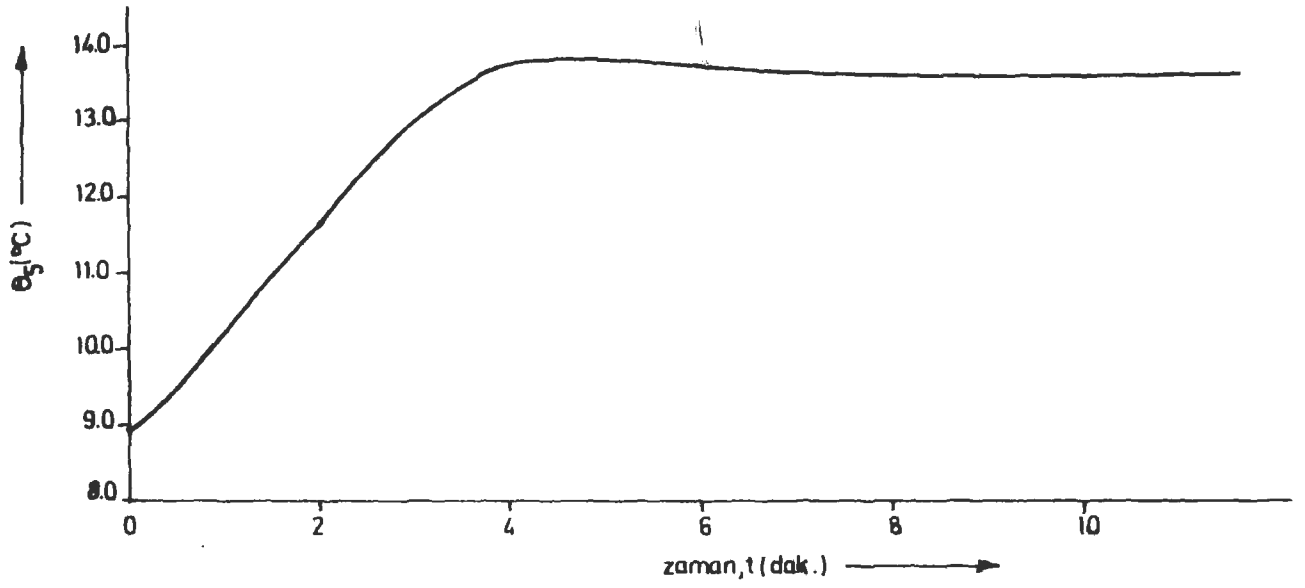
Şekil 5.31.: Besleme akış hızındaki ramp etkisinde, beşinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.1$).



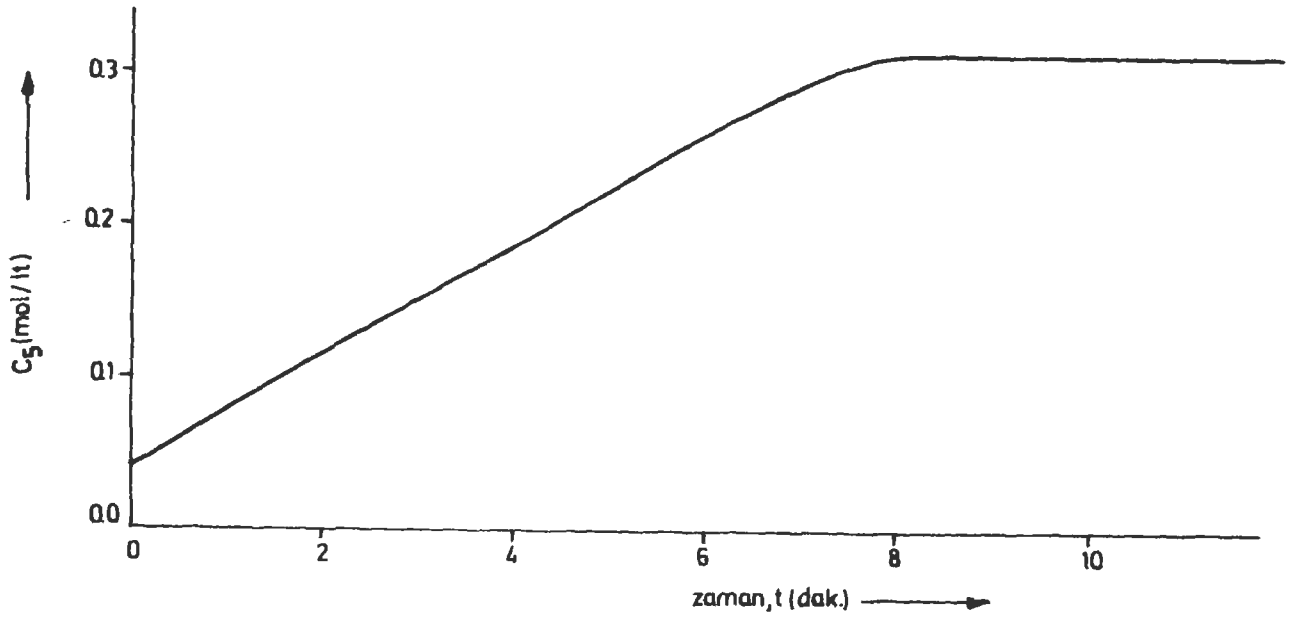
Şekil 5.32.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank çıkış derişiminin zamana göre değışimi
($B = 1.0$, $t = 8$ dak).



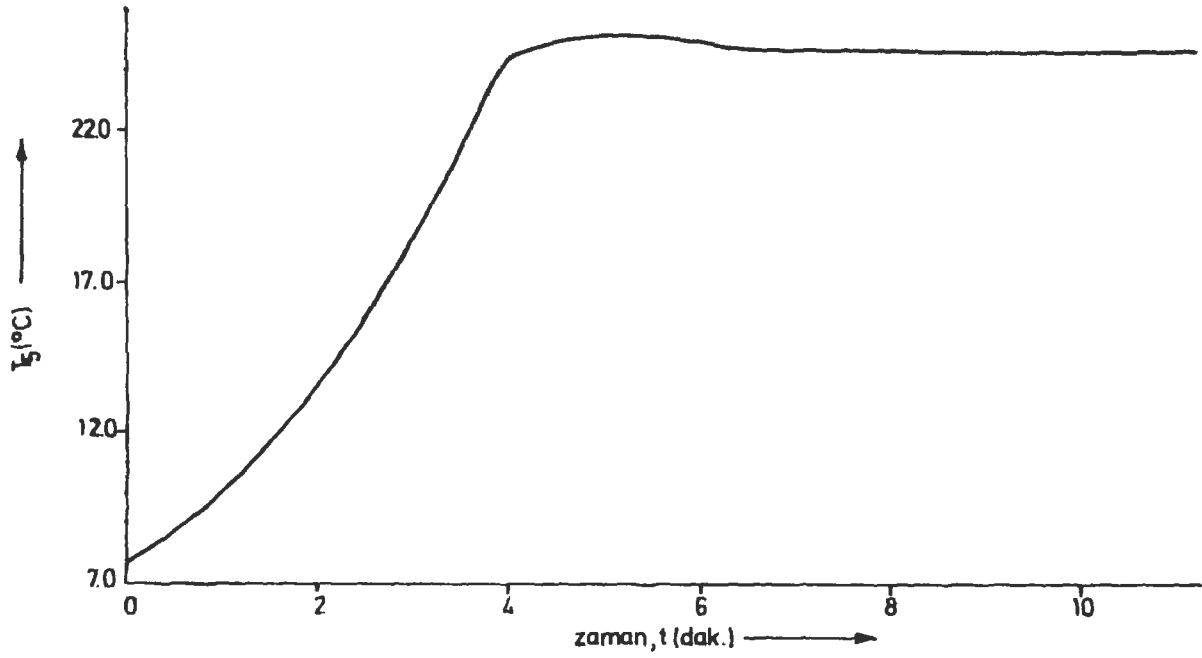
Şekil 5.33.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değışimi
($B = 1.0$, $t = 8$ dak).



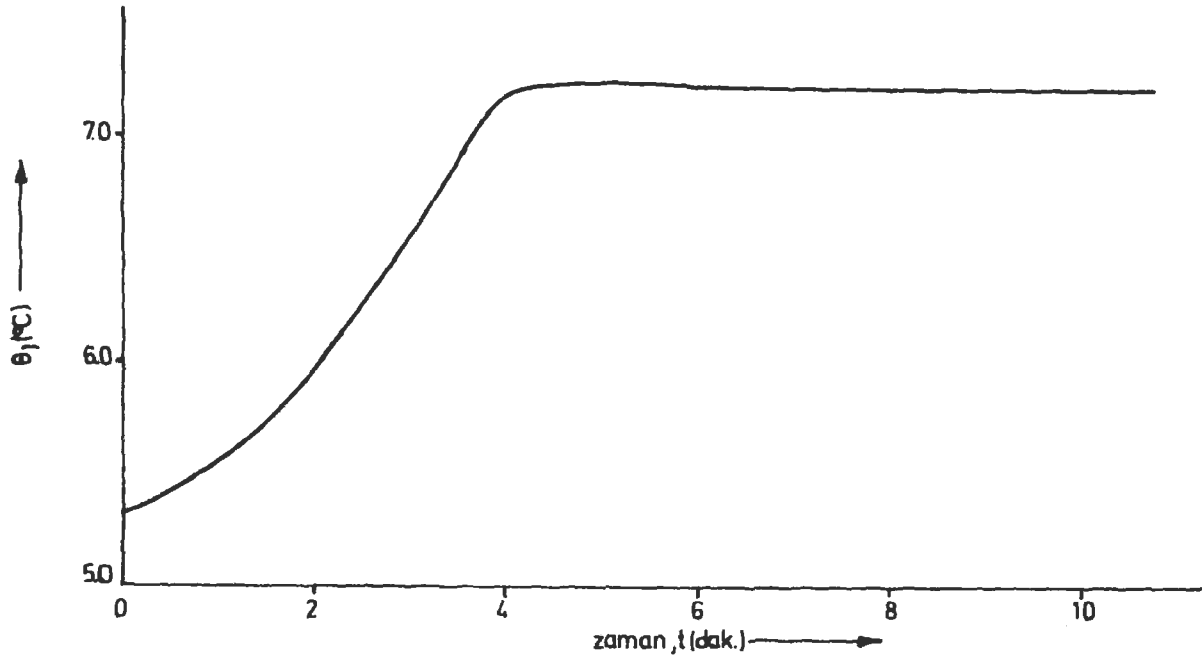
Şekil 5.34.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 8$ dak.).



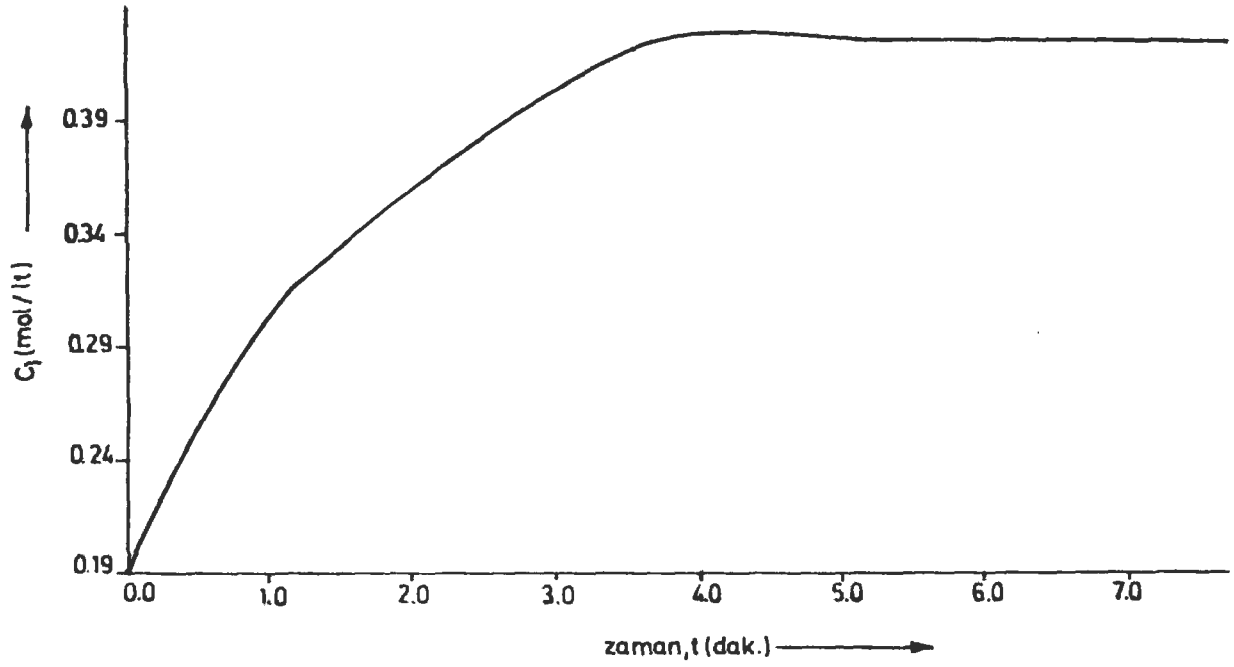
Şekil 5.35.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 8$ dak.).



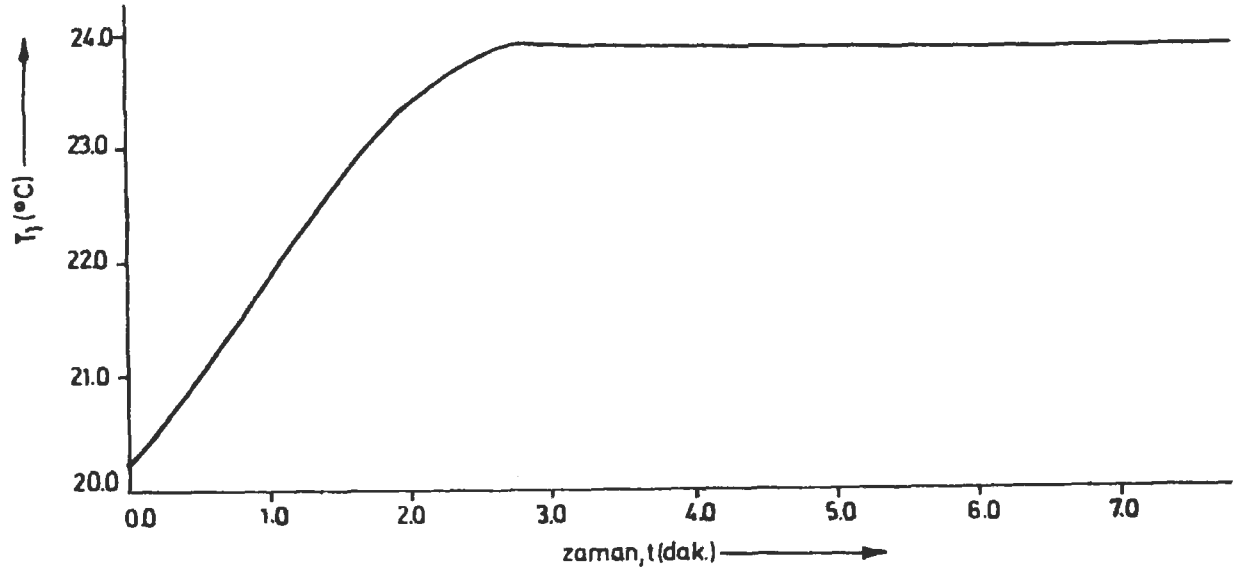
Şekil 5.36.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 8$ dak.).



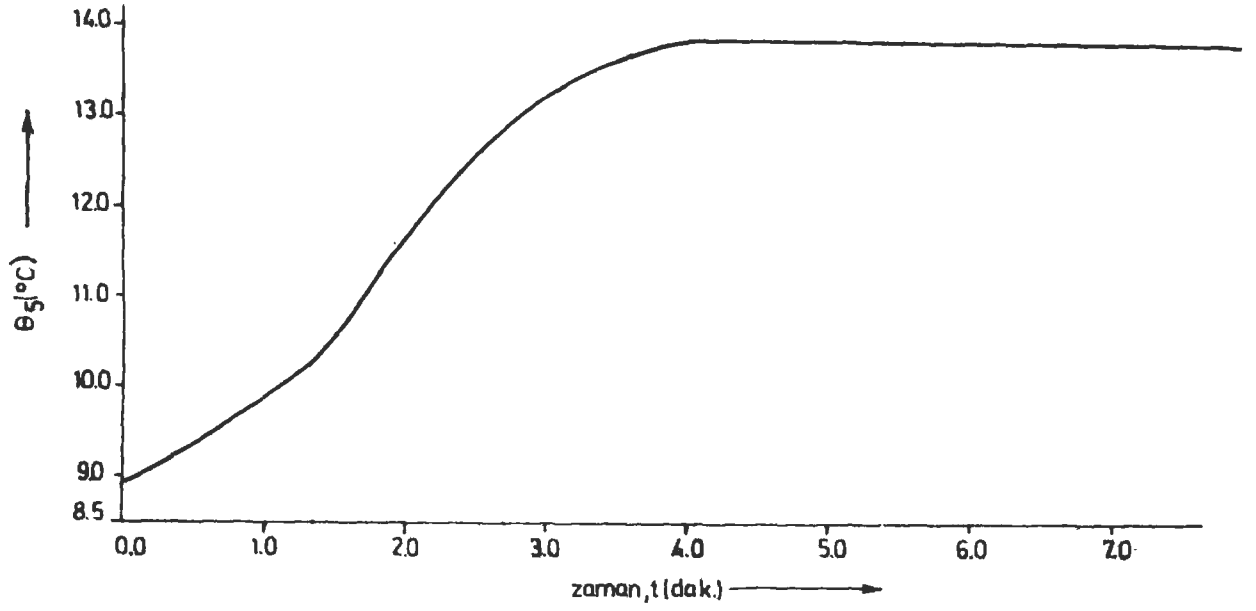
Şekil 5.37.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 8$ dak.).



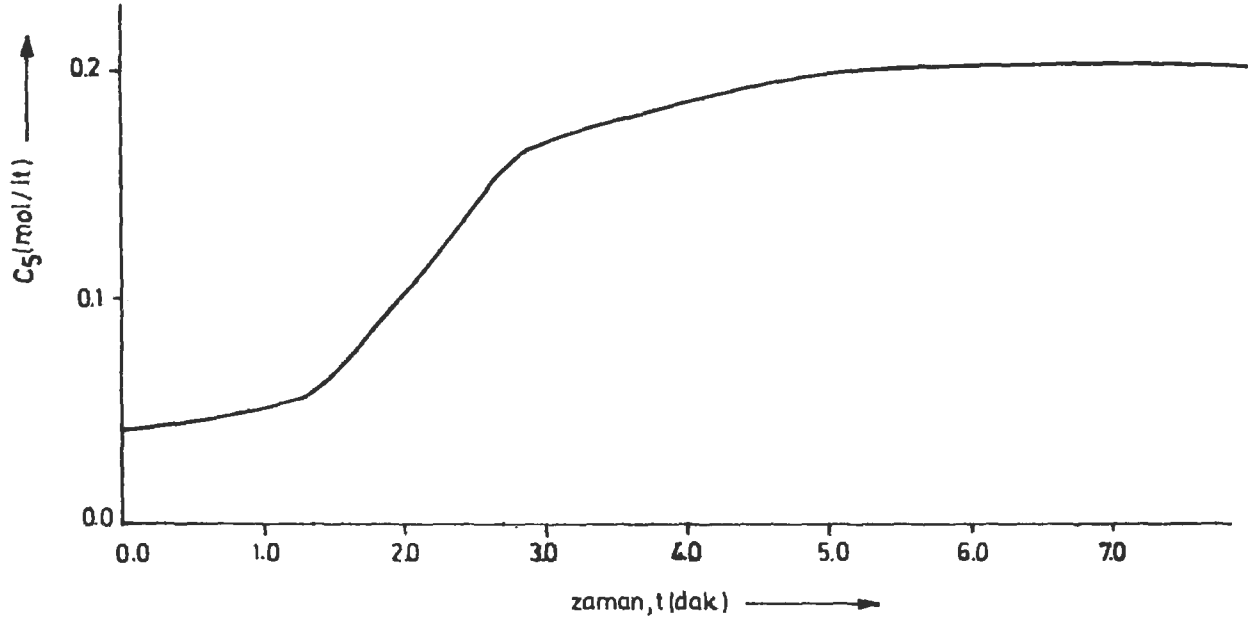
Şekil 5.38.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi
($B = 1.0$, $t = 4$ dak).



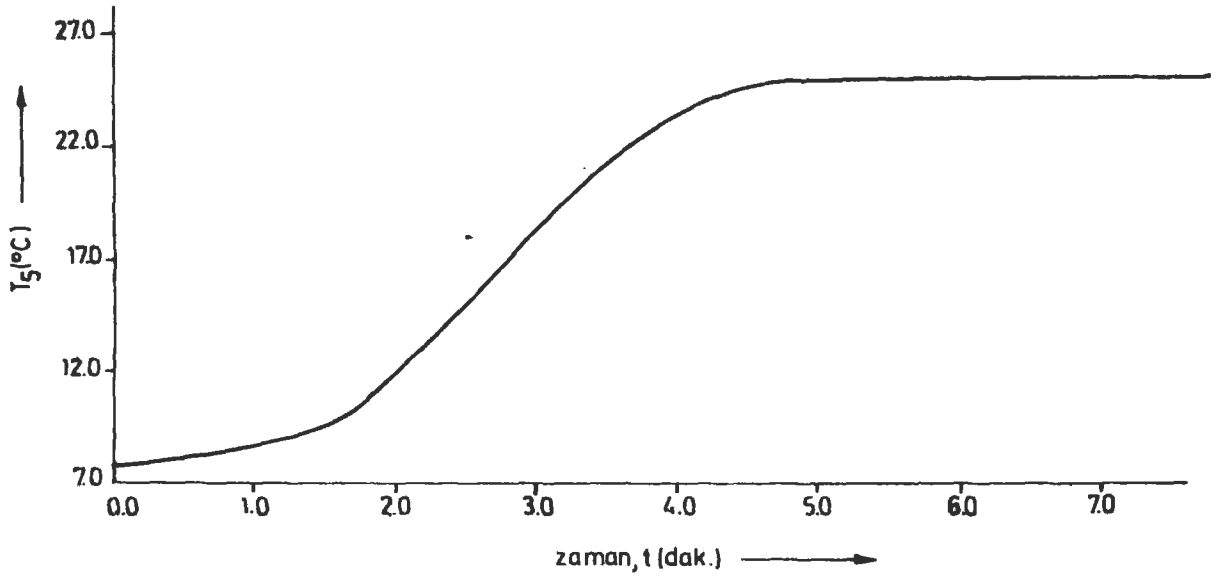
Şekil 5.39.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi
($B = 1.0$, $t = 4$ dak).



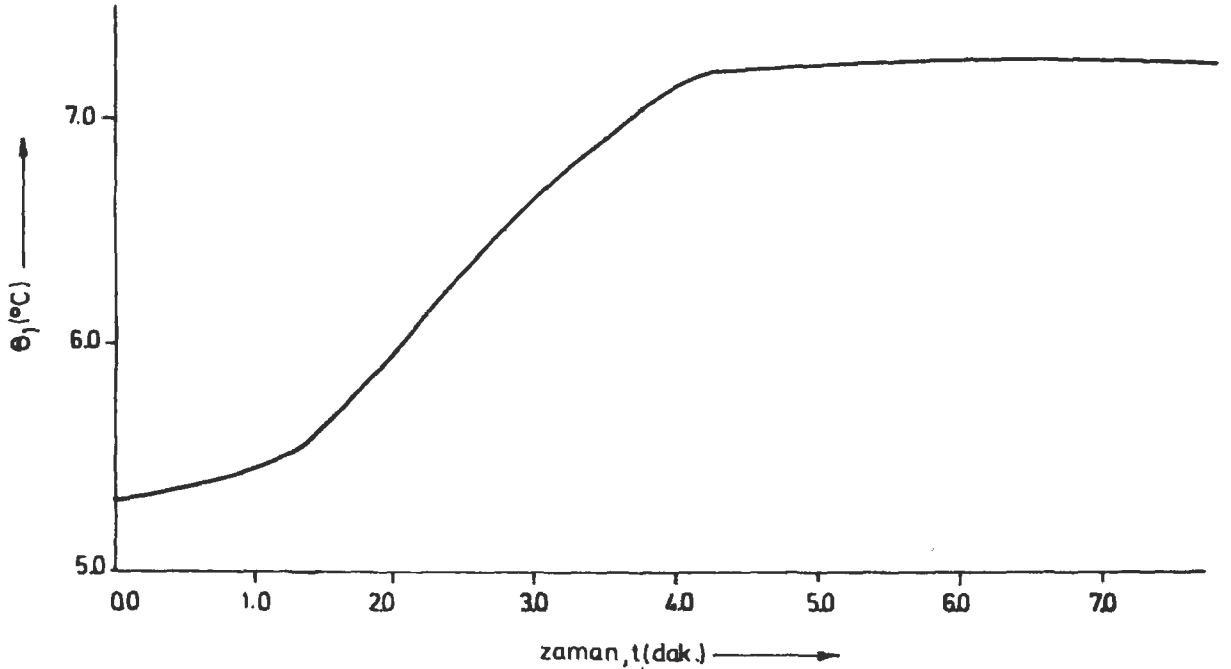
Şekil 5.40.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 4$ dak).



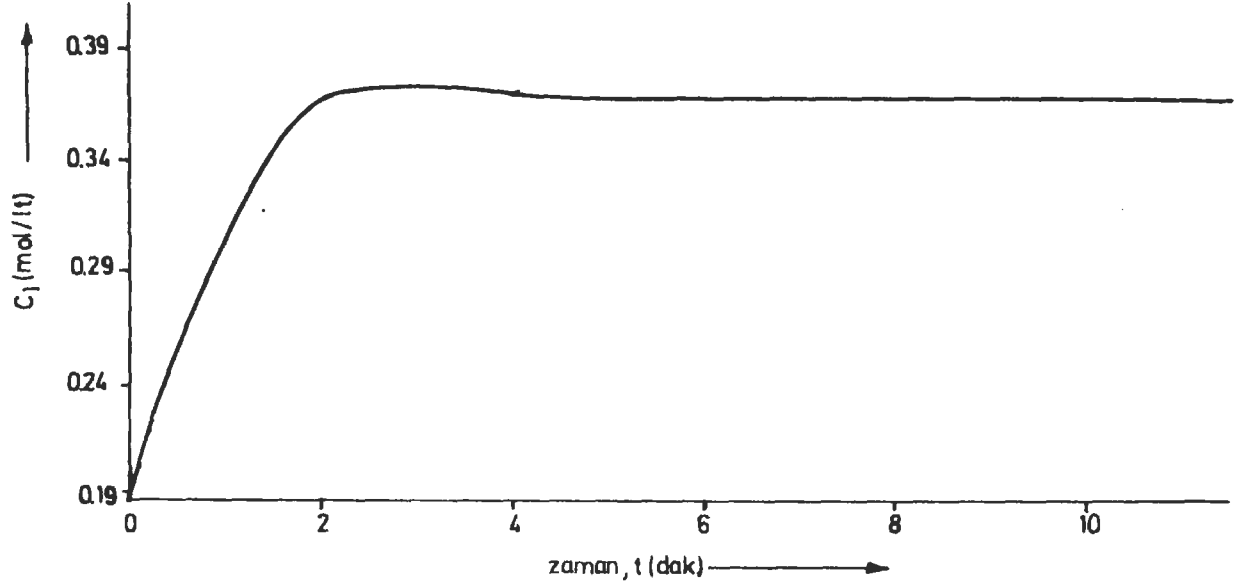
Şekil 5.41.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 4$ dak).



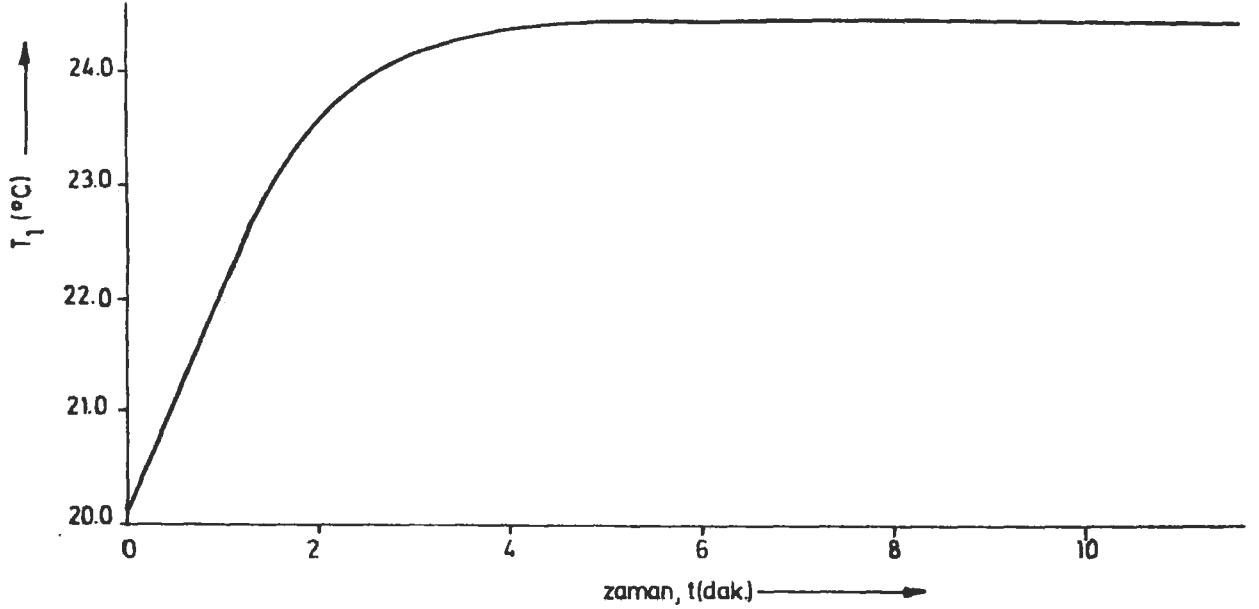
Şekil 5.42.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 4$ dak).



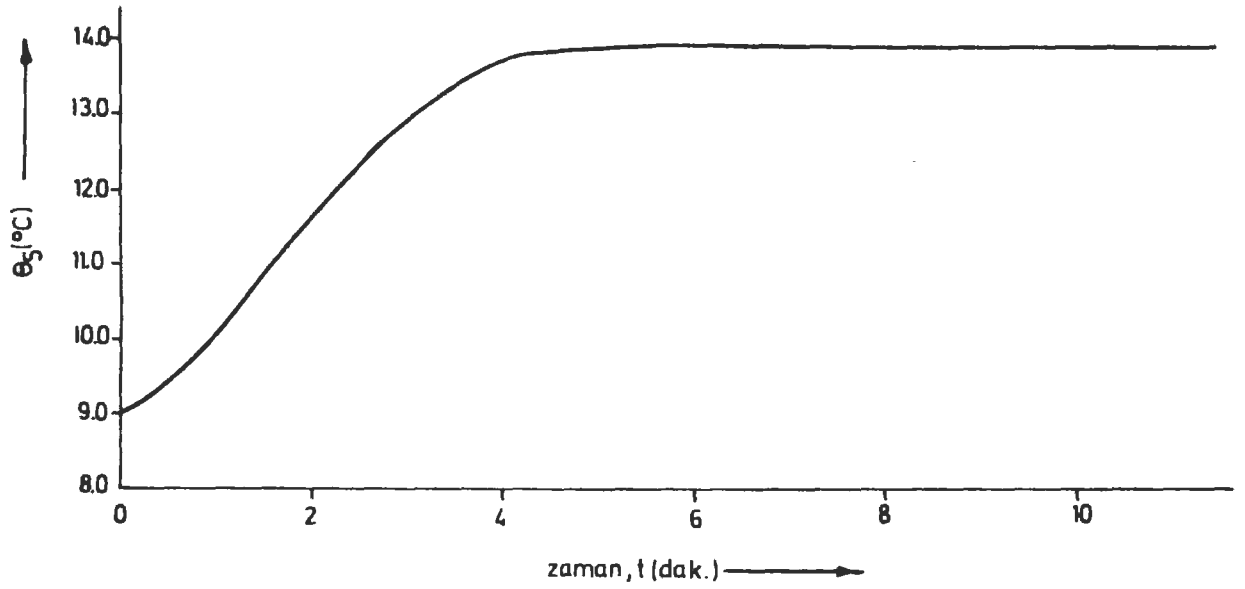
Şekil 5.43.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 4$ dak).



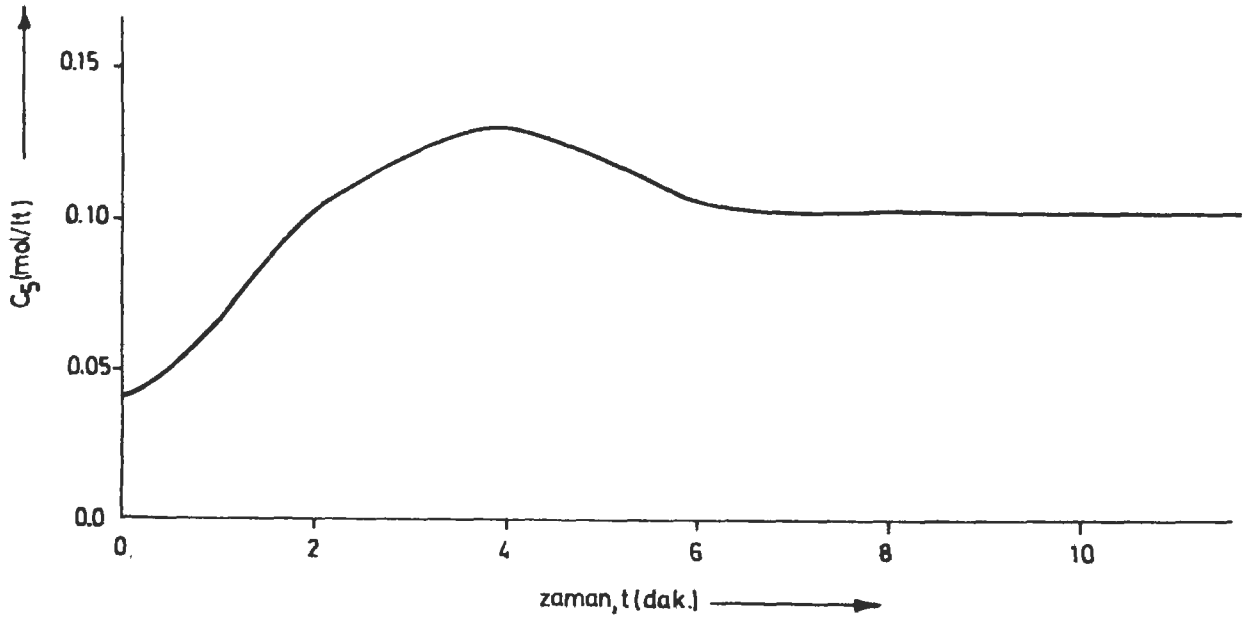
Şekil 5.44.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank çıkış derişiminin zamana göre değışimi ($B = 1.0$, $t = 2$ dak).



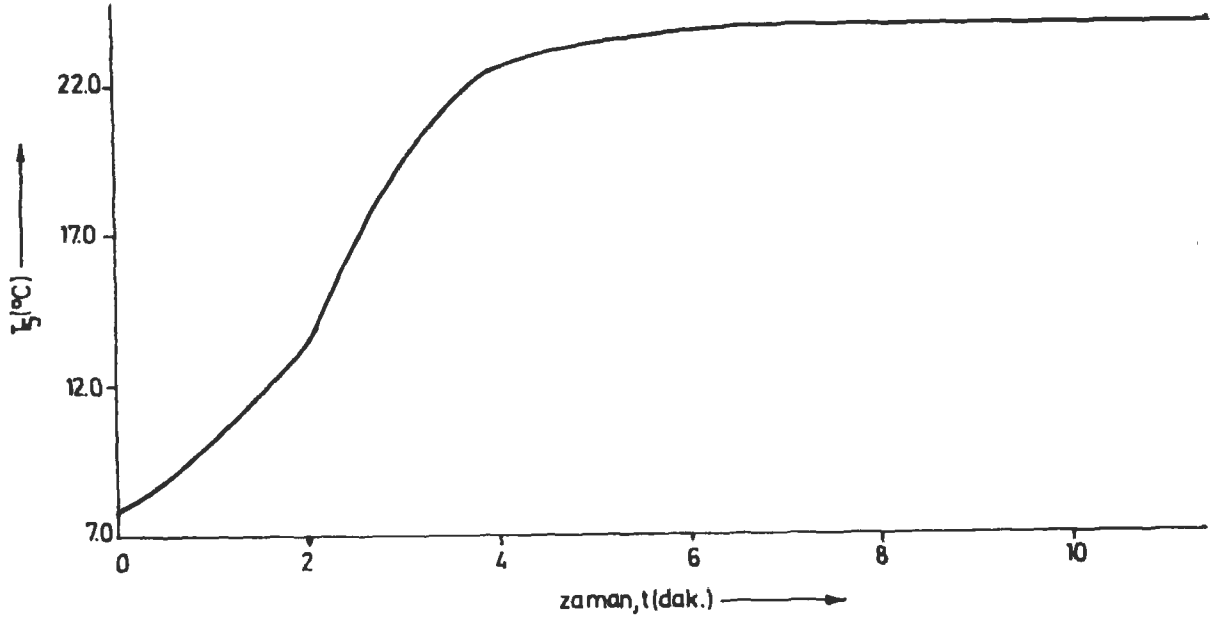
Şekil 5.45.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değışimi ($B = 1.0$, $t = 2$ dak).



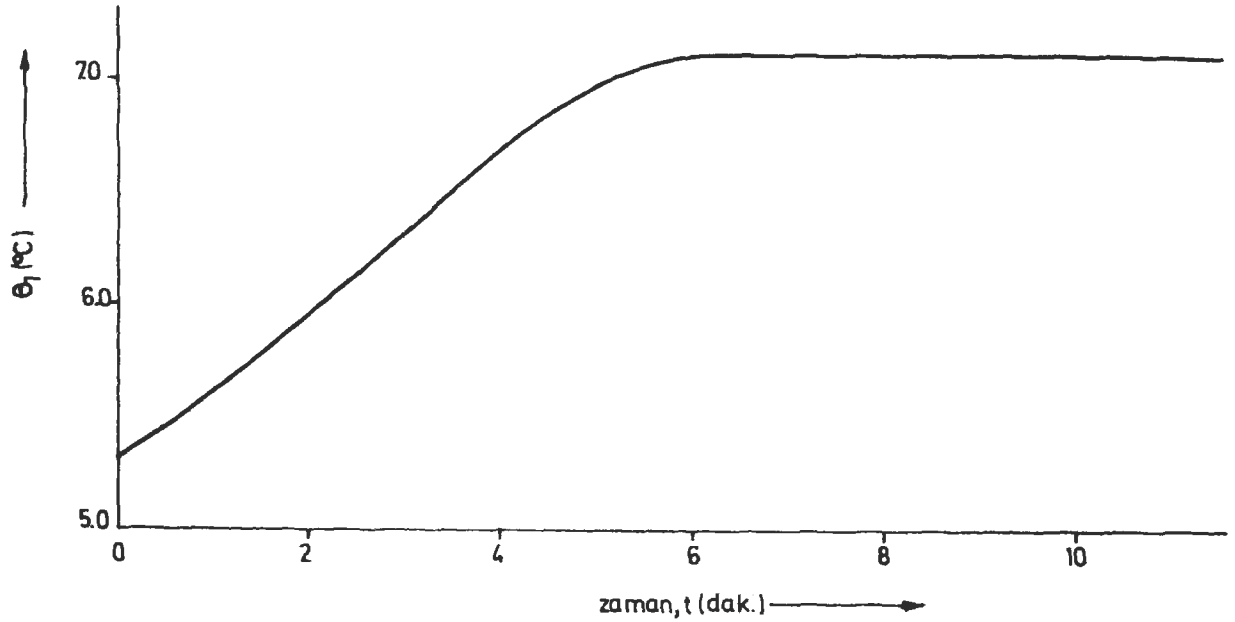
Şekil 5.46.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, birinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 2$ dak).



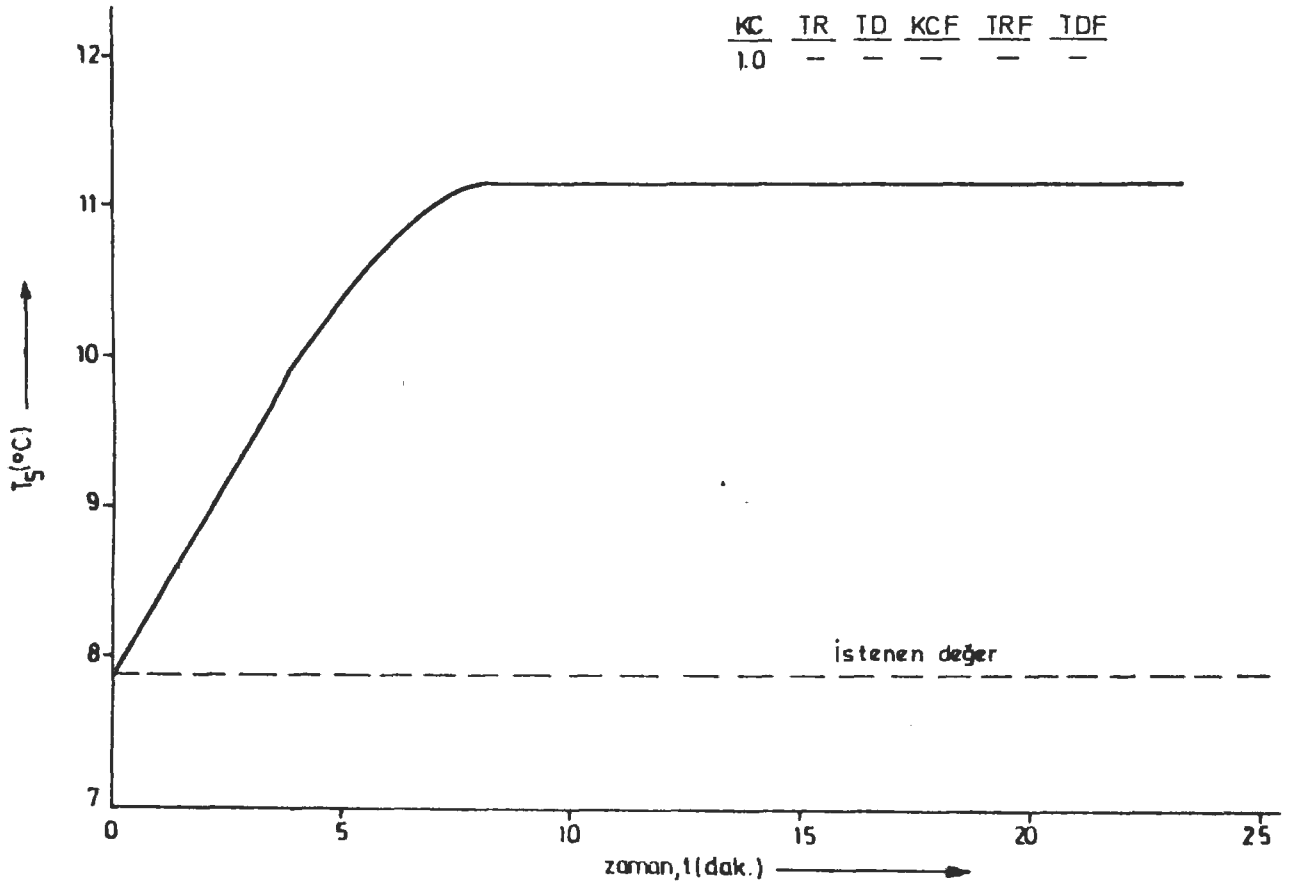
Şekil 5.47.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank çıkış derişiminin zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 2$ dak).



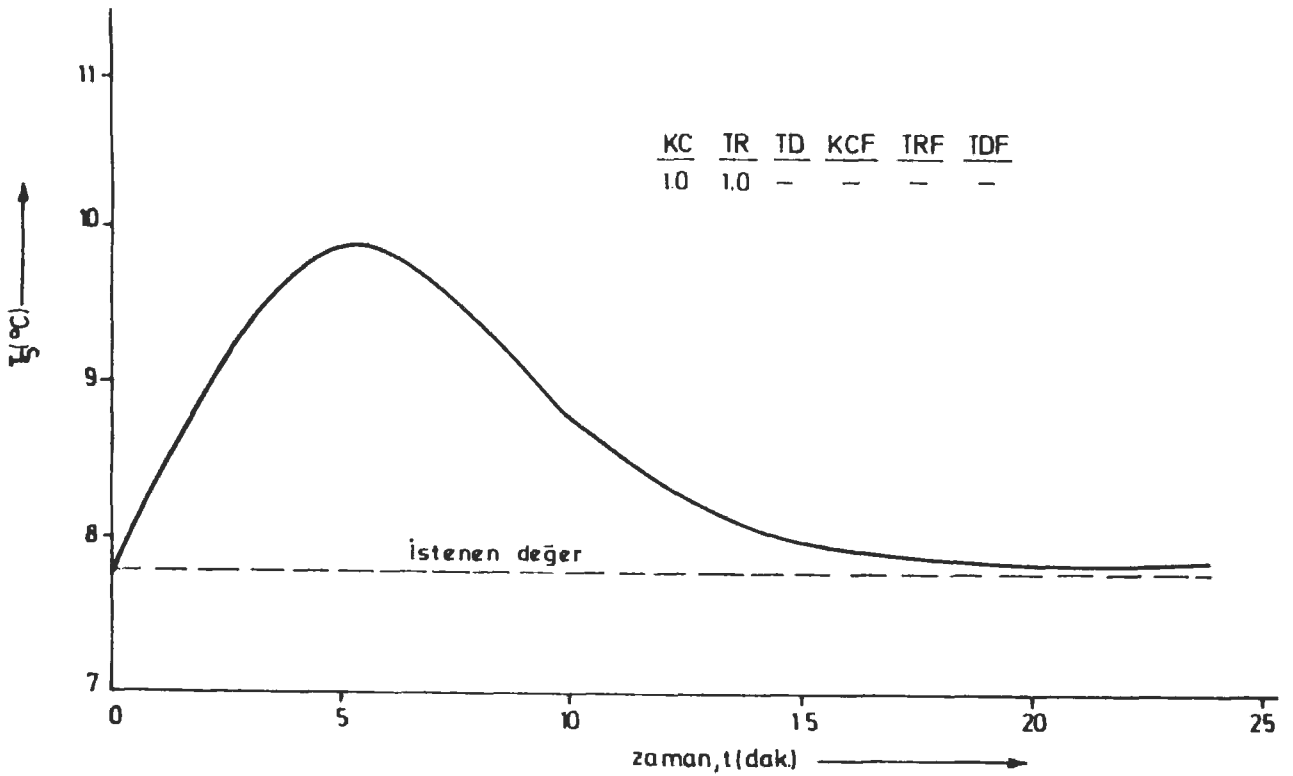
Şekil 5.48.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 2$ dak.).



Şekil 5.49.: Besleme akış hızında kesikli ramp etkisinde, beşinci tank soğutma suyu çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$, $t = 2$ dak.).

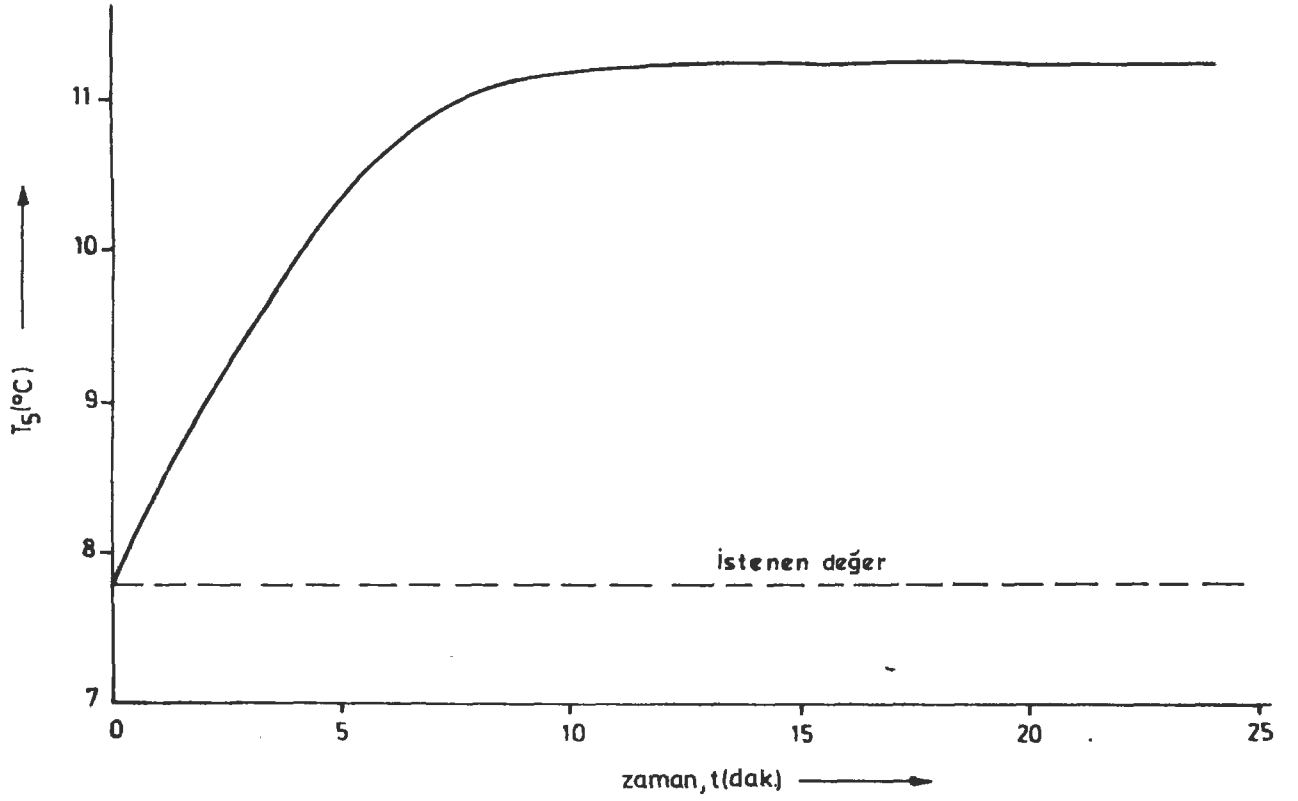


Şekil 5.50.: Kademe etkisinde ,geri beslemeli kontrol sistemi ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.



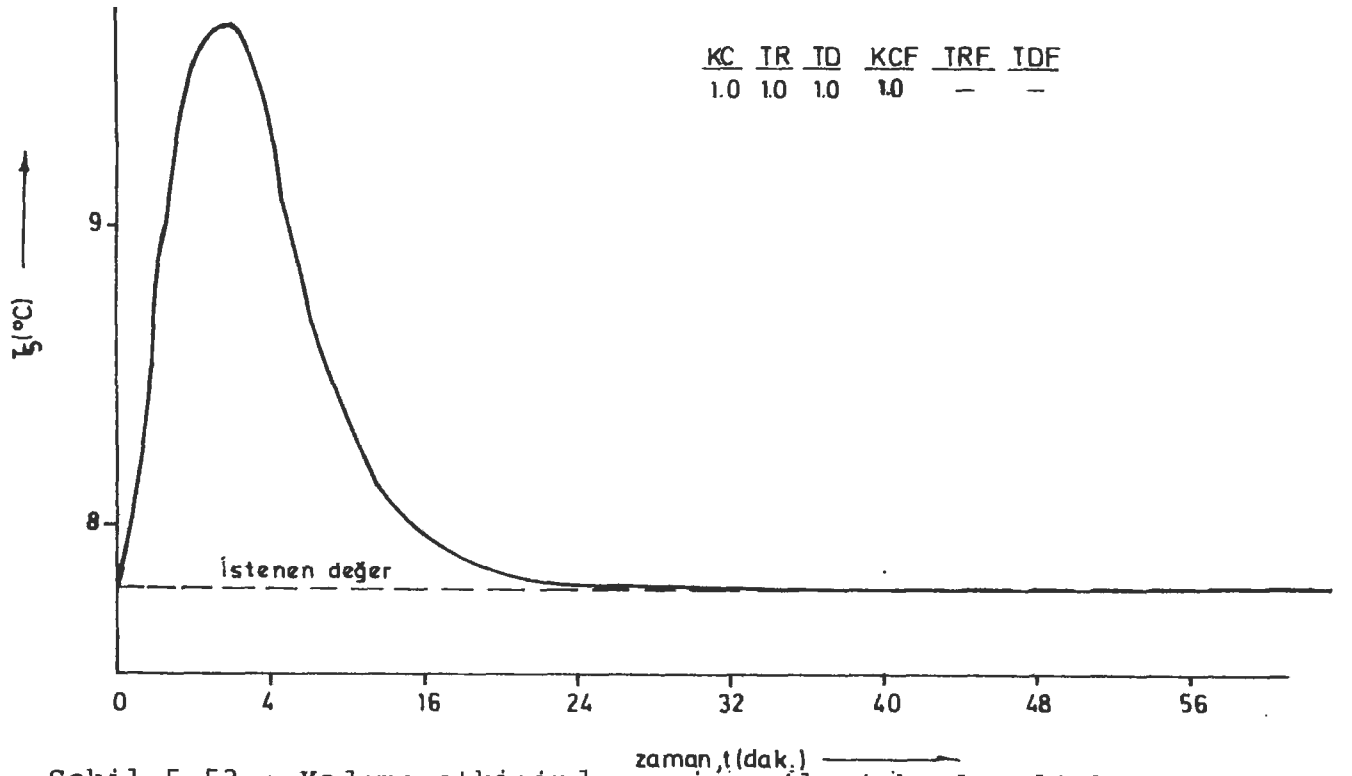
Şekil 5.51.: Kademe etkisinde ,geri beslemeli kontrol sistemi ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.

$\frac{KC}{1.0}$	$\frac{TR}{-}$	$\frac{TD}{1.0}$	$\frac{KCF}{-}$	$\frac{TRF}{-}$	$\frac{IDF}{-}$
------------------	----------------	------------------	-----------------	-----------------	-----------------

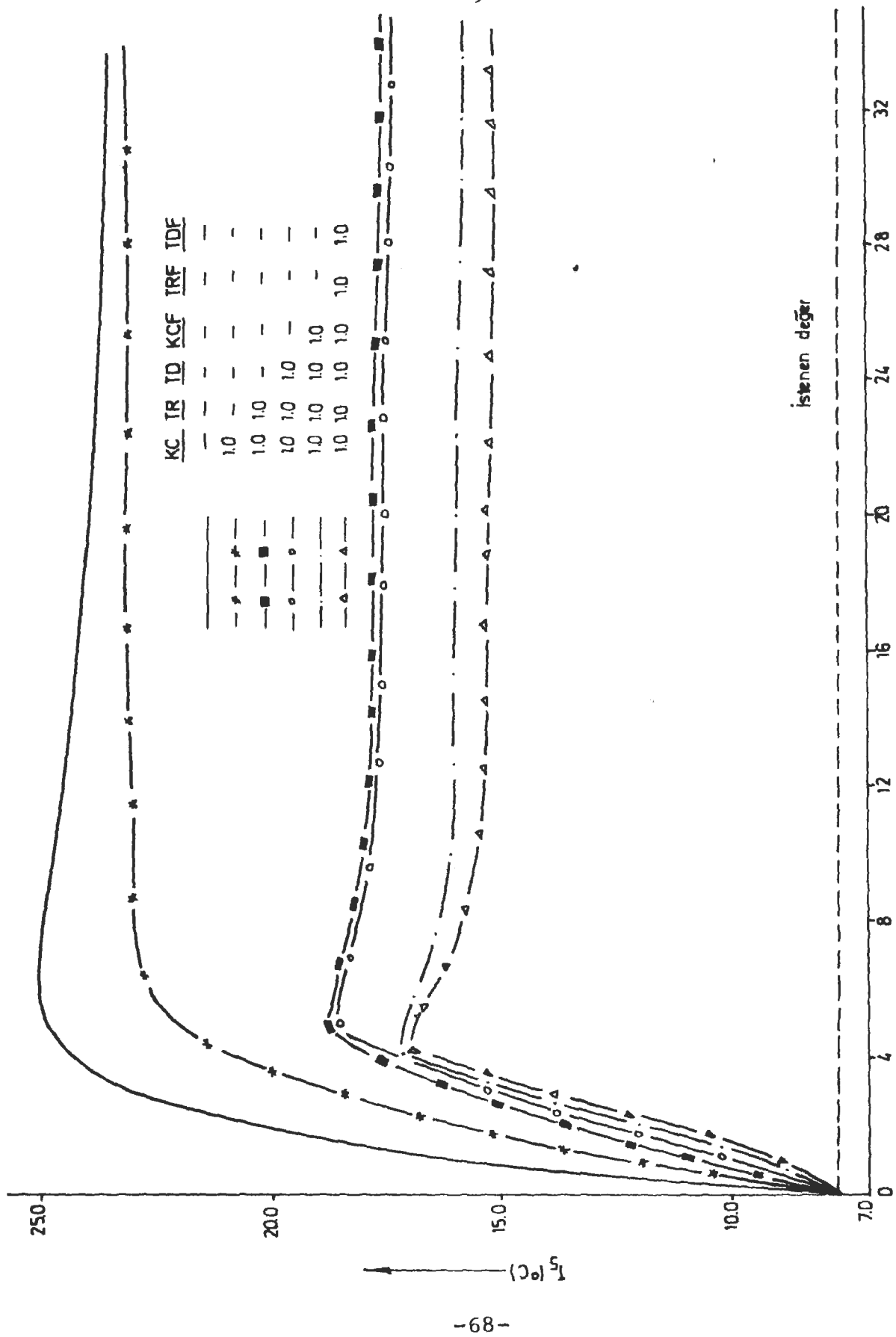


Şekil 5.52.: Kademe etkisinde, geri beslemeli kontrol sistemi ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.

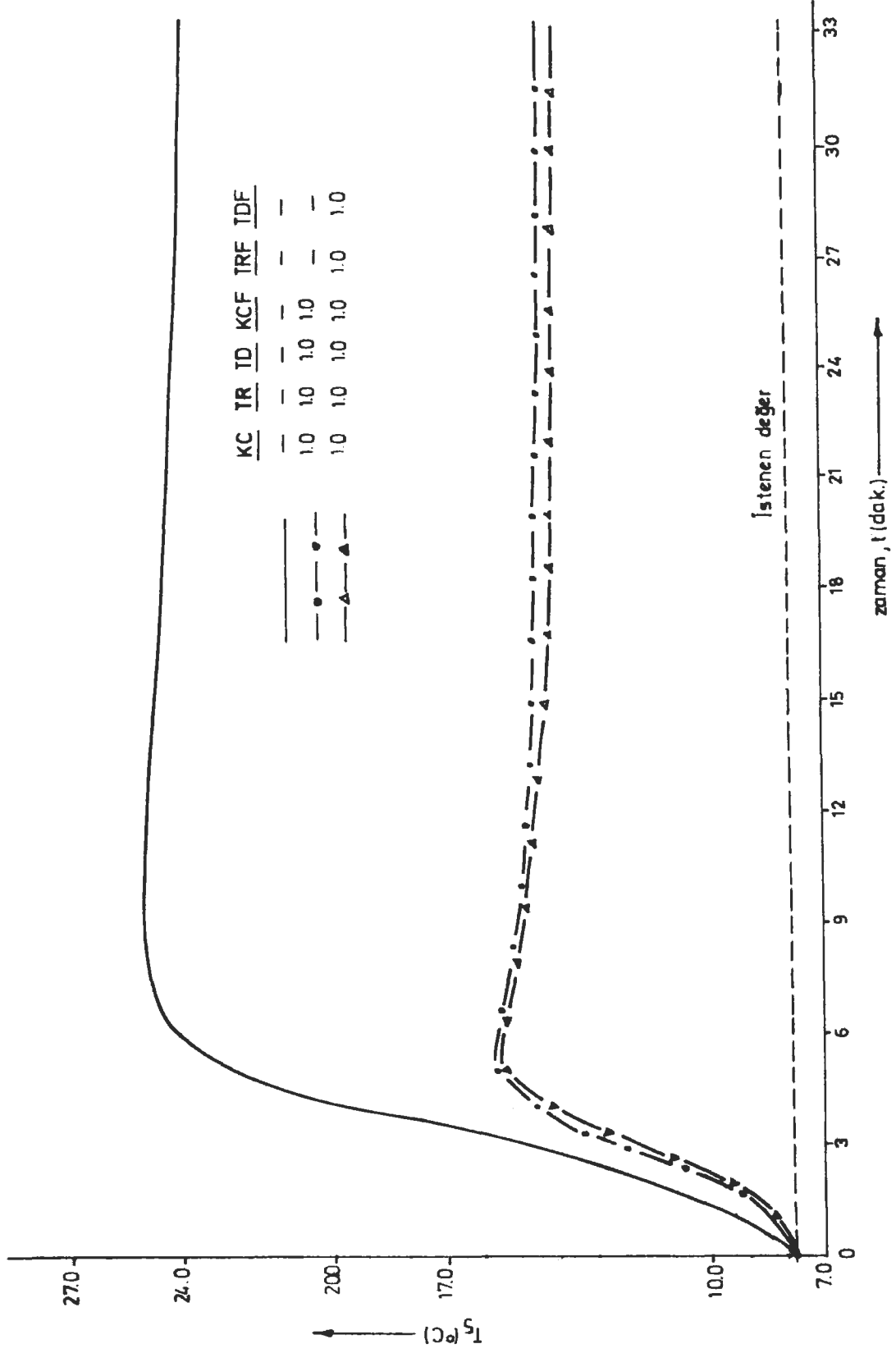
$\frac{KC}{1.0}$	$\frac{TR}{1.0}$	$\frac{TD}{1.0}$	$\frac{KCF}{1.0}$	$\frac{TRF}{-}$	$\frac{IDF}{-}$
------------------	------------------	------------------	-------------------	-----------------	-----------------



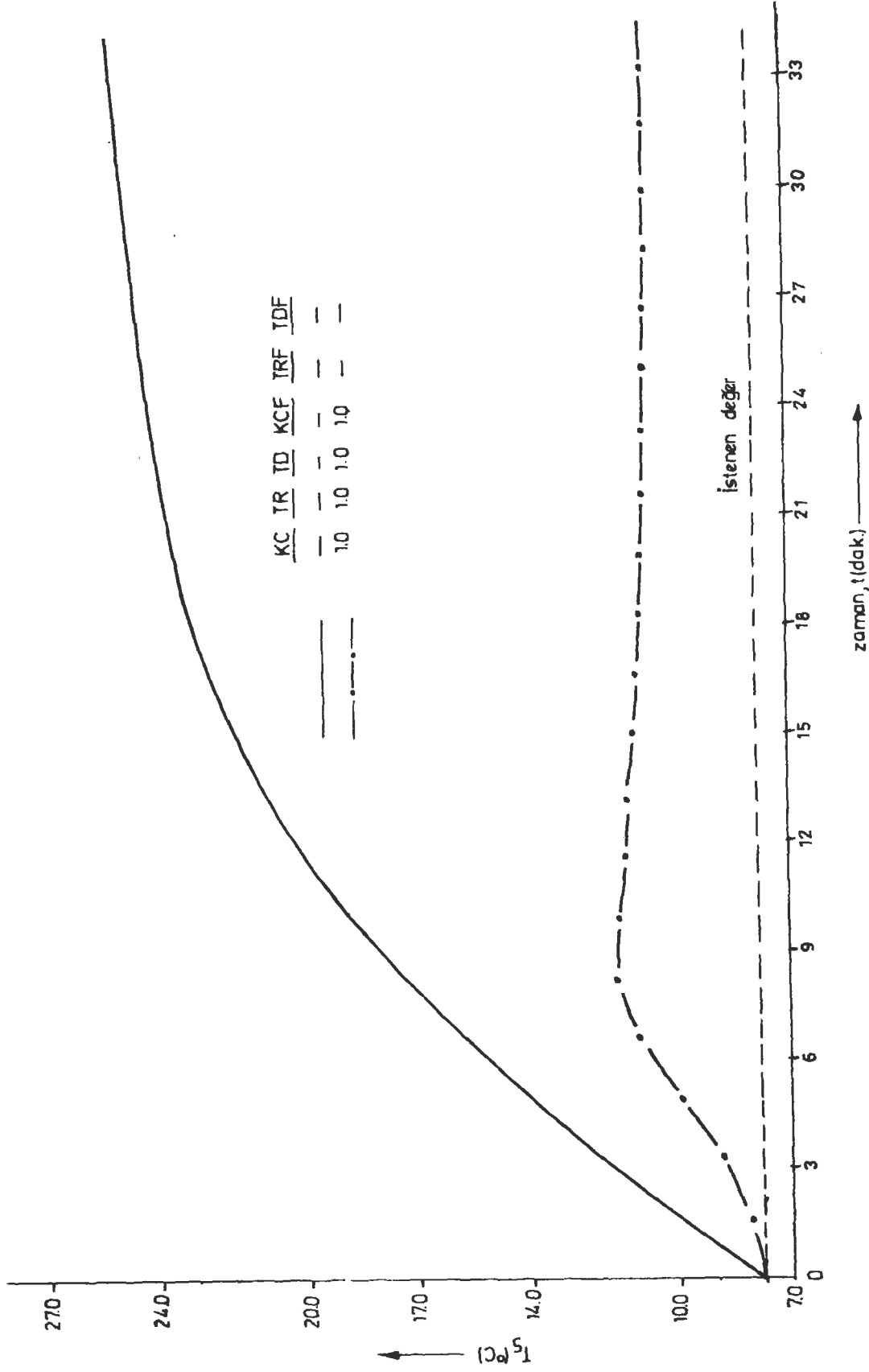
Şekil 5.53.: Kademe etkisinde, geri ve ileri beslemeli kontrol sistemi ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.



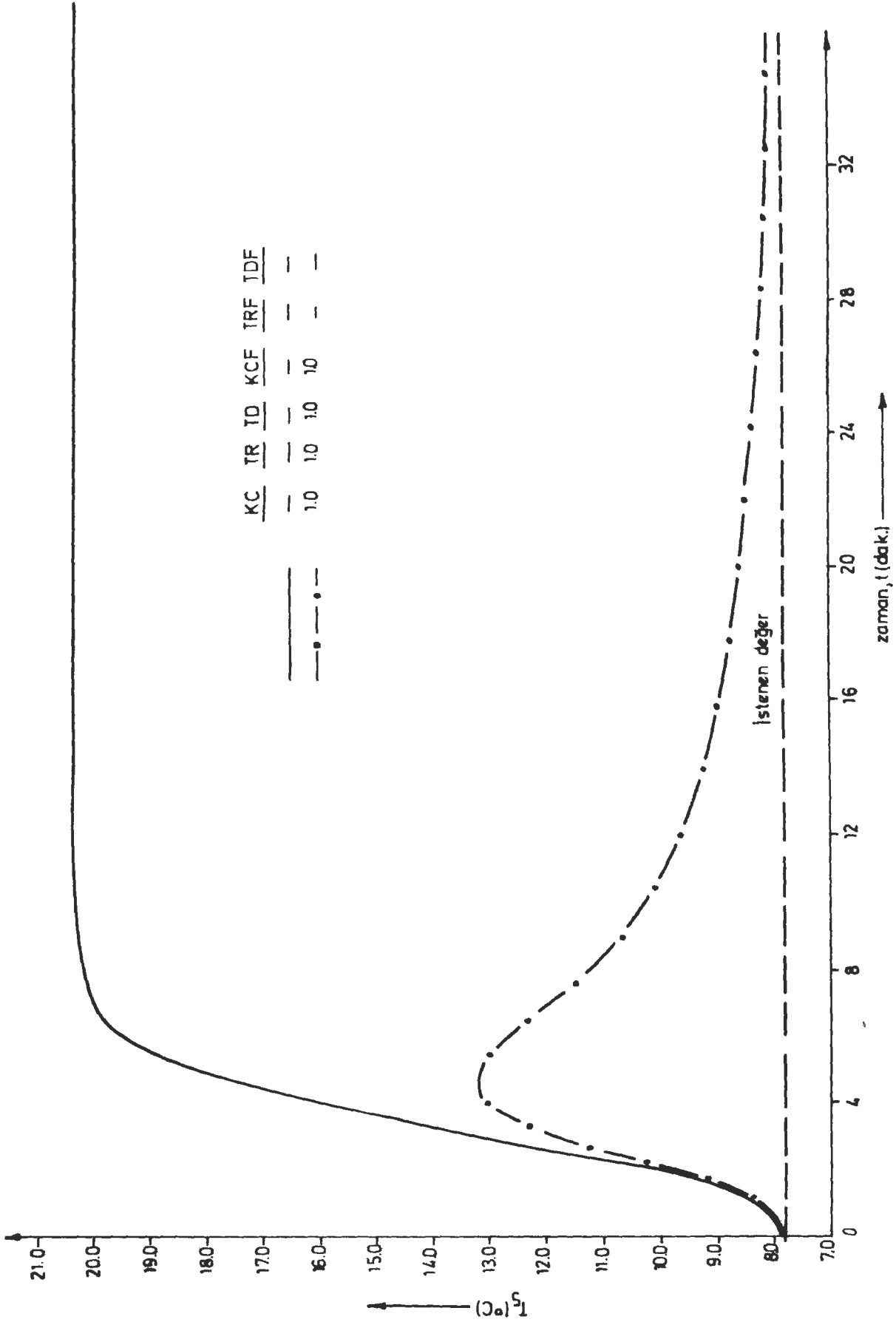
Şekil 5.54.: Kesiksiz ramp etkisinde, ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$).



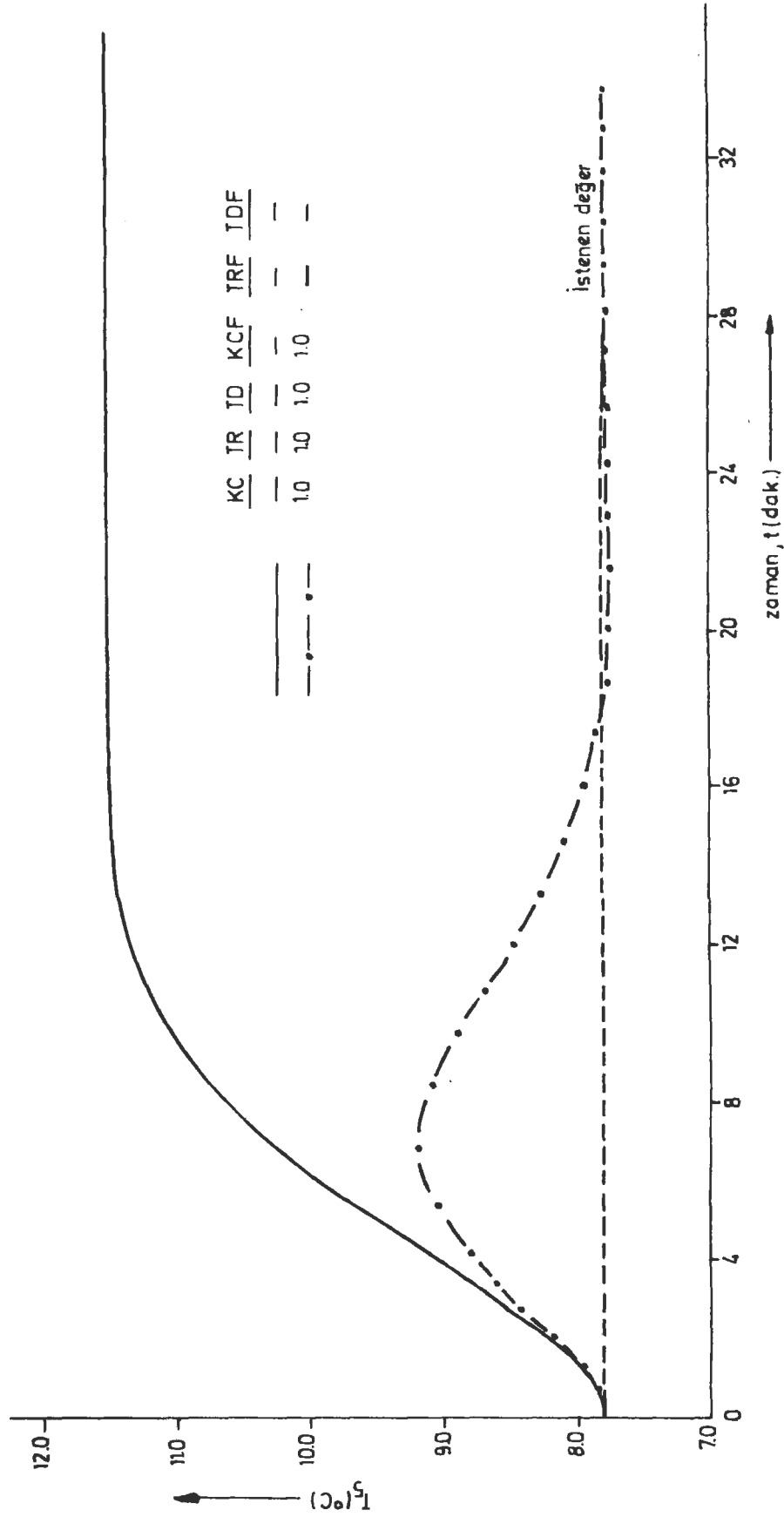
Şekil 5.55.: Kesiksiz ramp etkisinde, ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.5$).



Şekil 5.56.: Kesiksiz ramp etkisinde, ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 1.0$).



Şekil 5.58.: Kesikli ramp etkisi altında ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.5$, $t = 2$ dak).



Şekil 5.59.: Kesikli ramp etkisi altında, ileri ve geri beslemeli kontrol sistemleri ile beşinci tank çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi ($B = 0.1$, $t = 2$ dak).

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, yapılan araştırmadan elde edilen sonuçlar ve ileri çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

6.1. Sonuçlar

Beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinin, besleme akımındaki ramp değişiminde, dinamiği ve kontrolü üzerine yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Dinamik hesaplamalarda kesiksiz ramp etkisinin, sistemin tüm çıkış değişkenlerine kararsızlık verdiği görülmüştür.
2. Dinamik çalışmalarda çeşitli zamanlarda yapılan kesikli ramp etkilerinin tüm çıkış değişkenlerine kararlılık verdikleri görülmüştür.
3. Kontrol çalışmalarında kullanılan kontrol sisteminin kesiksiz ramp etkilerinin verdiği kararsızlığı yok ettiği fakat çıkış değişkenlerini istenen değerlere yaklaştıramadığı gözlenmiştir.
4. Kesikli rampların etkisinde kullanılan kontrol sistemlerinin kararsızlığı gidermesi yanında, uygun kontrol parametreleri seçimi ile çıkış değişkenlerini istenen değerlere yaklaştırdığı görülmüştür.

5. Bilgisayar alışmaları Anadolu Üniversitesi Bilgi İşlem Merkezi sayısal bilgisayar sistemi ICL 2903 de yürütülmüş ve bilgisayar ile mler 15-30 dakikada sonuçlanmıştır. Ayrıca çalışmaların bir kısmı Fırat Üniversitesi Bilgi İşlem Merkezinin IBM Bilgisayarında yürütülmüştür.

6. Beş tam karıştırmalı akım reaktörlerinde besleme akımı ile soğutma suyu ters yönlerde girdiğinden sistemin transfer fonksiyonu tam olarak elde edilememiştir.

7. Bölüm 3'te verilen tüm varsayımlarında bu hesaplamalar için geçerli olduğu görülmüştür.

6.2. İleri alışmalar İçin neriler

Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar yardımıyla ileri çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir.

1. İdeallikten sapan endüstriyel reaktörlerin dinamik ve kontrol çalışmaları için durgun bölge ve karışmıyan geçiş bölgeleri için hesaplama yöntemleride geliştirilen bilgisayar programlarına ilave edilmelidir.

2. Beş tam karıştırmalı akım reaktörlere ramp etki-lerinden başka çeşitli etkiler verilebilir.

3. Geri ve ileri beslemeli kontrol sistemlerinden başka değişik tipte Cascade kontrol sistemi uygulanabilir.

4. Beş tam karıştırmalı akım reaktörlere ceketle-rindeki metal cidarının ısı değişimi adi türevli veya kısmi türevli differansiyel denklemlerle ifade edilebilir.

5. Soğutma suyunun matematiksel modelinde varsayım yapılmadan adi türevli differansiyel denklem olarak alınabilir.

6. Sistemin birden fazla değişkenine çeşitli değişimler verilerek dinamik özellikleri incelenebilir (Multi-variable analysis).

7. Beş tam karıştırmalı akım reaktör dizesi kademeli parametrelili sistem yerine dağılımlı-parametrelili sistem olarak incelenebilir.

8. Isı transfer katsayısı U için daha sağlıklı değerler hesaplanabilir.

EK-1

SOĞUTMA SUYU İÇİN ENERJİ DENKLIĞI

Bölüm (3)'de verilen soğutma suyu yatişkin olmayan hal denklemlerinin sayısal bilgisayar çözümlerinde kullanılabilmesi için yapılan yaklaşım yöntemi aşağıda verilmiştir.

$$V_2 \rho_2 C_{p2} \theta_4 + UA(T_1 - \theta_5) = V_2 \rho_2 C_{p2} \theta_5 + M_c C_{p2} \frac{d\theta_5}{dt} \quad (3.9)$$

$$V_2^0 \rho_2 C_{p2} \theta_4 + (UA)_0 (T_1 - \theta_5^0) = V_2^0 \rho_2 C_{p2} \theta_5^0 \quad (E1.1)$$

Burada T_1 ve θ_4 sabit alınarak, (E1.1) denklemini (3.9) dan çıkartılırsa;

$$V_2' (C_{p2} \rho_2 \theta_4) + UA' (T_1) - UA' (\theta_5^0) - \theta_5' (UA)_0 = V_2' (\rho_2 C_{p2} \theta_5)_0 + \theta_5' (V_2 C_{p2} \rho_2)_0 + M_c C_{p2} \frac{d\theta_5'}{dt} \quad (E1.2)$$

$$M_c C_{p2} \frac{d\theta_5'}{dt} + ((V_2 C_{p2} \rho_2)_0 + (UA)_0) \theta_5' = ((C_{p2} \rho_2 \theta_4) - (\rho_2 C_{p2} \theta_5)_0) V_2' + ((T_1)_0 - (\theta_5)_0) UA'$$

$$- (\rho_2 C_{p2} \theta_5)_0 V_2' + ((T_1)_0 - (\theta_5)_0) UA' \quad (E1.3)$$

$$\frac{M_c C_{p2}}{((V_2 C_{p2} \rho_2)_0 + (UA)_0)} \frac{d\theta_5'}{dt} + \theta_5' = \frac{(C_{p2} \rho_2 \theta_4) - (\rho_2 C_{p2} \theta_5)_0}{((V_2 C_{p2} \rho_2)_0 + (UA)_0)} V_2' + \frac{(T_1)_0 - (\theta_5)_0}{((V_2 C_{p2} \rho_2)_0 + (UA)_0)} UA' \quad (E1.4)$$

veya

$$L\theta_5' + \theta_5' = K_1 V_2' + K_2 UA' \quad (E1.5)$$

$$\text{burada } L \text{ zaman sabiti} = \frac{M_c C_{p2}}{(V_2 \rho_2 C_{p2})_0 + (UA)_0}$$

ve K_1 ve K_2 sistem kazançlarıdır.

Aşağıdaki sayısal değerler için

$$M_c = 96.0 \text{ g } C_{p2} = 1.0 \text{ cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \rho_2 = 1.0 \text{ g cm}^{-3}$$

$$(UA)_0 = [(0.04) (300)] = 12 \text{ cal } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ sn}^{-1} \quad V_2^0 = 6 \text{ lt dak}^{-1}$$

$L = 0.857 \text{ sn}$ olarak elde edilir.

Zaman sabiti çok küçük olduğundan soğutma suyundaki birikme terimi ihmal edilir. (3.9) eşitliğinin düzenlenmesinden;

$$\rho_2 V_2 C_{p2} (\theta_5 - \theta_4) = UA (LMTD) \quad (E1.6)$$

$$= \frac{UA ((T_1 - \theta_5) - (T_1 - \theta_4))}{\ln \left(\frac{T_1 - \theta_5}{T_1 - \theta_4} \right)}$$

ve (E1.6) denkleminde θ_4 çekilirse;

$$\theta_4 = T_1 - (T_1 - \theta_5) \exp(UA / \rho_2 V_2 C_{p2}) \quad (E1.7)$$

soğutma suyu için enerji denkliği elde edilir. (E1.7) denklemi sayısal bilgisayar çözümlerinde kullanılmıştır.

YATIŞKIN-HAL DENKLEMLERİNİN SAYISAL BİLGİSAYAR İLE ÇÖZÜMLERİ

Sayısal bilgisayarda, yataşkın-hal denklemlerinin çö-
zümlerinde gerekli olan başlangıç şartlarını hesaplamak için
yataşkın-hal denklemlerinin çözüldüğü ve bu çözümde Newton-
Raphson dene-bul ile Golden-Section Search yöntemlerinin kul-
lanıldığı Bölüm 4'de anlatılmıştı.

Bu çözüm için bir anaprogramın yanında, iki de alt
program kullanılmıştır.

i. Ana program

Anaprogram, yataşkın-hal denklemlerinden faydalanarak
reaktör çıkış sıcaklığı ile derişimini, soğutma suyu çıkış sı-
caklığını ve her bir kademede açığa çıkan ısıyı hesaplar. Bu
hesaplamalarda Newton-Raphson dene-bul yöntemi ile altprogram
CONVERA ve GOLDA yı kullanır. Anaprogramda kullanılan eşit-
likler aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$C_1 = A(3) \star (\exp(A(6)) - 1) \text{ burada;} \quad (E2.1)$$

$$A(3) = V_2 \rho_2 C_{p2} / V_1 \rho_1 C_{p1} ; A(6) = U \star A_2 / V_2 \rho_2 C_{p2} \text{ dir.}$$

$$C_2 = 12100.0 \star A(7) \quad (E2.2)$$

burada;

$$A(7) = V \cdot \Delta H / V_1 \rho_1 C_{p1} \text{ dir.}$$

$$EK = E(TAS) \quad (E2.3)$$

$$E(TAS) = \exp(36.49 - 12100/TAS); TAS = T_1 \quad (E2.4)$$

$$T_C = TAS - (TAS - X(3)) \star A(8) \quad (E2.5)$$

$$X(3) = \theta_5; T_C = \theta_4; A(8) = \exp(U \star A_2/V_2 \rho_2 C_{p2})$$

$$FT = -TAS + X(2) - C1 \star (TAS - X(3)) - EK \star A(7) \star X(1) / (1.0 + EK \star VOL / FLOWA) \quad (E2.6)$$

$$X(2) = T_0; VOL = V; FLOWA = V_1$$

$$FDT = -1. - C1 - C2 \star X(1) \star EK / ((TAS \star \star 2) \star ((1 + EK \star VOL / FLOWA) \star \star 2)) \quad (E2.7)$$

$$X(1) = C_0$$

$$TOUT = TAS - FT / FDT \quad (E2.8)$$

$$HEATIN = E(Q(IH, 4) + 273) \star VOL \star DELH \star 0.001 \star Q(IH, 2) \star 4.18 \quad (E2.9)$$

$$HEATIN = E(T_1) \star V \star \Delta H \star 0.001 \star C1 \star 4.18 \quad (E2.10)$$

ii. Altprogram CONVERA

Anaproğrama bağlı olarak çalışır ve burada elde edilen değerlerin birimlerini çevirmede kullanılır.

iii. Altprogram GOLDA

Anaproğrama bağlı olarak çalışır ve Newton-Raphson yöntemine yardımcı olarak soğutma suyu çıkış sıcaklığı için, Golden-Section Search yöntemini kullanarak seçilen iki sınır değeri arasında yeni tahmini değerler üretir.

Tüm çözüm programı Şekil E2.1. ve listesi Tablo E2.1. de verilmiştir.

TABLE E2.1.: Yatışkın-hal denklemlerinin sayısal bilgisayar çözümü
Fortran programı.

```

1757
SEND TO (SEMICOMPILED)
LIBRARY(SUBGROUPS2F7)
WORK(WORKFILE)
DUMP ON(PROGRAM FORT)
RUN
PROGRAM(XXXX)
INPUT1=CR4
OUTPUT2=LP3
END
ARAS.GOP. SULFMAN KAYTAKOGLU
KIMYA MHH.BOL.MUHENDISLIK-MIMARLIK FAKULTESI
ANADOLU UNIVERSTITESI ESKISEHIR

```

BES TAM KARTSTIRMALI AKIM REAKTORUNUN
YATISKIN-HAL DENKLEMLERININ SAYISAL
BILGI SAYARDA COZUMLERI

SEMBOLLER:

A(1)	:HESAPLANMIS FONKSIYON KISIMLARI
CONC	:HESAPLANMIS CIKIS DERISIMI
DEFLH	:REAKSIYON ISISI
EK	:REAKSIYON HIZ SARITININ BULUNUSU
FLOWA	:BESLEME AKIS HIZI
FT	:CIKIS SICAKLIGININ BULUNMASINDA
	:KULLANILAN DENKLEM
FTD	:BU DENKLEMIN TUREV ALINMIS HALI
HEATIN	:ACIGA CIKAN ISI
INTVAL	:SIIR DEGERLER ARASINDAKI FARK
L	:SOGUTMA SUYU AKIS HIZI
NTANK	:TANK SAYISI
RHOA	:BESLEME YOGUNLUGU
RHOB	:SOGUTMA SUYU YOGUNLUGU
SPECA	:BESLEME ISI KAPASITESI
SPECH	:SOGUTMA SUYU ISI KAPASITESI
TACT	:SOGUTMA SUYUNUN GIRIS SICAKLIGI
TAS	:VARSAYILAN CIKIS SICAKLIGI
TC	:BIRINCI KADEMEYE GIREN SOGUTMA
	:SUYU SICAKLIGI
TEMPA	:EN DUSUK SICAKLIK LIMITI
TEMPR	:EN YUKSEK SICAKLIK LIMITI
TGUESS	:TAMMIN EDILEN SOGUTMA SUYU CIKIS
	:SICAKLIGI
TOUT	:HESAPLANMIS CIKIS SICAKLIGI
U	:ISI TRANSFER KATSAYISI
X(1)	:FASLANGIC DEGERLERI
VOL	:PIP TANKIN HACMI
WIDTH	:PIP TANKIN GENISLIGI

MASTER PROG

DIMENSION H(10),A(20)

COMMON X(40),C(40,40),TOUT,CONC,TC,N,TEMPA,TEMPR,TGUESS,TACT

F(DUMMY)=EXP(36.40-(12100.0/DUMMY))

READ(1,10)VOL,FLOWA,DEFLH,RHOA,SPECA

10 FORMAT(5F0.1)

READ(1,11)WIDTH,SPECH,RHOB,U

```

      READ(1,11) TEMPA,TEMPR,TACT,TGUESS
11  FORMAT(4F0.6)
      READ(1,12) NTANK
12  FORMAT(I0)
      READ(1,13) (X(I),I=1,3)
13  FORMAT(3F0.0)
      WRITE(2,70)
70  FORMAT(36H CASCADE MODEL IN KARARLI HAL ANALIZI)
      WRITE(2,71)
71  FORMAT(/120(1H-)/)
      R(1)=X(1)
      R(2)=X(2)
      DTEMPA=TEMPA
      DTEMPR=TEMPR
      DTGUESS=TGUESS
      NTANK=NTANK+1
      FLOWA=1
      WRITE(2,80) FLOWA
80  FORMAT(/17H MADDE AKIS HIZI=,F5.2,5X,9H LITRE/DAK)
      FLOWA=FLOWA*100./6.
      WRITE(2,71)
      DO 15 L=4,20
      U=0.0018333333*L+0.029
      WRITE(2,95) L,U
95  FORMAT(24H SOGUTMA SUYU AKIS HIZI=,F5.2,5X,9H LITRE/DAK/,2X,
      *3H U=,F7.4//)
      FLOWR=FLOWA*(L)*100./6.
      WRITE(2,72)
72  FORMAT(3(8X,5H GIRIS,14X,5H CIKIS,7X))
      WRITE(2,73)
73  FORMAT(2(3X,14HKONSANTRASYONU,3X),2(3X,5H MADDE,6X),2(7X,
      112HSOGUTMA SUYU))
      WRITE(2,75)
75  FORMAT(2(4X,13HGM-MOL/LITRE,3X),4(7X,8H DERECE C,5X))
      A(1)=FLOWR*RHOA*SPECB
      A(2)=RHOA*FLOWA*SPECA
      A(3)=A(1)/A(2)
      A(4)=VOL/FLOWA
      A(5)=WIDTH*20.
      A(6)=(U*A(5))/A(1)
      A(7)=(VOL*DFLH)/A(2)
      A(8)=EXP(A(6))
      N=1
      K=0
      C1=A(3)*(EXP(A(6))-1)
      C2=12100.0*A(7)
25  TAS=300.
      J=1
20  EK=E(TAS)
      TC=TAS-(TAS-X(3))*A(8)
      FT=-TAS+X(2)-C1*(TAS-X(3))-EK*A(7)*X(1)/(1.0+EK*VOL/FLOWA)
      FDT=-1.-C1-C2*X(1)*EK/((TAS**2)*((1.+EK*VOL/FLOWA)**2))
      TOUT=TAS-FT/FDT
      IF(ABS(TOUT-TAS).LT..01) GOTO 21
      TAS=TOUT
      J=J+1
      IF(J.GT.100) GOTO 22
      GOTO 20
21  CONC=X(1)/(1+(E(TOUT)*A(4)))

```

```

      CALL CONVERA
74  FORMAT(2(5X,E11.4,4X),4(6X,F7.3,7X))
      N=N+1
      X(1)=CONC
      X(2)=TOUIT
      X(3)=TC
      IF(N.LT.NTANK) GOTO 25
      IF(ABS(TC-TACT).LT..01) GO TO 100
      CALL GOIDA
      TGUESA=TGUESS-273.
      X(1)=R(1)
      X(2)=R(2)
      X(3)=TGUESS
      K=K+1
      N=1
      IF(K.LT.30) GOTO 25
      WRITE(2,44)
44  FORMAT(24H ISTENEN DEGRE ULASMAI)
      STOP
22  WRITE(2,45)
45  FORMAT(29H DAHA FAZLA ITERASYON GEREKLII)
      STOP
100  DO 140 IJ=1,N-1
      WRITE(2,76)(Q(IJ,IK),IK=1,6)
140  CONTINUE
      WRITE(2,77) TGUESA
77  FORMAT(//28H TAHMIN EDIEN YENI SICAKLIK,F9.3)
C    TANKLARDA ACIGA CIKAN ISI MIKTARININ HESAPLANMASI
C
      WRITE(2,110)
110  FORMAT(//,10X,8HTANK NO.,15X,15HACIGA CIKAN ISI,/)
      DO 120 IH=1,N-1
      HEATIN=F(Q(IH,4)+273.)*VOL*DEHN*0.001*Q(IH,2)*4.18
      WRITE(2,130) IH,HEATIN
130  FORMAT(12X,12,20X,E12.4)
120  CONTINUE
      N=1
      K=0
      TEMPA=DTEMPA
      TEMPH=DTEMPR
      TGUESS=DTGUES
      X(1)=R(1)
      X(2)=R(2)
      X(3)=TGUESS
      WRITE(2,71)
15  CONTINUE
      STOP
      END
      SUBROUTINE CONVERA
      COMMON X(40),Q(40,40),TOUIT,CONC,TC,N,TEMPA,TEMPR,TGUESS,TACT
      Q(N,1)=X(1)*1000.
      Q(N,2)=CONC*1000.
      Q(N,3)=X(2)-273.
      Q(N,4)=TOUIT-273.
      Q(N,5)=TC-273.
      Q(N,6)=X(3)-273.
      RETURN
      END
      SUBROUTINE GOIDA

```

```

REAL INTVAL
COMMON X(40),C(40,40),TOUT,CONC,TC,N,TEMPA,TEMPB,TGUESS,TACT
IF(X(3).GT.TACT) GOTO 300
TEMPA=TGUESS
GOTO 301
300 TEMPB=TGUESS
301 INTVAL=TEMPB-TEMPA
TGUESS=TEMPA+(INTVAL/1.618)
RETURN
END
FINISH

```

YATIŞKIN OLMAYAN-HAL DENKLEMLERİNİN SAYISAL
BİLGİSAYAR İLE ÇÖZÜMLERİ

Yatışkın olmayan-hal programı; yatışkın-hal çözüm sonuçları olan başlangıç şartları yardımı ile yatışkın olmayan-hal denklemlerini çözerek, tüm kademeler için çıkış sıcaklık, derişim ve soğutma suyu sıcaklıklarının zamana göre değişimlerini hesaplar. Bir ana ve üç altprogramdan oluşmuştur.

i. Altprogram RUKU4

Bu altprogramda Bölüm 4 de bahsedilen, bir sayısal çözüm metodu olan 4.dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak yatışkın olmayan-hal denklemleri seri halde çözülmüştür. Hesaplamalardan önce yatışkın olmayan-hal denklemleri; dördüncü dereceden Runge-Kutta yönteminde kullanılabilecek hale getirilmelidir.

ii. Altprogram EQNS

Yatışkın olmayan-hal denklemlerinin Runge-Kutta yönteminde kullanılabilmesi için altprogram EQNS dan yararlanılır. Altprogram EQNS'ta differansiyel denklemler; türevli ifade bir tarafta, diğer terimler eşitliğin öbür tarafında olacak şekilde düzenlenerek, türevli ifadeler FUN () ve değişkenlerin önündeki sabit katsayılar da A () indisli terimler şeklinde tanımlanmıştır.

$$FUN(4) = \frac{dC_1}{dt} = \frac{V_1}{V} (C_0 - C_1) - k(T_1)C_1 \quad (4.6)$$

$$FUN(5) = \frac{dT_1}{dt} = \frac{V_1}{V} (T_0 - T_1) - \frac{\rho_2 V_2 C_{p2}}{\rho_1 V C_{p1}} (\theta_5 - \theta_4) - \frac{\Delta H C_1}{\rho_1 C_{p1}} k(T_1) \quad (4.7)$$

$$A(1) = \frac{V_1}{V} ; A(2) = \frac{\Delta H}{\rho_1 C_{p1}} ; A(3) = \frac{V_2 \rho_2 C_{p2}}{\rho_1 V C_{p1}}$$

Sistem değişkenleri ise aşağıdaki gibi alınır;

$$X(1) = C_0 ; X(4) = C_1 ; X(5) = T_1 ; X(2) = T_0 \text{ ve } X(3) = \theta_5 ;$$

$$X(6) = \theta_4$$

$$FUN(4) = A(1) * X(1) - A(1) * X(4) - E(X(5)) * X(4) \quad (E3.1)$$

$$FUN(5) = A(1) * X(2) - A(1) * X(5) - A(2) * E(X(5)) * X(4) - A(3) * (X(3) - X(6)) \quad (E3.2)$$

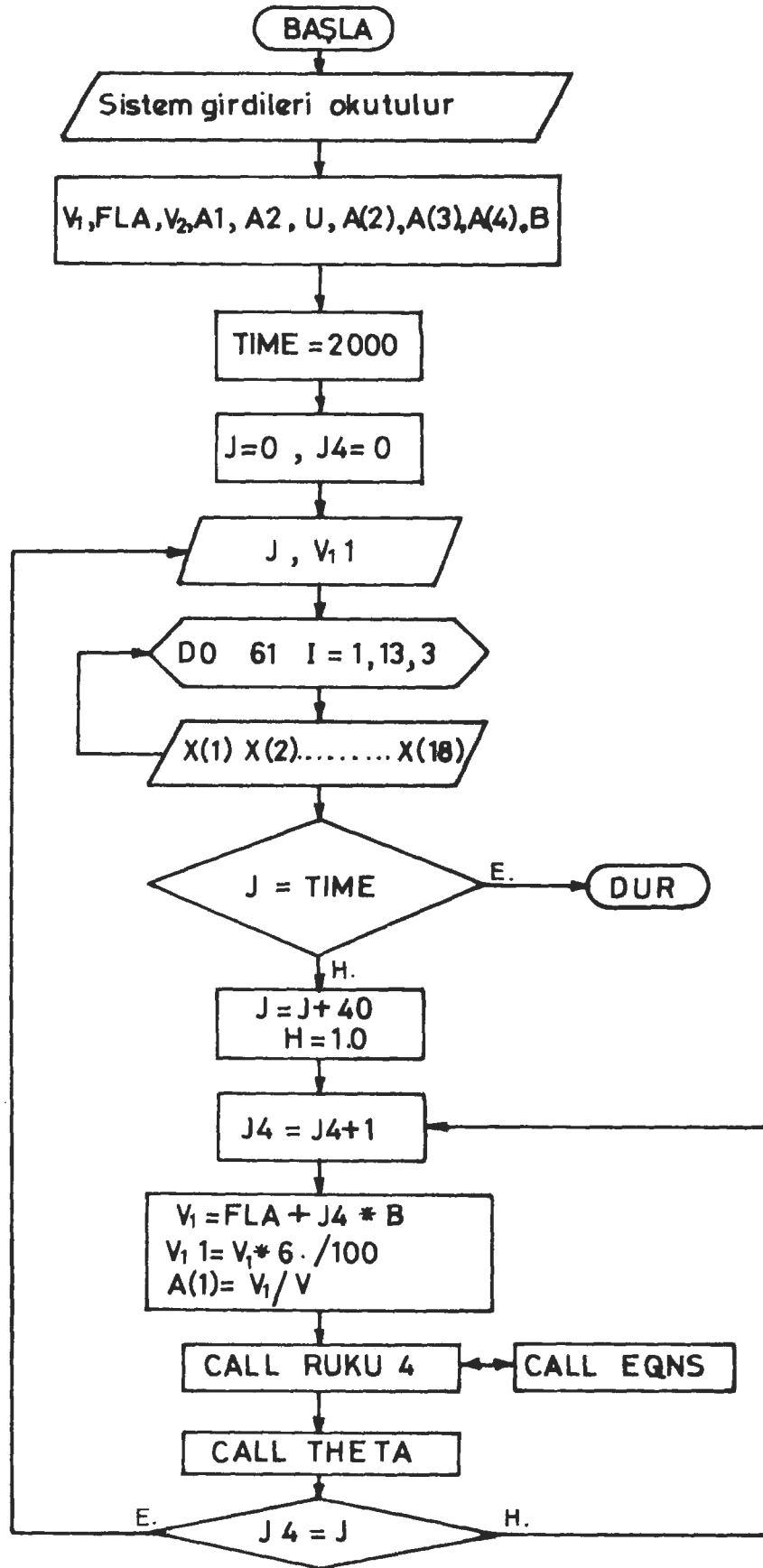
şeklinde tanımlanır.

iii. Altprogram THETA

Bu altprogramda, (3.10) eşitliği kullanılarak soğutma suyu sıcaklıkları hesaplanır. Kullanılan eşitliğin bir benzeri aşağıdaki gibidir.

$$\theta_1 = T_5 - (T_5 - \theta_0) \exp(-UA/V_2 \rho_2 C_{p2}) \quad (E3.3)$$

Tüm çözüm programı Şekil E3.1. ve listesi Tablo E3.1. de verilmiştir.



Şekil E3.1.: Yatışkın olmayan-hal denklemlerinin sayısal bilgisayar çözüm programı akış şeması.

TABLO E3.1.: Yatışkın olmayan-hal denklemlerinin sayısal bilgisayar
çözümü Fortran programı.

```

LIST
SEND TO (SEMICOMPILFD)
LIBRARY(SUBGROUPS2F7)
WORK(WORKFILE)
DUMP ON(PROGRAM FORT)
RI'N
PROGRAM(XXXX)
INPUT1=CR4
OUTPUT2=LP3
END
APAS.GOR. SULEYMAN KAYTAKOGLU
KIMYA MÜH.BÖL.MÜHENDİSLİK-MİMARLIK FAKÜLTESİ
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ ESKİŞEHİR

```

BİR TANK KARIŞTIRMALI AKIM REAKTORUNUN
YATISIKIN OLMAYAN-HAL DENKLEMLERİNİN SAYISAL
BİLGİ SAYARDA ÇÖZÜMLERİ

(SEMBOLLER:

```

A(I)      : HESAPLANMIŞ FONKSİYON KISIMLARI
AREA1     : REAKTOR İN KESİTİ
AREA2     : İST TRANSFER YÜZÜYÜ
AREA3     : SOĞUTMA KANALI KESİTİ
B         : RAMP FONKSİYONUNUN EĞİMİ
DELI      : REAKSİYON İSTİSİ
FLOWA     : DESLEME AKIS HIZI
FLOWA1    : DESLEME AKIS HIZI
FLOWB     : SOĞUTMA SUYU DESLEME AKIS HIZI
H         : İNTEGRASYON ZAMAN ARTISI
LENGTH    : BİR TANKIN UZUNLUĞU
NTANK     : TANK SAYISI
PRINT     : ZAMAN ARTISI
Q(I)      : HESAPLANMIŞ SİSTEM DEĞERLERİ
RHOA      : DESLEME YÖĞÜNLÜĞÜ
RHOB      : SOĞUTMA SUYU YÖĞÜNLÜĞÜ
SPECa     : DESLEME İST KAPASİTESİ
SPECB     : SOĞUTMA SUYU İST KAPASİTESİ
TIME      : ZAMAN
U         : İST TRANSFER KATSAYISI
VOLa      : BİR TANKIN HACMİ
WIDTH     : BİR TANKIN GENİSLİĞİ
X(I)      : BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ
MASTER PROG
REAL LENGTH,L,M
INTEGER PRINT,TIME
DIMENSION R(20)
COMMON/BLOCK1/X(100)/BLOCK3/A(100)
READ(1,14) AREA3,R
14 FORMAT(2F0.0)
READ(1,10) VINTH,FLOWA,RHOA,LENGTH
READ(1,12) FLOWB,VOLA,DELI
10 FORMAT(4F0.0)
READ(1,11) NTANK,TIME
11 FORMAT(2I0)
N=18

```

```

      READ(1,12) (X(I),I=1,N)
12  FORMAT(3F0.0)
      READ(1,12) L,M,U
      READ(1,12) SPECA,SPECB,RHOB
      WRITE(2,51)
51  FORMAT(75H  MADDE AKIS HIZINA RAMP DEGISIYI VEREREK CASCADE
      1  MODELIN ACIK HAT YANITIMI//)
      U=0.04
      FLOWA=1.
      FLOWA1=1.
      FLOWA=FLOWA*100./6.
      FIA=FLOWA
      FLOWB=FLOWB*100./6.
      AREA1=WIDTH*10.
      AREA2=LENGTH*20.
      A(2)=DEIH/(RHOA*SPECA)
      A(3)=(FLOWA*RHOB*SPECB)/(RHOA*VOLA*SPECA)
      A(4)=(U*AREA2)/(FLOWB*SPECB*RHOB)
      A(4)=-A(4)
      TIME=1000.
      J4=0
      J=0
35  WRITE(2,52) J,FLOWA1
52  FORMAT(44H KONSANTRASYON VE SICAKLIGIN ALGICI DEGERLER,16,
      18H SANYE,11,8H FLOWA=,F7.4,9H LITRE/DK)
      WRITE(2,53)
53  FORMAT(112H(1H-)//)
      WRITE(2,54)
54  FORMAT(3(8X,5H GIRS,14X,5H CTKIS,7X))
      WRITE(2,55)
55  FORMAT(2(3X,14H KONSANTRASYONU,4X,5X,5H MADDE,14X,5H MADDE,12X,
      112H SOGUTMA SUYU,7X,12H SOGUTMA SUYU)
      WRITE(2,56)
56  FORMAT(1H,45X,9H SICAKLIGI,10X,9H SICAKLIGI,13X,9H SICAKLIGI,
      110X,9H SICAKLIGI)
      WRITE(2,57)
57  FORMAT(2(4X,12H GM-MOL/LITRE,5X),4X,8H DERECE C,11X,8H DERECE C,
      114X,8H DERECE C,11X,8H DERECE C)
      WRITE(2,53)
      DO 61 I=1,N-5.3
      Q(1)=X(I)*1000.
      Q(2)=X(I+3)*1000.
      Q(3)=X(I+1)-273.
      Q(4)=X(I+4)-273.
      Q(5)=X(I+5)-273.
      Q(6)=X(I+2)-273.
      WRITE(2,60) Q(1),Q(2),Q(3),Q(4),Q(5),Q(6)
60  FORMAT(2(5X,E11.4,4X),4(6X,E7.3,7X))
61  CONTINUE
      WRITE(2,53)
      IF(J.FO.TIME) STOP
      J=J+40
      H=1.0
49  J4=J4+1
      FLOWA=FI A+J4*F
      FLOWA1=FLOWA*2./100.
      A(1)=FLOWA/VOLA
      CALL SUBU4(U,H)
      CALL THETA(H)

```

```

      IF(J4.EQ.J) GO TO 35
      GOTO 49
      STOP
      END
      SUBROUTINE RUFU4(N,H)
      REAL K
      DIMENSION K(4,100),Y(100)
      COMMON/BLOCK1/X(100)/BLOCK2/FUN(100)
      DO 100 M=1,N
100  Y(M)=X(M)
      DO 101 I=1,4
      CALL EONS(N)
      DO 102 J=4,N-2,3
      K(I,J)=H*FUN(I)
      K(I,J+1)=H*FUN(J+1)
      GOTO(103,103,104,105),I
103  X(J)=Y(J)+K(I,J)/2.
      X(J+1)=Y(J+1)+K(I,J+1)/2.
      GOTO 102
104  X(J)=Y(J)+K(I,J)
      X(J+1)=Y(J+1)+K(I,J+1)
      GOTO 102
105  X(J)=Y(J)+(K(1,J)+2.*K(2,J)+2.*K(3,J)+K(4,J))/6.
      X(J+1)=Y(J+1)+(K(1,J+1)+2.*K(2,J+1)+2.*K(3,J+1)+K(4,J+1))/6.
102  CONTINUE
101  CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE EONS(N)
      COMMON/BLOCK1/X(100)/BLOCK2/FUN(100)/BLOCK3/A(100)
      E(DUMMY)=EXP(36.49-(12100./DUMMY))
      DO 400 J=4,N-2,3
      FUN(J)=A(1)*X(J-3)-A(1)*X(J)-E(X(J+1))*X(J)
      FUN(J+1)=A(1)*X(J-2)-A(1)*X(J+1)-A(2)*E(X(J+1))*X(J)-A(3)*
1  (X(J-1)-X(J+2))
400  CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE THETA(N)
      COMMON/BLOCK1/X(100)/BLOCK3/A(100)
      IA=3
      DO 53 I=2,N/3
      X(N-IA)=X(N+2-IA)-((X(N+2-IA)-X(N+3-IA))*EXP(A(4)))
53  IA=IA+3
      RETURN
      END
      FINISH

```

KONTROL HESAPLARI İÇİN SAYISAL BİLGİSAYAR ÇÖZÜMLERİ

Beş tam karıştırmalı akım reaktörünün kontrolü için kullanılan sayısal bilgisayar programı bir ana ve 7 alt programdan oluşmuştur. Program akış şeması Şekil E4.1. de tüm program Tablo E4.1. de verilmiştir.

i. Altprogram CNTRLA

Geri beslemeli kontrol mekanizmasını oransal, türevsel, integral kontrol elemanlarının tümünü kullanarak uygulayan altprogramdır. Bu programda integral kontrol için Simpson kuralı {29} ve türevsel kontrol için Euler yöntemi {29.} kullanılmıştır.

ii. Altprogram FFCB

Bu altprogram ileri beslemeli kontrol mekanizmasını oransal, integral, türevsel kontrol elemanlarının tümü için gerçekleştirir.

iii. Altprogram MEAA

Kontrol edilmesi istenen değişkenin ölçülmesinde kullanılan altprogramdır.

iv. Altprogram VALVEA

Bu altprogram geri ve ileri beslemeli kontrol altprogramlarından gelen sinyalleri değerlendirir ve vanayı kontrol eder.

Burada kullanılan vana sabiti deneysel olarak aşağıdaki denklemlerle belirlenir.

$$KV = \frac{V_2}{C_{op}}$$

V_2 : Akış hızı

C_{op} : Kontrol çıkış basıncı

v. Altprogram EULM

Bu altprogram düzeltilmiş Euler yöntemini kullanarak differansiyel denklem çözer.

vi. Altprogram EQNS

Burada altprogram EULM de kullanılacak differansiyel denklemler ifade edilir.

vii. Altprogram THETA

Soğutma suyu sıcaklıklarını Bölüm 3. de verilen (3.10) eşitliğini kullanarak hesaplar.

TABLO E4.1.: Kontrol için sayısal bilgisayar çözümü Fortran programı.

```

IIST
SEND TO (SEMICOMPILFD)
LIBRARY(SUBGROUPS2F7)
WORK(WORKFILE)
DUMP ON(PROGRAM FORT)
RUN
PROGRAM(XXXX)
INPUT1=CR4
OUTPUT2=LP3
END
C  ARAS.GOR. SULFYMEN KAYTAKOGLU
C  KIMYA MUH.BOL.MUHENDISLIK-MIMARLIK FAKULTESI
C  ANADOLU UNIVERSITESI ESKISEHIR
C
C  RFS TAM KARISTIRMALI AKIM REAKTORUNUN
C  KONTROLU ICIN SAYISAL BILGISAYAR COZUMLERI
C
C  SEMBOLLER:
C
C  A(I)      :HESAPLANMIS FONKSIYON KISIMLARI
C  AREA1     :REAKTOR ON KESITI
C  AREA2     :ISI TRANSFER YUZEYI
C  AREA3     :SOGUTMA KANALI KESITI
C  ANSIG     :ILERI BESLEME OLCUM SINYALI
C  B         :RAMP FONKSIYONUNUN FGIMI
C  CSIG      :KONTROL SINYALI
C  DEIN      :REAKSIYON ISISI
C  ERROR(K)  :HAIALARDAN OLUSTURULAN MATRIS
C  FU,F1     :SOGUTMA SUYU BESLEME AKIS HIZI
C  FLOWA     :BESLEME AKIS HIZI
C  FLOWA1    :BESLEME AKIS HIZI
C  FLOWR     :SOGUTMA SUYU BESLEME AKIS HIZI
C  H         :INTEGRASYON ZAMAN ARTISI
C  JA        :ZAMAN SAYACI
C  INT       :INTEGRAL IFADESI
C  KC        :ORANSAL KONTROL SABITI GERI RFS.
C  KCF       :ORANSAL KONTROL SABITI ILERI RES.
C  KV        :VANA SABITI
C  LAGM      :OLCUM GECIKMESI
C  LAGV      :VANA GECIKMESI
C  LAG       :TOPIAM GECIKME
C  LENGTH    :BIR TANKIN UZUNLUGU
C  NTANK     :TANK SAYISI
C  MSIG      :OLCUM SINYALI
C  PRINT     :ZAMAN ARTISI
C  Q(I)      :HESAPLANMIS SISTEM DEGERLERI
C  RHOA      :BESLEME YOGUNLUGU
C  RHOB      :SOGUTMA SUYU YOGUNLUGU
C  SPECa     :BESLEME ISI KAPASITESI
C  SPECB     :SOGUTMA SUYU ISI KAPASITESI
C  SPNT      :AYAR NOKTASI
C  SPNTF     :ILERI BESLEME AYAR NOKTASI
C  STEP      :ZAMAN ARTIS DEGERI
C  SV        :YANITIM
C  TEMP(I,K) :OLCUM SICAKLIK ARTINDAN OLUSAN
C             :MATRIS

```

```

C      TR      : INTEGRAL ZAMAN SARITI
C      TRF     : ILIRI BESLEME INTEGRAL HAREKET
C           : ZAMANI
C      TDF     : ILIRI BESLEME TUREVSEL HAREKET
C           : ZAMANI
C      TIME    : ZAMAN
C      II     : ISI TRANSFER KATSAYISI
C      VOLA    : BIR TANKIN HACMI
C      VSIG,VSI : VANA SINYALI
C      W       : AGIRLIKLI SICAKLIK OLCUM
C           : KATSAYILARI
C      X(I)    : BASLANGIC DEGERLERI
MASTER PROG
REAL L,M,LENGTH,KC,MSIG,KV,KCF
INTEGER PRINT,TIME,STEP
DIMENSION Q(20)
COMMON/BLOCK1/X(93)/BLOCK3/A(93)/BLOCK4/LAGM,LAGV/BLOCK2/FUN
1(93)/BLOCK5/SPNT,KC,TR,TD/BLOCK6/KV,F0,F1,VSI/BLOCK7/AREA3,SP
2ECH,RHOB/BLOCK8/W1,W2,W3,W4,W5/BLOCK9/U/BLOCK/TEMP(10,10),SV
3/BLOCK/AREA2/BLOCK2/RHOA,VOLA,SPECA,FLOWR
4/BLOCK3/STEP/BLOCK4/L,M/BLOCK6/SPNTE,FLOWA1,KCF,FLOWA
5/BLOCK7/TRF,TDF
READ(1,11)LAGM,LAGV
READ(1,17)STEP,PRINT
17 FORMAT(2I0)
READ(1,14) AREA3,B
14 FORMAT(2F0.0)
B=0.1
READ(1,12) SPECH,RHOB,SPECA
READ(1,10)SPNTE,FLOWA,RHOA,LENGTH
READ(1,12) FLOWB,VOLA,DEIH
10 FORMAT(4F0.0)
READ(1,11) NTANK,TIME
11 FORMAT(2I0)
NTANK=5
N=NTANK*3+3
READ(1,12) (X(I),I=1,N)
12 FORMAT(3F0.0)
READ(1,10) SPNT,KC,KV,TD
READ(1,19) TR,W1,W2,W3,W4,W5
19 FORMAT(6F0.0)
READ(1,16)II,KCF
16 FORMAT(2F0.0)
I=FLOAT(STEP)
H=I
FLOWA1=FLOWA
F0=FLOWR
F1=F0
FLOWA=FLOWA*100./6.
FLA=FLOWA
* FLOWB=FLOWB*100./6.
KV=KV*100./6.
WRITE(2,51)
51 FORMAT(/76H MADDE AKIS HIZINA RAMP DEGISIMI VEREREK CASCADE
1MODELIN KAPALI HAT YANITIMI/)
AREA2=LENGTH*20.
A(2)=DEIH/(RHOA*SPECA)
A(3)=(FLOWB*RHOB*SPECH)/(RHOA*VOLA*SPECA)

```

```

A(4)=-((1*AREA2)/(FLOWB*SPECN*RHOB)
SPNT=W1*X(5)+W2*X(8)+W3*X(11)+W4*X(14)+W5*X(17)
SV=SPNT-273.
K=0
J=0
IF(KCF.LE..001)GO TO 58
WRITE(2,59)
59 FORMAT(//,5X,43H ILERI BESLEMELI ORANSAL KONTROL KULLANILIR//)
58 IF(TR.LE..001.AND.TD.LE..001)GO TO 68
IF(TD.LE..001) GOTO 66
IF(TR.LE..001) GOTO 64
WRITE(2,63)
63 FORMAT(//52H ORANSAL+INTEGRAL+TUREVSEL HAREKET ZAMANI KULLANI
1LIR//)
GOTO 70
68 IF(KC.GF..001)GO TO 78
WRITE(2,77)
77 FORMAT(//,5X,42H SADECE ILERI BESLEMELI KONTROL KULLANILIR//)
GO TO 70
78 WRITE(2,69)
69 FORMAT(//,5X,56H SADECE GERI BESLEMELI ORANSAL HAREKET ZAMANI
1KULLANILIR//)
GOTO 70
66 WRITE(2,67)
67 FORMAT(1H,57HGGERI BESLEMELI ORANSAL+INTEGRAL HAREKET ZAMANI
1KULLANILIR//)
GOTO 70
64 WRITE(2,65)
65 FORMAT(//,43H ORANSAL+TUREVSEL HAREKET ZAMANI KULLANILIR//)
70 WRITE(2,71) KC
71 FORMAT(30H ORANSAL HAREKET SAHITI DEGERI,F7.2)
WRITE(2,72) TR
72 FORMAT(24H INTEGRAL HAREKET ZAMANI,6X,F7.2)
WRITE(2,73) TD
73 FORMAT(24H TUREVSEL HAREKET ZAMANI,6X,F7.2)
WRITE(2,76)KCF
76 FORMAT(1H,40H ILERI BESLEMELI DOGRUSAL HAREKET SABITI,F7.2)
WRITE(2,801)TDF
801 FORMAT(30H ILERI BESLEME TUREVSEL SABITI,F7.2)
WRITE(2,800)TRF
800 FORMAT(30H ILERI BASLEME INTEGRAL SABITI,F7.2)
WRITE(2,725)SV,W1,W2,W3,W4,W5
725 FORMAT(//,10X,5HSPNT=,F10.4,//,5X,3HW1=,F5.3,5X,3HW2=,F5.3,5X
1,3HW3=,F5.3,5X,3HW4=,F5.3,5X,3HW5=,F5.3//)
WRITE(2,727)L,M,U
727 FORMAT(1H0,2HI=,F10.4,10X,2HM=,F10.4,10X,2HU=,F10.4//)
WRITE(2,53)
53 FORMAT(3(8X,5HGIRIS,14X,5HCIKIS,7X))
WRITE(2,54)
54 FORMAT(2(3X,14HKONSANTRASYONU,4X),5X,5HMADDE,14X,5HMADDE,12X,
112HSOGUTMA SUYU,7X,12HSOGUTMA SUYU)
WRITE(2,55)
55 FORMAT(1H,45X,9HSTCAKLIĞI,10X,9HSICAKLIĞI,13X,9HSICAKLIĞI,
110X,9HSTCAKLIĞI)
WRITE(2,56)
56 FORMAT(2(4X,12HGM-MOL/LITRE,5X),4X,8HDERECE C,11X,8HDERECE C
1,14X,8HDERECE C,11X,8HDERECE C)
WRITE(2,57)
57 FORMAT(//120(1H-)//)

```

```

      TR=TR*60.
      TD=TD*60.
      WRITE(2,723)TR,TD
723  FORMAT(1H0,3HTR=,F10.3,10X,3HTD=,F10.3/)
      35 WRITE(2,52) J
      52 FORMAT(44H KONSANTRASYON VE SICAKLIGIN AIDIGI DEGERLER,16,8H
1  SANIYE)
      WRITE(2,722)SV
722  FORMAT(1H0,9H YANITIM=,F10.3,5X,9H DERECE C)
      WRITE(2,730)U,FLOWA1
730  FORMAT(4H U=,F7.4,/,8H FLOWA=,F8.4,9HLITRE/DAK)
      WRITE(2,720)VSI,F1
720  FORMAT(7H VSI=,F8.4,9HLITRE/DAK,/,8H FLOWB=,F8.4,9HLITRE/
1DAK//)
      DO 61 I=1,N-5,3
      Q(1)=X(I)*1000.
      Q(2)=X(I+3)*1000.
      Q(3)=X(I+1)-273.
      Q(4)=X(I+4)-273.
      Q(5)=X(I+5)-273.
      Q(6)=X(I+2)-273.
      WRITE(2,60) Q(1),Q(2),Q(3),Q(4),Q(5),Q(6)
60  FORMAT(2(5X,E11.4,4X),4(6X,F7.3,7X))
      61 CONTINUE
      WRITE(2,57)
      IF(J.EQ.TIME) STOP
      J=J+PRINT
      J4=STEP
49  K=K+STEP
      FLOWA=FLA+R*K
      A(1)=FLOWA/VOIA
      FLOWA1=FLOWA*6./100.
      CALL EUM(N,H)
      CALL THETA(N)
      CALL MFAA(K,MSIG)
      CALL CNTRLA(MSIG,CSIG,K)
      CALL FFRB(AMSIG)
      CALL VALVEA(CSIG,AMSIG)
      IF(J4.EQ.PRINT) GOTO 35
      J4=J4+STEP
      GOTO 49
      END
      SUBROUTINE EUM(N,H)
      REAL K
      DIMENSION K(93),Y(93)
      COMMON/BLOCK1/X(93)/BLOCK2/FUN(93)
      DO 100 M=1,N
100  Y(M)=X(M)
      CALL EQNS(N)
      DO 101 J=4,N-2,3
      K(J)=FUN(J)
      K(J+1)=FUN(J+1)
      X(J)=Y(J)+H*K(J)
101  X(J+1)=Y(J+1)+H*K(J+1)
      CALL EQNS(N)
      DO 102 J=4,N-2,3
      X(J)=Y(J)+((H/2.)*(K(J)+FUN(J)))
102  X(J+1)=Y(J+1)+((H/2.)*(K(J+1)+FUN(J+1)))
      RETURN

```

```

END
SUBROUTINE EQNS(N)
COMMON/BLCK1/X(93)/BLCK2/FUN(93)/BLCK3/A(93)
F(DUMMY)=EXP(36.49-(12100./DUMMY))
DO 400 J=4,N-2,3
FUN(J)=A(1)*X(J-3)-A(1)*X(J)-E(X(J+1))*X(J)
FUN(J+1)=A(1)*X(J-2)-A(1)*X(J+1)-A(2)*F(X(J+1))*X(J)-A(3)*
1(X(J-1)-X(J+2))
400 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE THETA(N)
COMMON/BLCK1/X(93)/BLCK3/A(93)
IA=3
DO 53 I=2,N/3
X(N-IA)=X(N+2-IA)-((X(N+2-IA)-X(N+3-IA))*EXP(A(4)))
53 IA=IA+3
RETURN
END
SUBROUTINE MFAA(JA,MSIG)
REAL MSIG,KC
INTEGER STEP
COMMON/BLCK1/X(93)/BLCK4/LAGM,LAGV/BLCK8/W1,W2,W3,W4,W5/
1BLCK/TFMP(10,10),SV
2/BLCK3/STEP
3/BLCK5/SPNT,KC,TR,TD
LAG=(LAGV+LAGM)/STEP
J=JA/STEP
IF(J.GT.1)GO TO 31
N=0
IA=5
DO 30 I=1,5
TFMP(I,1)=X(IA)
30 IA=IA+3
31 IF(J.LE.9) GOTO 40
N=10
GOTO 41
40 N=N+1
IF(J.EQ.1)GO TO 600
41 IA=5
DO 29 I=1,5
TFMP(I,N)=X(IA)
29 IA=IA+3
IF(J.LE.LAG) GOTO 600
MSIG=(W1*TFMP(1,N-LAG)+W2*TFMP(2,N-LAG)+W3*TFMP(3,N-LAG)+W4*
1TFMP(4,N-LAG)+W5*TFMP(5,N-LAG))/(W1+W2+W3+W4+W5)
SV=MSIG-273.
IF(J.LE.9) RETURN
DO 84 K=2,10
DO 84 I=1,5
84 TFMP(I,K-1)=TFMP(I,K)
RETURN
600 MSIG=SPNT
RETURN
END
SUBROUTINE CNTRLA(MSIG,CSIG,JA)
REAL MSIG,KC,I,M,INT
INTEGER STEP
DIMENSION ERROR(10)

```

```

COMMON/BLCK5/SPNT,KC,TR,TD
1/BLCK4/L,M
2/BLCK3/STEP
J=(JA/STEP)+1
IF(J.EQ.2) ERROR(1)=0.
IF(J.LE.10)GO TO 705
J=10
705 ERROR(J)=MSIG-SPNT
IF(TR.LE..001) GOTO 701
IF(J.EQ.2)INT=0.0
IF(J.EQ.3)GO TO 703
IF(J.LT.4)GO TO 700
IF(KOUNT.EQ.2)GO TO 702
INT=INT+L*(ERROR(J)+ERROR(J-1))/2.0
KOUNT=2
GOTO 700
703 INT=L*(ERROR(1)+ERROR(2)*4.0+ERROR(3))/3.0
KOUNT=1
GO TO 700
702 INT=INT+L*(ERROR(J)+2.5*ERROR(J-1)-0.5*ERROR(J-2))/3.0
KOUNT=1
700 CSIG=KC*(ERROR(J)+(INT/TR)+(TD/L)*(ERROR(J)-ERROR(J-1)))
IF(J.EQ.10)GO TO 707
RETURN
701 CSIG=KC*(ERROR(J)+(TD/L)*(ERROR(J)-ERROR(J-1)))
IF(J.EQ.10)GO TO 707
RETURN
707 DO 708 K=2,10
708 ERROR(K-1)=ERROR(K)
RETURN
END
SUBROUTINE FFCR(AMSIG)
REAL KCF,L,INT
INTEGER STEP
DIMENSION FRR(10)
COMMON/BLCK6/SPNTF,FLOWA1,KCF,FLOWA
1/BLCK7/TRF,TDF
3/BLCK3/STEP
2/BLCK4/L,M
J=(JA/STEP)+1
IF(J.EQ.2)FRR(1)=0.
IF(J.LE.10)GO TO 705
J=10
705 FRR(J)=FLOWA1-SPNTF
IF(TRF.LE..001)GO TO 701
IF(J.EQ.2) INT=0.0
IF(J.EQ.3) GO TO 703
IF(J.LT.4) GO TO 700
IF(KOUNT.EQ.2)GO TO 702
INT=INT+L*(ERR(J)+FRR(J-1))/2.0
KOUNT=2
GO TO 700
703 INT=L*(FRR(1)+FRR(2)*4.0+FRR(3))/3.0
KOUNT=1
GO TO 700
702 INT=INT+L*(ERR(J)+2.5*FRR(J-1)-0.5*ERR(J-2))/3.0
KOUNT=1
700 AMSIG=KCF*(ERR(J)+(INT/TRF)+(TDF/L)*(ERR(J)-FRR(J-1)))
IF(J.EQ.10)GO TO 707

```

```

      RETURN
701 AMSIG=KCF*(ERR(J)+(TDF/L)*(ERR(J)-ERR(J-1)))
      IF(J.EQ.10)GO TO 707
      RETURN
707 DO 708 K=2,10
708 ERR(K-1)=ERR(K)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE VALVEA(CSIG,AMSIG)
      REAL KV,L,M
      COMMON/BLOCK6/KV,F0,F1,VS1/BLOCK7/ARFA3,SPECR,RHOB/BLOCK3/A(93)
1 /BLOCK9/U/BLOCK/ARFA2/BLOCK2/RHOA,VOLA,SPECA,FLOWB
      VSIG=(CSIG+AMSIG)*KV
      VS1=VSIG*6./100.
      IF(VS1.GT.(1000.-F0))VSIG=(1000.-F0)*100./6.
      FLOWB=VSIG+F0*100./6.
      F1=FLOWB*6./100.
      IF(FLOWB.GT.0.0)GO TO 710
      FLOWB=0.0
      A(3)=0.0
      A(4)=0.0
      F1=0.0
      RETURN
710 A(3)=(F1*FLOWB*RHOB*SPECR)/(RHOA*VOLA*SPECA)
      U=0.001833333333*F1+0.029
      A(4)=- (U*ARFA2)/(RHOB*FLOWB*SPECR)
      RETURN
      END
      FINISH

```

REFERANSLAR

1. ALPBAZ, M.
Ph.D.Thesis, University of Aston, England (1975).
2. LEE, H.H.
Ph.D.Thesis, Purdue University, USA (1971).
3. LEE, H.H., KOPPEL, B. and LIM, H.C.
Ind.Eng.Chem.Process Des.Develop.12,1 (1973).
4. KOPPEL, L.B.
Ind.Eng.Chem.Fund.1,131 (1962).
5. CAAN, M.J.
Ph.D.Thesis, Imperial College, London (1973).
6. ARMSTRONG, W.Dand., WILKINSON, W.L.
Trans.Inst.Chem.Eng.35,352 (1957).
7. KISAKÜREK, B.
Doğentlik tezi, ODTÜ, (1977).
8. DENBIGH, K.G.
Chemical Reactor Theory,
Cambridge University Press, London (1965).
9. CHOLETTE, A. and CLOUTIER, L.
Can.J.of Chem.Eng.37,105 (1959).
10. CHOLETTE, A. BLANCHET, J. and CLOUTIER, L.
Can.J.of Chem.Eng.38,1 (1960).
11. CLOUTIER, L. and CHOLETTE, A.
Can.J.of Chem.Eng. 46,82 (1968).
12. MANNING, F.S. and WILHELM, R.H.
A.I.Ch.E. 10,12 (1963).

13. LEVENSPIEL, O.
Ind.Eng.Chem. 50,343 (1958).
14. ERCUMENT, A.
Msc.Thesis, Aston University,England (1978).
15. FRANKS, R.G.
Modelling and Simulation in Chemical Engineering
Wiley-Interscience (1972).
16. KUMMEL, M.
Chem.Eng.Sci.24,1055 (1969).
17. JORGENSEN, S.B. and KUMMEL, M.
I.F.A.C. Warszawa (1969).
18. HIMMELBLAU and BISCHOFF.
Process Analysis and Simulation,
Wiley Comp. (1968).
19. COUGHANOWR, D.R., KOPPEL, L.B.
Process Systems Analysis and Control
Mc Graw-Hill Comp. (1965).
20. LUYBEN, L.W.
Process Modeling, Simulation and Control for Chemical
Engineers,
Mc Graw-Hill Comp. (1973).
21. COUGHANOWR, D.R., VISCNEVETSKY, R., LANDAUER, J. and
CARLSON, A.M.
E.A.I. Hybrid Computation Application Study:6.4.2.4 (1965).
22. Mc CANN
Control of Distributed Parameter System
Ph.D.Thesis, Imperial College, London (1972).

23. MUTHARASON, R. and COUGHANOWR, D.R.
Ind.Eng.Chem.Process Des.Develop.13,168 (1974) .
24. ÇINAR, A.
Doçentlik Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, (1981).
25. HARRIOT, P.
Process Control
Mc Graw-Hill Comp.(1964) .
26. MURRILL, P.
Automatic Control of Processes.
International Text Book Comp. (1967) .
27. HARRISON, H.L. and BOLLINGER, J.G.
Introduction to Automatic Control
Intertext, Wiley Company (1968) .
28. ARIS, R. and AMUNDSON, N.R.
Chem. Eng. Sci. 7,121 (1959) .
29. HAMMING, R.W.
Numerical Methods for Scientists and Engineers
Mc Graw-Hill Comp. (1962) .
30. HYNDMAN, D.H.
Analog and Hybrid Computing
Pergamon Press. Oxford (1979) .