

**ELEKTRİKLİ ISIL İŞLEM FIRINLARININ MODELLENMESİ VE
SICAKLIK KONTROLÜ**

ONUR ARIKAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2009

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Anabilim Dalı Başkanı

Onur ARIKAN tarafından hazırlanan ELEKTRİKLİ ISIL İŞLEM FIRINLARININ
MODELLENMESİ VE SICAKLIK KONTROLÜ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi
olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Yücel ERCAN
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr.Mehmet SUNAR

Üye : Prof. Dr. Yücel ERCAN

Üye : Doç. Dr. Şefaaddin YÜKSEL

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Onur ARIKAN

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yücel ERCAN
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ağustos 2009

Onur ARIKAN

ELEKTRİKLİ ISIL İŞLEM FIRINLARININ MODELLENMESİ VE SICAKLIK KONTROLÜ

ÖZET

Bu tez, elektrikli ısıtma fırınlarına farklı kontrol stratejilerinin uygulamalarını hedef almaktadır. Öncelikle, elektrikli bir ısıtma fırınının ısıtma davranışını tanımlayan bir dinamik model geliştirilmiş ve fırının durum denklemleri standart matris formunda elde edilmiştir. Daha sonra sayısal hesaplamalarda kullanılan sistem parametreleri belirlenmiştir. Yalıtımın etkisini incelemek için fırının yalıtım duvar katmanının yapısı üç farklı şekilde tasarlanmıştır. Belirlenme zorluklarından dolayı, fırının iç refrakter katmanı ve ısıtma işlem gören malzeme arasındaki konveksiyon/radyasyon direncinin üç farklı değeri seçilmiştir. Hesaplamalar ısıtma işlem gören malzemenin iki farklı kütle değeri için yürütülmüştür. Aç-kapa, *PID*, optimum ve düşük mertebeden durum gözlemleyicileriyle optimum kontrol yöntemlerinin uygulanması için algoritmalar geliştirilmiştir. Fırında ısıtma işlem gören malzemeyi ortam sıcaklığından belli bir referans sıcaklığına getirmek için her bir kontrol yöntemi uygulanarak sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar kontrol doğruluğunu ve geçici cevap özelliklerini özetleyen performans kartlarıyla sunulmuştur. Sistem çıkışının ve diğer önemli sistem değişkenlerinin zaman cevapları grafikler halinde verilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen performans kartları ve grafikler düşük mertebeden durum gözlemleyicisi kullanılarak yapılan optimum kontrolün, tüm durum değişkenlerinin geribeslendiği optimum kontrol kadar iyi olduğunu; diğer önerilen kontrol yöntemlerinden çok daha iyi kontrol doğruluğu, görece kararlılık ve cevap hızı sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Isıtma Fırınları, Sıcaklık kontrolü, Aç-kapa kontrol, *PID* kontrol, Optimal kontrol, Düşük mertebeli gözlemleyici.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Professor Dr. Yücel ERCAN
Degree Awarded and Date : M.Sc. – August 2009

Onur ARIKAN

MODELLING AND TEMPERATURE CONTROL OF ELECTRICAL HEAT TREATMENT FURNACES

ABSTRACT

This thesis addresses different kinds of control strategy applications for electrical heat treatment furnaces. First, a dynamic model of an electrical heat treatment furnace has been developed to describe its thermal behavior, and the state equations have been obtained in the standard matrix form. Then, system parameters of the furnaces used in the numerical calculations have been determined. Three different values of thickness of the insulation layer have been considered to investigate the effect of insulation on the system behavior. Since determination of the equivalent thermal resistance between the inner furnace wall and the processed material is difficult, three different values of it have been used. The calculations were carried out for two different mass values of the processed material. Algorithms have been developed to perform on-off, *PID*, optimum, and reduced-order state observer based optimal control methods. Numerical simulations have been carried out to bring temperature of the processed material from the environment temperature to a final reference temperature by using each of the control methods. Results have been presented by performance charts which summarize the control accuracy and the transient response features. Time response of the system output and other relevant variables have been presented in graphical form. Performance charts and graphics obtained from simulations have shown that the reduced-order state observer based optimal control is as good as the optimal control in which all the state variables are employed, and provides much better control accuracy, relative stability and speed of response compared to the other proposed control methods.

Key words: Electrical heat treatment furnaces, Temperature control, On-off control, *PID* control, Optimum control, Reduced order observer.

TEŞEKKÜR

Çalışma konumu belirleyen ve yapılan bu çalışmanın her aőaması boyunca yardım ve ilgileriyle beni yönlendiren kıymetli hocam ve tez danıőmanım **Prof. Dr. Yücel ERCAN**'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım. Ayrıca tecrübelerinden yararlandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, maddi-manevi desteğini esirgemeyen aileme ve kısmi burs sağladığı için TÜBİTAK'a içtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ | xi |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ | xv |
| SEMBOL LİSTESİ | xxiii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Gerekçe | 1 |
| 1.2. Daha Önce Yapılan Çalışmalar | 5 |
| 1.3. Çalışmanın Amacı | 9 |
| 1.4. Çalışmanın Kapsamı | 11 |
| 2. ELEKTRİKLİ BİR ISIL İŞLEM FIRINININ MATEMATİK MODELLENMESİ | 13 |
| 2.1. Elektrikli Bir Isıl İşlem Fırınının Dinamik Modeli | 13 |
| 2.1.1. Isıl Kaynak Devredeyken Sistemin Isıl Davranışını Tanımlayan Denklemlerin Eldesi | 18 |
| 2.1.2. Isıl Kaynak Devre Dışındayken Sistemin Isıl Davranışının Modellenmesi | 31 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3. | SİSTEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE PERFORMANS DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ | 33 |
| 3.1. | Elektrikli Bir Isıl İşlem Fırını İçin Parametrelerin Belirlenmesi | 33 |
| 3.1.1. | Fırınının Duvar Katmanları İçin Parametrelerin Belirlenmesi | 33 |
| 3.1.2. | Fırınlarda Dış Yüzey Isı Kayıpları | 35 |
| 3.1.3. | Malzemeye Olan Isı Aktarımı | 36 |
| 3.1.4. | Direnç Teli ve Sisteme Verilen Güç İçin Parametrelerin Belirlenmesi | 37 |
| 3.2. | İncelenecek Örnek Sistemler İçin Parametre Değerleri | 39 |
| 3.3. | Değerlendirme Kriterleri | 43 |
| 4. | AÇ-KAPA KONTROLCÜ KULLANARAK ELEKTRİKLİ ISIL İŞLEM FIRINLARINDA MALZEME SICAKLIĞININ KONTROLÜ | 49 |
| 4.1. | Aç-Kapa Tipi Denetim Organı İle Elektrikli Isıl İşlem Fırınlarda Malzeme Sıcaklığının Kontrolü | 49 |
| 4.2. | Örnek Fırınlarda Malzeme Sıcaklığının Aç-Kapa Kontrolcü İle Kontrolü | 50 |
| 4.2.1. | Fırın-1’de Malzeme Sıcaklığının Açık-Kapalı Kontrolü | 52 |
| 4.2.2. | Fırın-2’de Malzeme Sıcaklığının Açık-Kapalı Kontrolü | 68 |
| 4.3.3. | Fırın-3’de Malzeme Sıcaklığının Açık-Kapalı Kontrolü | 79 |
| 5. | P , PI VE PID KONTROL İŞLEMLERİ KULLANARAK MALZEME SICAKLIĞININ KONTROLÜ | 91 |
| 5.1. | Oransal (P) Kontrol İle Malzeme Sıcaklığının Kontrolü | 94 |
| 5.2. | Oransal+İntegral (PI) Kontrol ile Malzeme Sıcaklığının Kontrolü | 110 |
| 5.3. | Oransal + İntegral + Türevsel (PID) Kontrol ile Malzeme Sıcaklığının Kontrolü | 131 |

| | |
|---|-----|
| 6. OPTİMUM KONTROL YÖNTEMİ İLE MALZEME SICAKLIĞININ KONTROLÜ | 144 |
| 6.1. Doğrusal Optimum Durum Kontrol Problemi | 144 |
| 6.2. Optimum Kontrol İçin Durum Denklemlerinin Yeniden Düzenlenmesi | 147 |
| 6.3. Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü İçin Performans Kriterinin Belirlenmesi | 151 |
| 6.4. Örnek Fırınlarda Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü | 152 |
| 6.4.1. Fırın-1’de Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü | 153 |
| 6.4.2. Fırın-2’de Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü | 169 |
| 6.4.3. Fırın-3’de Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü | 173 |
| 7. GÖZLEMLEYİCİ KULLANARAK MALZEME SICAKLIĞININ OPTİMUM KONTROLÜ | 178 |
| 7.1 Gözlemleyiciler ve Çalışma Prensipleri | 178 |
| 7.2. Düşük Mertebeden Durum Gözlemleyicilerinin Çalışma Prensibi | 179 |
| 7.3. Malzeme Sıcaklığının Gözlemleyiciyle Optimum Kontrolü İçin Düşük Mertebeden Durum Gözlemleyicisinin Tasarımı | 183 |
| 7.3.1. Malzeme Sıcaklığının Gözlemleyiciyle Optimum Kontrolü İçin Altıncı Mertebeden Durum Gözlemleyicisinin Tasarımı | 183 |
| 7.3.2. Malzeme Sıcaklığının Gözlemleyiciyle Optimum Kontrolü İçin Beşinci Mertebeden Durum Gözlemleyicisinin Tasarımı | 186 |
| 7.4. Malzeme Sıcaklığının Düşük Mertebeden Gözlemleyiciler İle Optimum Kontrolü | 189 |
| 7.5. Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3’de Malzeme Sıcaklığının Düşük Mertebeden Gözlemleyiciyle Kontrolü | 192 |
| 8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA | 215 |

KAYNAKLAR

231

ÖZGEÇMİŞ

234

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | | Sayfa |
|--------------|---|-------|
| Çizelge 3.1. | Elektrikli ısıtım işlem fırınlarında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri | 35 |
| Çizelge 3.2. | Yüzey ortalama sıcaklığına bağlı olarak $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığında yüzeyde serbest konveksiyon ve radyasyon toplam film katsayısı | 36 |
| Çizelge 3.3. | Kanthal türü değişik malzemelerin fiziksel özellikleri | 38 |
| Çizelge 3.4. | Kanthal türü değişik malzemeler için sıcaklık faktörleri (K_t) | 39 |
| Çizelge 3.5. | Örnek olarak kullanılacak fırınların malzeme parametreleri | 41 |
| Çizelge 3.6 | Örnek olarak kullanılacak fırınların ısıtım parametreleri | 42 |
| Çizelge 3.7. | Örnek olarak kullanılacak olan fırınların direnç tellerine ait parametreler | 43 |
| Çizelge 3.8. | Aç-kapa dışında kontrol işlemi kullanan sistemler için performans değerlendirme kartı | 46 |
| Çizelge 3.9. | Aç-kapa kontrol işlemi kullanan sistemler için performans değerlendirme kartı | 48 |
| Çizelge 4.1. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-1 için $R_{13} = 0,01$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 53 |
| Çizelge 4.2. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-1 için $R_{13} = 0,1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 54 |
| Çizelge 4.3. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-1 için $R_{13} = 1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 55 |
| Çizelge 4.4. | Fırın-1 için difransiyel aralığın değişik değerlerinde elde edilen anahtarlama periyotları | 67 |
| Çizelge 4.5. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-2 için $R_{13} = 0,01$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 69 |
| Çizelge 4.6. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-2 için $R_{13} = 0,1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 70 |
| Çizelge 4.7. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-2 için $R_{13} = 1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 71 |
| Çizelge 4.8. | Fırın-2 için difransiyel aralığın değişik değerlerinde elde edilen anahtarlama zamanları | 77 |

| | | |
|------------------|---|-----|
| Çizelge 4.9. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-3 için $R_{13} = 0,01$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 81 |
| Çizelge 4.10. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-3 için $R_{13} = 0,1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 82 |
| Çizelge 4.11. | Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-3 için $R_{13} = 1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı | 83 |
| Çizelge 4.12. | Fırın-3 için difransiyel aralığın değişik değerlerinde elde edilen anahtarlama periyotları | 89 |
| Çizelge 5.1.(a). | Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 95 |
| Çizelge 5.1.(b). | Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 96 |
| Çizelge 5.2.(a). | Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 104 |
| Çizelge 5.2.(b). | Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 105 |
| Çizelge 5.3.(a). | Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 107 |
| Çizelge 5.3.(b). | Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 108 |
| Çizelge 5.4.(a). | Oransal+integral (PI) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 111 |
| Çizelge 5.4.(b). | Oransal+integral (PI) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 112 |
| Çizelge 5.4.(c). | Oransal+integral (PI) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 113 |
| Çizelge 5.5.(a). | Oransal+integral (PI) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 122 |
| Çizelge 5.5.(b). | Oransal+integral (PI) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 123 |
| Çizelge 5.5.(c). | Oransal+integral (PI) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 124 |
| Çizelge 5.6.(a). | Oransal+integral (PI) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 127 |
| Çizelge 5.6.(b). | Oransal+integral (PI) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 128 |

| | | |
|------------------|---|-----|
| Çizelge 5.6.(c). | Oransal+integral (<i>PI</i>) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 129 |
| Çizelge 5.7. | Oransal+integral+türevsel (<i>PID</i>) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 132 |
| Çizelge 5.8. | Oransal+integral+türevsel (<i>PID</i>) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 140 |
| Çizelge 5.9. | Oransal+integral+türevsel (<i>PID</i>) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 142 |
| Çizelge 6.1. | Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 154 |
| Çizelge 6.2. | Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 155 |
| Çizelge 6.3. | Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 156 |
| Çizelge 6.4. | Optimum kontrol işleminde Fırın-1'de malzeme kütlesi 10 kg iken farklı R_{13} değerleri için elde edilen optimum geribesleme katsayı matrisleri | 160 |
| Çizelge 6.5. | Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı ($m = 1$ kg) | 167 |
| Çizelge 6.6. | Optimum kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 170 |
| Çizelge 6.7. | Optimum kontrol işleminde Fırın-2'de $m = 10$ kg ve $R_{13} = 0,1$ değeri için elde edilen optimum geribesleme katsayı matrisleri | 172 |
| Çizelge 6.8. | Optimum kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 174 |
| Çizelge 6.9. | Optimum kontrol işleminde Fırın-3'de $m = 10$ kg ve $R_{13} = 0,1$ değeri için elde edilen optimum geribesleme katsayı matrisleri | 176 |
| Çizelge 7.1. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi tasarımında seçilen K_e değerleri | 190 |
| Çizelge 7.2. | Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi tasarımında seçilen K_e değerleri | 191 |
| Çizelge 7.3. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 193 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Çizelge 7.4. | Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 194 |
| Çizelge 7.5. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 198 |
| Çizelge 7.6. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 202 |
| Çizelge 7.7. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1, Fırın-2, Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 205 |
| Çizelge 7.8. | Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1, Fırın-2, Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 206 |
| Çizelge 8.1. | P , PI ve PID kontrol işlemlerinde Fırın-1-2 ve 3 için elde edilen performans değerlendirme kartı | 219 |
| Çizelge 8.2. | Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı (simulasyon süresi = 20000 s, $T_{ref} = 300^{\circ}C$). | 222 |
| Çizelge 8.3. | Optimum kontrol işleminde Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı ($R_{13} = 0,1$ s $^{\circ}C/J$, $C_7 = 4400$ J/ $^{\circ}C$, simulasyon süresi = 20000 s, $T_{ref} = 300^{\circ}C$). | 223 |
| Çizelge 8.4. | Değişik kontrol yöntemlerinin uygulanmasıyla Fırın-1-2 ve 3 için elde edilen performans değerlendirme kartı ($R_{13} = 0,1$ s $^{\circ}C/J$, $C_7 = 4400$ J/ $^{\circ}C$, simulasyon süresi = 20000 s, $T_{ref} = 300^{\circ}C$). | 229 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | | Sayfa |
|---------------|--|-------|
| Şekil 2.1. | Elektrikli bir ısı işlem fırınının genel yapısı | 14 |
| Şekil 2.2. | Basitleştirilmiş sistem modelinin yapısı | 15 |
| Şekil 2.3. | Elektrikli bir ısı işlem fırınının herhangi bir duvar katmanının modellenmiş hali | 16 |
| Şekil 2.4. | Isıl kaynak devredeyken bir ısı işlem fırınının modellenmiş hali | 17 |
| Şekil 2.5. | Isıl kaynak devre dışındayken bir ısı işlem fırınının modellenmiş hali | 19 |
| Şekil 2.6. | Isıl sistemin doğrusal grafiği | 20 |
| Şekil 2.7.(a) | Isıl sistemin normal ağacı | 21 |
| Şekil 2.7.(b) | Isıl sistemin ağaç bağları | 22 |
| Şekil 3.1. | Değişik malzemelerden elde edilmiş direnç tellerinin öz dirençlerinin sıcaklıkla değişimi | 37 |
| Şekil 3.2. | Aç-kapa dışında bir kontrol yöntemi kullanan bir sistem için geçici zaman cevabı parametreleri | 44 |
| Şekil 3.3. | Aç-kapa kontrol yöntemi kullanan bir sistem için geçici zaman cevabı parametreleri | 47 |
| Şekil 4.1. | İki konumlu denetim sistemi | 50 |
| Şekil 4.2. | Açık kapalı kontrolcü ile kontrol edilen sistemin blok diyagramı | 51 |
| Şekil 4.3. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 56 |
| Şekil 4.4. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 57 |
| Şekil 4.5. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 57 |
| Şekil 4.6. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 58 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 4.7. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 58 |
| Şekil 4.8. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 59 |
| Şekil 4.9. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in rezistans telindeki sıcaklık değişimi | 59 |
| Şekil 4.10. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında ısı kaynaktan fırına olan ısı akışı | 60 |
| Şekil 4.11. | Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında dışarıya olan enerji kayıplarının güç cinsinden ifadesi | 60 |
| Şekil 4.12. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 61 |
| Şekil 4.13. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 62 |
| Şekil 4.14. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 62 |
| Şekil 4.15. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 63 |
| Şekil 4.16. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 63 |
| Şekil 4.17. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 64 |
| Şekil 4.18. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 64 |
| Şekil 4.19. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 65 |
| Şekil 4.20. | Fırın-1'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 65 |
| Şekil 4.21. | Fırın-1'in aç-kapa denetim organı ile kontrolü sırasında sistem düzenli rejime girdikten sonra elde edilen anahtarlama periyotları ($b_w = 1-10$, $R_{13} = 0,1$ ve $0,01$) | 66 |
| Şekil 4.22. | Fırın-2'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 72 |
| Şekil 4.23. | Fırın-2'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 72 |
| Şekil 4.24. | Fırın-2'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 73 |
| Şekil 4.25. | Fırın-2'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 73 |
| Şekil 4.26. | Fırın-2'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 74 |
| Şekil 4.27. | Fırın-2'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 74 |
| Şekil 4.28. | Fırın-2'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 75 |
| Şekil 4.29. | Fırın-2'de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 75 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Şekil 4.30. | Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 76 |
| Şekil 4.31. | Fırın-2’nin aç-kapa denetim organı ile kontrolü sırasında sistem düzenli rejime girdikten sonra elde edilen anahtarlama periyotları ($b_w = 1-10$, $R_{13} = 0,01, 0,1$ ve 1) | 78 |
| Şekil 4.32. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 84 |
| Şekil 4.33. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 84 |
| Şekil 4.34. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 85 |
| Şekil 4.35. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 85 |
| Şekil 4.36. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 86 |
| Şekil 4.37. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 86 |
| Şekil 4.38. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 87 |
| Şekil 4.39. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 87 |
| Şekil 4.40. | Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü | 88 |
| Şekil 4.41. | Fırın-3’ün aç-kapa denetim organı ile kontrolü sırasında sistem düzenli rejime girdikten sonra elde edilen anahtarlama periyotları ($b_w = 1-10$, $R_{13} = 0,01$ ve $0,1$) | 90 |
| Şekil 5.1. | <i>PID</i> kontrol işlemi ile kontrol edilen sistemin blok diyagramı | 92 |
| Şekil 5.2. | <i>P</i> kontrol uygulamasında K_p ’nin değişik değerleri için Fırın-1’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 97 |
| Şekil 5.3. | Malzeme sıcaklığının oransal (<i>P</i>) kontrolü sırasında Fırın-1’in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 98 |
| Şekil 5.4. | Malzeme sıcaklığının oransal (<i>P</i>) kontrolü sırasında Fırın-1’in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 98 |
| Şekil 5.5. | Malzeme sıcaklığının oransal (<i>P</i>) kontrolü sırasında Fırın-1’in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 99 |
| Şekil 5.6. | Malzeme sıcaklığının oransal (<i>P</i>) kontrolü sırasında Fırın-1’in Kanthal-APM rezistansında meydana gelen sıcaklık değişiminin zamana bağlı değişimi | 99 |
| Şekil 5.7. | Malzeme sıcaklığının oransal (<i>P</i>) kontrolü sırasında Fırın-1’in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 100 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Şekil 5.8. | Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 100 |
| Şekil 5.9. | Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 101 |
| Şekil 5.10. | Oransal (P) kontrol sırasında Fırın-1'de malzeme sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 101 |
| Şekil 5.11. | Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında sisteme sağlanan güç değerinin zamana bağlı değişimi | 102 |
| Şekil 5.12. | Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında fırın dışına olan güç kaybı | 102 |
| Şekil 5.13. | P kontrol uygulamasında K_p 'nin değişik değerleri için Fırın-2'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 106 |
| Şekil 5.14. | P kontrol uygulamasında K_p 'nin değişik değerleri için Fırın-3'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 109 |
| Şekil 5.15. | PI kontrol ile Fırın-1'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 114 |
| Şekil 5.16. | PI kontrol ile Fırın-1'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 114 |
| Şekil 5.17. | PI kontrol ile Fırın-1'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 114 |
| Şekil 5.18. | PI kontrol sırasında Fırın-1'in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 116 |
| Şekil 5.19. | PI kontrol sırasında Fırın-1'in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 116 |
| Şekil 5.20. | PI kontrol sırasında Fırın-1'in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 117 |
| Şekil 5.21. | PI kontrol sırasında Fırın-1'in Kanthal-APM rezinastasında meydana gelen sıcaklık değişiminin zamana bağlı gösterimi | 117 |
| Şekil 5.22. | PI kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 118 |
| Şekil 5.23. | PI kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 118 |
| Şekil 5.24. | PI kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 119 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Şekil 5.25. | <i>PI</i> kontrol sırasında Fırın-1’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 119 |
| Şekil 5.26. | <i>PI</i> kontrol sırasında sisteme sağlanan güç değerinin zamana bağlı değişimi | 120 |
| Şekil 5.27. | <i>PI</i> kontrol sırasında Fırın-1’den dışarıya olan güç kaybı | 120 |
| Şekil 5.28. | <i>PI</i> kontrol ile Fırın-2’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 125 |
| Şekil 5.29. | <i>PI</i> kontrol ile Fırın-2’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 125 |
| Şekil 5.30. | <i>PI</i> kontrol ile Fırın-2’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 126 |
| Şekil 5.31. | <i>PI</i> kontrol ile Fırın-3’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 130 |
| Şekil 5.32. | <i>PI</i> kontrol ile Fırın-3’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 130 |
| Şekil 5.33. | <i>PI</i> kontrol ile Fırın-3’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 131 |
| Şekil 5.34. | <i>PID</i> kontrol ile Fırın-1’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 133 |
| Şekil 5.35. | <i>PID</i> kontrol sırasında Fırın-1’in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 134 |
| Şekil 5.36. | <i>PID</i> kontrol sırasında Fırın-1’in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 134 |
| Şekil 5.37. | <i>PID</i> kontrol sırasında Fırın-1’in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 135 |
| Şekil 5.38. | <i>PID</i> kontrolü sırasında Fırın-1’in Kanthal-APM rezistansında meydana gelen sıcaklık değişiminin zamana bağlı gösterimi | 135 |
| Şekil 5.39. | <i>PID</i> kontrol sırasında Fırın-1’in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 136 |
| Şekil 5.40. | <i>PID</i> kontrol sırasında Fırın-1’in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 136 |
| Şekil 5.41. | <i>PID</i> kontrol sırasında Fırın-1’in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 137 |
| Şekil 5.42. | <i>PID</i> kontrol sırasında malzeme sıcaklığın zamana bağlı değişimi | 137 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Şekil 5.43. | <i>PID</i> kontrol sırasında sisteme sağlanan güç değerinin zamana bağlı değişimi | 138 |
| Şekil 5.44. | <i>PID</i> kontrol sırasında dışarıya olan güç kaybı | 138 |
| Şekil 5.45. | <i>PID</i> kontrol ile Fırın-2’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 141 |
| Şekil 5.46. | <i>PID</i> kontrol ile Fırın-3’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 143 |
| Şekil 6.1. | Optimum kontrol ile kontrol edilen sistemin blok diyagramı | 147 |
| Şekil 6.2. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de $R_{13} = 0,01$ iken malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 157 |
| Şekil 6.3. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de $R_{13} = 0,1$ iken malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 157 |
| Şekil 6.4. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de $R_{13} = 1$ iken malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 158 |
| Şekil 6.5. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de farklı R_{13} değerleri ve $m = 10$ kg iken belirlenen en iyi ρ_3 değerlerine karşılık gelen T_7 ’nin cevap eğrileri | 161 |
| Şekil 6.6. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1; m = 10$ kg) | 162 |
| Şekil 6.7. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1; m = 10$ kg) | 162 |
| Şekil 6.8. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1; m = 10$ kg) | 163 |
| Şekil 6.9. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1; m = 10$ kg) | 163 |
| Şekil 6.10. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1; m = 10$ kg) | 164 |
| Şekil 6.11. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1; m = 10$ kg) | 164 |
| Şekil 6.12. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de güç kayıplarının zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1; m = 10$ kg) | 165 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Şekil 6.13. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1'e ısı kaynaktan aktarılan gücün zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg) | 165 |
| Şekil 6.14. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1'de $m = 1$ kg iken malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 168 |
| Şekil 6.15. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1'de $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg iken farklı R_{13} değerlerinde malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 168 |
| Şekil 6.16. | Optimum kontrol sırasında Fırın-2'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 171 |
| Şekil 6.17. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1 ve Fırın-2'de $R_{13} = 0,1$ durumu için malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 172 |
| Şekil 6.18. | Optimum kontrol sırasında Fırın-3'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 175 |
| Şekil 6.19. | Optimum kontrol sırasında Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de $R_{13} = 0,1$ durumu için malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi | 176 |
| Şekil 7.1. | Düşük mertebeden durum gözlemleyicisi kullanılarak tasarlanmış kapalı döngü bir kontrol sisteminin blok diyagramı | 180 |
| Şekil 7.2. | Fırın-1 için malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 195 |
| Şekil 7.3. | Fırın-1 için malzeme sıcaklığının altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 195 |
| Şekil 7.4. | Fırın-1'de $m = 1$ kg iken malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 199 |
| Şekil 7.5. | Fırın-1'de $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg iken malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 199 |
| Şekil 7.6. | Fırın-1'de $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg iken malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 200 |
| Şekil 7.7. | Fırın-1'de $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg iken malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 200 |
| Şekil 7.8. | Malzeme ağırlığı 1kg iken Fırın-1 için malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 203 |
| Şekil 7.9. | Fırın-1, 2 ve 3 için malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 207 |
| Şekil 7.10. | Fırın-1, 2 ve 3 için malzeme sıcaklığının altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü | 207 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Şekil 7.11. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi | 219 |
| Şekil 7.12. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi | 219 |
| Şekil 7.13. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi | 210 |
| Şekil 7.14. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi | 210 |
| Şekil 7.15. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi | 211 |
| Şekil 7.16. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi | 211 |
| Şekil 7.17. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında fırından dışarıya olan güç kayıpları | 212 |
| Şekil 7.18. | Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında ısıl kaynaktan fırına aktarılan güç | 212 |

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Semboller | Açıklama |
|-----------|--|
| A | Sistem matrisi |
| B | Sistem ağacı kol sayısı |
| B | Bozucu matris |
| bw | Diferansiyel aralık |
| C | Kontrol matrisi |
| C_1 | Örnek sistemde ceraboard (dış yalıtım-1) katmanının kapasitansı |
| C_2 | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-1) katmanının kapasitansı |
| C_3 | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-2) katmanının kapasitansı |
| C_4 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-1) katmanının kapasitansı |
| C_5 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-2) katmanının kapasitansı |
| C_6 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-3) katmanının kapasitansı |
| C_7 | Örnek sistemde ısıtım işlemi görece malzemenin 1 kg ve kg için kapasitansı |
| C_{p1} | Örnek sistemde ceraboard (dış yalıtım-1) katmanının özgül ısısı |
| C_{p2} | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-1) katmanının özgül ısısı |
| C_{p3} | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-2) katmanının özgül ısısı |
| C_{p4} | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-1) katmanının özgül ısısı |
| C_{p5} | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-2) katmanının özgül ısısı |
| C_{p6} | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-3) katmanının özgül ısısı |
| C_t | Isıl kapasitans |
| $e(t)$ | Hata sinyali |
| e_{ss} | Simulasyon süresi sonunda kalıcı hata |
| F | Gözlemleyicilerle kontrolde kullanılan katsayı matrisi |
| $G_c(s)$ | <i>PID</i> kontrolcü transfer fonksiyonu |
| h | Hava film katsayısı |
| H | Pontryagin durum fonksiyonu |
| K | Optimum geri besleme katsayı matrisi |
| K_e | Gözlemleyici kazanç matrisi |
| K_p | Oransal kontrol kazanç katsayısı |
| K_t | Sıcaklık faktörü |

| | |
|---------------------------|--|
| L_1 | Örnek sistemde ceraboard (dış yalıtım-1) katman kalınlığı |
| L_2 | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-1) katman kalınlığı |
| L_3 | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-2) katman kalınlığı |
| L_4 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-1) katman kalınlığı |
| L_5 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-2) katman kalınlığı |
| L_6 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-3) katman kalınlığı |
| L_{fg} | Örnek sistemde glass fiber (dış takviye) katman kalınlığı |
| N | Sistem ağacı düğüm sayısı |
| P | Oransal kontrol |
| PI | Oransal+İntegral kontrol |
| PID | Oransal+İntegral+Türevsel kontrol |
| $P.I.$ | Sistem geçici zaman cevap analizinde yüzde aşma |
| $P.O.$ | Performans indisi |
| Q | Performans kriterinde kullanılan durum değişkeni matrisi |
| Q_1 | En dış duvar katmanının kapasitans ısıl debisi |
| Q_2 | İkinci duvar katmanının kapasitans ısıl debisi |
| Q_3 | Üçüncü duvar katmanının kapasitans ısıl debisi |
| Q_4 | Dördüncü duvar katmanının kapasitans ısıl debisi |
| Q_5 | Beşinci duvar katmanının kapasitans ısıl debisi |
| Q_6 | Altıncı duvar katmanının kapasitans ısıl debisi |
| Q_7 | Isıl işlem görececek malzemenin ısıl debisi |
| $Q_{8,10,12,14,16,18,20}$ | Sistem normal ağacında yer alan ilgili bölgelerin ısıl debileri |
| $Q_{9,11,13,15,19,21}$ | Sistem normal ağacında yer alan ilgili bölgelerin ısıl debileri |
| Q_{ao} | Isıl kaynaktan fırına aktarılan ortalama güç |
| Q_d | Güç kaynağından sisteme, sistem durağan halde iken sağlanan güç |
| Q_{ko} | Fırından dış ortama olan ortalama güç kaybı |
| $Q(t)$ | Güç kaynağından sisteme sağlanan maksimum güç |
| $Q(t)_{mak}$ | PID kontrolde sisteme sağlanacak maksimum güç |
| $Q(t)_{mak1}$ | PID kontrolde sisteme sağlanacak maksimum gücün birinci sınır değeri |
| $Q(t)_{mak2}$ | PID kontrolde sisteme sağlanacak maksimum gücün ikinci sınır değeri |
| R | Matris Riccati denkleminin çözüm matrisi |
| R_1, R_2 | Örnek sistemde ceraboard (dış yalıtım-1) katmanına ait eşdeğer dirençler |
| R_3, R_4 | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-1) katmanına ait eşdeğer dirençler |
| R_5, R_6 | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-2) katmanına ait eşdeğer dirençler |
| R_7, R_8 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-1) katmanına ait eşdeğer dirençler |

| | |
|---------------------------|---|
| R_9, R_{10} | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-2) katmanına ait eşdeğer dirençler |
| R_{11}, R_{12} | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-3) katmanına ait eşdeğer dirençler |
| R_{fg} | Örnek sistemde glass fiber (dış takviye) katmanına ait eşdeğer direnç |
| R_0 | $R_1 + R_{fg}$ |
| R_{13} | Örnek sistemde fırın içindeki konveksiyon eş direnci |
| R_{14} | Örnek sistemde fırın dışı hava katmanındaki konveksiyon eş direnci |
| R_r | Örnek sistemde seçilen Kanthal APM direnç telinin direnci |
| S | Sistem ağacı kaynak sayısı |
| S_A | Sistem ağacı gerilim kaynağı sayısı |
| S_T | Sistem ağacı akım kaynağı sayısı |
| T | Kapasitans sıcaklıklarından oluşan durum değişkenleri vektörü |
| T_0 | Dış ortam sıcaklığı |
| T_1 | Dış yalıtım-1 duvar katmanının kapasitans sıcaklığı |
| T_2 | Dış refrakter-1 duvar katmanının kapasitans sıcaklığı |
| T_3 | Dış refrakter-2 katmanının kapasitans sıcaklığı |
| T_4 | İç refrakter-1 duvar katmanının kapasitans sıcaklığı |
| T_5 | İç refrakter-2 duvar katmanının kapasitans sıcaklığı |
| T_6 | İç refrakter-3 duvar katmanının kapasitans sıcaklığı |
| T_7 | Isıl işlem görececek malzemenin kapasitans sıcaklığı |
| T_{11} | Rezistans teline en yakın bölgedeki sıcaklık (rezistans sıcaklığı) |
| $T_{a, c, e, g, i, k, m}$ | Sistem normal ağacında yer alan ilgili bölgelerin sıcaklıkları |
| $T_{b, d, f, h, j, l, n}$ | Sistem normal ağacında yer alan ilgili bölgelerin sıcaklıkları |
| t_c | Geçit zamanı |
| t_d | Gecikme zamanı |
| T_d | Türevsel zaman |
| T_i | İntegral zamanı |
| T_p | Tepe sıcaklığı |
| t_p | Tepe zamanı |
| t_{pmak} | Maksimum aşma zamanı (tepe zamanından farklı ise) |
| t_r | Yükselme zamanı |
| $T_{ref.}$ | Referans sıcaklığı |
| t_s | Yerleşme zamanı |
| T_{mak} | Maksimum aşmada ulaşılan sıcaklık (tepe sıcaklığından farklı ise) |
| T_{ss} | Cevabın son değeri |
| x | Yeniden tanımlanmış durum değişkenleri vektörü |
| \tilde{x} | Gözlemleyici çıkış matrisi |
| \dot{x}_a | Gözlemleyicilerle kontrolde ölçülebilen durum değişkenleri matrisi |
| \dot{x}_b | Gözlemleyicilerle kontrolde ölçülemeyen durum değişkenleri matrisi |

| | |
|---------------------|---|
| $x_{1,2,3,4,5,6,7}$ | $T_{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}$ sıcaklıklarının durağan değerlerinden olan farkları |
| x_{11} | T_{11} sıcaklığının referans sıcaklığından farkı |
| $V_{mak.}$ | Sisteme uygulanacak kontrol yöntemine göre sağlanacak olan maksimum voltaj değeri |
| Y | Çıkış matrisi |
| λ_1 | Örnek sistemde ceraboard (dış yalıtım-1) katmanının ısı iletim katsayısı |
| λ_2 | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-1) katmanının ısı iletim katsayısı |
| λ_3 | Örnek sistemde alumina (dış refrakter-2) katmanının ısı iletim katsayısı |
| λ_4 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-1) katmanının ısı iletim katsayısı |
| λ_5 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-2) katmanının ısı iletim katsayısı |
| λ_6 | Örnek sistemde alumina (iç refrakter-3) katmanının ısı iletim katsayısı |
| λ_{fg} | Örnek sistemde glass fiber (dış takviye) katmanının ısı iletim katsayısı |
| ρ_1 | Performans indisinde geçen bir ağırlık katsayısı |
| ρ_2 | Performans indisinde geçen bir ağırlık katsayısı |
| ρ_3 | Performans indisinde geçen bir ağırlık katsayısı |

1. GİRİŞ

1.1. Gerekçe

Fırınlarda temel işlevleri ısı işlem göreceğ malzemeyi belirlenen bir sıcaklık değeriinde, belirli bir süre tutmaktır. Sisteme kontrol yöntemleri uygulanırken malzemenin ısı işlem göreceğ sıcaklık değeri belli bir tolerans bandı içerisinde tutulmaya çalışılır. Modern uygulamalarda fırınların sıcaklık kontrolleri ile ilgili toleranslar da oldukça daralmıştır. Fırında işlem gören malzemede istenen yapının elde edilmesi için ısı işlem, belirli bir sıcaklık değeriinde birkaç °C doğrulukla veya malzeme sıcaklığının belirli bir sıcaklık profilini bir kaç °C'lik kontrol doğruluğu ile izlemesi sağlanarak yapılmalıdır. Örnek olarak, 100Cr6 çeliği mermi üretiminde kullanılmaktadır ve 63 Rockwell sertliğinde olması gerekmektedir. Bu sertliği sağlamak için 800 °C de ± 2 °C kontrol doğruluğunda malzemenin belirli bir süre ısı işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Martemperleme işleminde ısı işlem gören malzemenin belirli bir sıcaklık profilini izlemesi gerekmektedir. Belirlenen tolerans bandı ± 2 °C üzerinde olmamalıdır. Belirlenen sıcaklıkta 30 dakika tutulan malzeme aniden soğutulur ve daha sonra östenitleme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda belirli süreler bekletilerek numunede farklı iç yapılar elde edilir. Bu aşamada ulaşılan sıcaklık değeri belirlenen sıcaklık profilinden 7 °C-10 °C saptığında iç yapı ve mekanik özellikler değişmektedir. Al alaşımlarında yaşlandırma işlemi yağ banyosunda 120 °C -200 °C sıcaklıkları arasında ± 2 °C kontrol doğruluğuyula yapılmalıdır. Benzer olarak ameliyathane, laboratuvarlar ve gıda sektöründe sterilizasyon işlemleri için kullanılan otoklavların basınçlı ve doymuş su buharı ortamında 121 °C-134 °C aralığında $\pm 0,2$ °C doğrulukla kontrol edilmeleri gerekmektedir. Sinterleme işlemi metalin ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda yapılmaktadır. Uygulan kontrol yönteminde kontrol doğruluğunun yanı sıra tepe aşmalarının da metalin ergime noktası üzerine çıkmaması gerekmektedir. Benzer şekilde ara kritik bölgede ısı işlem uygulanan malzemelerde arzu edilen sıcaklık değerinden birkaç °C'lik sapmalar bile malzemenin beklenen mekanik özelliklerin elde edilememesine yol açmaktadır. Örneğin 4340 çeliği otomotiv ve savunma sanayisinde kullanılan yüksek mukavemet düşük alaşım (HSLA) çeliklerindedir.

Ara kritik bölgede su verilmesi gereken durumlarda, 780 °C-800 °C arasında 5 °C aralıklarla su verildiğinde farklı iç yapı ve mekanik özellikler elde edilmektedir. Dolayısıyla bu aralıkta referans sıcaklığından çok küçük sapmalar bile istenen özelliklerin elde edilememesine yol açmaktadır. Mikroalaşım çeliklerinde ara kritik bölge 35 °C'lik bir alandır. Bu aralıkta 5-7 °C sıcaklık farklarıyla su verildiğinde farklı iç yapılar elde edilir [1]. Yukarıdaki örneklerde görüldüğü gibi fırında uygulanan farklı işlemlerde kontrol doğruluğu önem arz etmekte ve sistemde malzemenin yapısını etkileyecek aşmalar olmadan malzeme sıcaklığının belirlenen tolerans bandına girmesi gerekmektedir. Dolayısıyla uygulanacak kontrol yönteminin hem kontrol doğruluğu hem de sistemin dinamik özellikleri bakımından arzu edilen değerleri sağlaması gerekmektedir.

Fırında kullanılan yakıt türü sistemin kontrolünde önem teşkil etmektedir. Fırınlarda ısı gücü kaynağı olarak fosil yakıtlar veya elektrikli bir ısı kaynaktan ısı gücünü ısıtıcı tellerle fırına aktarıldığı elektrikli ısıtıcılar kullanılmaktadır. Fosil yakıt kullanılan endüstriyel bir fırında, verilen enerji dış yüzeylerden konveksiyon ve radyasyonla, yanma gazları içinde duyulur ısı olarak bacadan, yanmanın eksik olması sonucu yanmamış gazlar olarak bacadan, çatlak ve açıklıklardan çıkan sıcak gazlarla, açıklıklardan radyasyonla, fırın basıncının çok yüksek olması durumunda yanmanın fırın dışında tamamlanmasından dolayı, iş parçasının fırına tamamen girmemesi durumunda malzeme üzerinden iletimle, soğutma suyu kullanılıyorsa soğutma suyuyla taşınarak, eğer fırın sürekli bir fırın ise konveyör ve bantlar üzerinden kaybolur [2,3]. Elektrikli fırınlarda ise yanma olmadığından baca gazları, duyulur ısı kayıpları ve yanma kayıpları olmadığından geliştirilen kontrol stratejisinde bu kayıpların göz önünde bulundurulması gerekmemektedir.

Çok yüksek sıcaklık fırınlarında (> 1260 °C) malzemeye arzu edilen sıcaklığın aktarılabilmesi için fırının yalıtım katman kalınlığının artırılması sağlanır [2]. Özellikle elektrikle ısıtılan ısı işlem fırınlarında, ısı gücünü fırına aktarıldığı ısıtıcı tellerin maksimum çalışma sıcaklıkları 1100-1300 °C civarındadır. Yalıtım katman kalınlığının yeterince arttırılmaması durumunda fırından dışarıya olan ısı kayıpları artmaktadır. Dolayısıyla malzemenin referans sıcaklığına erişmesi sağlanamayacak

ya da sistemin referans sıcaklığına erişmesi için çok daha fazla ısı güç harcanması gerekecektir. Düşük sıcaklık fırınlarında (< 560 °C) ısı kaynaktan fırına aktarılan güç malzemenin ulaşması beklenen referans sıcaklığından çok daha fazladır. Böyle bir durumda ise malzeme istenen sıcaklığa ulaştıktan sonra ısı kaynak devreden çıkmış olsa bile fırının refrakter duvar katmanının bünyesinde ısı kapasitansından dolayı barındırdığı sıcaklığın malzemeye iletimi devam edeceğinden, malzemenin sıcaklığı da artmaya devam edecektir. Bunu önlemek için piyasadaki fırınlarda genellikle yalıtım katman kalınlığının azaltılması ve malzeme sıcaklığının kontrolünün, ilk yatırım maliyetlerinin düşük ve sistemin optimizasyonun ikinci planda olduğu klasik yöntemlerle yapılması yoluna gidilmektedir. Bu durum sistem cevap hızının kötüleşmesine yol açabilmekte, fırından dışarıya olan ısı kayıpların dolayısıyla ısı kaynaktan fırına aktarılması gereken ısı gücün artmasına neden olmaktadır.

Kullanılan enerji miktarı ürün maliyetini etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Bu nedenle ısı işlem fırınlarında enerji tasarrufu önem arz eden bir durum olarak ortaya çıkmıştır [3]. Enerji kayıp ve kazançları arasındaki fark kar ve zararın bir göstergesi olabilmekte ve endüstriyel ısı işlemlerde ısı tasarrufu ve kontrol duyarlılığı bu durumu en çok etkilemektedir. Birçok endüstriyel ısı işlem uygulamasında, kullanılan yakıt türü de enerji kayıplarını büyük oranda etkileyebilmektedir [2].

2000 yılından itibaren ham petrol fiyatları, dünyaki petrol fiyatlarındaki dalgalanmalara rağmen sürekli artmaktadır [4]. 2008 yılı ham petrol fiyatlarında en çok dalgalanmaların olduğu yıldır. Fiyatlar dünyada yılın ilk yarısında önce yaklaşık %50 artmış, daha sonra ise yılbaşına göre yaklaşık %60 oranında düşmüştür [4, 5]. 2000-2008 yılları arasında kömür harici kullanılan tüm enerji kaynaklarının fiyatları, diğer Avrupa ülkelerinde Türkiye'ye oranla, daha düşük seviyelerde seyretmiştir [6, 7]. 2000 yılında Uluslar Arası enerji Ajansının yaptığı bir araştırmaya göre elektrik fiyatlarının en pahalı olduğu iki ülkenin Japonya ve Türkiye olduğu sonucuna varılmıştır [4]. Türkiye'de hızla gelişen ekonomiye karşın elektrik enerjisinin yeterliliği bu büyüme için bir engel teşkil edebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı

modern sanayi süreçlerinin enerji yoğunluklarını mümkün olan en düşük düzeye indirmeleri rekabete dayalı günümüz dünyasında hem ekonomik bir zorunluluk hem de gelecek nesillere daha iyi bir çevre bırakabilmek için sosyal bir sorumluluktur. Endüstriyel fırın uygulamalarında ise bu sorun ilk yatırım maliyetlerini kısa sürede tekrar ödeyebilen ileri kontrol yöntemlerinin uygulanmasıyla aşılabilecektir.

Sanayide çeşitli preslerde kullanılan fırınlar enerjinin yoğun olarak kullanıldığı tesisler arasında yer alır. Bu tesislerde birim ürün başına kullanılan enerjinin düşürülmesi ürün maliyetini etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Dolayısıyla kontrol duyarlılığının yanında enerji kazançlarının da artırılması önem arz etmektedir. Uygun bir kontrol stratejisi hem kontrol doğruluğunu hem de enerji kazançlarını arttırabilmektedir.

Fosil yakıt kullanan fırınlarda baca gazlarının duyulur ısısı dolayısıyla meydana gelen kayıplar çok önemlidir. Bu tür kayıpların azaltılması, yanma kontrolüyle; yani yakıt/hava ayarının kontrol edilip hava fazlalık katsayısının yanmayı bozmayacak en düşük değerde tutulmasıyla, baca gazlarının duyulur ısısının reküpatör ve rejeneratörler vasıtasıyla geri kazanılarak yakma havasının ön ısıtılmasıyla azaltılabilir. Yanma kontrolü aynı zamanda yanma kayıplarını da azaltır. Fırınların dış yüzeylerinden olan ısı kayıplarının azaltılması, fırın yalıtımının iyileştirilmesi ve bunun sonucu olarak fırının yüzey sıcaklığı düşürülerek sağlanır. Pek çok fırında fırın içindeki basınç ortam basıncının biraz üzerinde tutulur. Bu sayede atmosfer havasının fırın içine girerek malzemeyi oksitlemesi önlenir. Bu yüzden fırın içindeki sıcak gazlar açıklıklardan dışa sızarak ısı kaybına neden olur. Yakıt yakan fırının basıncı çok yüksekse yanmanın bir kısmı açıklıklardan dışa taşan alev killeri dolayısıyla fırın dışında olur. Hem sızıntı hem de dış yanma kayıpları fırının iç basıncı kontrol edilerek azaltılır. Bunlar dışında diğer kayıplar ise uygun tasarım ve uygulama yöntemleriyle azaltılır.

Enerji tasarrufuna yönelik alınacak önlemler sıcaklık kontrolü üzerinde bazı olumsuz etkiler yaratabilir. Bu durum elektrikle ısıtılan ısıl işlem fırınlarında daha da belirgindir. Zira bu fırınlarda baca kayıpları yoktur. Sızıntı kayıpları ise ihmal

edilebilecek kadar azdır. Enerji tasarrufu sağlamak için fırınların yüzey yalıtımı arttırıldıkça fırın soğuması da zorlaşır. Böyle bir fırına uygulanacak olan yanlış bir kontrol stratejisi sonucunda aşmalar ortaya çıkacağından malzeme sıcaklığının referans sıcaklığı değerine inmesi uzun süreler alabilmektedir. Sisteme sağlanan ısı enerjisindeki kazançları arttırmaya yönelik uygulamalarda, enerji kayıplarının, kontrol duyarlılığının ve fırın duvar katmanlarında kullanılan refrakter malzeme ömrünün de göz önüne alınması gerekmektedir. Elektrikli ısıtım fırınlarında ısıtım kaynaktan sisteme sağlanan sıcaklık değeri, malzemenin ulaşması beklenen sıcaklık değerinden çok daha yüksek bir değere sahiptir ve genellikle ısıtım kaynaktan fırına ısı iletiminin sağlandığı direnç telleri refrakter katmanı ile temas halindedir. Dolayısıyla refrakter katmanın maksimum kullanım sıcaklığı önem teşkil etmektedir. Bunun dışında ısıtım işlem gören malzeme istenen sıcaklığa ulaştıktan sonra ısıtım kaynağı devreden çıkmış olsa bile refrakter katmanın bünyesinde ısıtım kapasitesinden dolayı barındırdığı sıcaklığın malzemeye iletimi devam edeceğinden, malzemenin sıcaklığı da artmaya devam edecektir. Uygun bir kontrol yöntemi uygulanmazsa malzemenin sıcaklığında meydana gelen aşmalar sonucu malzeme sıcaklığının tekrar referans sıcaklığına erişmesi için geçen süre benzer şekilde artacaktır.

Fırınlar genel olarak doğrusal olmayan ve karmaşık sistemlerdir ve pek çoğunda malzemenin bulunduğu yerden sıcaklık ölçülmesi mümkün değildir. Genel olarak ısıtımın sağlandığı nokta ile sıcaklığı kontrol edilmek istenen malzeme farklı bölgelerde olduğundan, kullanılacak olan sıcaklık kontrol sistemi fırının dinamik yapısının ayrıntılı olarak tanımlanmasını gerektirir ve parametre değişikliklerinden etkilenir. Bu durumda meydana gelen gecikme zamanlarından ötürü, ölçümlerin doğruluğunu arttırabilmek amacıyla yeni düzenlemelere gidilmesi gerekmektedir [2].

1.2. Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Sanayide kullanılan enerjide büyük payı olan ısıtım işlem fırınlarında enerjinin daha verimli kullanılması doğrultusunda yapılacak revizyonlar kullanılan enerji türü ve uygulanan kontrol yöntemi ile birebir ilişkilidir. İleri kontrol yöntemleri sağladıkları enerji kazançlarıyla ilk yatırım maliyetlerini kısa sürede geri ödeyebilmektedir. Hem

enerji tasarrufu etmek hem de modern mühendislikte kullanılan ısı işlem süreçlerinin gerektirdiği kontrol doğruluğunu sağlayabilmek için bu tür sistemlerde ileri kontrol yöntemlerinin kullanılmasına yönelik pek çok çalışma yapılmıştır.

Uygulamada bütün sistemler doğrusal olmayan bir davranış gösterirler. *PID* kontrolcü ile sıcaklığın kontrol edilmeye çalışıldığı endüstriyel bir tavlama fırınında özellikle geniş çalışma aralıklarında kontrolcüye ait parametrelerin sürekli değiştirilmesi gerekmektedir. Fakat uygulamadaki zorluğu ve getireceği maliyetlerden dolayı, kontrolcünün parametreleri daha geniş bir çalışma aralığını kapsayacak şekilde seçilmekte bu da idealin altında bir kontrol işleminin uygulanmasına yol açmakta ve enerji kayıplarını arttırabilmektedir [8, 9, 10]. Martineau ve arkadaşları endüstriyel fırınlara uygulanan *PID* kontrolcülerin çift doğrusallaştırılmaları üzerine çalışmışlardır [11]. Çift doğrusal sistemler doğrusal olmayan durumları, doğrusal olan sistemlere oranla daha iyi modelleyebilmektedir. Yapılan çalışma gaz yakıtlı endüstriyel fırınların yüksek sıcaklıklardaki işlem performansını ve kararlılığını düzeltmeyi amaçlamıştır. Çift doğrusal *PID* kontrolcü, doğrusal bir *PID* kontrolcü, çift doğrusal bir kompensatör ve doğrusal olmayan sistemi içerecek şekilde tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan sistemden elde edilen çıkış değeri hem *PID* kontrolcüye hem de doğrusal olmayan kompensatöre geribeslenmiştir. Tasarlanan çift doğrusal kompensatörde doğrusal olmayan sistem doğrusallaştırılmakta ve ayar noktası otomatik olarak belirlenmektedir. Tek giriş ve tek çıkışlı sistemin durum denkleminde, sisteme sağlanan güç çift doğrusal kompensatör katsayılarıyla düzenlenmektedir. Tasarlanan kontrolcü 4 farklı ürün ve 3 farklı fırın boyutu için uygulanmıştır. Tasarlanan çift doğrusal *PID* kontrolcü, *PID* kontrolcüye oranla değişik fırın boyutları için ortalama güç gereksimini % 3-4 oranında ortalama azaltmıştır [11].

Sürekli sinterleme fırınları geleneksel malzeme fırınlarından farklı olarak bölümlerden oluşmakta ve her bölüm arasında ısı alışverişi meydana gelmektedir. Bundan dolayı kontrol doğruluğu azalmakta ve sistemin matematik modelinin doğru olarak kurulması zorlaşmaktadır [12, 13, 14]. Shu-kun ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sürekli tip sinterleme fırınlarının sıcaklık kontrol sistemleri üzerinde

çalışmışlar ve çalışmada uzman kontrol sistemi kullanmışlardır [14]. Ele alınan sinterleme fırını bölgelere ayrılmış olup bunlar sırasıyla yağ giderme, soğutma, ön ısıtma, sinterleme bölümleridir. Sistem ele alınırken, yağ giderme bölümü 3, ön ısıtma bölümü 2, sinterleme bölümü ise 3 parçaya bölünmüştür. Geri besleme her bir ana bölümün ortasında yer alan termoelektrik çiftlerle sağlanmıştır. Isıtıcı direnç her bir bölgenin arasından geçmekte ve her bölgede rölelerle kontrol edilmektedir. bölgelerin sıcaklığını ölçmek için 11 adet termoelektrik çift kullanılmıştır. Kullanılan uzman kontrol sisteminin çalışma prensibi şu şekildedir; sisteme ait parametreler bilgi yönetim birimine girilir. Hata sinyali bilgi işlem birimine gönderilir. Bilgi işlem biriminde elde edilen bilgiler hem *PID* kontrolcüye, hem de uzman kontrol sisteminin bilgi tabanı ve mantık geliştirme birimlerine gönderilir. Giriş değerleri göz önüne alınarak bilgi tabanında yer alan veriler değiştirilir. Mantık geliştirme birimi bilgi tabanından elde edilen veriler ile kontrol kanunlarını baz alarak çalışır ve girişten elde edilen değerler bu birime, bu birimden elde edilen veriler ise girişe aktarılır. Dolayısıyla hata sinyali hem uzman kontrol sisteminden hem de termoelektrik çiftlerle geribeslenmektedir. Uzman sistemler veri tabanı teknolojisine dayanarak çalışmaktadır. Fırına ait tüm bilgiler bir veritabanında biriktirilmektedir. Ele alınan sistemin veri tabanı Microsoft 2000 tarafından geliştirilmiştir. Sistem için oluşturulan veri tabanı değiştirilebilmektedir. Uzman kontrol sistemleri sistemde büyük sıcaklık değişimlerini kestirebilmekte ve sürekli sinterleme fırınlarında histeresiz problemini ortadan kaldırabilmekte ayrıca kontrol doğruluğunu geleneksel yöntemlere oranla arttırabilmektedir [14].

Banerjee ve arkadaşları doğrudan ateşlemeli katile yüklemeli ısıtma fırınlarında, ısıtma prosesini kontrol etmek için bir optimum kontrol stratejisi geliştirmişlerdir [15, 16]. Geliştirilen yöntem ısıtma işlem uygulanan malzemenin sıcaklığının referans sıcaklığından sapmaların ve yakıt sarfiyatının ağırlık katsayılarıyla çarpılmış karelerini içeren bir performans kriterini optimum kontrol yöntemi ile minimum yapmaktadır [15, 16]. Geliştirilen model fırındaki yanmayı, ısıtma işlem görecektir olan malzemeye olan ısı transferini (konveksiyon ve radyasyon) ve yük içindeki ısı iletimini belirleyecek şekilde tasarlanmıştır. Sonuçlar, farklı malzeme kütleleri ve

fırın geometreleri için elde edilmiş her bir duruma uygun ağırlık katsayıları belirlenmiştir [15].

Eroğlu, akaryakıtla çalışan ve sürekli yükleme yapılan tav fırınlarında yanma, sıcaklık ve i basıncın optimum kontrolü üzerine çalışmıştır [3]. Çalışmada öncelikle  bölgeli bir fırında yakıt sıcaklık ve iç basıncının optimum kontrolü için bir sistem modeli geliştirilmiş ve sistem denklemleri elde edilmiştir. Modeldeki parametreler 15 ton/saat kapasiteli bir tav fırını için belirlenmiş, sistem için seçilen performans kriterini minimum yapacak olan optimum kontrol geribesleme katsayıları, Riccati denkleminin nümerik çözümleri kullanılarak bulunmuştur. Seçilen performans kriteri fırının çıkış bölgesindeki sıcaklık, fırının iç basıncı ve baca gazındaki oksijen yüzde oranı gibi sıcaklık, i basınç ve hava/yakıt oranını ilgilendiren temel sistem değişkenleriyle yakıt miktarı, yakma havası miktarını ve baca klipesi açıklığı gibi kontrol değişkenlerini içine almaktadır [3].

Matematik modelin tam anlamıyla gerçekle birebir rtşememesinden ve uygulanan kontrol yönteminin yetersiz kalmasından dolayı sürekli yüklemeli tav hatlarında temel sıcaklık kontrol metodları genellikle iyi sonuçlar verememektedir. Bu şekilde tasarlanan bir kontrol sistemi, elde edilen ürünlerde kalite sorununun yanı sıra enerji kayıpları ve kullanılan ekipmanın ömrünün kısılması gibi sorunlar da sebep olmaktadır. Ming ve Datai, sürekli tip tavlama fırınlarının ısıl kaynakla sisteme g sağlanan kısmı için yeni bir sıcaklık kontrol yöntemi geliştirmişlerdir [17]. Uygulanan yeni yöntemle 1550 C'ye ayarlanmış bir fırında ± 2 C kontrol doğruluğu sağlanabilmiştir. Sistemde akıllı kestirimciden yararlanan ve geribesleme düzeltmeleri yapan bir optimum kontrol sistemi kullanılmıştır [17].

Son zamanlarda, bulanık mantıkla kontrol yöntemlerinin fırınlara uygulandığı çalışmalar da mevcuttur [18, 19, 20, 21, 22]. Abilov ve arkadaşları ileri-geribeslemeli kademeli sistemlerle tümleşik bulanık mantık kontrol yönteminin endüstriyel rafineri fırınlarına uygulaması üzerinde çalışmışlardır [20]. Ele alınan fırının modeli çift giriş ve ıkışlı (MIMO) olup giriş ve çıkış değişkenleri arasında birçok tersinir etkileşim olmaktadır. Sistemin modellenmesi için eş değer sistem yöntemi kullanılmıştır.

Sisteme ait denklemler elde edildikten sonra geliştirilen algoritmalarla sistemin bulanık mantıkla kontrolü gerçekleştirilmiş ve simülasyonlar *PI* kontrolle elde edilen sistem cevaplarıyla karşılaştırıldığında sistemin yükselme zamanının ve referans sıcaklığından aşmalarının azaltılabildiği görülmüştür. Bulanık mantıkla kontrol edilen sistemin *PI* kontrolcüyle elde edilen cevaplara oranla yerleşme zamanının 50 dakika azaldığı görülmüştür [20]. Çimento döner fırınları, uzun ve karmaşık yapıları ve silindirik şekillerinden dolayı bulanık mantıkla kontrol tekniklerinin endüstriye uyarlanabilirliği için iyi bir örnek olmaktadır [21]. Yapılan bir başka çalışmada, bulanık mantık kullanan kontrol organları ile çimento döner fırınlarının kontrolü bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş ve değişik referans sıcaklıkları için kabul edilebilir sınırlar altında sistem cevabı elde edilebildiği görülmüştür [22].

1.3. Çalışmanın Amacı

Fırınlarda işlem görece malzemenin sıcaklığının istenen zaman içinde bir profili izlemesi veya sabit bir değerde tutulmasının, fırınların karmaşık ve doğrusal olmayan yapılarından dolayı genellikle zor olduğu bilinmektedir. Elektrikli bir fırının güç kaynağının bulunduğu bölgede direnç telinin sıcaklığı malzemenin istenilen çıkış sıcaklığına oranla çok yüksek bir değere sahiptir. Özellikle ısıtıcı direnç telinin fırın duvar katmanlarının arasına gömülü olduğu durumlarda, malzeme istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra fırına sağlanan güç kapatılmış olsa bile direnç teli dolaylarındaki duvar katmanları yüksek sıcaklıkta olduğundan malzemenin bulunduğu bölgeye doğru ısı iletimi devam etmektedir. Malzemenin istenilen durağan sıcaklığı direnç telinin sıcaklığından çok daha küçük bir değere sahip olduğunda, istenilen sıcaklıktan aşmaların olmasını önlemek daha da zorlaşabilmektedir. Bu durum sistemin düzenli rejime geçeceği süreyi uzatabilmekte hatta uygulanan kontrol yöntemine bağlı olarak imkansız hale getirebilmektedir. Enerji tasarrufu amacıyla çok iyi yalıtılan bir fırında uygun yöntemler kullanılmadığında malzemenin sıcaklığı arzu edilen çıkış değerinin çok üstünde bir aşma değerine erişebilmektedir. Uygun kontrol parametreleri seçilmedikçe bir yandan dışarıya olan enerji kayıplarının arttığı bir yandan da malzemenin istenilen sıcaklıkta kontrolünün zorlaşacağı görülebilmektedir. Uygun bir

kontrol yöntemi ve iyi bir yalıtımla malzemenin sıcaklık kontrolünü yapmak, sistemin yerleşme zamanını kısaltabilmekte ve enerji kayıplarını azaltabilmektedir.

Endüstriyel veya laboratuvar tipi fırınlarda günümüzde otomatik kontrol yöntemleri kullanılmakla beraber tercih edilen aç-kapa ya da oransal, türevsel, integral (*PID*) işlemleri içeren kontrol yöntemleridir. Uygulanan bu tür alışılmış kontrol yöntemlerinde, bir performans kriteri ve sistem optimizasyonu söz konusu olmadığından, enerji kayıplarını azaltma hususu arka planda kalmakta ve referans sıcaklığına kabul edilebilir bir geçici davranış sonunda erişmesi amaçlanmaktadır.

Bu tezde katile yükleme tipinde bir elektrikli ısıtma işlem fırınında malzeme sıcaklığının kontrolü için geleneksel aç-kapa ve *PID* kontrol yöntemlerinin yanı sıra, durum değişkenlerinin tümünün geri beslendiği optimum kontrol yöntemi ve sadece bazı durum değişkenlerinin geri beslendiği düşük mertebeli gözlemleyicili optimum kontrol yöntemi karşılaştırılmalı olarak incelenecek ve en uygun kontrol yöntemi belirlenecektir. Bu amaçla önce duvar katmanlarından meydana gelen ve ısıtıcının duvar katmanları arasına yerleştirilmiş olduğu düşünülen elektrikli bir ısıtma işlem fırınının ısıtma davranışını yeterince ayrıntılı tanımlayan bir matematik model ortaya koyulacak ve kontrol yöntemlerinin uygulanabilmesi için sistemin durum denklemleri elde edilecektir. Uygulanabilirlik ve ekonomiklik kriterleri göz önüne alınarak sistem modelinin değişik parametrelerle kullanılabilir esneklikte olması hedef alınmış, endüstriyel olarak kullanılan fırınlarla mümkün olduğu kadar benzer yapısal ve ısıtma özellikleri gösteren bir modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Daha sonra örnek olarak incelemek üzere 3 farklı elektrikli fırınının parametrelerinin belirlenmesi, örnek olarak bu 3 fırında geleneksel kontrol yöntemlerinin yanında optimum kontrol uygulamasının da gerçekleştirilmesi, optimum kontrol uygulamasında elde edilen geribesleme katsayıları ile tümleşik olarak çalışan düşük mertebeli gözlemleyicilerin tasarlanması ve elde edilen her durum için sonuçların karşılaştırılması ve hem de enerji tasarrufu, kontrol doğruluğu ve sistemin geçici zaman özellikleri gibi etkenler göz önüne alınarak en uygun kontrol yönteminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.4. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada ikinci bölümde elektrikli bir ısıtım fırınının ısıtım davranışını tanımlayan bir model oluşturulmuş ve ısıtım kaynağı devrede iken ve devrede değilken sisteme ait durum denklemleri bulunmuştur.

Üçüncü bölümde, bir önceki bölümde elde edilen durum denklemlerinde geçen sistem parametrelerinin değerleri üç örnek fırın için hesaplanmıştır. Ayrıca her bir kontrol yöntemi için sistem performansını ortaya koyacak olan performans değerlendirme kriterleri belirlenmiş ve performans kartları oluşturulmuştur.

Dördüncü bölümde iki konumlu aç-kapa tip kontrol uygulaması için yapılması gereken düzenlemeler anlatılmış ve malzeme sıcaklığının değişik parametreler altında aç-kapa yöntemiyle kontrolünden elde edilen sonuçlar çizelgeler ve şekiller halinde sunulmuştur.

Beşinci bölümde oransal (P), oransal + integral (PI), oransal + integral + türevsel (PID) kontrol özellikleri anlatılmış, malzeme sıcaklığının değişik parametreler altında bu yöntemlerle kontrolü ile elde edilen sonuçlar, çizelgeler ve şekiller halinde sunulmuştur.

Altıncı bölümde optimum kontrol yöntemi anlatılmış, optimum kontrol uygulaması için durum denklemleri yeniden elde edilmiş, sistem için performans kriteri belirlenmiş ve optimum kontrol kanunu elde edilmiştir. Elde edilen optimum kontrol kanunu malzeme sıcaklığının kontrolü için sisteme değişik parametreler altında uygulanmış ve her durum için değişik geribesleme katsayıları ile elde edilen sistem geçici zaman cevapları, çizelgeler ve şekillerle sunulmuştur.

Yedinci bölümde düşük dereceden iki farklı gözlemleyici tasarımı yapılmış ve tasarlanan gözlemleyicilerle malzeme sıcaklığının kontrolü sağlanmıştır. Gözlemleyicilerin karakteristikleri ve düşük dereceden gözlemleyicilerin tasarımı hakkında bilgi verildikten sonra en uygun gözlemleyici kazanç katsayıları elde

edilmiş ve kazanç katsayıları optimum kontrol uygulamasında elde edilen optimum geribesleme katsayıları ile sisteme uygulanmıştır. Değişik parametler altında malzeme sıcaklığının kontrolü ile elde edilen sonuçlar çizelgeler ve şekillerle sunulmuştur.

Sekizinci bölümde tezde incelenen tüm kontrol yöntemleriyle elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış, üstünlükleri ve zayıf yanları ile ele alınmış, ileride yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

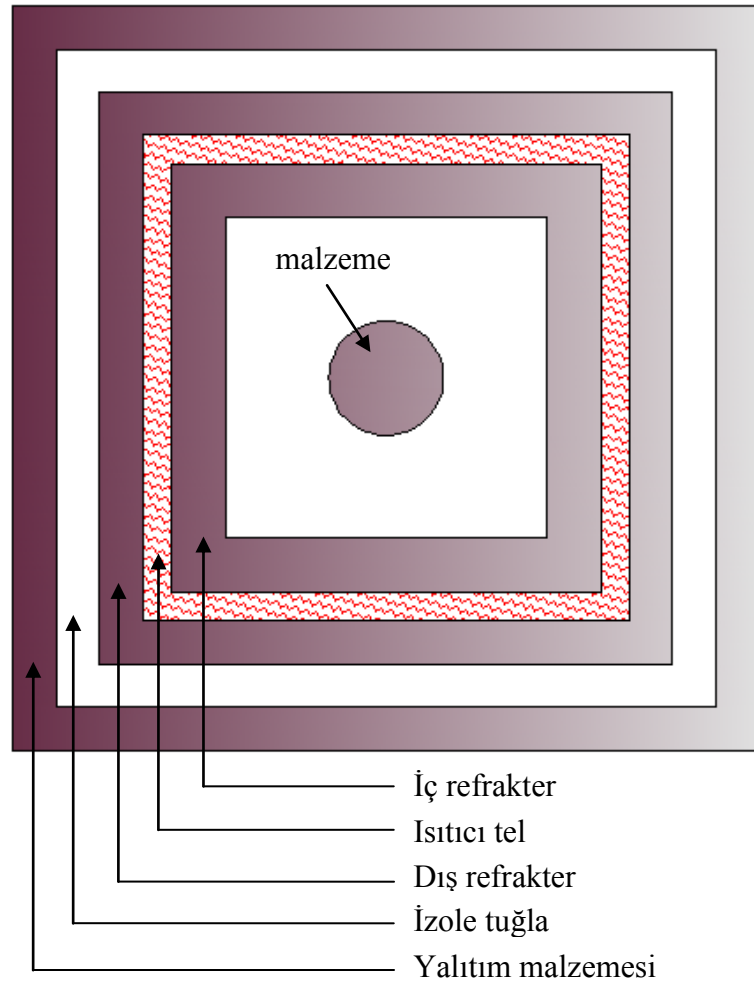
2. ELEKTRİKLİ BİR ISIL İŞLEM FIRINININ MATEMATİK MODELLENMESİ

2.1. Elektrikli Bir Isıl İşlem Fırının Dinamik Modeli

Elektrikli bir ısı işlem fırınının sıcaklık kontrolünde kullanılabilecek çeşitli kontrol yöntemlerinin analitik olarak değerlendirilebilmesi için fırının ısı davranışını yeterli ayrıntıda tanımlayabilecek bir dinamik model gereklidir. Fırınlarda farklı geometrik şekillerde olsa dahi, duvar yapıları birbirine benzer. Bu çalışmada direnç elemanı ile ısıtılan bir fırın esas alınacaktır. Fırına cebri olarak sıcak hava üflenmediği kabul edilecektir. Bu tip fırınlarda ısıtıcı eleman ya fırının iç yüzeyine döşenmiş durumda ya da nisbeten ince bir refrakter tabakasıyla koruma altına alınmıştır. Burada daha genel olduğu için iç yüzeyde refrakter katmanı olduğu kabul edilmiştir. Isıtıcı elemandan dışarıya doğru gidildiğinde sırasıyla refrakter (şamot, alumina vb.), izole tuğla (şamot izole, kieselguhr, ceraboard, vb.), yalıtım malzemesi (taş yünü, perlit, cam yünü, vb.) katmanları yer alır. Elektrikli bir ısı işlem fırınının genel yapısı Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

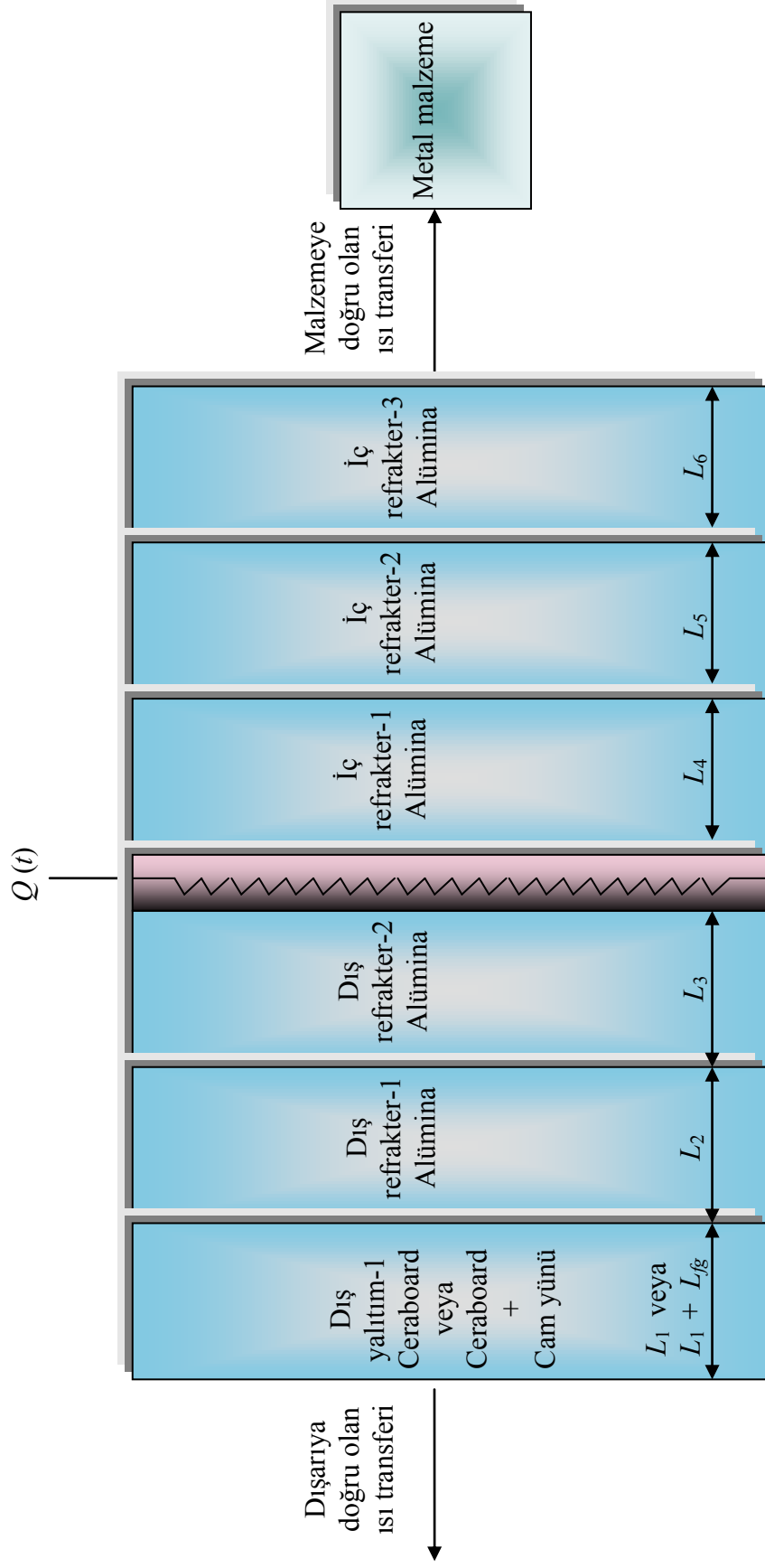
Fiziksel dünyada karşılaşılan ısı sistemlerinde, ısı kapasitans ve ısı direnç özellikleri sistemi meydana getiren elemanların bütününe yayılmış şekilde bulunmaktadır. Dolayısıyla hassas analizlerde yayılmış parametrelili modellerin kullanılması uygundur. Bu çalışmada ise analizi kolaylaştırabilmek amacıyla kümelenmiş parametrelili model kullanılması tercih edilmiştir [3, 23, 24]. Elektrikli ısı işlem fırınları farklı geometrilere olabilir. Bu çalışmada farklı geometrilere bağımsız olarak analiz yapabilmek amacıyla Şekil 2.2’de görülen, ısı akışının tek eksen boyunca ve katmanlara dik yönde olduğu bir model kullanılacaktır. Şekilde görülen her duvar katmanının bir ısı kapasitansı ve ısı direnci vardır. Bunların değerleri, incelenecek fırının fiziksel yapısı baz alınarak belirlenen ilgili katmanların eşdeğer kapasitans ve eşdeğer direnç değerleri kadardır. Burada ısıtıcı eleman yakınında oluşan sıcaklık gradyanını daha iyi görebilmek için, ısıtıcı ile fırının dış duvarı arasında kalan refrakter iki katman halinde; ısıtıcı ile fırının iç duvarı arasındaki

refrakter ise üç katman halinde modele dahil edilmiştir. En dıştaki duvar katmanından ortama esas olarak konveksiyon yoluyla ısı kaybı olmaktadır. Fırının iç yüzeyi ile malzeme arasındaki ısı transferi ise radyasyon ve konveksiyonlardır. Ancak fırının çalışma sıcaklığı yüksekse ve fırının iç yüzeyi ile malzeme arasındaki sıcaklık farkı büyük ise malzemeye olan ısı transferi çok büyük oranla radyasyon yoluyla gerçekleşir. Isıl işlem gören malzemenin içindeki sıcaklık dağılımının muntazam olduğu ve sadece ısıl kapasitansının olduğu kabul edilecektir.



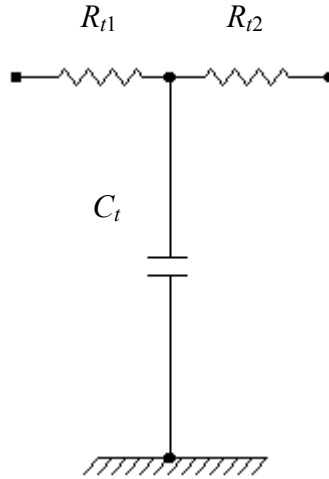
Şekil 2.1. Elektrikli bir ısıl işlem fırınının genel yapısı.

Şekil 2.2’de görülen herhangi bir duvar katmanı bir kapasitans ve iki dirençle Şekil 2.3’de gösterildiği gibi modellenebilir. Burada C_t duvar katmanının toplam ısıl kapasitansını ifade etmektedir. Duvarın toplam ısıl direnci ise R_{t1} ve R_{t2} olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Katmanların iç ve dış yüzey alanlarının eşit olduğu durumlarda,

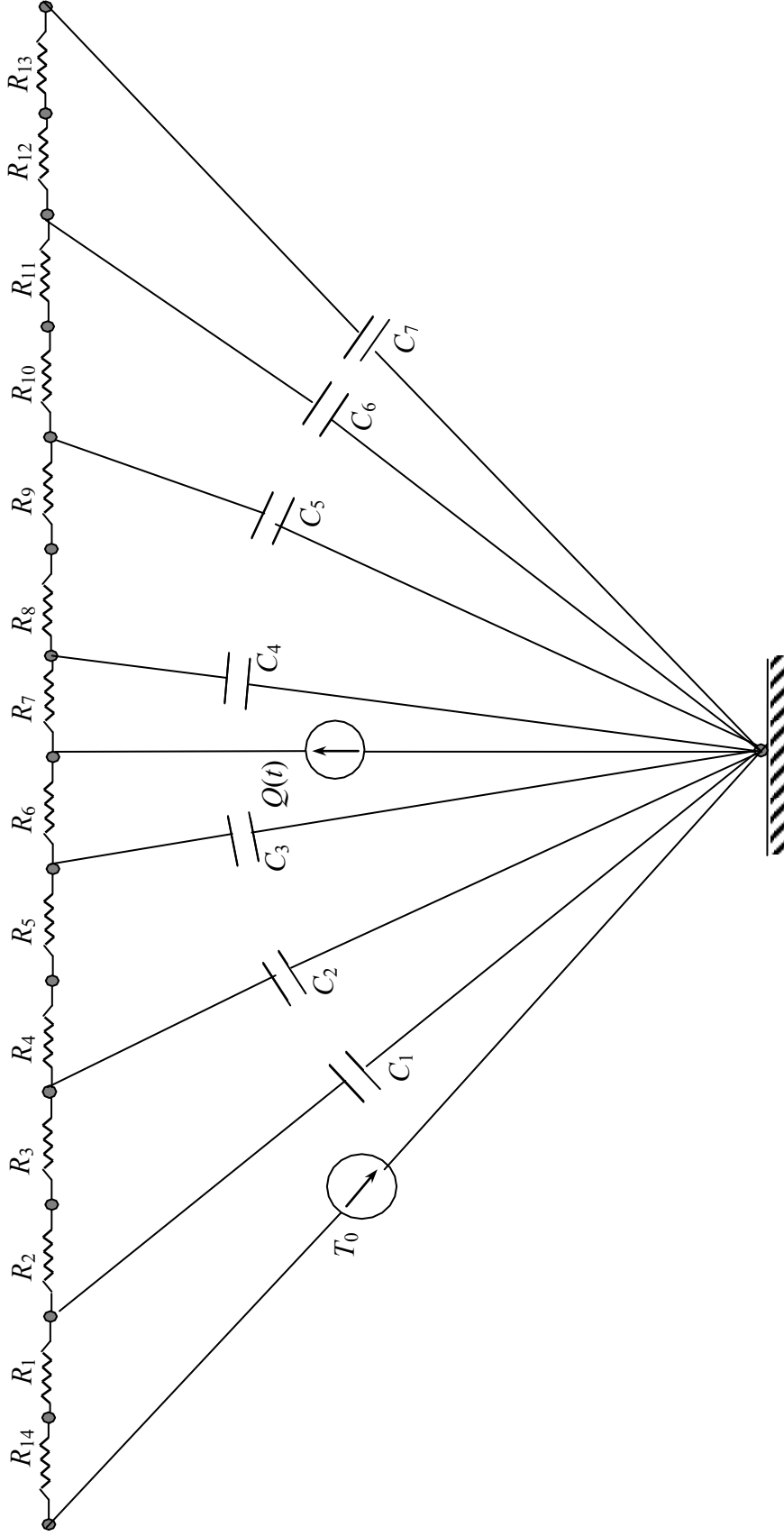


Şekil 2.2. Basitleştirilmiş sistem modelinin yapısı.

C_t 'nin sıcaklığının duvarın ortasında olduğu kabul edilerek, bu dirençlerin değerleri birbirine eşit alınabilir. Ancak fırın geometrisi dolayısıyla bir katmanın iç ve dış alanları arasında büyük bir fark varsa toplamları aynı kalmak kaydıyla farklı direnç değerleri de kullanılabilir. Elektrikli fırının ısı dinamik elemanlar kullanılarak oluşturulan modeli Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Şekilde $Q(t)$, ısı debisi veren ısı bir akım kaynağı olup ısıtıcı elemanı göstermektedir. İncelenmesi istenen fırının yapısına göre fırın duvar katmanlarının ısı direnç ve kapasitans özellikleri belirlenebilir. Isıtıcı elemandan dışarıya doğru gidildiğinde R_6 , C_3 , R_5 elemanları birinci dış refrakter katmanını; R_4 , C_2 , R_3 elemanları ikinci dış refrakter katmanını; R_2 , C_1 , R_1 yalıtım tuğlası katmanını (fırın yapısına göre cerabord, izole tuğla veya kieselguhr) göstermektedir. Cam yünü ya da taş yünü gibi bir malzemeden olan yalıtım katmanının ısı kapasitansı ihmal edilmiş bu katmanın sadece ısı direnci olduğu kabul edilmiştir. Bu katmana ait direnç değeri, yalıtım tuğlasının direnç değerlerinden olan R_1 direnç değeri ile birleştirilerek modele dahil edilmiştir. R_{14} direnci dış yüzeyden konveksiyon yoluyla olan ısı kaybını modellemek amacıyla modele ilave edilmiştir. $T_0(t)$ ise dış ortam sıcaklığını modelleyen bir gerilim kaynağıdır.



Şekil 2.3. Elektrikli bir ısı işlem fırınının herhangi bir duvar katmanının modellenmiş hali.



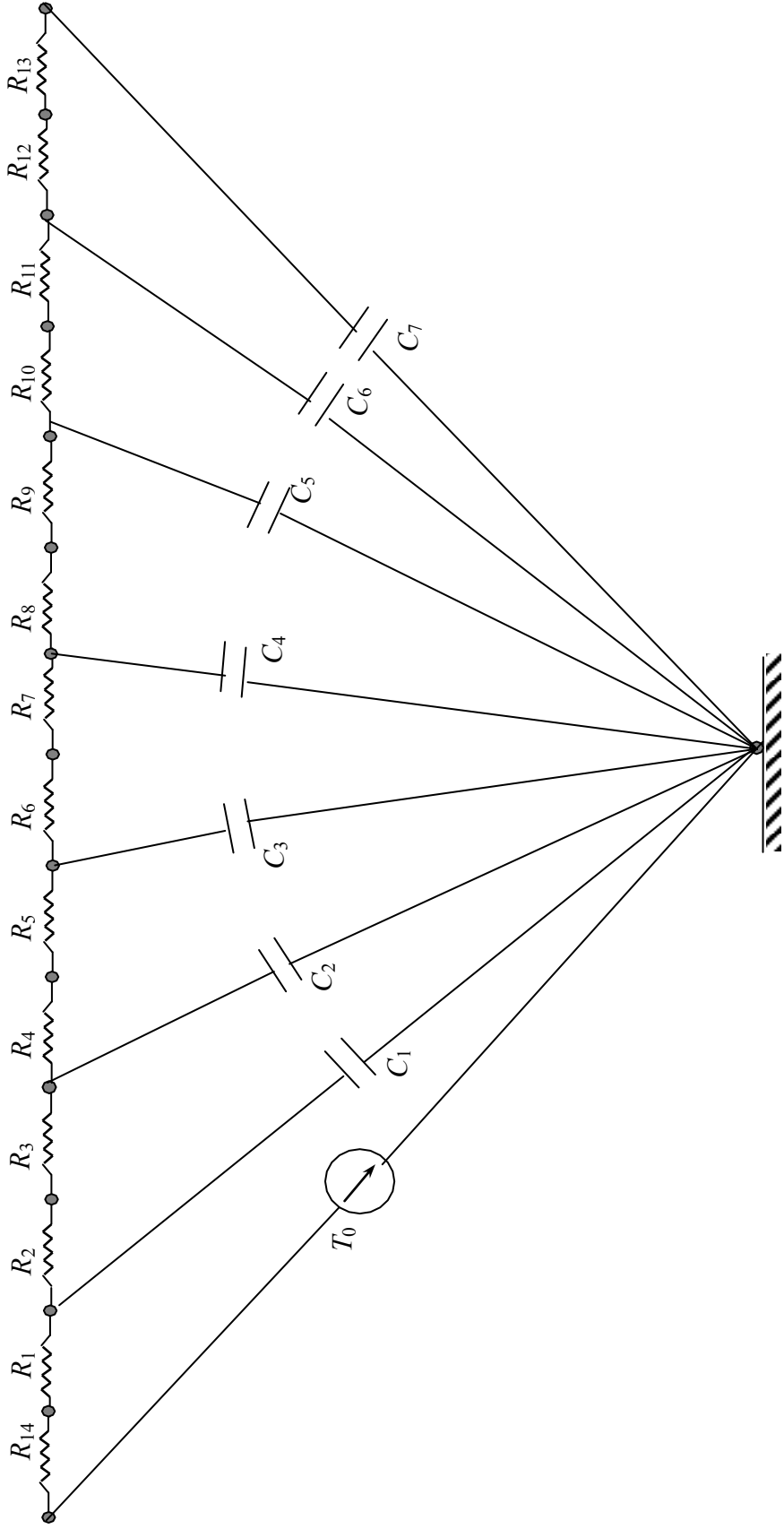
Şekil 2.4. Isıl kaynak devredeyken elektrikli bir ısı işlem firmanın modellenmiş hali.

Isıtıcıdan, fırın içine doğru gidildiğinde R_7 , C_4 , R_8 elemanları birinci iç refrakter katmanını; R_9 , C_5 , R_{10} elemanları ikinci iç refrakter katmanını; R_{11} , C_6 , R_{12} ise üçüncü iç refrakter katmanını göstermektedir. R_{13} direnci iç yüzeyden konveksiyon ve radyasyon yoluyla olan ısı kaybını modellemek için modele dahil edilmiştir. C_7 ise fırında işlem gören malzemenin ısı kapasitansını ifade etmektedir.

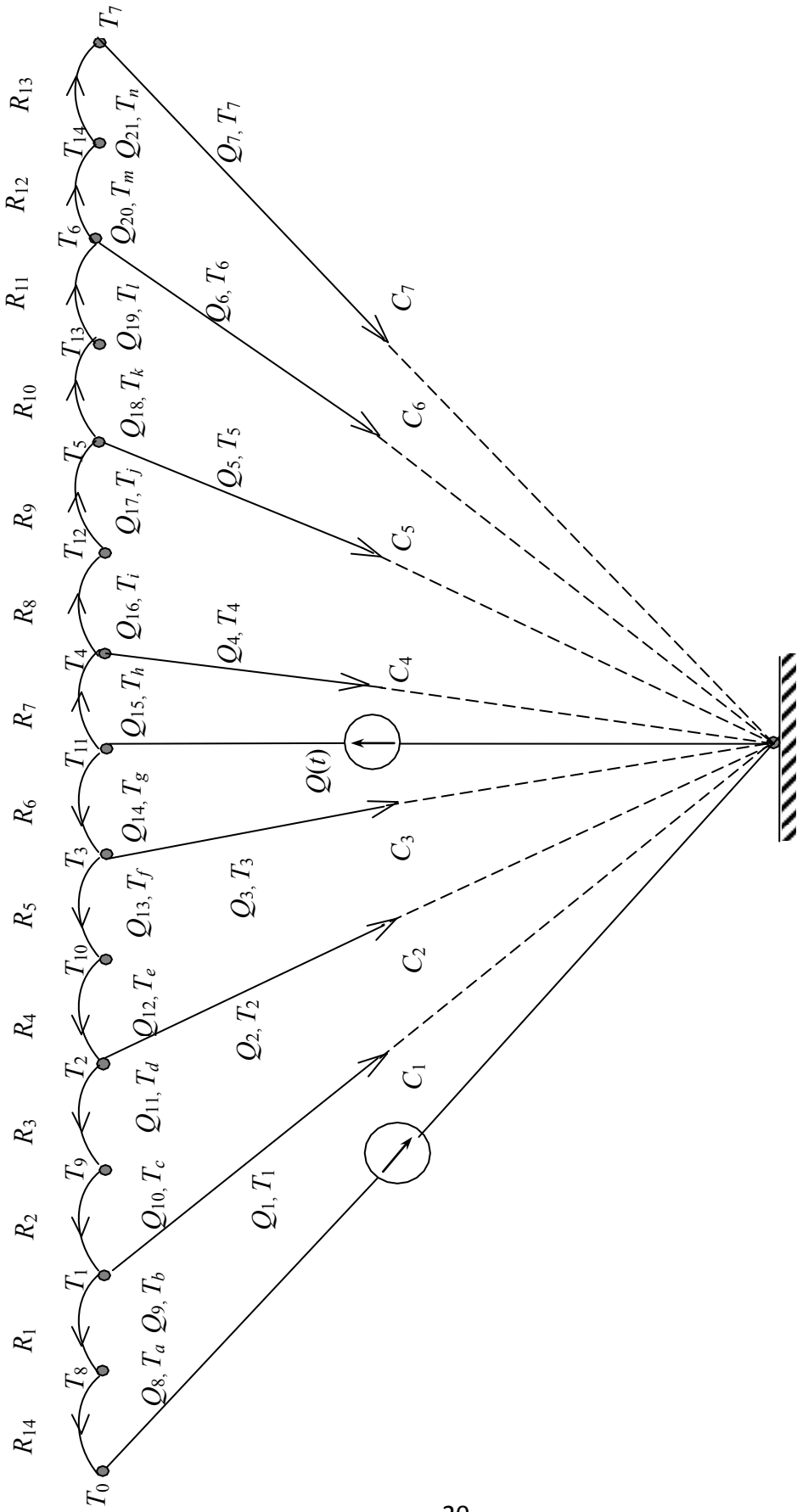
Şekil 2.4'deki model sistem davranışını ısıtıcı devrede iken tanımlayan bir modeldir. Ancak ısıtıcı devrede değilken (açık kapalı kontrolde olabileceği gibi) sistemin modeli Şekil 2.5'de gösterildiği gibidir. Bu modelin Şekil 2.4'deki modelden tek farkı $Q(t)$ ısı kaynağının sistemde olmayışıdır.

2.1.1. Isıl Kaynak Devredeyken Sistemin Isıl Davranışını Tanımlayan Denklemlerin Eldesi

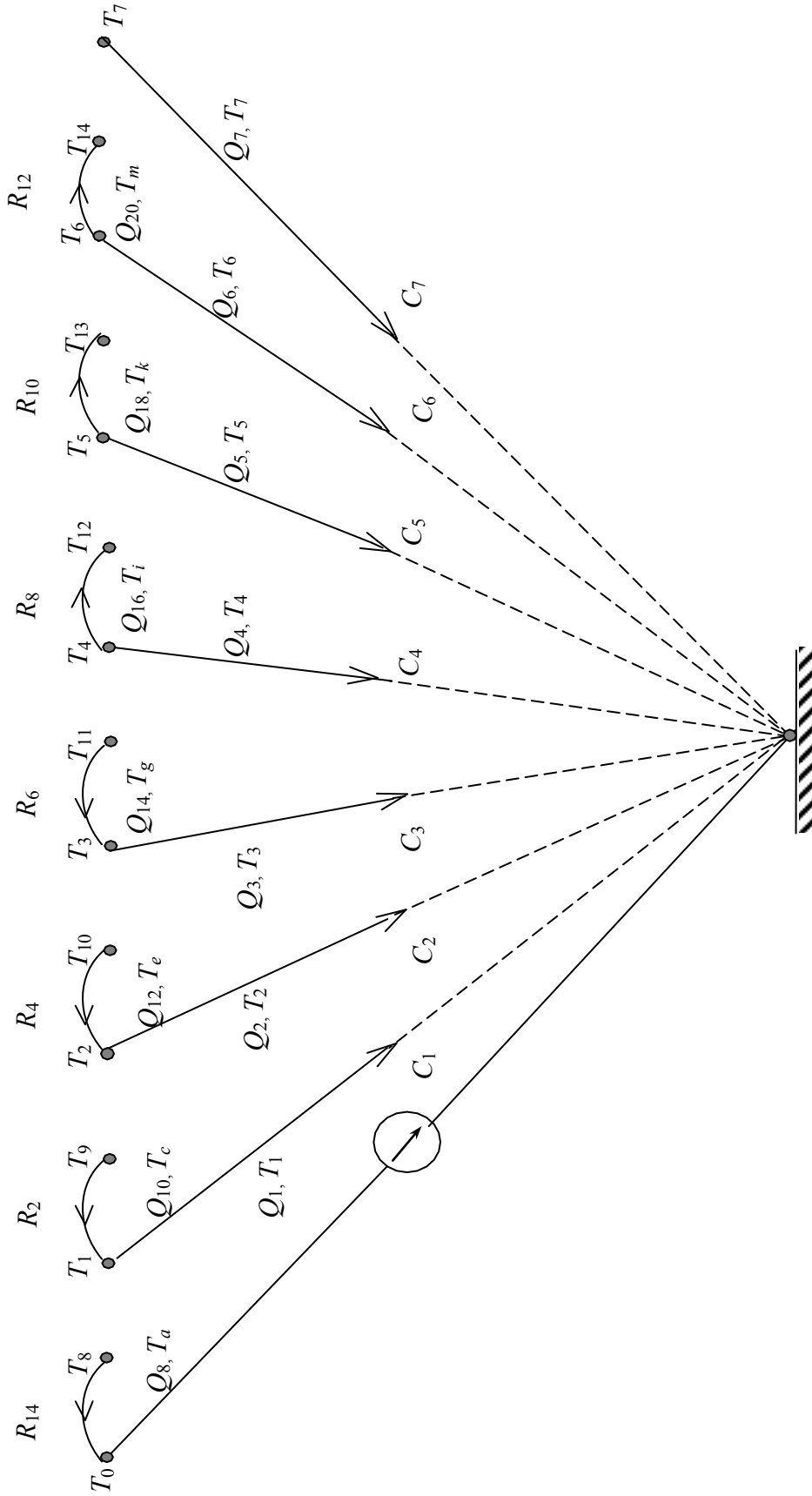
Şekil 2.4' de sistemin ısı kaynak devredeyken elde edilen modeli görülmektedir. Sistemin; bu model baz alınarak elde edilen doğrusal grafiği Şekil 2.6'da gösterildiği gibidir. Grafikteki kol sayısı 23, düğüm sayısı ise 16'dır. Sistemin normal ağacı Şekil 2.7.(a)'daki gibidir. Normal ağaca dahil edilmeyen diğer elemanlar ise Şekil 2.7.(b)'de gösterildiği gibi ağaç bağlarını oluşturmaktadır. Normal ağaçtan yararlanılarak sistemin durum değişkenleri duvar katmanlarının yani kapasitansların sıcaklıkları olan T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , T_7 olarak bulunmuştur. Daha sonra sistemin birincil değişkenleri normal ağaç üzerinde yer alan kapasitansların sıcaklıkları, direnç elemanları üzerindeki sıcaklık farkları ile ağaç bağlarında yer alan pasif elemanların ısı debileri olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , T_7 , T_a , T_c , T_e , T_g , T_i , T_k , T_m sıcaklıkları ile Q_9 , Q_{11} , Q_{13} , Q_{15} , Q_{19} , Q_{21} ısı debileri sistemin birincil değişkenlerini ifade etmektedir. Birincil değişkeni sıcaklık olan elemanların ısı debileri ile birincil değişkeni ısı debisi olan elemanların sıcaklık farkları ikincil değişkenleri tanımlamaktadır. Buna göre sistemin ikincil değişkenlerini Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 , Q_6 , Q_7 , Q_8 , Q_{10} , Q_{12} , Q_{14} , Q_{16} , Q_{18} , Q_{20} ısı debileri ile T_b , T_d , T_f , T_h , T_j , T_L , T_n sıcaklıkları oluşturmaktadır.



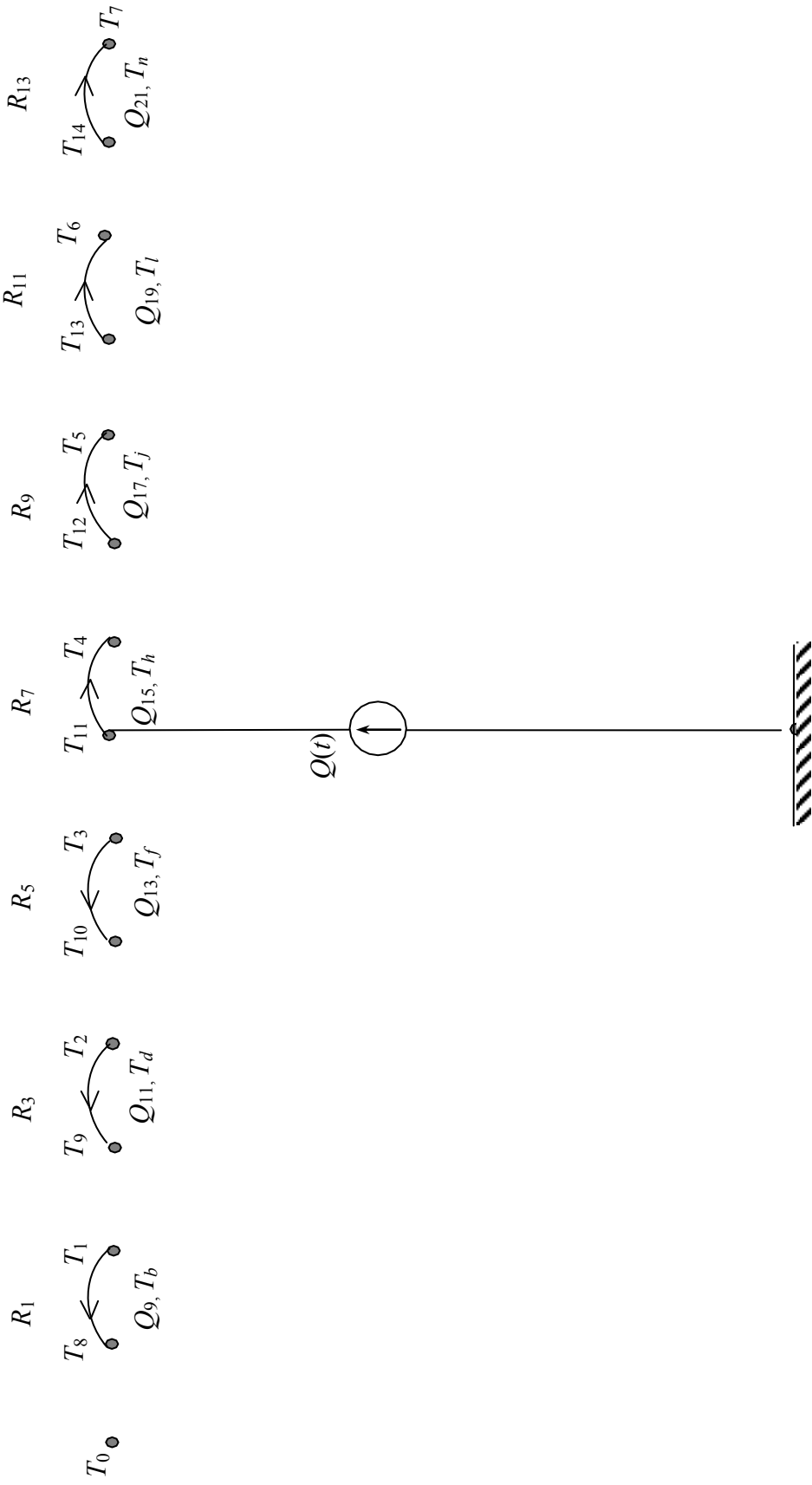
Şekil 2.5. Isıl kaynak devre dışındayken elektrikli bir ısı işlem firminin modellenmiş hali.



Şekil 2.6. Isıl sistemin doğrusal grafiği.



Şekil 2.7. (a) Isıl sistemin normal ağacı.



Şekil 2.7.(b). Isıl sistemin ağaç bağları.

Birincil değişkenler denklemlerin sol tarafında kalmak üzere pasif elemanların eleman denklemleri; denklemler (2.1)-(2.21)'de ifade edildiği gibi yazılabilir.

$$\dot{T}_1 = \frac{Q_1}{C_1} \quad (2.1)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{Q_2}{C_2} \quad (2.2)$$

$$\dot{T}_3 = \frac{Q_3}{C_3} \quad (2.3)$$

$$\dot{T}_4 = \frac{Q_4}{C_4} \quad (2.4)$$

$$\dot{T}_5 = \frac{Q_5}{C_5} \quad (2.5)$$

$$\dot{T}_6 = \frac{Q_6}{C_6} \quad (2.6)$$

$$\dot{T}_7 = \frac{Q_7}{C_7} \quad (2.7)$$

$$T_a = R_{14} Q_8 \quad (2.8)$$

$$T_c = R_2 Q_{10} \quad (2.9)$$

$$T_e = R_4 Q_{12} \quad (2.10)$$

$$T_g = R_6 Q_{14} \quad (2.11)$$

$$T_i = R_8 Q_{16} \quad (2.12)$$

$$T_k = R_{10} Q_{18} \quad (2.13)$$

$$T_m = R_{12} Q_{20} \quad (2.14)$$

$$Q_9 = \frac{T_b}{R_1} \quad (2.15)$$

$$Q_{11} = \frac{T_d}{R_3} \quad (2.16)$$

$$Q_{13} = \frac{T_f}{R_5} \quad (2.17)$$

$$Q_{15} = \frac{T_h}{R_7} \quad (2.18)$$

$$Q_{17} = \frac{T_j}{R_9} \quad (2.19)$$

$$Q_{19} = \frac{T_l}{R_{11}} \quad (2.20)$$

$$Q_{21} = \frac{T_n}{R_{13}} \quad (2.21)$$

İkincil değişkenler denklemlerin sol yanında kalacak şekilde süreklilik denklemleri denklemler (2.22)-(2.35)'de ifade edildiği gibi akım tipi birincil değişkenler ve ısı kaynağının ısıl debisi cinsinden yazılır.

$$Q_8 = Q_9 \quad (2.22)$$

$$Q_1 = Q_{11} - Q_9 \quad (2.23)$$

$$Q_{10} = Q_{11} \quad (2.24)$$

$$Q_{12} = Q_{13} - Q_{11} \quad (2.25)$$

$$Q_{12} = Q_{13} \quad (2.26)$$

$$Q_3 = Q(t) - Q_{15} - Q_{13} \quad (2.27)$$

$$Q_{14} = Q(t) - Q_{15} \quad (2.28)$$

$$Q_4 = Q_5 - Q_{17} \quad (2.29)$$

$$Q_{16} = Q_{17} \quad (2.30)$$

$$Q_5 = Q_{17} - Q_{19} \quad (2.31)$$

$$Q_{18} = Q_{19} \quad (2.32)$$

$$Q_6 = Q_{19} - Q_{21} \quad (2.33)$$

$$Q_{20} = Q_{21} \quad (2.34)$$

$$Q_7 = Q_{21} \quad (2.35)$$

Sıcaklık cinsinden olan ikincil değişkenler ise, uygun olarak seçilen çevrimler için uyumluluk denklemleri yazılarak, birincil değişkenler cinsinden denklemler (2.36)-(2.42)'de ifade edildiği gibi bulunur.

$$T_b = T_1 - T_a - T_0 \quad (2.36)$$

$$T_d = T_2 - T_1 - T_c \quad (2.37)$$

$$T_f = T_3 - T_2 - T_e \quad (2.38)$$

$$T_h = T_3 + T_g - T_4 \quad (2.39)$$

$$T_j = T_4 - T_5 - T_i \quad (2.40)$$

$$T_L = T_5 - T_6 - T_k \quad (2.41)$$

$$T_n = T_6 - T_7 - T_m \quad (2.42)$$

Denklemler (2.22)-(2.35) ile verilen ikincil akım değişkenleri ve denklemler (2.36)-(2.42) ile verilen ikincil gerilim değişkenleri alınarak denklemler (2.1)-(2.21)'de yerlerine konulursa ve durum değişkeni olmayan değişkenler yok edilip gerekli düzenlemeler yapılırsa, sistem davranışını tanımlayan durum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{T}_1 = \frac{1}{C_1(R_1+R_{14})} T_0(t) - \frac{(R_1+R_2+R_3+R_{14})}{C_1(R_2+R_3)(R_1+R_{14})} T_1 + \frac{1}{C_1(R_2+R_3)} T_2 \quad (2.43)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{1}{C_2(R_2+R_3)} T_1 - \frac{(R_2+R_3+R_4+R_5)}{C_2(R_2+R_3)(R_4+R_5)} T_2 + \frac{1}{C_2(R_4+R_5)} T_3 \quad (2.44)$$

$$\dot{T}_3 = \frac{1}{C_3(R_4+R_5)} T_2 - \frac{(R_4+R_5+R_6+R_7)}{C_3(R_4+R_5)(R_6+R_7)} T_3 + \frac{1}{C_3(R_6+R_7)} T_4 + \frac{R_7}{C_3(R_6+R_7)} Q(t) \quad (2.45)$$

$$\dot{T}_4 = \frac{1}{C_4(R_6+R_7)} T_3 - \frac{(R_6+R_7+R_8+R_9)}{C_4(R_6+R_7)(R_8+R_9)} T_4 + \frac{1}{C_4(R_8+R_9)} T_5 + \frac{R_6}{(R_6+R_7)} Q(t) \quad (2.46)$$

$$\dot{T}_5 = \frac{1}{C_5(R_8+R_9)} T_4 - \frac{(R_8+R_9+R_{10}+R_{11})}{C_5(R_8+R_9)(R_{10}+R_{11})} T_5 + \frac{1}{C_5(R_{10}+R_{11})} T_6 \quad (2.47)$$

$$\dot{T}_6 = \frac{1}{C_6(R_{10}+R_{11})} T_5 - \frac{(R_{10}+R_{11}+R_{12}+R_{13})}{C_6(R_{10}+R_{11})(R_{12}+R_{13})} T_6 + \frac{1}{C_6(R_{12}+R_{13})} T_7 \quad (2.48)$$

$$\dot{T}_7 = \frac{1}{C_7(R_{12}+R_{13})} T_6 - \frac{1}{C_7(R_{12}+R_{13})} T_7 \quad (2.49)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen katsayılar için aşağıdaki tanımlamalar yapılsın;

$$a_{11} = -\frac{(R_1+R_2+R_3+R_{14})}{C_1(R_2+R_3)(R_1+R_{14})} \quad (2.50)$$

$$a_{12} = \frac{1}{C_1(R_2+R_3)} \quad (2.51)$$

$$a_{21} = \frac{1}{C_2(R_2+R_3)} \quad (2.52)$$

$$a_{22} = -\frac{(R_2+R_3+R_4+R_5)}{C_2(R_2+R_3)(R_4+R_5)} \quad (2.53)$$

$$a_{23} = \frac{1}{C_2(R_4+R_5)} \quad (2.54)$$

$$a_{32} = \frac{1}{C_3(R_4+R_5)} \quad (2.55)$$

$$a_{33} = -\frac{(R_4+R_5+R_6+R_7)}{C_3(R_4+R_5)(R_6+R_7)} \quad (2.56)$$

$$a_{34} = \frac{1}{C_3(R_6+R_7)} \quad (2.57)$$

$$a_{43} = \frac{1}{C_4(R_6+R_7)} \quad (2.58)$$

$$a_{44} = -\frac{(R_6+R_7+R_8+R_9)}{C_4(R_6+R_7)(R_8+R_9)} \quad (2.59)$$

$$a_{45} = \frac{1}{C_4(R_8+R_9)} \quad (2.60)$$

$$a_{54} = \frac{1}{C_5(R_8+R_9)} \quad (2.61)$$

$$a_{55} = -\frac{(R_8+R_9+R_{10}+R_{11})}{C_5(R_8+R_9)(R_{10}+R_{11})} \quad (2.62)$$

$$a_{56} = \frac{1}{C_5(R_{10}+R_{11})} \quad (2.63)$$

$$a_{65} = \frac{1}{C_6(R_{10}+R_{11})} \quad (2.64)$$

$$a_{66} = -\frac{(R_{10}+R_{11}+R_{12}+R_{13})}{C_6(R_{10}+R_{11})(R_{12}+R_{13})} \quad (2.65)$$

$$a_{67} = \frac{1}{C_6(R_{12}+R_{13})} \quad (2.66)$$

$$a_{76} = \frac{1}{C_7(R_{12}+R_{13})} \quad (2.67)$$

$$a_{77} = -\frac{1}{C_7(R_{12}+R_{13})} \quad (2.68)$$

$$b_{11} = \frac{1}{C_1(R_1+R_{14})} \quad (2.69)$$

$$c_{31} = \frac{R_7}{C_3(R_6 + R_7)} \quad (2.70)$$

$$c_{41} = \frac{R_6}{C_4(R_6 + R_7)} \quad (2.71)$$

Durum denklemleri yukarıda tanımlanan katsayılar cinsinden aşağıdaki matris formunda ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \\ \dot{T}_6 \\ \dot{T}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_0(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c_{31} \\ c_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} Q(t) \quad (2.72)$$

Eğer,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c_{31} \\ c_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

matrisleri tanımlanırsa, durum denklemleri kısaca

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{AT} + \mathbf{B}T_0(t) + \mathbf{C}Q(t) \quad (2.77)$$

olarak yazılabilir.

Sistemin çıkış değişkeni ise malzeme sıcaklığıdır. Buna göre, çıkış ifadesi matris cinsinden,

$$\mathbf{y} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

şeklinde ya da kısaca aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$y = T_7 \quad (2.79)$$

Isıtıcı direnç teli sıcaklığının imalatçısı tarafından belirlenen maksimum bir çalışma değeri olduğundan, fırın çalışırken bu sıcaklığın izlenmesi ve gerekirse fırına verilen enerjiyi azaltarak sınırlandırılması istenebilir. Direnç telinin bulunduğu bölgeye en

yakın yerdeki sıcaklık değeri direnç telinin sıcaklığıyla çok yakın bir değere sahip olduğundan bu noktadaki T_{11} sıcaklığı direnç telinin sıcaklığıyla aynı kabul edilmiştir. Bu sıcaklığın değeri sistemin durum değişkenleri cinsinden aşağıdaki gibi bulunabilir. Kaynak elemanının sol tarafında kalan göz için çevrim denklemi yazılırsa;

$$T_{11}=T_g+T_3 \quad (2.80)$$

elde edilir. Burada T_g , R_6 direncinin üzerindeki sıcaklık farkıdır. Denklemler (2.11), (2.28), (2.18) ve (2.39) kullanılarak istenmeyen değişkenler yok edilir ve gerekli düzenlemeler yapılırsa, T_g için aşağıdaki ifade bulunur.

$$T_g=\frac{R_6}{R_6+R_7}(R_7Q(t)-T_3+T_4) \quad (2.81)$$

T_g değeri denklem (2.80)'de yerine konulursa, T_{11} için durum değişkenleri ve sistem girişi $Q(t)$ cinsinden aşağıdaki ifade bulunur.

$$T_{11}=\left(\frac{R_6R_7}{R_6+R_7}Q(t)-\frac{R_6}{R_6+R_7}(T_3-T_4)\right)+T_3 \quad (2.82)$$

2.1.2. Isıl Kaynak Devre Dışındayken Sistemin Isıl Davranışının Modellenmesi

Isıl kaynak devre dışındayken, ısı kaynak devredeykenki duruma benzer şekilde sistemin doğrusal grafiği, normal ağacı ve ağaç bağları çizilip gerekli olan eleman süreklilik ve uyumluluk denklemleri yazılıp durum değişkenleri elde edilirse, bu denklemlerin genel denklemlerden tek farkının $Q(t)$ gibi bir akım kaynağının sistemde yer almayışı olduğu görülür. Dolayısıyla ısı kaynak devre dışındayken elde edilen durum denklemleri, denklem (2.72)'nin özel bir hali olarak denklem (2.82)'de gösterildiği gibi bulunur.

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \\ \dot{T}_6 \\ \dot{T}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_0(t) \quad (2.82)$$

Ya da daha önce de tanımlanan **A** ve **B** matrisleri cinsinden

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{AT} + \mathbf{B}T_0(t) \quad (2.83)$$

olur.

Sistemin çıkış ifadesi ise denklem (2.79)'daki gibi olup,

$$y = T_7 \quad (2.84)$$

olarak yazılabilir.

3. SİSTEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE PERFORMANS DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ

3.1. Elektrikli Bir Isıl İşlem Fırını İçin Parametrelerin Belirlenmesi

3.1.1. Fırınının Duvar Katmanları İçin Parametrelerin Belirlenmesi

Fırının duvarının herhangi bir katmanı ısı kapasitans ve ısı direnç olmak üzere iki temel kümelenmiş parametre ile tanımlanabilir. Isıl kapasitans (C_t) malzemenin ısı depolama özelliğini modellemek için kullanılır ve aşağıdaki ifadeden bulunabilir [25].

$$C_t = C_p m \quad (3.1)$$

Burada, C_p (J/kg) malzemenin özgül ısısı, m (kg) ise duvar katmanını oluşturan malzemenin toplam kütesini göstermektedir. Katmanın toplam kütesi ise malzeme yoğunluğu ρ (kg/m³) ve katmanın toplam hacmi V (m³) cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$m = \rho V \quad (3.2)$$

Duvar katmanının ısı direnci R_t ise ;

$$R_t = L / \lambda A \quad (3.3)$$

ifadesinden bulunabilir. Burada L (m) katman kalınlığı, A (m²) yüzey alanı, λ (J/s·m·°C) ise katmanı oluşturan malzemenin ısı iletim katsayısıdır [25].

Yukarıda belirtilen iki parametrenin belirlenmesi için fırın geometrisinin yanı sıra, duvar katmanlarını oluşturan malzemelerin özelliklerine gerek vardır. Elektrikli ısı

işlem fırınlarında duvarlar fırın içinden itibaren sırasıyla refrakter, yalıtım tuğlası ve yalıtım katmanlarından meydana gelmektedir.

Refrakter malzeme olarak kullanılan şamot, alümina veya diğer malzemelerin ısı iletkenlikleri yalıtım ve izolasyon katmanlarında kullanılan malzemelere oranla çok yüksek bir değere sahiptir. Şamot malzemelerin maksimum çalışma sıcaklıkları 1300-1500°C dolayındadır. Birçok refrakter malzemede olduğu gibi oksitlerin değişik oranlarda biraraya gelmesi alumina malzemelerin temelini oluşturmaktadır. Alümina malzemeler büyük oranda Al₂O₃ ve SiO₂ (yaklaşık %95) ile Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO ve Alkali malzemelerinden meydana gelmektedir. Azami kullanım sıcaklıkları 1400-1700 °C dolayındadır [26].

Refrakter tabakasının dışında ilk yalıtım tabakası olarak, kieselguhr, ceraboard veya şamot izole gibi bir malzeme kullanılır. Kieselguhr tuğlası yüksek gözenekli bir yapıya sahip olup ısı iletim katsayısı şamot izole tuğlasının yarısı kadardır. Azami kullanım sıcaklığı 900-1000 °C dolayındadır. Bu tezde bu tabakada ceraboard kullanıldığı kabul edilmiştir. Plakalar halinde olabilen ceraboard malzeme seramik elyafın çeşitli bağlayıcılar kullanılarak sıkıştırılması ile elde edilebilen mukavemetli bir malzemedir. Maksimum kullanım sıcaklığı 1200-1400 °C arasında değişebilmektedir. Benzer özellikler gösteren şamot izole malzemenin maksimum çalışma sıcaklığı ise 1250 °C'dir [26].

Fırının en dışında perlit, cam yünü, taş yünü gibi ısı depolama özelliği ihmal edilecek kadar az, ısı direnci çok yüksek olan malzemelerin kullanıldığı bir yalıtım katmanı yer alabilir. Perlit camsı ve volkanik bir kayaç olup bünyesinde % 72-76 SiO₂, %11-13 Al₂O₃ ve % 2-5 oranında su bulunduran bir alüminyum silikattir. 850-1100 °C'lik bir alev şokuna tabii tutulduğunda bünyesindeki suyu kaybeder ve patlama sonucunda tane hacminin 10-30 misline kadar genişleyerek düşük yoğunluklu, gözenekli, hafif ve beyaz bir malzeme olan genişletilmiş perlit elde edilir [27]. Cam yünü; inorganik bir hammadde olan silis kumunun 1200-1250 °C sıcaklığında ergitilip elyaf haline getirilmesi ile elde edilmektedir. Maksimum çalışma sıcaklığı 400 °C'dir. Taş yünü; bazalt, diyabaz, dolomite gibi kayaların ergitilerek

püskürtüldükten ve bakalit ile karıştırılıp daha sonra özel işlemlerden geçirilmesi sonucu elde edilen bir mineral yün çeşitidir. Kaya yünü olarak da bilinen taş yününün maksimum çalışma sıcaklığı 750 °C'dir [26].

Yukarıda söz edilen malzemelerin ısı transferi için önemli olan fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Elektrikli ısıtım fırınlarında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri [26, 28, 29].

| | Alümina | Şamot | Ceraboard | Şamot İzole | Kieselguhr | Cam yünü | Perlit | Taş yünü |
|--------------------------------------|---------|--------|-----------|-------------|------------|----------|--------|----------|
| Maksimum çalışma sıcaklığı (°C) | 1400 | 1300 | 1200 | 1250 | 1000 | 400 | 870 | 750 |
| Yoğunluk (kg/m ³) | 272 | 2100 | 310 | 1300 | 900 | 22 | 32 | 30 |
| Özgül ısı, (J/kg.°C) | 1000 | 1130,4 | 1580 | 1130,4 | 837,36 | 837 | 837 | 837 |
| Isı iletim katsayısı, (W/m.°C) (ASM) | 3,5 | 1,425 | 0,07 | 0,616 | 0,155 | 0,04 | 0,04 | 0,035 |

3.1.2. Fırınların Dış Yüzey Isı Kayıpları

Matematiksel modelde fırının dış yüzeyinden ortama olan sıcaklık kaybının bir ısı direnç üzerinden olduğu kabul edilmiştir. Fırının dış yüzeyi ısı yalıtım dolayısıyla oldukça düşük bir sıcaklıktadır. Bu yüzden dış yüzeyden ortama olan ısı geçişi esas olarak konveksiyon yoluyla olur. A alanlı bir yüzey ile bir akışkan ortam arasında taşınım (konveksiyon) yoluyla olan ısı geçişine karşı gösterilen direnç, h film katsayısı olmak üzere denklem (3.4)'de gösterildiği gibi bulunur [25].

$$R_f=1/hA \quad (3.4)$$

Düşük sıcaklıktaki yüzeylerden radyasyonla olan ısı kaybı ise konveksiyonla olan ısı kaybına göre daha düşük olduğundan, radyasyonun payı konveksiyonun içine dahil edilerek eşdeğer bir film katsayısı tanımlanabilir. Çizelge 3.2’de $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ çevre sıcaklığı için geçerli olan doğal konveksiyon ve radyasyon toplam eşdeğer film katsayısı değerleri yüzey sıcaklığının fonksiyonu olarak verilmiştir.

Çizelge 3.2. Yüzey ortalama sıcaklığına bağlı olarak yüzeyde serbest konveksiyon ve radyasyon toplam film katsayısı

[24, 30, 31, 32].

| Yüzey ortalama sıcaklığı ($^\circ\text{C}$) | Film katsayısı ($\text{J/s}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$) |
|---|---|
| 20 | 5,813 |
| 40 | 10,666 |
| 60 | 12,266 |
| 80 | 12,762 |
| 100 | 13,52 |
| 200 | 20,56 |
| 300 | 41,7 |

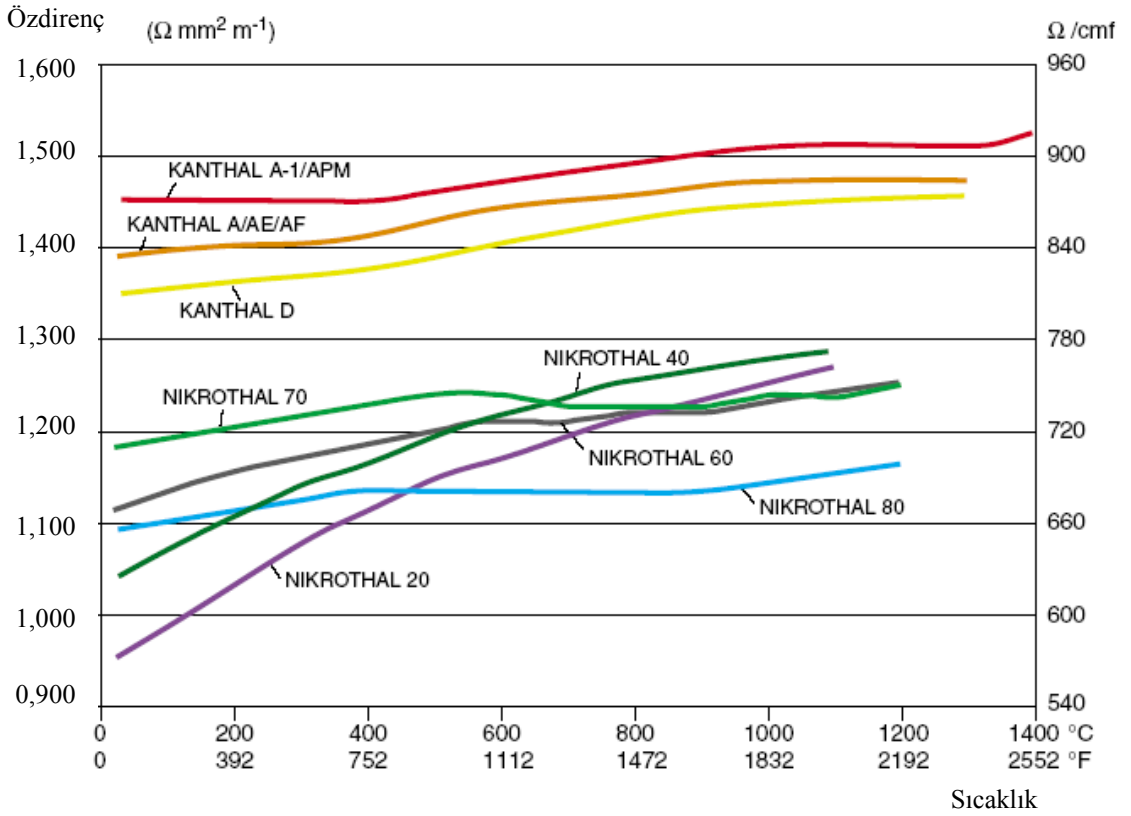
3.1.3. Malzemeye Olan Isı Aktarımı

Fırının iç yüzeyi ile malzeme arasındaki ısı aktarımı radyasyon ve konveksiyon yoluyla. Ancak yüksek sıcaklık farklarında ısı aktarımı büyük oranda radyasyon yoluyla. Radyasyon yoluyla olan ısı geçişi sıcaklığın doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Ayrıca radyasyonu alan ve veren yüzeylerin şekilleri, yüzey özellikleri ve aradaki ortamın soğurma özellikleri gibi bir çok unsurdan da etkilenir. Bu yüzden matematiksel modelde fırın iç yüzeyi ile malzeme arasında olduğu varsayılan ısıl direnç aslında çok karmaşık bir ısı transfer sürecinin fazlaca basitleştirilmiş bir modelidir. Bu direnç değerinin belirlenmesi çok zor olduğundan

bu tezde kullanılan kontrol yöntemleri ve simülasyonlar bu direncin bir kaç değeri için yürütülecektir. Böylece lineer sistemlerin analiz ve hesaplama kolaylıklarından yararlanılırken, farklı direnç değerine sahip sistemlerin ortak davranış özellikleri incelenebilecektir.

3.1.4. Direnç Teli ve Sisteme Verilen Güç İçin Parametrelerin Belirlenmesi

Bu çalışmada direnç teliyle ısıtılan elektrikli ısıtılma fırınları incelenmektedir. Isıl direnç teli FeCrAl elementlerinden meydana gelen alaşımlar (Kanthal) ve NiCr elementlerinden meydana gelen alaşımlar (Nicrothal) olmak üzere iki sınıfta toplanır.



Şekil 3.1. Değişik malzemelerden elde edilmiş direnç tellerinin öz dirençlerinin sıcaklıkla değişimi [33].

Düşük sıcaklık uygulamalarında ise CrNi ve NiFe bazlı alaşımlar tercih edilir. Nicrothal alaşımlar östenitik bazlı alaşımlar olup 1000-1200 °C arasında bir çalışma sıcaklığına sahiptirler. Nichotral tellerin ısıtılma fırınlarında kullanımları mevcut

olmakla beraber bu tip fırınlarda uzun ömürleri dolayısıyla genellikle Kanthal APM veya Kanthal A-1 türü direnç teller tercih edilir.

Kanthal türü direnç telleri ferritik alaşımlar sınıfında olup maksimum çalışma sıcaklıkları 1100-1425°C arasında değişmektedir. Kanthal elementler, Nicrothal elementlere oranla 4-5 kat daha uzun süre kullanım ömrüne sahiptirler. Al₂O₃ (Alüminyum oksit) bazlı duvar katmanlarıyla kullanımında daha iyi bağlayıcı etkiye sahip olduğu görülen Kanthal alaşımlar diğer alaşım malzemelerine oranla daha iyi bir difüzyon yüzeyi de meydana getirebilmektedirler. Yoğunlukları da diğer direnç teli alaşımlarına oranla düşük olan Kanthal alaşımların özgül dirençleri daha yüksek değerlere sahiptir (Şekil 3.1). Böylelikle daha büyük kesit alanına sahip teller kullanılabilen ve direnç telinin kullanım ömrü arttırılabilmektedir.

Kanthal alaşımlarının akma dayanımı diğer direnç teli alaşımlarına oranla daha yüksek bir değere sahip olduğundan direnç teli soğurken kesit alanında çok fazla bir plastik şekil değişimi meydana gelmemektedir. Kanthal türü alaşımlara ait fiziksel özellikler Çizelge 3.3’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.3. Kanthal türü değişik malzemelerin fiziksel özellikleri [33].

| Kanthal Alaşım Türü | APM | A-1 | A | AF | AE |
|--|------|------|------|------|------|
| Maksimum çalışma sıcaklığı, (°C) | 1425 | 1400 | 1350 | 1300 | 1300 |
| Cr (%) | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Yüzde bileşim Al (%) | 5,8 | 5,8 | 5,8 | 5,8 | 5,8 |
| Fe (%) | 72,2 | 72,2 | 72,2 | 72,2 | 72,2 |
| Yoğunluk, (kg/m ³) | 7100 | 7100 | 7150 | 7150 | 7150 |
| Özgül ısı, (J/kg·°C) | 460 | 460 | 460 | 460 | 460 |
| Isı iletim katsayısı, (W/m·°C) | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Özdirenç (Ω·mm ² ·m ⁻¹) | 1,45 | 1,45 | 1,39 | 1,39 | 1,39 |

Çizelge 3.3’de verilen özdirenç değerleri 20 °C içindir. Özdirençlerin farklı sıcaklıklardaki değerleri Çizelge 3.4’de verilen sıcaklık faktörü (K_t) ile çarpılarak edilir. Çizelge 3.4’deki sıcaklık faktörü değerleri incelendiğinde özellikle Kanthal türü direnç tellerinin özdirençlerinin sıcaklıkla çok fazla değişmediği görülmektedir.

Çizelge 3.4. Kanthal türü değişik malzemeler için sıcaklık faktörleri (K_t) [33].

| Sıcaklık (°C) | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
|---------------|----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| APM | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,01 | 1,02 | 1,02 | 1,03 | 1,03 | 1,04 | 1,04 | 1,04 |
| A-1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,01 | 1,02 | 1,02 | 1,03 | 1,03 | 1,04 | 1,04 | 1,04 |
| A | 1 | 1 | 1,01 | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,04 | 1,05 | 1,05 | 1,06 | 1,06 | 1,06 |
| AF | 1 | 1 | 1,01 | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,04 | 1,05 | 1,05 | 1,06 | 1,06 | 1,06 |
| AE | 1 | 1 | 1,01 | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,04 | 1,05 | 1,05 | 1,06 | 1,06 | 1,06 |

Isıtıcı telin direnci (R_r), Ohm (Ω) cinsinden,

$$R_r = \rho K_t L / q \quad (3.5)$$

Denklemden hesaplanabilir [33]. Bu ifadede; ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$) telin öz direncini (Çizelge 3.3) K_t sıcaklık faktörünü (Çizelge 3.4), L (m) kullanılacak telin toplam uzunluğunu, q (mm^2) ise kesit alanını ifade etmektedir. Telin kesit alanı ise tel çapı d (mm) cinsinden aşağıdaki denklemden bulunur.

$$q = \pi d^2 / 4 \quad (3.6)$$

Dirençli elektrikli fırınlara sağlanan güç genellikle direnç teline uygulanan elektrik gerilimini V (Volt) değiştirerek kontrol edilebilir. Herhangi bir anda fırına giren ısı güç $Q(t)$ (W) aşağıdaki denklemden bulunur.

$$Q(t) = V^2 / R_r \quad (3.7)$$

3.2. İncelenecek Örnek Sistemler İçin Parametre Değerleri

Tezde önerilen kontrol yöntemlerinin denemelerinde Fırın-1, Fırın-2, Fırın-3 olarak adlandırılan üç farklı sistem kullanılmıştır. Parametreler fırın dış yüzey alanı ile normalize edilmiş, yani duvar katmanlarının 1 m en ve 1 m boy boyutlarında bir ısı

geçiş alanına sahip olduğu kabul edilmiştir. Fırına sağlanan ısı güç ve fırında işlem gören malzeme miktarı da birim dış yüzey alanına karşılık gelen değerler olarak alınmıştır. Fırın-1 temel sistem olup, parametrelerin belirlenmesinde piyasadaki laboratuvar tipi kül fırınları esas alınmıştır. Bu fırında en dışta yalıtım tabakası (cam yünü vb.) bulunmamakta içeriden dışarıya doğru alumina ve ceraboard tabakalar yer almaktadır. Fırın-2’de, ceraboard katman kalınlığı, Fırın-1’deki $\frac{1}{4}$ ’ü kadar alınmıştır. Fırın-3 ise Fırın-1’in en dışına cam yününden bir yalıtım katmanının eklenmesiyle elde edilmiştir. Böylece tanımlanan örnek fırınlara kontrol yöntemleri uygulandığında yalıtımın etkisi açık bir şekilde görülebilecektir. Her üç örnek fırında da, fırın dış yüzeyindeki konveksiyon eş değer direncinin sıcaklıkla değişmediği kabul edilip sahip olabileceği en büyük direnç değeri baz alınmıştır. Fırın iç yüzeyinde meydana gelen konveksiyon/radyasyon direncinin belirlenmesi ise çok zor olduğundan, nümerik çalışmalarda geniş bir aralığı içine alan 0,01; 0,1 ve 1 ($s^{\circ}C/J$) değerleri kullanılmıştır. Böylelikle fırın içindeki konveksiyon/radyasyon direncinin farklı değerleri için uygulanan kontrol yöntemleriyle elde edilebilecek sonuçlar irdelenebilecektir. Benzer sebeplerden dolayı fırında ısı işlem görece malzemenin birim fırın alanına düşen miktarı için de 1 kg/m^2 ve 10 kg/m^2 olmak üzere 2 farklı değeri kullanılmıştır. Isıl işlem gören malzemenin eş değer kapasitans değerleri demirin özgül ısısı baz alınarak hesaplanmıştır.

Bu şekilde elde edilen üç farklı fırına ait malzeme parametreleri Çizelge 3.5’de belirtildiği gibidir. Bu değerler ve Bölüm 3.1.1’de verilen formüller yardımıyla her bir duvar katmanının eşdeğer özgül ısısı ve direnci hesaplanmıştır. Fırın-3’de yer alan cam yünü katmanının kapasitans değeri ihmal edilip, direnç değeri, ceraboard katmanının R_1 direncine eklenmiştir. Örnek fırınlara ait ısı parametreler Çizelge 3.6’da gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3.5. Örnek olarak kullanılacak fırınların malzeme parametreleri

[25, 26, 28, 29].

| ÖRNEK SİSTEM | | FIRIN-1 | FIRIN-2 | FIRIN-3 |
|---|-----------|----------------|----------------|----------------|
| Isı Geçiş Alanı Eni (m) | | 1 | 1 | 1 |
| Isı Geçiş Alanı Boyu (m) | | 1 | 1 | 1 |
| Birim Güç (W/m^2) | | 12000 | 12000 | 12000 |
| Katman Kalınlıkları (m) | | | | |
| L_1 | Ceraboard | 0,04 | 0,01 | 0,04 |
| L_2 | Alumina | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| L_3 | Alumina | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| L_4 | Alumina | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| L_5 | Alumina | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| L_6 | Alumina | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| L_{fg} | Cam yünü | yok | yok | 0,06 |
| Isı İletkenlik Katsayıları ($J/s \cdot m \cdot ^\circ C$) | | | | |
| λ_1 | Ceraboard | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| λ_2 | Alumina | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| λ_3 | Alumina | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| λ_4 | Alumina | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| λ_5 | Alumina | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| λ_6 | Alumina | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| λ_{fg} | Cam yünü | yok | yok | 0,04 |
| Özgül Isı ($J/kg \cdot ^\circ C$) | | | | |
| C_{P1} | Ceraboard | 1580 | 1580 | 1580 |
| C_{P2} | Alumina | 1000 | 1000 | 1000 |
| C_{P3} | Alumina | 1000 | 1000 | 1000 |
| C_{P4} | Alumina | 1000 | 1000 | 1000 |
| C_{P5} | Alumina | 1000 | 1000 | 1000 |
| C_{P6} | Alumina | 1000 | 1000 | 1000 |
| Yoğunluk (kg/m^3) | | | | |
| ρ_1 | Ceraboard | 300 | 300 | 300 |
| ρ_2 | Alumina | 272 | 272 | 272 |
| ρ_3 | Alumina | 272 | 272 | 272 |
| ρ_4 | Alumina | 272 | 272 | 272 |
| ρ_5 | Alumina | 272 | 272 | 272 |
| ρ_6 | Alumina | 272 | 272 | 272 |

Çizelge 3.6. Örnek olarak kullanılacak fırınların ısı parametreleri

[30, 31, 32, 25, 28].

| ÖRNEK SİSTEM | | FIRIN-1 | FIRIN-2 | FIRIN-3 |
|---|----------------------|-------------|-------------|-----------|
| Isı alanı En (m) | | 1 | 1 | 1 |
| Isı alanı Boy (m) | | 1 | 1 | 1 |
| Birim Güç (W/m ²) | | 12000 | 12000 | 12000 |
| Katman Eşdeğer Dirençleri (s^oC/J) | | | | |
| R_1 | Ceraboard | 0,285714286 | 0,071428571 | 0,2857142 |
| R_2 | Ceraboard | 0,285714286 | 0,071428571 | 0,2857142 |
| R_3 | Alumina | 0,007142857 | 0,007142857 | 0,0071428 |
| R_4 | Alumina | 0,007142857 | 0,007142857 | 0,0071428 |
| R_5 | Alumina | 0,007142857 | 0,007142857 | 0,0071428 |
| R_6 | Alumina | 0,007142857 | 0,007142857 | 0,0071428 |
| R_7 | Alumina | 0,001428571 | 0,001428571 | 0,0014285 |
| R_8 | Alumina | 0,001428571 | 0,001428571 | 0,0014285 |
| R_9 | Alumina | 0,001428571 | 0,001428571 | 0,0014285 |
| R_{10} | Alumina | 0,001428571 | 0,001428571 | 0,0014285 |
| R_{11} | Alumina | 0,001428571 | 0,001428571 | 0,0014285 |
| R_{12} | Alumina | 0,001428571 | 0,001428571 | 0,0014285 |
| R_{fg} | Cam yünü | yok | yok | 1,5 |
| R_0 | R_1+R_{fg} | yok | yok | 1,7857142 |
| Konveksiyon/Radyasyon Eşdeğer Dirençleri (s^oC/J) | | | | |
| R_{13} | Fırın İçi | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| R_{13} | Fırın İçi | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| R_{13} | Fırın İçi | 1 | 1 | 1 |
| R_{14} | Fırın Dışı | 0,172 | 0,172 | 0,172 |
| Katman Eşdeğer Kapasitansları (J/°C) | | | | |
| C_1 | Ceraboard | 18960 | 4740 | 18960 |
| C_2 | Alumina | 13600 | 13600 | 13600 |
| C_3 | Alumina | 13600 | 13600 | 13600 |
| C_4 | Alumina | 2720 | 2720 | 2720 |
| C_5 | Alumina | 2720 | 2720 | 2720 |
| C_6 | Alumina | 2720 | 2720 | 2720 |
| Malzeme Kapasitansı (J/°C) | | | | |
| C_7 | 1 kg/m ² | 440 | 440 | 440 |
| C_7 | 10 kg/m ² | 4400 | 4400 | 4400 |

Örnek olarak kullanılacak olan 3 ısıtım fırını için de ısıtım kaynaktan sisteme sağlanacak olan gücün Kanthal APM türü direnç teliyle aktarıldığı kabul edilmiştir. Seçilen direnç teline ait parametreler Bölüm 3.1.1.2’de ifade edilen denklemlerle hesaplanmış Çizelge 3.7’ de sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Örnek olarak kullanılacak olan fırınların direnç tellerine ait parametreler [33].

| Telin cinsi | Kanthal APM |
|---|-------------|
| Özdirenç ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$) | 1,45 |
| Sıcaklık faktörü (K_t) | 1 |
| Çap (mm) | 4 |
| Kesit alanı (mm^2) | 12,6 |
| Toplam uzunluk (m) | 35 |
| Toplam direnç (Ω) | 4,034 |

Çizelgedeki direnç değerleri kullanılır ve sisteme sağlanacak maksimum voltaj değerinin 220 V olduğu kabul edilirse, sisteme sağlanan maksimum güç değeri denklemin (3.7)’den 12 kW olarak bulunur.

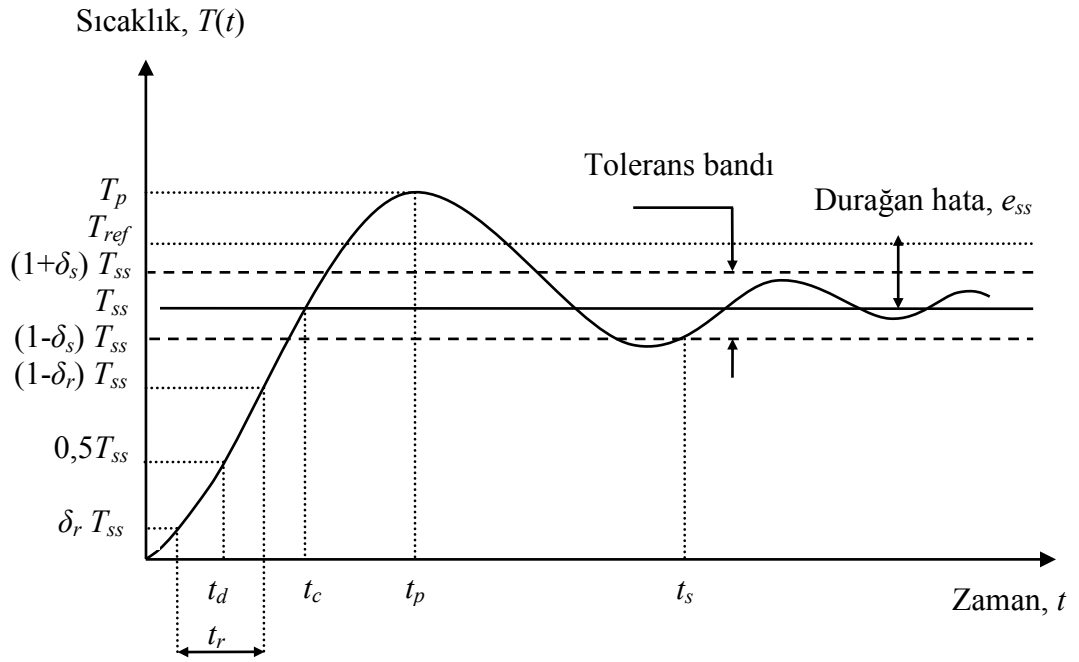
3.3. Değerlendirme Kriterleri

Bu tezde incelenen farklı kontrol yöntemlerinin değerlendirilmesinde ve birbirleriyle karşılaştırılmasında test girişi olarak basamak referans girişi kullanılacaktır. Değerlendirmelerde iki temel husus dikkate alınacaktır. Bunlardan biri kontrol doğruluğu, diğeri ise sistemin dinamik davranış özellikleridir.

Sistemin durağan cevabının istenen referans değerinden ne kadar farklı olduğu, yani sistemin cevabının durağan hatası kontrol doğruluğunun bir ölçütüdür. Sistemin geçici zaman cevabının özellikleri ise dinamik davranışını değerlendirmek amacıyla kullanılır. Dinamik davranış değerlendirilirken sistemin cevap hızı ve göreceli kararlılığı dikkate alınır. Bu amaçla kullanılan performans parametreleri ya cevap hızının ya da göreceli kararlılığın ölçütü olacak biçimde tanımlanır.

Basamak giriş uygulanan ve aç-kapa dışında bir kontrol işlemi kullanılan bir sistemin geçici zaman cevap davranışını değerlendirmek için kullanılan parametreler aşağıda verilmiş, Şekil 3.2 üzerinde de gösterilmiştir.

- i. Gecikme zamanı (t_d)
- ii. Yükselme zamanı (t_r)
- iii. Geçit zamanı (t_c)
- iv. Tepe zamanı (t_p)
- v. Yüzde aşma ($P.O$)
- vi. Yerleşme zamanı (t_s)



Şekil 3.2. Aç-kapa dışında bir kontrol yöntemi kullanan bir sistem için geçici zaman cevabı parametreleri.

Gecikme zamanı (t_d), cevabın ulaşması gereken en son değerin yarısına ulaştığı ilk zamandır. Sistem cevap hızının bir ölçütüdür. Bu süre ne kadar kısa ise sistem cevabı o kadar hızlı olur.

Yükselme zamanını bulmak için bir δ_r değeri belirlenir. δ_r değeri %0, %5 veya % 10 olarak alınır. Eğer cevabın son değeri T_{ss} ise, yükselme zamanı cevabın $\delta_r T_{ss}$ değerine ulaştığı zaman ile $(1 - \delta_r) T_{ss}$ değerine ulaştığı zaman arasındaki fark olarak tanımlanır. Yükselme zamanı da cevap hızının ölçütüdür. Yükselme zamanı ne kadar kısa ise, sistem cevabı o kadar hızlıdır.

Cevabın son değerine ulaştığı ilk zaman geçit zamanı (t_c) olarak tanımlanır. Sistem cevap hızının bir ölçütüdür. Bu süre ne kadar kısalsa sistem cevabı o kadar hızlıdır.

Diğer bir parametre tepe zamanı (t_p)'dir. Cevabın son değerini aşarak ilk tepeye ulaştığı zaman olarak tanımlanır. Bu parametre de sistem cevap hızının bir ölçüsüdür. Tepe zamanı ne kadar kısa ise sistem cevabı o kadar hızlı olur.

Yüzde aşma ($P.O.$) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$P.O. = \frac{T(t_p) - T_{ss}}{T_{ss}} \times 100 \quad (3.1)$$

Yüzde aşma göreceli kararlılığın bir ölçütü olup, değeri büyüdükçe sistem daha salınımlı hale gelir. Yüzde aşma azaldıkça sistemin göreceli kararlılığı artar.

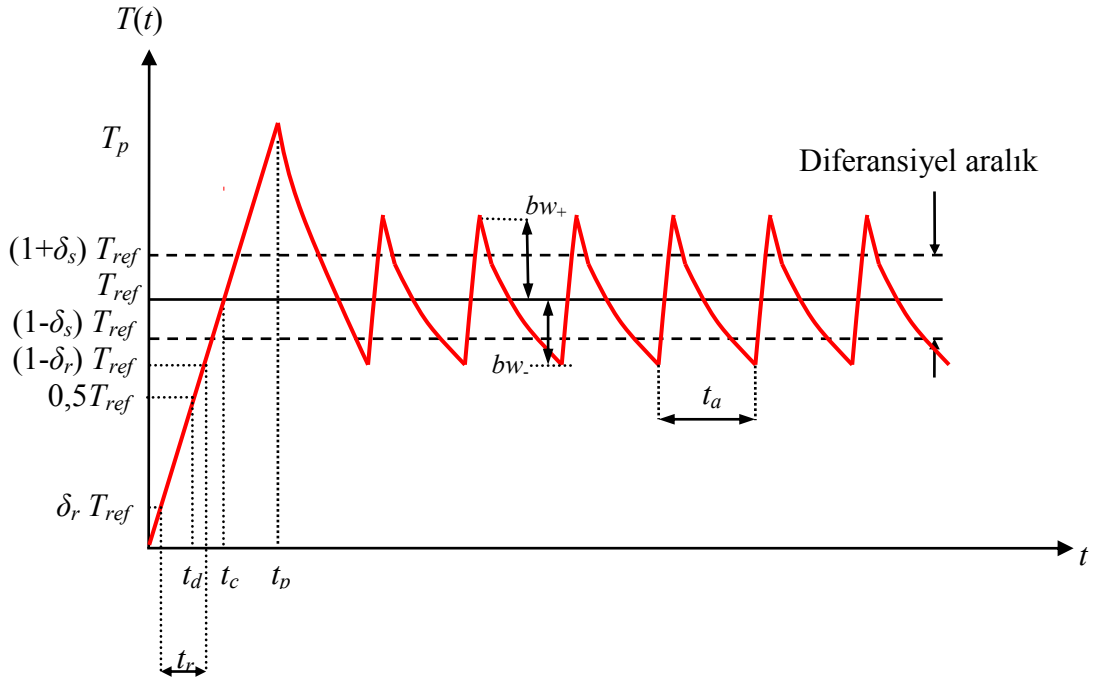
Yerleşme zamanı (t_s) sistem cevap eğrisinin son değer etrafında tanımlanan bir tolerans bandına girdiği ve ondan sonra bant içinde kaldığı zamandır. Tolerans bandı; son değer etrafında $\pm \delta_s T_{ss}$ aralığı olarak tanımlanır. δ_s 'in değeri %2 ya da %5 olarak seçilir. Yerleşme zamanı sistemin göreceli kararlılığının bir ölçütüdür. Yerleşme zamanı kısaldıkça göreceli kararlılık artar.

Tezin bundan sonraki bölümlerinde incelenecek olan, aç-kapa dışındaki kontrol yöntemlerinin değerlendirmelerinde yukarıda belirtilen performans parametrelerinden yararlanılacaktır ve elde edilecek sonuçlar Çizelge 3.8'de yer alan tabloya benzer bir değerlendirme kartı ile sunulacaktır.

Çizelge 3.8. Aç-kapa dışında kontrol işlemi kullanan sistemler için performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1, 2 veya 3 | | |
|---|----------|-------|
| Parametre | Birim | Değer |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | |
| Simulasyon Süresi | (s) | |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | |
| Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | |

Aç-kapa kontrolü kullanan sistemlerin değerlendirilmelerinde ise bu sistemlerin zaman cevaplarının özellik arz etmesi dolayısıyla bazı özel performans parametreleri tanımlanmıştır. Bu tür bir sistemin tipik bir zaman cevabı Şekil 3.3’de verilmiş ve dinamik davranışını tanımlayan parametreler şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Aç-kapa kontrol yöntemi kullanan bir sistem için geçici zaman cevabı parametreleri.

Bu parametreler arasında yer alan gecikme zamanı (t_d), yükselme zamanı (t_r), geçit zamanı (t_c), ve tepe zamanı (t_p) daha önceki gibi tanımlanmıştır. Tanımlanan yeni parametreler ise durağan salınımlar başladıktan sonra referans sıcaklıktan + ve - yönlerde olan sapmalar (bw_+ , bw_-) ile anahtarlama periyodu (t_a)'dır.

İncelenecek olan aç-kapa kontrol yönteminin değerlendirmesinde Şekil 3.3 üzerinde belirtilen performans parametrelerinden yararlanılacak ve sonuçlar Çizelge 3.9'da yer alan tabloya benzer bir değerlendirme kartı ile sunulacaktır.

Çizelge 3.9. Aç-kapa kontrol işlemi kullanan sistemler için performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1, 2 veya 3 | | |
|--|----------|-------|
| Parametre | Birim | Değer |
| Diferansiyel Aralık, bw | (°C) | |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | |
| Simulasyon Süresi | (s) | |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, bw_+ | (°C) | |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, bw_- | (°C) | |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | |

4. AÇ-KAPA KONTROLCÜ KULLANARAK ELEKTRİKLİ ISIL İŞLEM FIRINLARINDA MALZEME SICAKLIĞININ KONTROLÜ

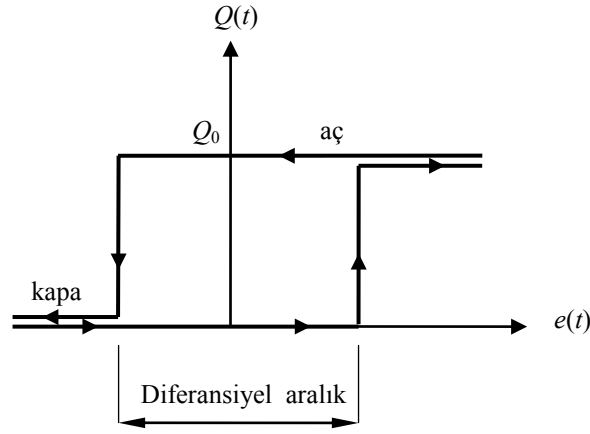
4.1. Aç-Kapa Tipi Denetim Organı İle Elektrikli Isıl İşlem Fırınlarında Malzeme Sıcaklığının Kontrolü

Aç-kapa tipi denetim organları basit bir yapıda ve ucuz olduklarından kullanımları yaygındır. Bu tip denetim organları sadece iki belirli konumda çalışan sistemlerdir [34, 35]. Denetlenen çıkış büyüklüğü değeri, ayar değerini (referans girişi) belli bir miktar aştığında denetim organı sıfır kumanda konumunda (kapama), buna karşılık çıkış büyüklüğü değeri ayar değerinin belli bir miktar altına düştüğünde ise denetim organı maksimum kumanda (açma) konumunda çalışır. Denetim organı böylece açma ve kapama işlemleriyle çıkış değişkenini ayar noktası etrafında tanımlanan bir bölgede tutmaya çalışır. Bu bölgeye diferansiyel aralık ya da kontrol aralığı denir. Diferansiyel aralık ne kadar geniş tutulursa kontrol doğruluğu da o kadar az olur. Diferansiyel aralık daraldıkça kontrol doğruluğu artar; buna karşılık açma-kapama periyodu kısalır. Açma-kapama işleminin bir kontaktör ile yapıldığı sistemlerde açma-kapama periyodunun kısalması kontaktör ömrünün de kısalması demektir. Bunun için diferansiyel aralık değerinin sistemden beklenen kontrol doğruluğu ve kontaktör ömrüne bağlı olarak belli bir optimum değerde tutulması gerekir.

Şekil 4.1'de elektrikli bir ısıl işlem fırınına uygulanan aç-kapa tipi bir denetim organının çalışma prensibi, Şekil 4.2'de ise aç-kapa tipi kontrolcüyle kontrol edilen sistemin blok diyagramı görülmektedir. Şekillerde, güç kaynağından sisteme sağlanan güç, $Q(t)$ olarak; hata sinyali ise $e(t)$ ($e(t) = T_{ref} - T_7$) olarak ifade edilmektedir. Kontrolcünün çalışma prensibi aşağıda özetlendiği gibidir;

- i. Eğer sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığı T_7 'nin değeri, diferansiyel aralığı tanımlayan alt sınır değere eşit veya bu değerden daha küçük ise aç-kapa kontrolcü açık konuma geçer sisteme $Q_0(t)$ kadar ısıl güç sağlar.
- ii. Malzeme sıcaklığının değeri diferansiyel aralığa girerek, diferansiyel aralığın üst sınır değerine ulaşıncaya kadar kontrolcü açık konumda çalışır.

- iii. Eğer malzeme sıcaklığı, diferansiyel aralığın üst sınır değerine eşit veya daha büyükse sistem kapalı kumanda konumuna geçer ve sisteme güç sağlanmaz.
- iv. Malzeme sıcaklığı, diferansiyel aralığa tekrar girip diferansiyel aralığın alt sınır değerine ulaşincaya kadar aç-kapa kontrolcü kapalı konumda çalışır.

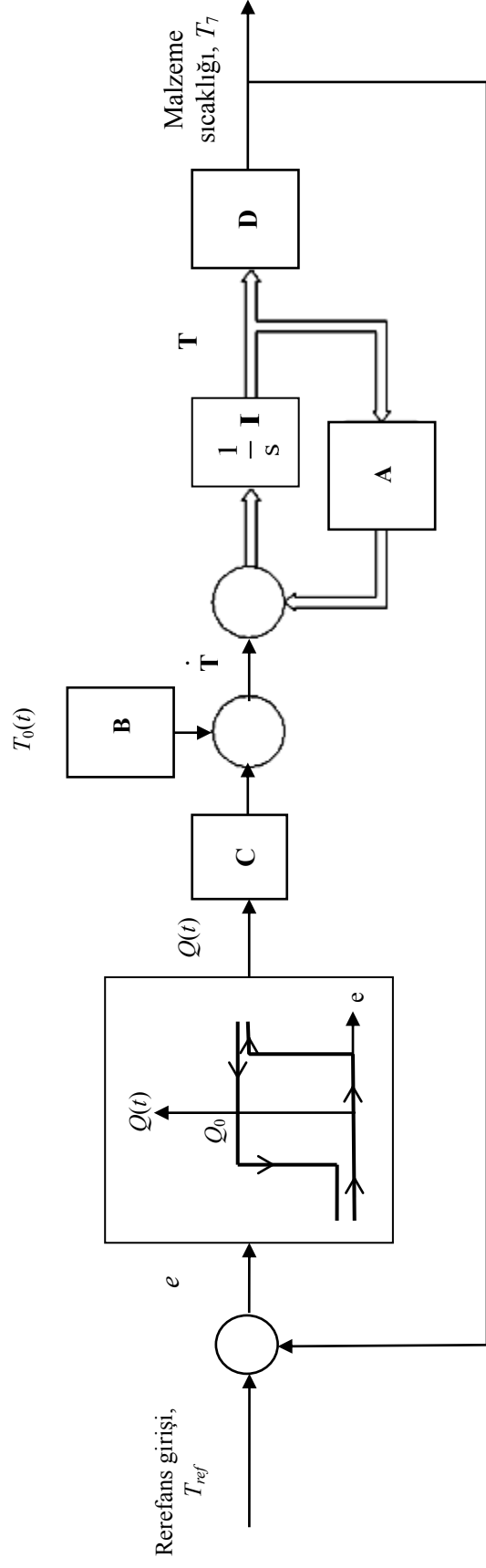


Şekil 4.1. İki konumlu denetim sistemi.

4.2. Örnek Fırınlarda Malzeme Sıcaklığının Aç-Kapa Kontrolcü İle Kontrolü

Daha önce Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 olarak tanımlanan örnek fırınlarda malzeme sıcaklığı aç-kapa tipi kontrolcüyle kontrol edildiğinde, sistemin sergileyeceği dinamik davranışı incelemek için MATLAB ortamında bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu program ısıtıcı devrede iken ve devre dışında iken gerekli olan diferansiyel denklemleri (Bölüm 2) Runge Kutta yöntemi kullanan ODE 45 çözücü ile çözmekte, daha sonra sistemin performans parametrelerini (Bölüm 3) hesaplamaktadır.

Bütün simülasyonlarda malzeme kütlesi 10 kg, malzemenin ulaşması istenen referans sıcaklık derecesi (T_{ref}) 300 °C olarak alınmıştır. Fırın iç duvarı ve malzeme arasındaki ısı geçişini modelleyen R_{13} direnci için üç farklı değer (0,01; 0,1; 1,0); diferansiyel aralık olarak ± 1 °C ($bw = 1$) ile ± 10 °C ($bw = 10$) arasında 10 farklı değer kullanılmıştır. Böylece diferansiyel aralık ve R_{13} değerlerinin değiştirilmesiyle



Not: Çift çizgiyle gösterilen kollar, değişken vektörlerini göstermektedir.

Şekil 4.2. Açık-kapalı kontrolcü ile kontrol edilen sistemin blok diyagramı.

her bir örnek fırının 30 farklı durumu incelenmiştir. Ancak incelenen durum sayısı çok fazla olduğu için, sonuçları özetleyen performans değerlendirme kartları diferansiyel aralığın sadece 3 değeri için ($bw = 1, 5$ ve 10) verilecektir.

4.2.1. Fırın-1'de Malzeme Sıcaklığının Açık-Kapalı Kontrolü

Çizelgeler 4.1-4.3'de verilen performans kartlarında Fırın-1 için $R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 olduğu durumlarda $bw = 1, 5$ ve 10 değerlerinde iken sistem geçici zaman cevaplarını tanımlayan performans parametreleri görülmektedir. $R_{13} = 0,1$ ve $bw = 1$ durumu için elde edilen cevap eğrileri örnek olarak Şekiller 4.3-4.12'de verilmiştir.

$R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 olduğu durumlarda $bw = 1, 5$ ve 10 değerlerinde iken sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığı T_7 'e ait cevap eğrileri Şekiller 4.12-4.20' de, diferansiyel aralığın değişik değerleri için elde edilen anahtarlama periyotları Çizelge 4.4 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.

Çizelgeler ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

Fırın iç duvarıyla malzeme arasındaki ısı direnç olan R_{13} 'ün her hangi bir değeri için tolerans bandı genişliği (bw) değerinin değiştirilmesi, sistem cevap hızını etkilememektedir. Çünkü bu aşamada sisteme sürekli olarak 12 kW güç verilmektedir. Bu yüzden t_r, t_d ve t_c değerleri bw değerinin değişiminden etkilenmemektedir. Buna karşılık R_{13} 'ün herhangi bir değerinde tolerans bandı genişliği bw 'nin değeri arttırıldıkça, tepe sıcaklığı ve tepe zamanı değerleri de artmaktadır. Bant genişliği bw sabitken R_{13} değerinin arttırılması fırında işlem gören malzemeye olan ısı akışını zorlaştırdığından sistem cevabının yavaşlamasına yol açmaktadır. R_{13} değeri arttıkça yükselme, geçit, gecikme ve tepe zamanları da artmaktadır.

İncelenen bütün cevaplarda tepe sıcaklığı, tolerans bandının üst sınır değerinin üzerine çıkmaktadır. R_{13} 'ün değeri arttıkça aşma yükseklikleri artmaktadır. Zira, R_{13} 'ün değeri arttıkça malzemeye olan ısı akışı zorlaşmakta ve dolayısıyla sistem güç

Çizelge 4.1. Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-1 için $R_{13} = 0,01$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, bw | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 355,0 | 355,0 | 355,0 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 682,2 | 682,2 | 682,2 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 833,7 | 833,7 | 833,7 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 871,5 | 887,2 | 902,5 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 306,4 | 310,7 | 315,6 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 2,1 | 3,6 | 5,2 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | 309,6 | 317,1 | 322,1 |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | 34788,0 | 29081,0 | 38955,0 |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | 804,0 | 2543,0 | 1709,0 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, bw_+ | (°C) | 7,96 | 11,38 | 12,08 |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, bw_- | (°C) | 0,03 | 0,05 | 0,04 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 13150 | 13158 | 13100 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 328,7 | 328,9 | 327,5 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 337,7 | 336,2 | 335,9 |

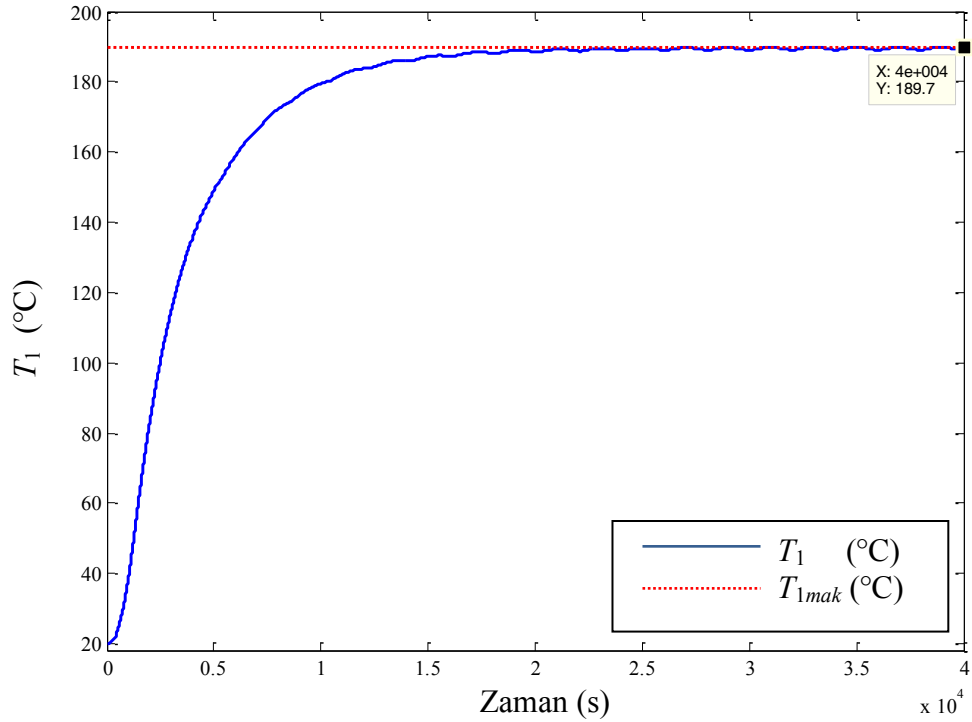
Çizelge 4.2. Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-1 için $R_{13} = 0,1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, bw | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 1176 | 1176 | 1176 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1920,0 | 1928,0 | 1939,9 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 349,6 | 353,9 | 358,6 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 16,5 | 18 | 19,5 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | 1969,0 | 4161,0 | 6033,0 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, bw_+ | (°C) | 9,36 | 19,42 | 26,16 |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, bw_- | (°C) | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 13415 | 13663 | 13811 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 335,4 | 341,6 | 345,3 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 345,1 | 348,4 | 347,1 |

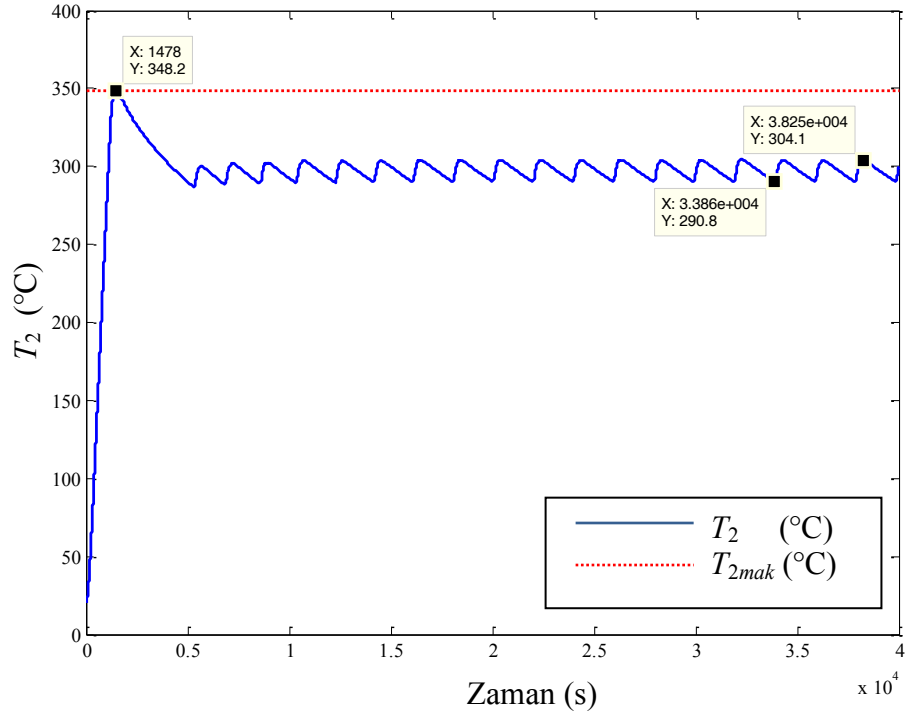
Çizelge 4.3. . Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-1 için $R_{13} = 1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|---|---|---|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, bw | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 1 | 1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 1855,3 | 1855,3 | 1855,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 2360,9 | 2360,9 | 2360,9 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 2969,2 | 2969,2 | 2969,2 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 10059,0 | 10081,0 | 10100,0 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 610,7 | 616,2 | 622,4 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 103,4 | 105,4 | 107,5 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | >40000 | >40000 | >40000 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, bw_+ | (°C) | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, bw_- | (°C) | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | 32219 | 32315 | 32187 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 805,5 | 807,9 | 804,7 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 436,9 | 441,1 | 445,8 |

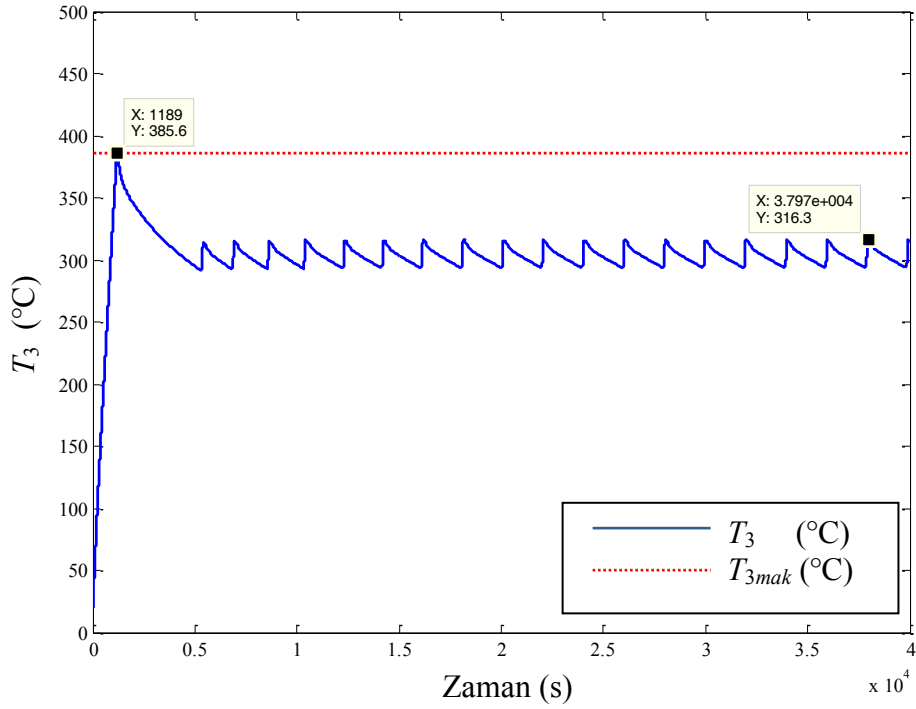
kaynağını daha uzun süre açık konumda tutarak, malzemenin sıcaklığının referans giriş değerindeki sıcaklığa ulaşmasına çalışmaktadır. Bunun sonucu olarak duvar katmanlarının sıcaklıkları da sürekli artmakta; malzemenin sıcaklığı tolerans bandının üst sınır değerine ulaştıktan sonra ısı kaynak kapalı konuma gelse bile, yüksek sıcaklığa erişmiş olan duvar katmanlarından malzemeye olan ısı akışı devam etmekte ve malzeme sıcaklığının tolerans bandı üst sınır değerini aşmasına sebep olmaktadır. Şekiller 4.3-4.8’de Fırın-1’in duvar katmanlarının ($T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$), Şekil 4.9’da rezistans telinin (T_{11}) ve Şekil 4.12’de ısı işlem gören malzemenin (T_7) sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekiller incelendiğinde, ısı kaynaktan fırına ısı aktarımını sağlayan ısıtıcı telin ısı davranışı ile ısı kaynaktan fırın içine doğru sıralanan iç refrakter-1, 2 ve 3 katmanlarının ısı davranışı benzer özellikler göstermektedir. Malzemenin sıcaklığı tolerans bandının üst sınır değerine eriştikten sonra ısı kaynak kapalı konuma geldiğinde ısıtıcı telin sıcaklığı (T_{11}), 360 °C civarında seyrederken, iç refrakter-1, 2 ve 3 katmanlarının sıcaklıkları sırayla 353 °C, 343 °C, 340 °C değerlerine erişmektedir.



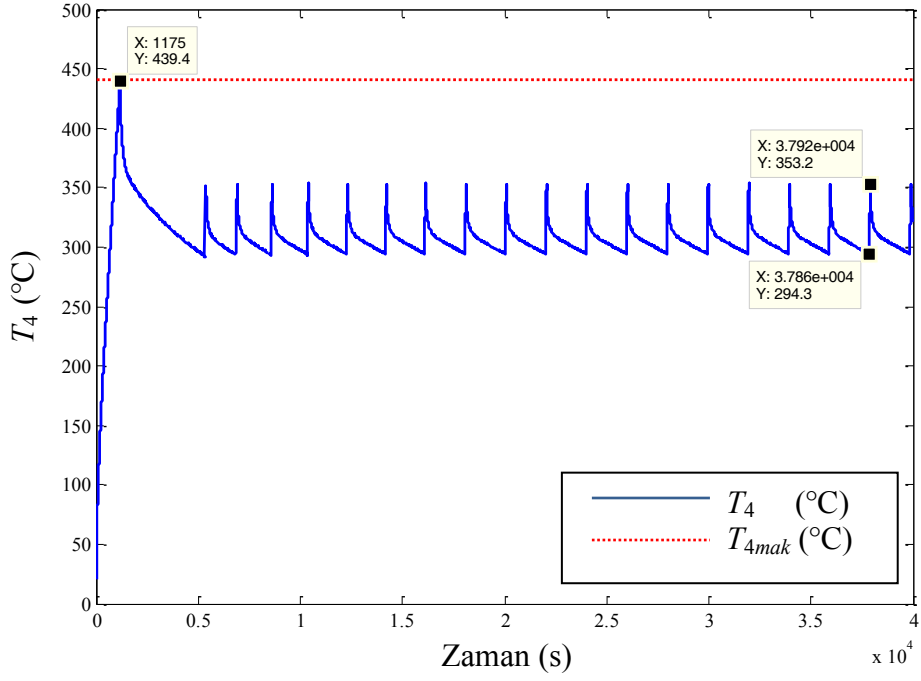
Şekil 4.3. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



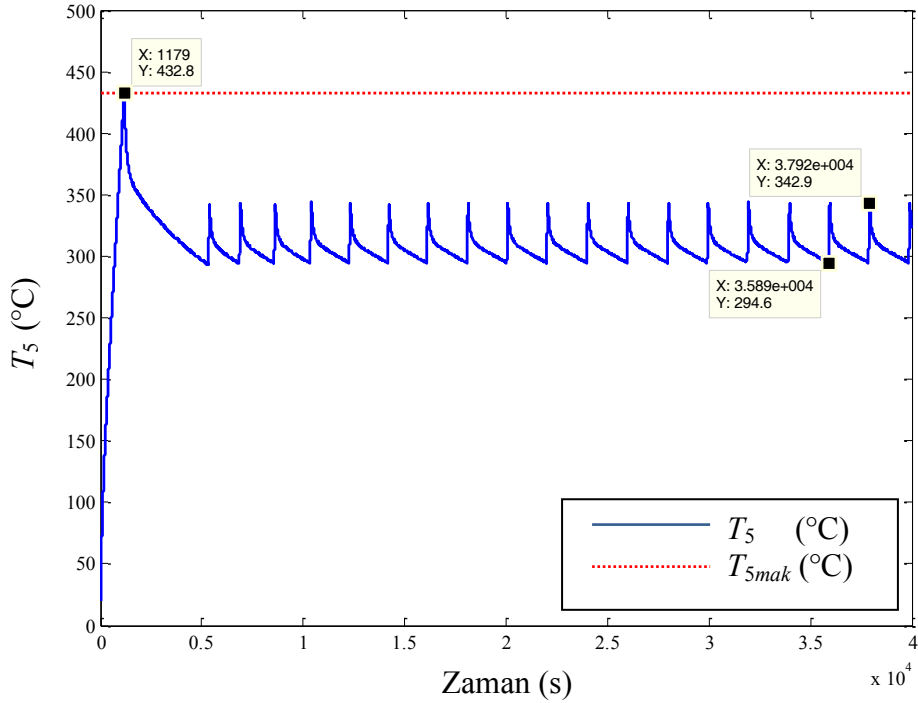
Şekil 4.4. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



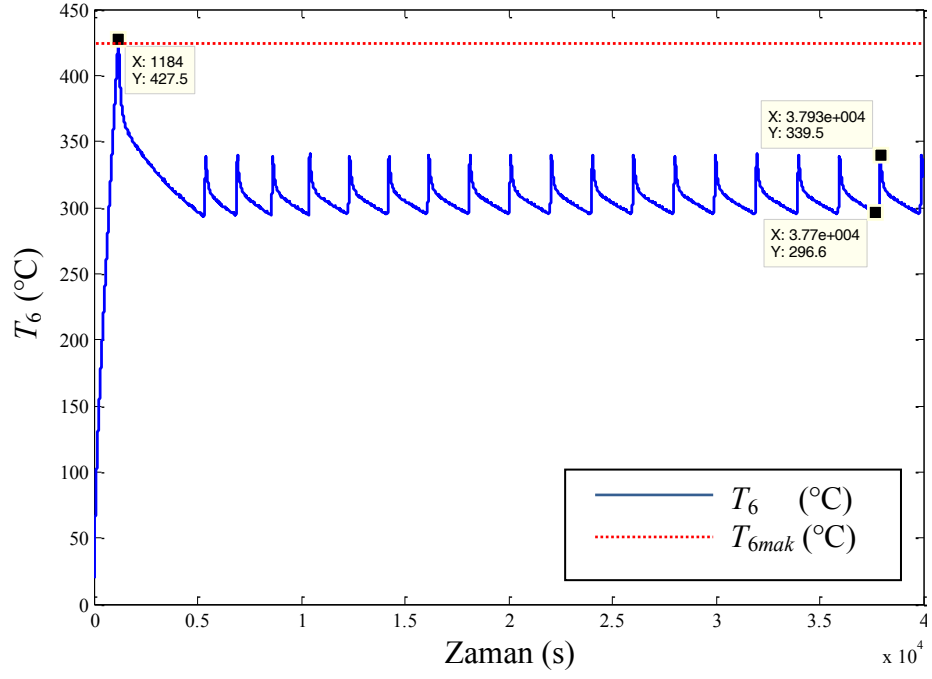
Şekil 4.5. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



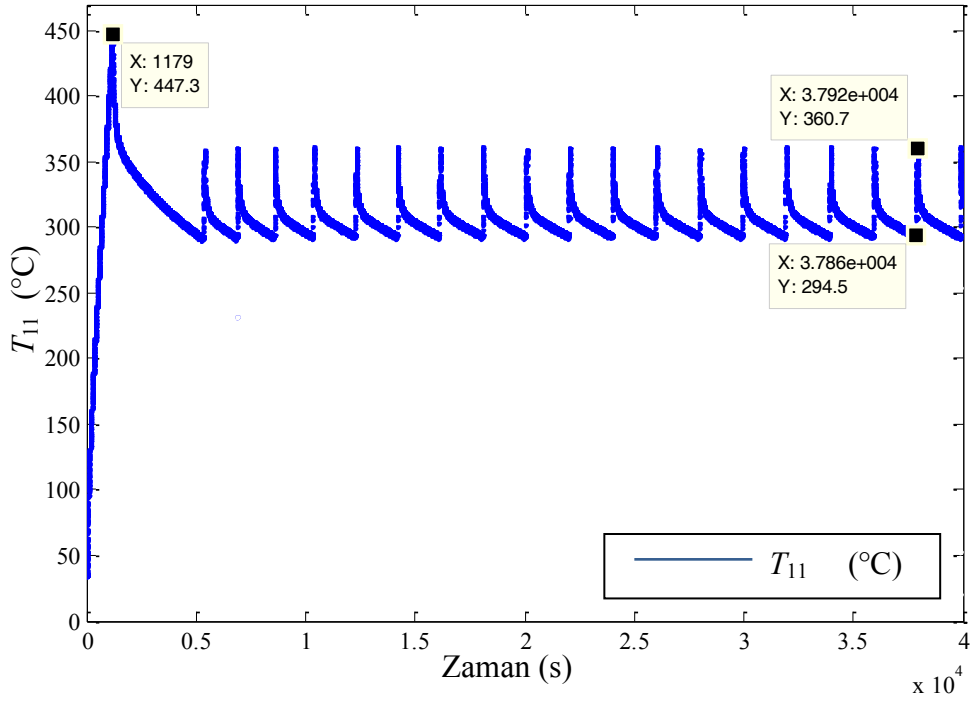
Şekil 4.6. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



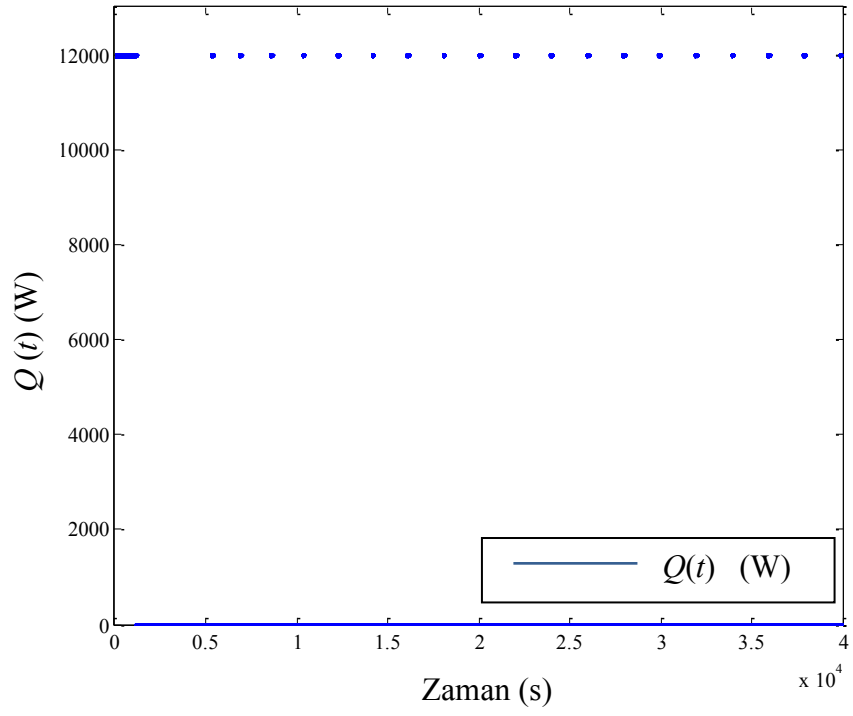
Şekil 4.7. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



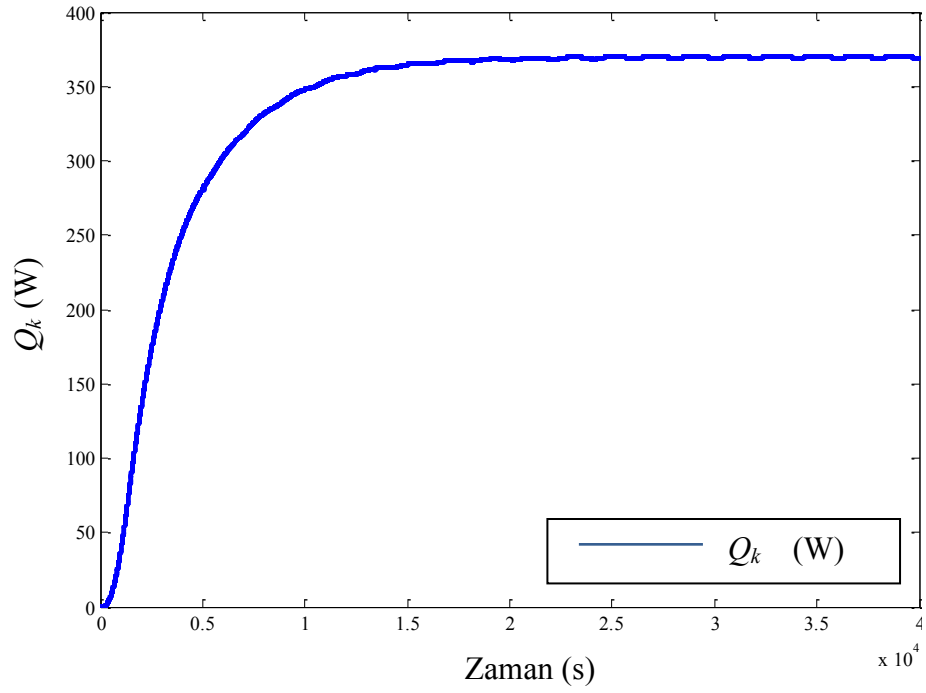
Şekil 4.8. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



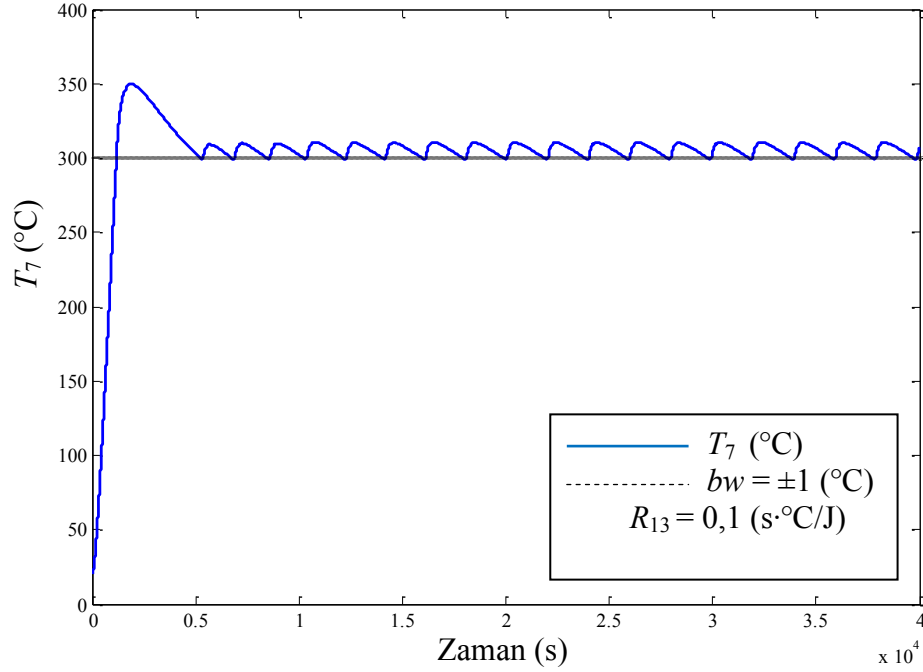
Şekil 4.9. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında Fırın-1'in rezistans telindeki sıcaklık değişimi.



Şekil 4.10. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında ısı kaynaktan fırına olan ısı akışı.



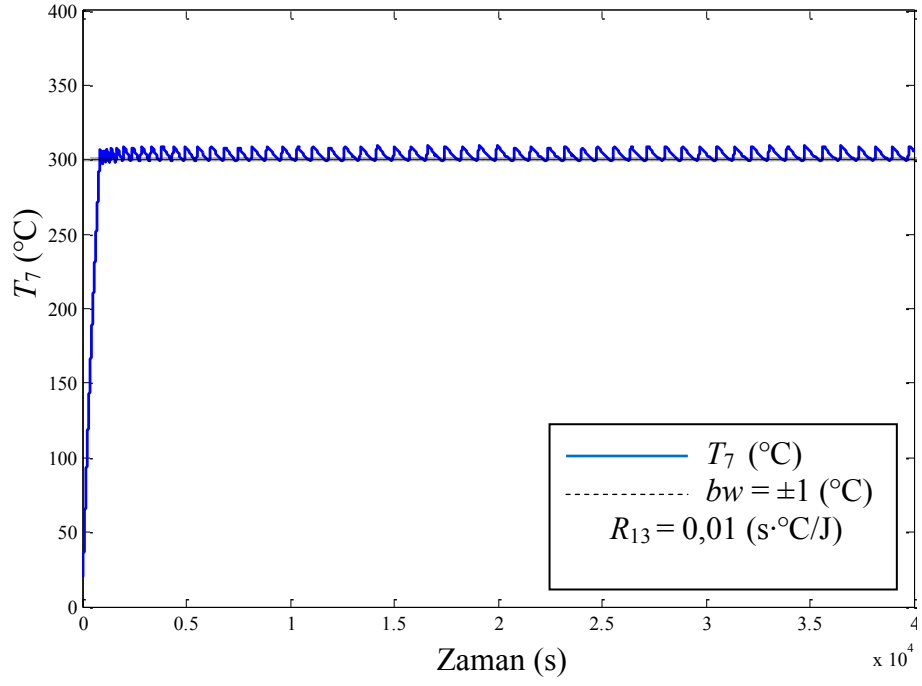
Şekil 4.11. Malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü sırasında dışarıya olan enerji kayıplarının güç cinsinden ifadesi.



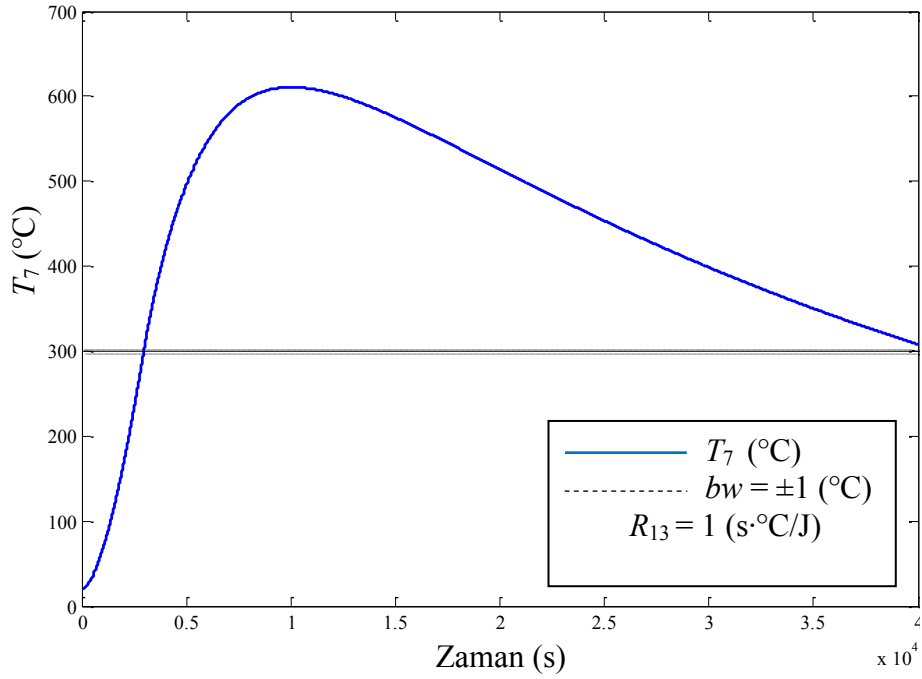
Şekil 4.12. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.

Dolayısıyla ısı kaynak kapalı konuma geldikten sonra da malzemeye ısı akışı devam etmekte ve malzeme sıcaklığı tolerans bandı üst sınır değerini aşmaktadır. İlk tepeden sonraki zamanlarda görülen malzeme sıcaklıkları, $R_{13} = 0,1$ durumunda ve bütün bw değerleri için tepe sıcaklığının altında kalmaktadır (Şekiller 4.12, 4.15, 4.18). $R_{13} = 0,01$ durumunda ise tüm bw değerleri için ilk tepeden sonraki zamanlarda ilk tepe sıcaklığının üzerinde sıcaklıklar görülmektedir (Şekiller 4.13, 4.16, 4.19). Bunun sebebi, $R_{13} = 0,01$ durumunda malzemeye olan ısı akışının $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumlarına göre daha kolay olmasıdır. $R_{13} = 1$ durumunda ise simulasyon süresince ilk tepeden sonraki zamanlarda ısı kaynak açık konuma geçemediğinden ikinci bir tepe elde edilememektedir.

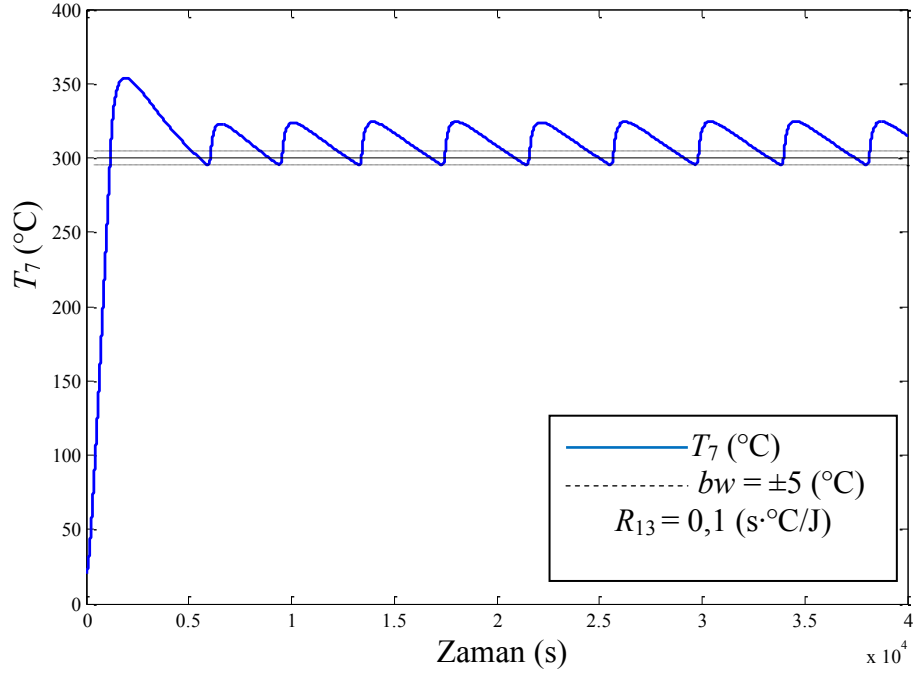
$R_{13} = 0,01$ ve $0,1$ durumları için sistem bir süre sonra düzenli rejime girmeye çalışmakta fakat malzeme sıcaklığı diferansiyel aralıkta kalamamaktadır. Referans girişinden fark şeklinde tanımlanan bw_+ ve bw_- değerleri bw değeri arttıkça artmakta ve bw_+ değerlerinin bw_- değerlerine göre daha büyük olduğu gözlemlenmektedir (Çizelge 4.4). Bu durum, diferansiyel aralığın alt sınırındaki değere yakın bir değerde



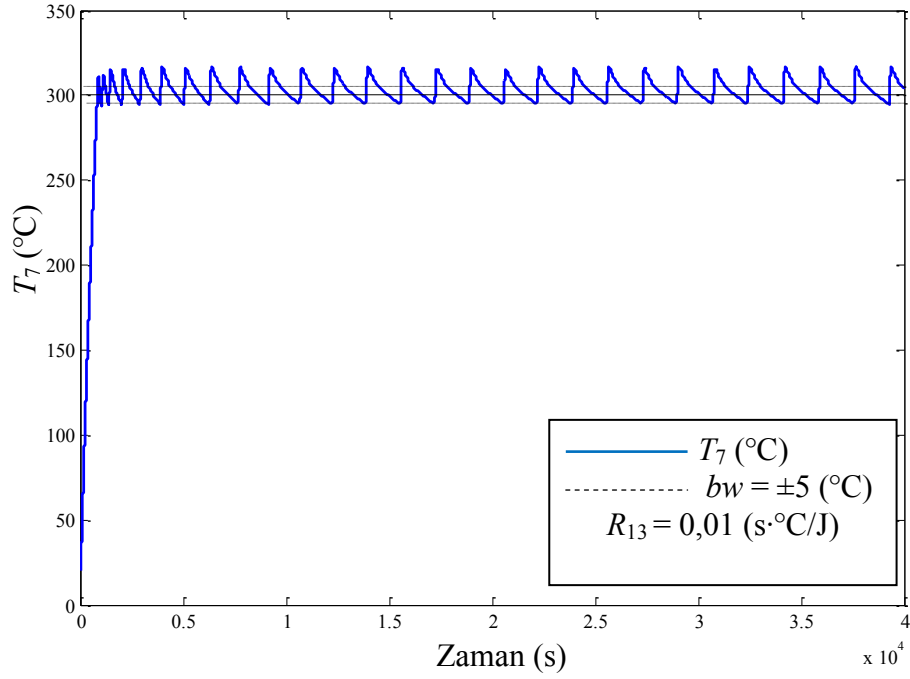
Şekil 4.13. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



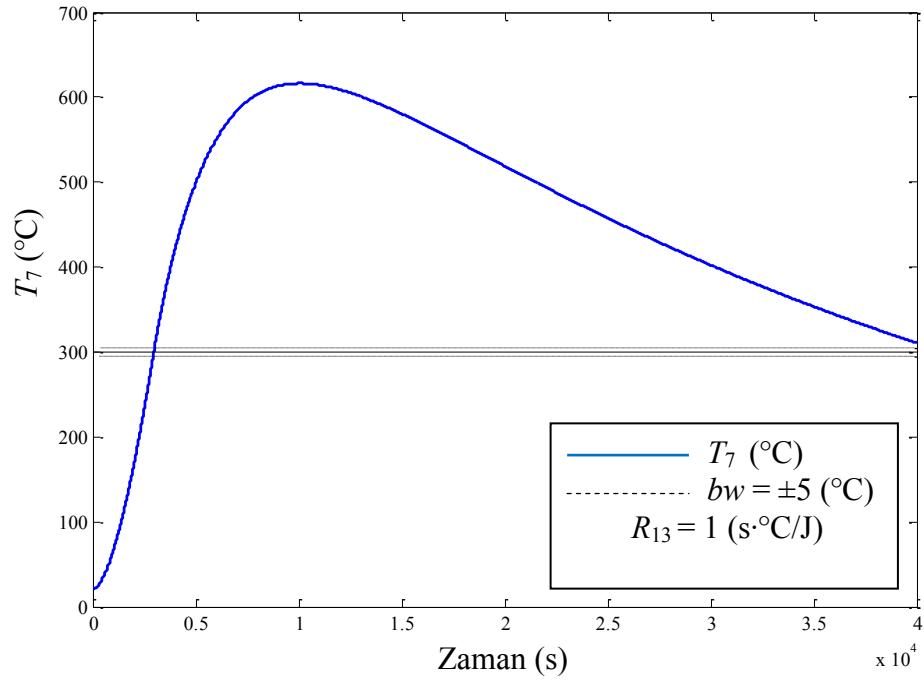
Şekil 4.14. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



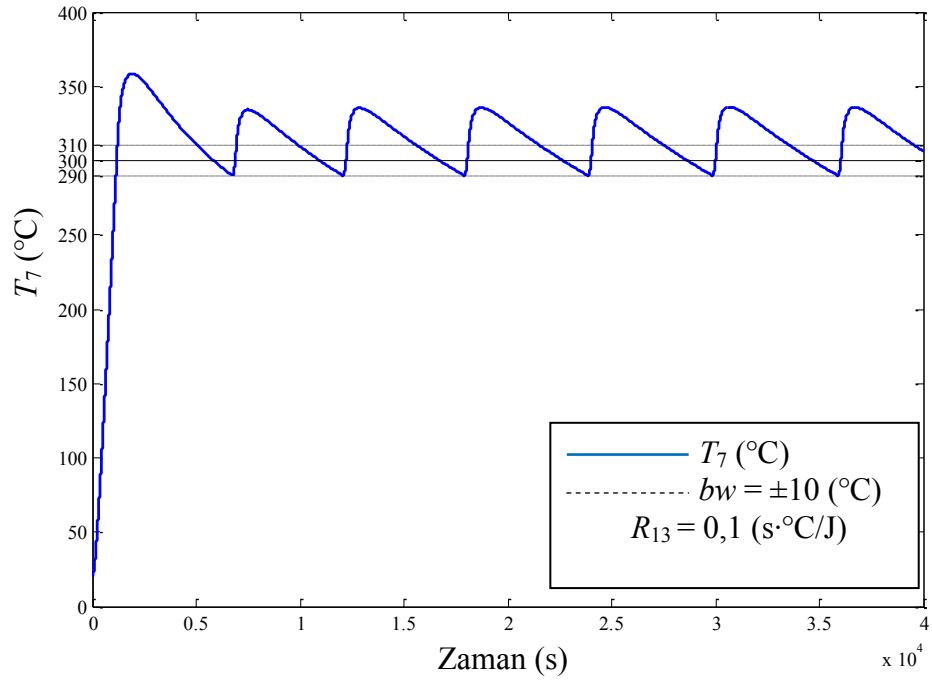
Şekil 4.15. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



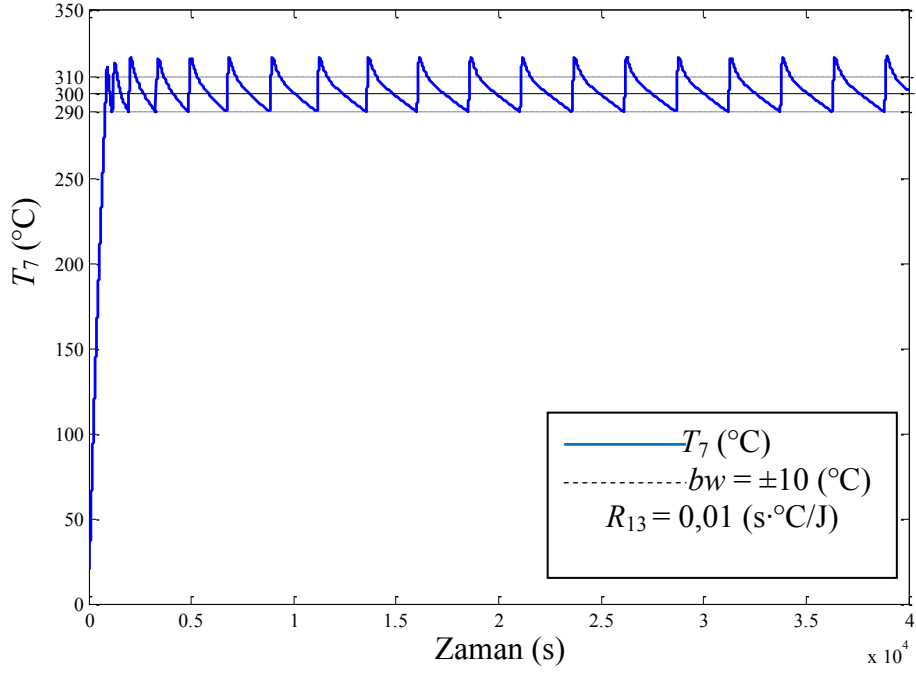
Şekil 4.16. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



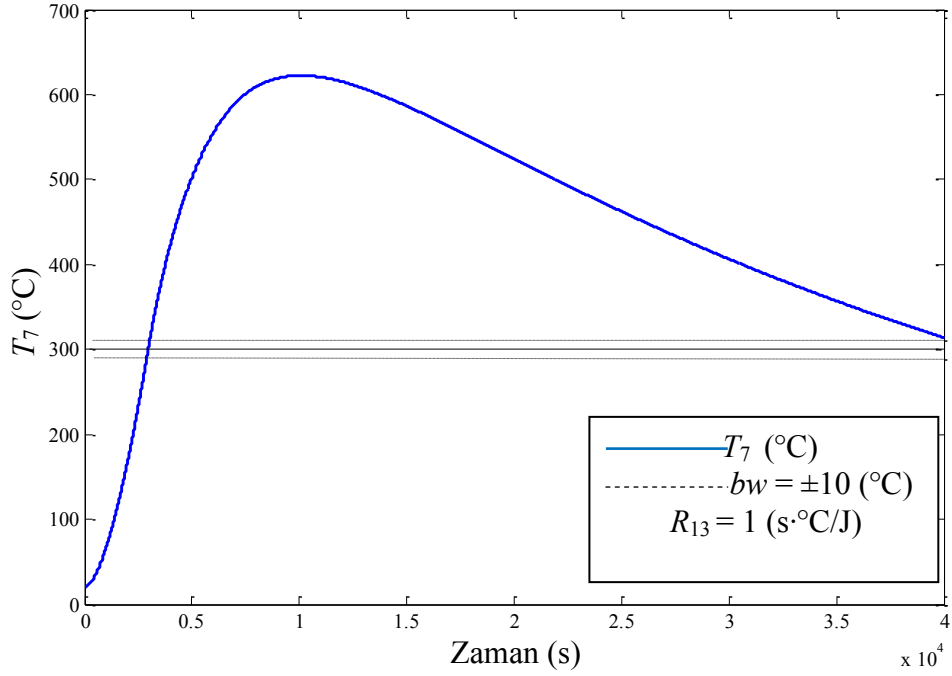
Şekil 4.17. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



Şekil 4.18. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



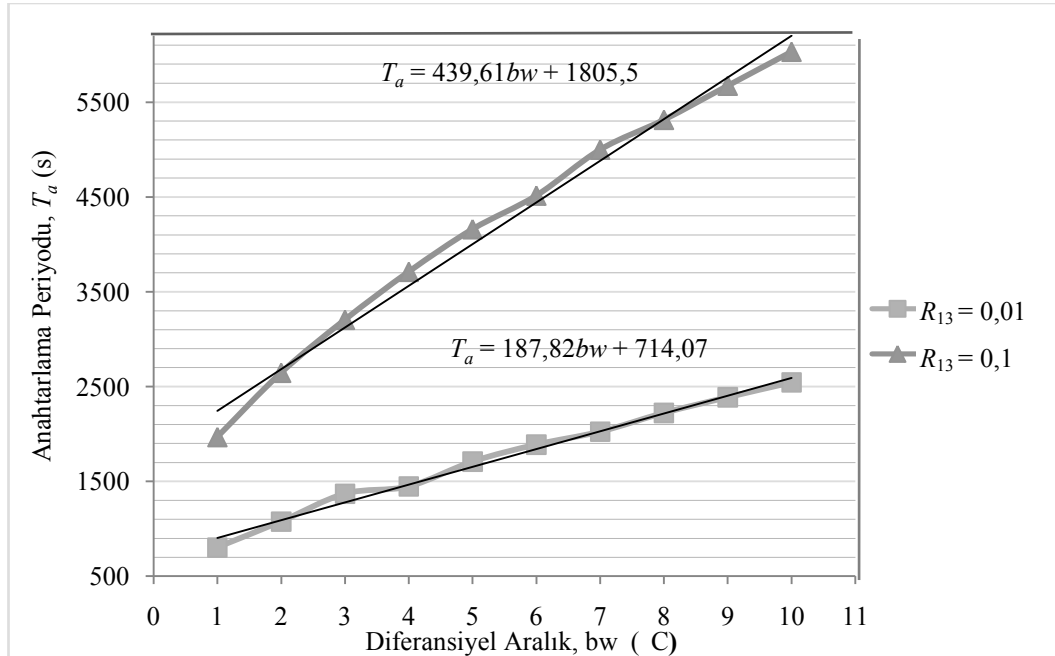
Şekil 4.19. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



Şekil 4.20. Fırın-1’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.

12 kW gücün sisteme birden bire verilmesinden dolayı meydana gelmektedir. $R_{13}=1$ durumunda ise malzemeye ısı aktarımı zorlaşırken, malzemedan dışarıya olan ısı kayıpları da zorlaşmaktadır. Bu durumda aç-kapa kontrolün karakteristiği simülasyon boyunca gözlemlenememiştir.

Sistem düzenli rejime girdikten sonra aç-kapa anahtarlama periyodik hale gelmektedir. bw değeri arttıkça anahtarlama periyotları da artmaktadır. 10 farklı bw değeri için anahtarlama periyotları Çizelge 4.4’de gösterildiği gibidir. Bu değerler baz alınarak çizilen Şekil 4.21’den diğer bw değerlerine karşılık gelen anahtarlama periyotları elde edilebilir. $R_{13} = 0,01$ için elde edilen anahtarlama periyotları $R_{13} = 0,1$ için elde edilenlerin yaklaşık 2,5 katıdır. $R_{13} = 1$ için ise 40000 saniye olan simülasyon süresi sonunda dahi sistem düzenli rejime girememektedir. Fırının en iç duvar katmanı ile malzeme arasındaki ısı direnç olan R_{13} ’ün değeri arttıkça, malzeme sıcaklığını istenen referans sıcaklığına getirebilmek için sisteme verilmesi gereken güç değeri de artmakta dolayısıyla güç kaynağı daha uzun süre açık



Şekil 4.21. Fırın-1’in aç-kapa denetim organı ile kontrolü sırasında sistem düzenli rejime girdikten sonra elde edilen anahtarlama periyotları ($bw = 1-10$, $R_{13} = 0,1$ ve $0,01$).

Çizelge 4.4. Fırın-1 için difransiyel aralığın değişik değerlerinde elde edilen anahtarlama periyotları.

| $R_{13} = 0,01 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
|---|--|--|---------------------------------|
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 | 7,96 | 0,03 | 804,0 |
| ±2 | 9,09 | 0,02 | 1077,0 |
| ±3 | 10,32 | 0,03 | 1370,0 |
| ±4 | 11,25 | 0,03 | 1447,0 |
| ±5 | 11,38 | 0,05 | 1709,0 |
| ±6 | 11,67 | 0,04 | 1888,0 |
| ±7 | 11,80 | 0,03 | 2024,0 |
| ±8 | 11,89 | 0,02 | 2222,0 |
| ±9 | 11,74 | 0,03 | 2387,0 |
| ±10 | 12,08 | 0,04 | 2543,0 |
| $R_{13} = 0,1 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 | 9,36 | 0,06 | 1969,0 |
| ±2 | 12,52 | 0,07 | 2647,0 |
| ±3 | 15,52 | 0,07 | 3206,0 |
| ±4 | 17,35 | 0,06 | 3712,0 |
| ±5 | 19,42 | 0,05 | 4161,0 |
| ±6 | 20,91 | 0,07 | 4516,0 |
| ±7 | 22,25 | 0,06 | 5000,0 |
| ±8 | 23,81 | 0,07 | 5315,0 |
| ±9 | 24,38 | 0,06 | 5675,0 |
| ±10 | 26,16 | 0,06 | 6033,0 |
| $R_{13} = 1 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 - ±10 | Malzeme sıcaklığı difransiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı difransiyel aralığa giremiyor. | > 40000 |

konumda çalışmaktadır. Bu aşamada fırın duvar katmanlarının depoladığı ısı miktarı da artmaktadır. Malzeme sıcaklığı referans değerine geldikten sonra, duvar katmanlarının bünyelerinde barındırdığı ısı malzemeye doğru akmaya devam etmekte ve referans sıcaklığından aşmalar artmaktadır. Özellikle $R_{13} = 1$ durumunda aşmalardan sonra malzemenin soğuması da zorlaşmakta ve ısı kaynak tekrar devreye giremediğinden anahtarlama periyodu elde edilememektedir

Fırından dış ortama olan ortalama enerji ve güç kayıpları ile fırına sağlanan ortalama güç değerleri bw değerinin değişiminden çok fazla etkilenmemektedir (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11). Buna karşılık R_{13} değerinin artması, dışarıya olan enerji kayıplarının da artmasına yol açmaktadır. R_{13} değeri arttıkça malzemenin sıcaklığının referans giriş değerine ulaşması için ısı kaynak daha uzun süre açık konumda çalışmaktadır. Bu esnada fırın duvar katmanlarının sıcaklığı da artmaktadır. Dış ortamla olan sıcaklık farkının artması, dışarıya olan enerji kayıplarının da artmasına yol açmaktadır.

Sistem 1000 saniye kadar açık konumda çalıştıktan sonra sisteme verilen ısı güç tamamen kesilmekte ve malzeme sıcaklığının bw değerlerinin altına indiği anda sisteme tekrar 12 kW güç verilmektedir. Sistemden ortama olan güç kayıpları bir süre sonra belli bir değer etrafında salınmaktadır.

4.2.2. Fırın-2'de Malzeme Sıcaklığının Açık-Kapalı Kontrolü

Fırın-2'nin yalıtım tuğlası (ceraboard) kalınlığı Fırın-1'inin $\frac{1}{4}$ 'ü kadardır. Çizelgeler 4.5-4.7'de verilen performans kartlarında Fırın-2 için $R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 olduğu durumlarda $bw = 1, 5$ ve 10 değerlerinde iken sistem geçici zaman cevaplarını tanımlayan performans parametreleri görülmektedir. $R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 olduğu durumlarda $bw = 1, 5$ ve 10 değerlerinde iken sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri Şekiller 4.22-4.30' da, diferansiyel aralığın değişik değerleri için elde edilen anahtarlama periyotları Çizelge 4.8 ve Şekil 4.31'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-2 için $R_{13} = 0,01$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

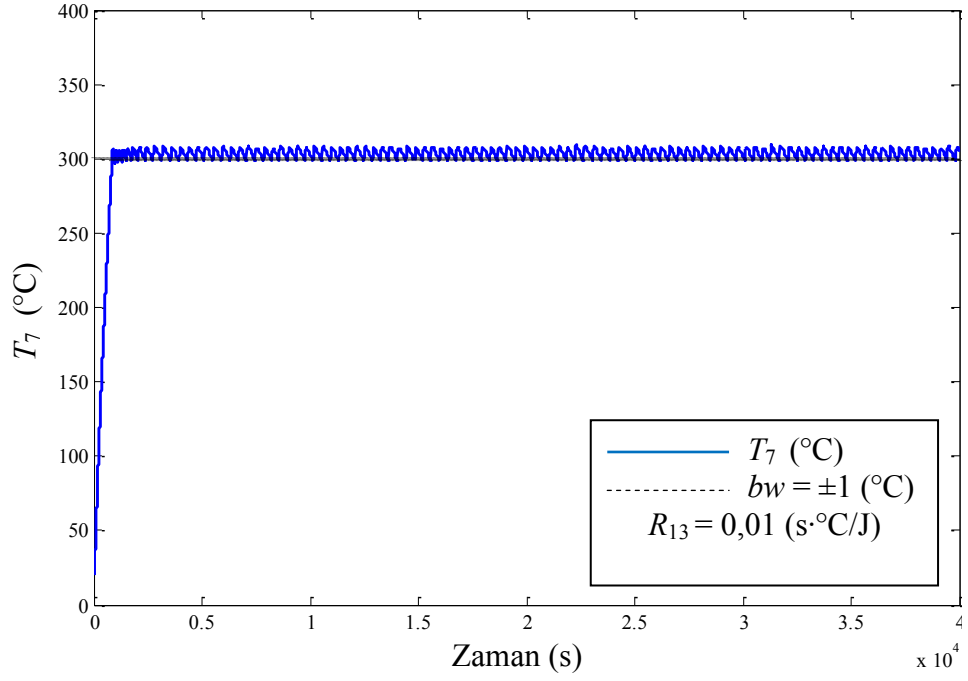
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, bw | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 355,6 | 355,6 | 355,6 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 691,4 | 691,4 | 691,4 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 846,9 | 846,9 | 846,9 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 884,1 | 898,4 | 915,4 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 306,1 | 310,1 | 315,0 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 2,1 | 3,4 | 5,0 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | 309,1 | 316,3 | 321,8 |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | 22294,0 | 18099,0 | 32834,0 |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | 412,0 | 773,0 | 1163,0 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, bw_+ | (°C) | 6,81 | 9,75 | 11,55 |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, bw_- | (°C) | 1,39 | 0,12 | 0,13 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | 35364 | 35938 | 36616 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 884,1 | 898,4 | 915,4 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 541,6 | 545,0 | 543,5 |

Çizelge 4.6. Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-2 için $R_{13} = 0,1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

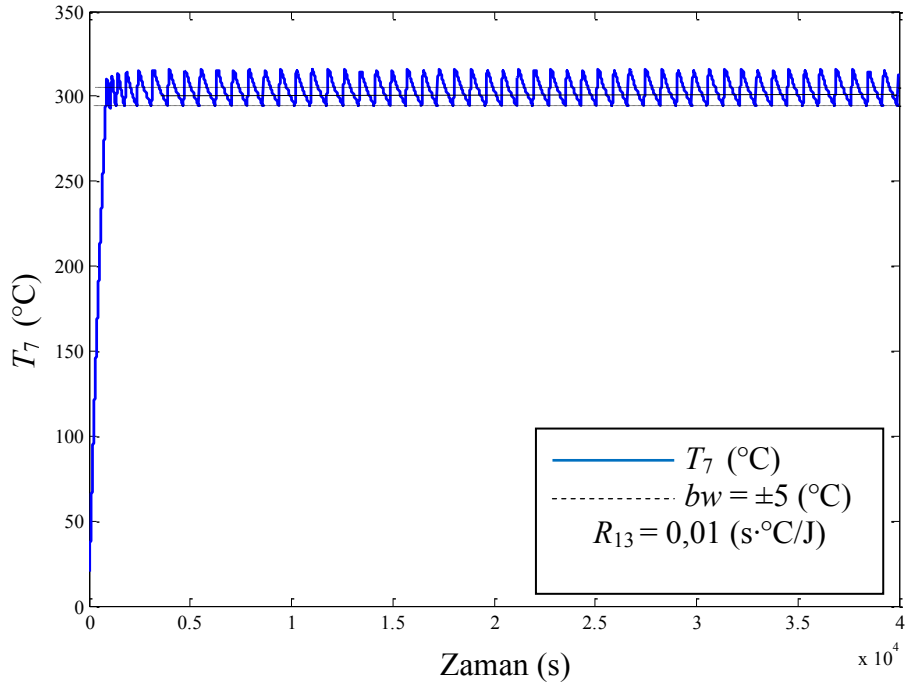
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | |
|---|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, bw | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 640,1 | 640,1 | 640,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 961,1 | 961,1 | 961,1 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1767,3 | 1784,4 | 1792,9 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 341,5 | 345,8 | 350,5 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 13,8 | 15,3 | 16,8 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | 1004,0 | 2003,0 | 2835,000 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, bw_+ | (°C) | 7,41 | 15,48 | 20,25 |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, bw_- | (°C) | 1,24 | 0,26 | 0,25 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | 32606 | 33166 | 33490 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 815,2 | 829,2 | 837,2 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 543,0 | 549,5 | 569,8 |

Çizelge 4.7. Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-2 için $R_{13} = 1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

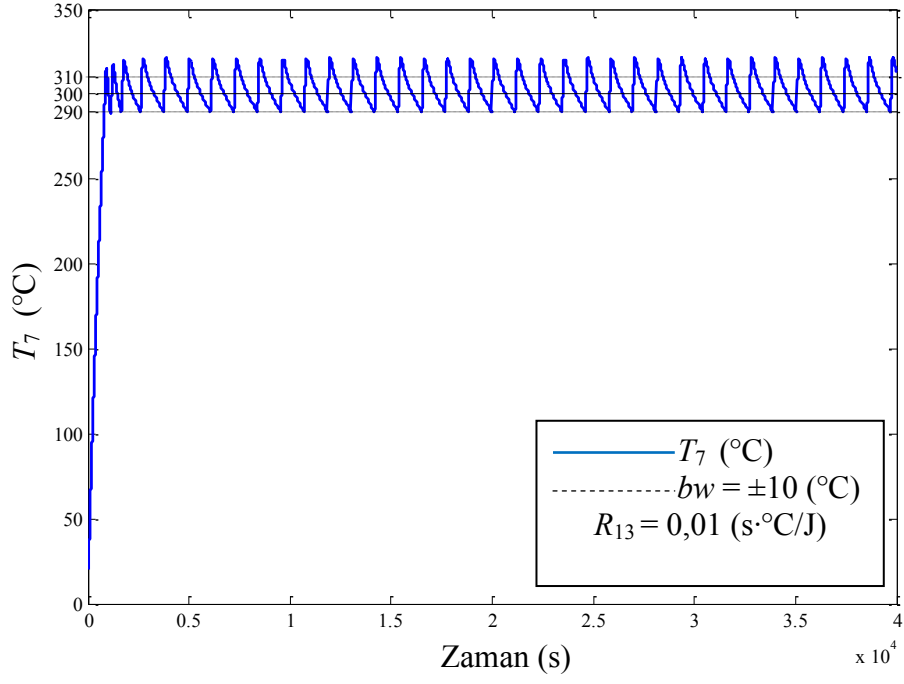
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | |
|---|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, b_w | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 1 | 1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 1885,5 | 1885,500 | 1885,500 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 2425,4 | 2425,400 | 2425,400 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 3042,9 | 3042,900 | 3042,900 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 8319,8 | 8335,300 | 8350,900 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 552,3 | 557,221 | 562,882 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 84,1 | 85,7 | 87,6 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | 3386,0 | 7638,000 | 10568,000 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, b_{w+} | (°C) | 6,30 | 26,25 | 47,28 |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, b_w | (°C) | 1,05 | 1,07 | 1,04 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | 42661 | 43792 | 45160 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 1066,5 | 1094,8 | 1129,0 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 675,2 | 707,8 | 699,4 |



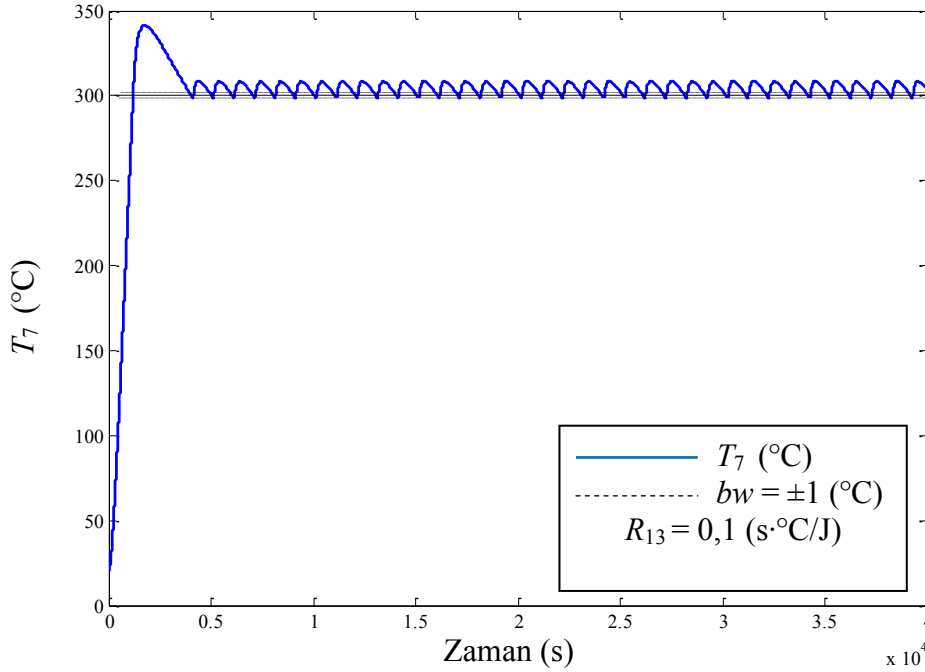
Şekil 4.22. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



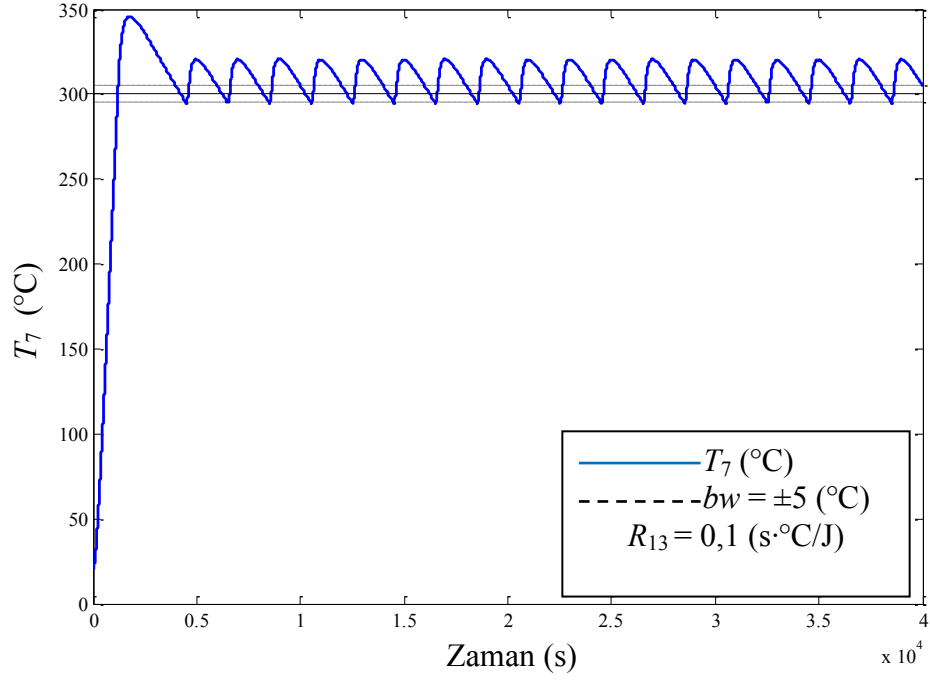
Şekil 4.23. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



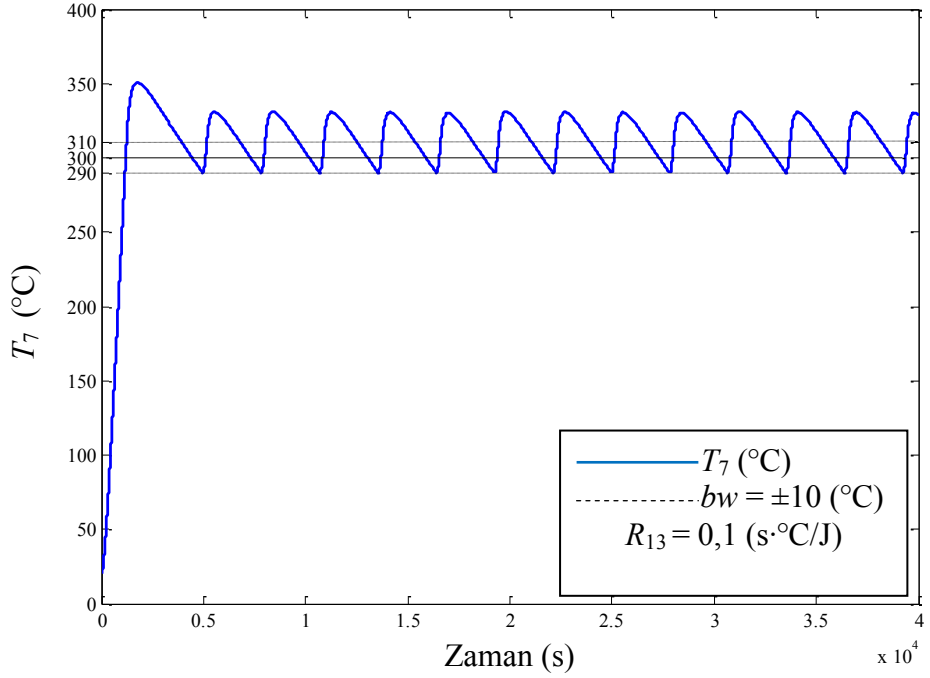
Şekil 4.24. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



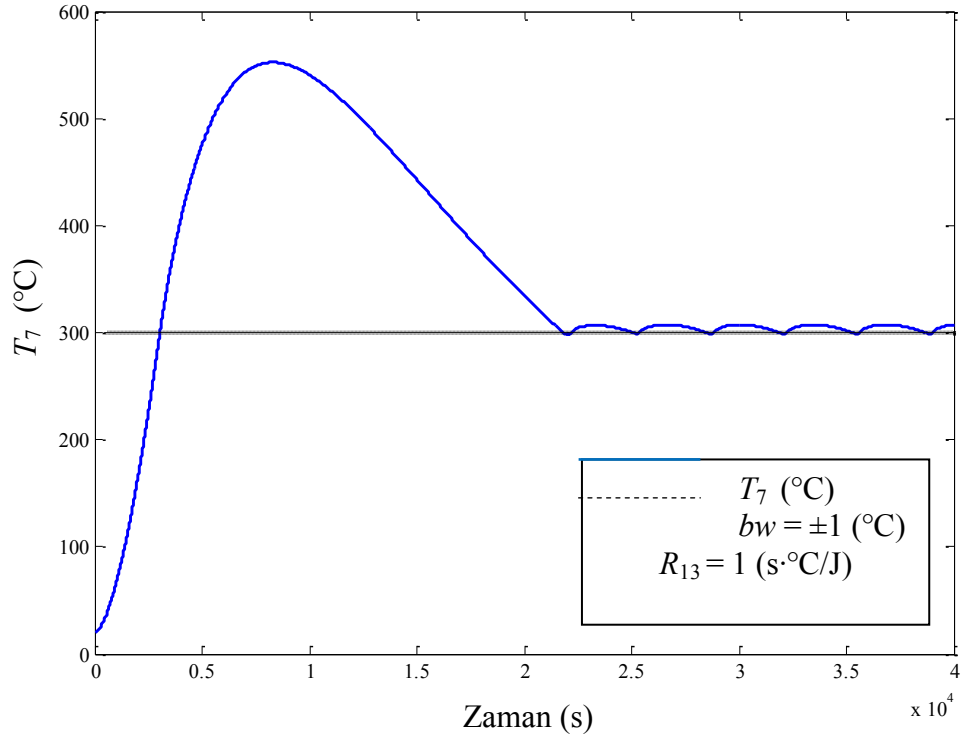
Şekil 4.25. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



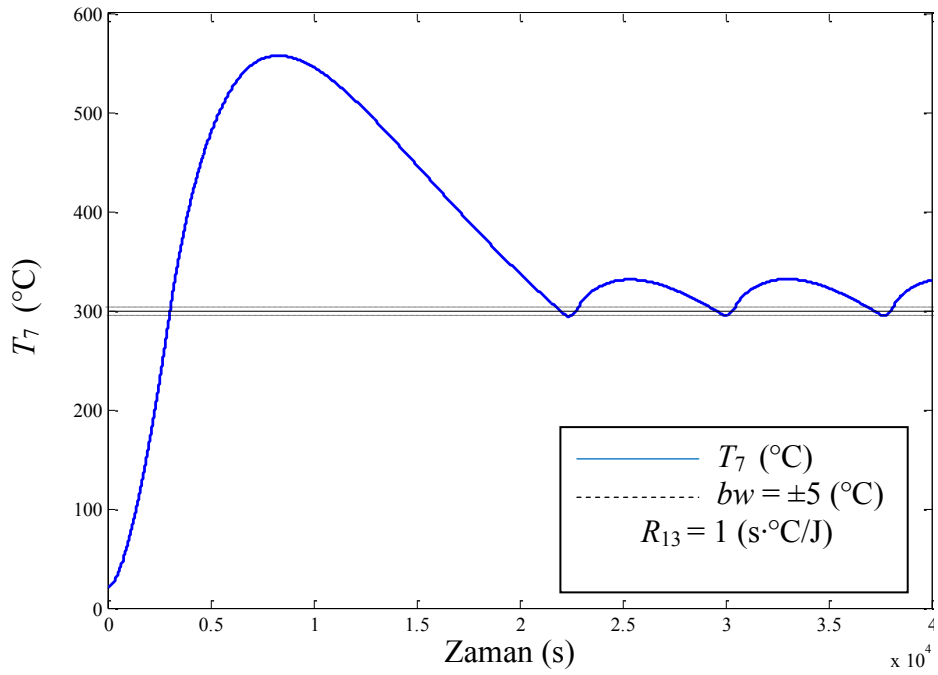
Şekil 4.26. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



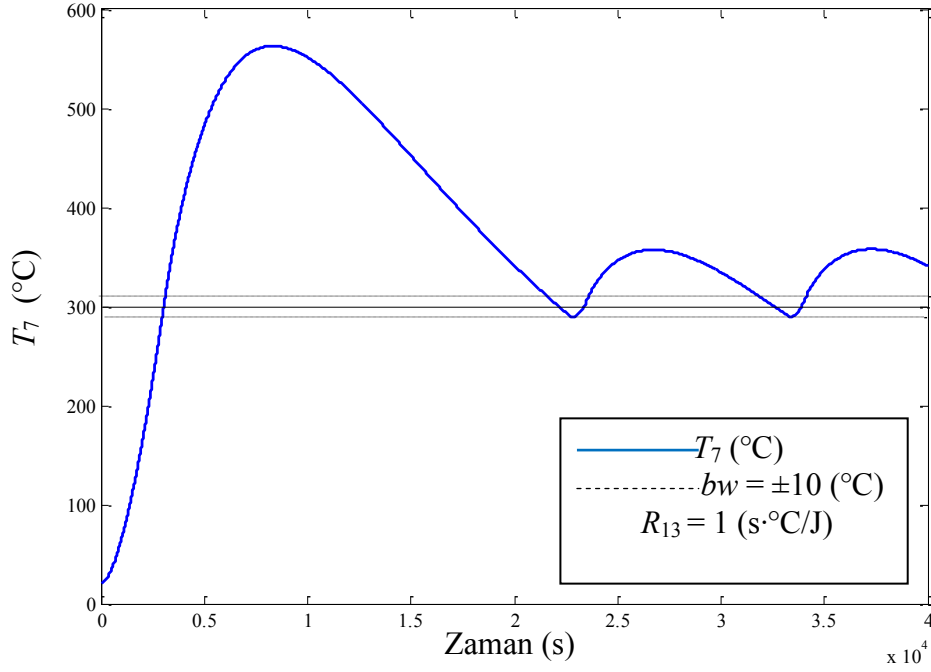
Şekil 4.27. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



Şekil 4.28. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



Şekil 4.29. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



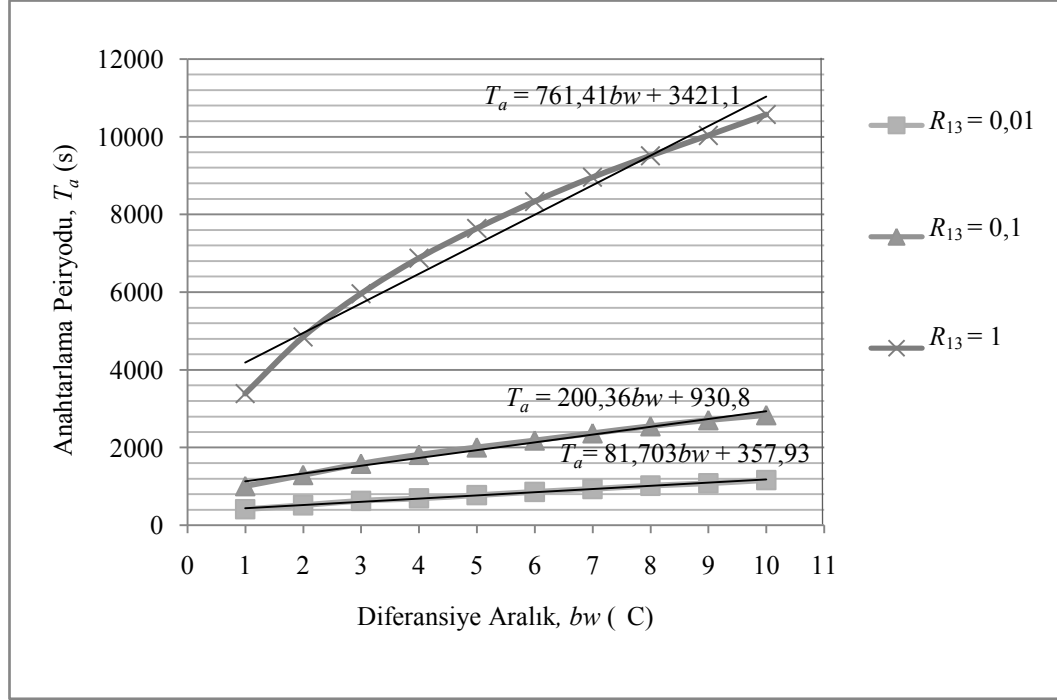
Şekil 4.30. Fırın-2’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.

Çizelgeler ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

Dışarıya olan enerji akışının kolaylaşmasından dolayı malzemenin referans sıcaklığına erişmesi için geçen süre Fırın-1’e oranla artmakta buna bağlı olarak yükselme, geçit ve gecikme zamanları da artmakta ve sistem cevap hızı Fırın-1’e oranla kötüleşmektedir. Fırın-1’e benzer olarak, Fırın-2’de de fırın iç duvarıyla malzeme arasındaki ısı direnç olan R_{13} ’ün her hangi bir değeri için tolerans bandı genişliği (bw) değerinin değiştirilmesi, t_r , t_d ve t_c değerlerini etkilememektedir. Fırın-1’e benzer olarak R_{13} ’ün herhangi bir değerinde tolerans bandı genişliği bw ’nin değeri arttırıldıkça, ilk tepe sıcaklığı ve tepe zamanı değerleri de artmaktadır. Tolerans bandı genişliği bw sabitken R_{13} değerinin arttırılması fırında işlem gören malzemeye olan ısı akışını zorlaştırdığından sistem cevabının yavaşlamasına yol açmaktadır. R_{13} değeri arttıkça yükselme, geçit, gecikme ve tepe zamanları da artmaktadır. Fırın-2’de yalıtım tuğlası kalınlığının azalmasından dolayı dışarıya olan enerji akışı kolaylaştığından, malzeme sıcaklığı tolerans bandı üst sınır değerine erişinceye kadar sisteme Fırın-1’e oranla daha uzun süre 12 kW güç verilmiş olsa da

Çizelge 4.8. Fırın-2 İçin difransiyel aralığın değişik değerlerinde elde edilen anahtarlama zamanları.

| $R_{13} = 0,01 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 | 7,81 | 1,39 | 412,0 |
| ±2 | 10,67 | 2,33 | 515,0 |
| ±3 | 12,99 | 3,14 | 629,0 |
| ±4 | 13,61 | 4,15 | 689,0 |
| ±5 | 14,75 | 5,12 | 773,0 |
| ±6 | 16,40 | 6,13 | 859,0 |
| ±7 | 17,99 | 7,13 | 935,0 |
| ±8 | 18,53 | 8,13 | 1019,0 |
| ±9 | 19,64 | 9,12 | 1079,0 |
| ±10 | 21,55 | 10,14 | 1163,0 |
| $R_{13} = 0,1 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 | 8,41 | 1,24 | 1004,0 |
| ±2 | 11,74 | 2,23 | 1291,0 |
| ±3 | 14,89 | 3,23 | 1581,0 |
| ±4 | 18,17 | 4,24 | 1812,0 |
| ±5 | 20,48 | 5,26 | 2003,0 |
| ±6 | 22,70 | 6,23 | 2181,0 |
| ±7 | 24,70 | 7,26 | 2367,0 |
| ±8 | 27,03 | 8,22 | 2549,0 |
| ±9 | 29,02 | 9,24 | 2705,0 |
| ±10 | 30,25 | 10,25 | 2835,0 |
| $R_{13} = 1 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 | 7,33 | 2,05 | 3386,0 |
| ±2 | 13,68 | 3,05 | 4844,0 |
| ±3 | 19,61 | 4,06 | 5958,0 |
| ±4 | 26,02 | 5,05 | 6872,0 |
| ±5 | 31,76 | 6,07 | 7638,0 |
| ±6 | 37,22 | 7,01 | 8331,0 |
| ±7 | 42,82 | 8,03 | 8953,0 |
| ±8 | 47,90 | 9,03 | 9508,0 |
| ±9 | 52,96 | 10,02 | 10031,0 |
| ±10 | 57,93 | 11,04 | 10568,0 |



Şekil 4.31. Fırın-2'nin aç-kapa denetim organı ile kontrolü sırasında sistem düzenli rejime girdikten sonra elde edilen anahtarlama periyotları ($bw = 1-10$, $R_{13} = 0,01$, $0,1$ ve 1).

duvar katmanlarının bünyelerinde barındırabileceği ısı miktarı azaldığından, ısı kaynak kapalı konuma geçtikten sonra, malzemeye duvar katmanlarından aktarılacak olan ısı miktarı da azalmaktadır. Bundan dolayı ilk tepe sıcaklığı değerleri azalmakta ve ilk tepe sıcaklıklarının azalmasına bağlı olarak tepe zamanlarında da azalma görülmektedir. İncelenen bütün cevaplarda ilk tepe sıcaklıkları ve tepe zamanları Fırın-1 ile benzer özellikler göstermekte fakat ilk tepe sıcaklıkları bw değerinin artmasıyla Fırın-1'e oranla daha küçük değerlere sahip olmaktadır. $R_{13} = 1$ değerinde ilk tepe sıcaklığının dolayısıyla yüzde aşmanın Fırın-1'in benzer durumuna oranla belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bunun yanında ilk tepe sıcaklığı referans değerinden hala 200-250°C fazla olmakta ve bu noktadan sonra iki konumlu denetim sistemi karakteristiği görülememektedir. İlk tepeden sonraki zamanlarda görülen malzeme sıcaklıkları, $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumlarında ve bütün bw değerleri için ilk tepe sıcaklığının altında kalmaktadır (Şekiller 4.25-4.30). $R_{13} = 0,01$ durumunda ise tüm bw değerleri için ilk tepeden sonraki zamanlarda ilk tepe sıcaklığının üzerinde sıcaklıklar görülmektedir (Şekiller 4.22-4.24). Bunun sebebi,

Fırın-1'e benzer olarak $R_{13} = 0,01$ durumunda malzemeye olan ısı akışının $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumlarına göre daha kolay olmasıdır.

R_{13} 'ün herhangi bir değeri için anahtarlama periyotları Çizelge 4.8'de gösterildiği gibi bw değeri arttıkça artmakta, Fırın-1'e oranla bu sürenin her bw değeri için daha az olduğu görülmektedir. Çünkü Fırın-2'de dışarıya olan enerji kayıpları daha fazla olduğundan malzeme daha kolay soğuyabilmektedir. Dolayısıyla malzeme sıcaklığını diferansiyel aralıkta tutabilmek için güç kaynağı daha sık devreye girmektedir. Çizelgede yer alan değerler kullanılarak Şekil 4.31'de gösterilen eğriler elde edilmiştir. Fırın-1'den farklı olarak $R_{13} = 1$ değeri için de sistemin düzenli rejime girebildiği fakat yine malzeme sıcaklığının bw aralığında kalamadığı gözlemlenmektedir. R_{13} direncinin artması anahtarlama periyotlarını yine arttırmaktadır. Aynı bw değerinde, anahtarlama periyotları, $R_{13} = 0,01$ ile $R_{13} = 1$ arasında yaklaşık 9,5 kat, $R_{13} = 0,01$ ile $R_{13} = 0,1$ arasında ise yaklaşık 2.5 kat artmaktadır.

Ortalama enerji ve güç kayıpları yalıtım tuğlası direncinin dörtte bir oranına indirilmesinden dolayı $R_{13} = 0,01$ durumunda Fırın-1'e oranla yaklaşık olarak 3 kat kadar artmıştır. $R_{13} = 0,1$ durumunda ise $R_{13} = 0,01$ durumuna göre ve Fırın-1'in $R_{13} = 0,1$ durumuna oranla bir artış söz konusudur. $R_{13} = 1$ durumu için de benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Ortalama enerji kayıplarına paralel olarak sisteme sağlanması gereken ortalama güç miktarı da artmaktadır.

4.3.3. Fırın-3'de Malzeme Sıcaklığının Açık-Kapalı Kontrolü

Fırın-3, Fırın-1'e oranla dış yüzey yalıtımının cam yünü malzeme ile güçlendirildiği bir fırındır. Burada gözlemlenmek istenen; dış yalıtımı artırılmış, ısı kayıpları azaltılmış fırının düzenli rejime girene kadar ve girdikten sonra nasıl bir davranış sergileyeceğidir. Çizelgeler 4.9-4.11'de verilen performans kartlarında Fırın-3 için $R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 olduğu durumlarda $bw = 1, 5$ ve 10 değerlerinde iken sistem geçici zaman cevaplarını tanımlayan performans parametreleri görülmektedir. $R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 olduğu durumlarda $bw = 1, 5$ ve 10 değerlerinde iken sistem çıkışı olan

malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri Şekiller 4.32-4.40' da, diferansiyel aralığın değişik değerleri için elde edilen anahtarlama periyotları Çizelge 4.12 ve Şekil 4.41'de verilmiştir.

Dış yüzey yalıtımının artırılması sonucu fırın yüzeyinden dışarıya olan enerji akışının zorlaştığı Fırın-3'de, malzeme sıcaklığı tolerans bandının üst sınır değerine Fırın-1 ve Fırın-2'ye oranla daha kısa süre erişmekte bu aşamada sisteme diğer fırınlara oranla daha az enerji verilmektedir. Bundan dolayı Fırın-1 ve Fırın-2'ye benzer olarak yükselme, geçit ve gecikme zamanları bw değerinin değişiminden etkilenmese bile Fırın-1 ve Fırın-2'ye oranla azalmakta ve sistem cevap hızı iyileşmektedir. Benzer şekilde R_{13} değerinin artırılması fırında işlem gören malzemeye olan ısı akışını zorlaştırdığından sistem cevabının yavaşlamasına yol açmaktadır. R_{13} değeri arttıkça yükselme, geçit, gecikme ve tepe zamanları da artmaktadır.

Dış yalıtım katmanının direnç değerinin Fırın-1'e oranla daha da artmış olması $R_{13} = 0,01$ ve $0,1$ değerleri için ilk tepe sıcaklığı değerlerinin değişmesine yol açmamakla beraber, $R_{13} = 1$ durumunda bu sıcaklığın Fırın-1 ve Fırın-2'ye oranla daha yüksek bir değere sahip olmasına neden olmaktadır. Zira bu durumda hem malzemeye olan ısı akışı hem de ortama olan ısı akışı zorlaşmaktadır. Bir yandan malzemenin referans sıcaklığına ulaşması için gereken süre artarken diğer yandan da duvar katmanlarında depolanan enerji dış ortama kayıplar şeklinde aktarılamamaktadır. Dolayısıyla malzemenin referans sıcaklığı değerine ulaşmasından sonra bünyesine aktarılabilen ısı miktarı Fırın-1 ve Fırın-2'ye oranla daha fazla olmakta ve ilk tepe sıcaklığı belirgin bir şekilde artmaktadır. Artan tepe sıcaklığı ile birlikte tepe zamanında da artış söz konusu olmaktadır. Özellikle $R_{13} = 1$ ve $bw = 10$ durumunda, ilk tepe sıcaklığının artmış olmasından dolayı, tepe zamanına Fırın-1'e oranla yaklaşık 20 dakika geç ulaşılmaktadır. İlk tepeden sonraki zamanlarda görülen malzeme sıcaklıkları, $R_{13} = 0,01$ durumunda tüm bw değerleri için, ilk tepe sıcaklığının üzerinde (Şekiller 4.32-4.34), $R_{13} = 0,1$ durumunda ve bütün bw değerleri için ilk tepe sıcaklığının altında (Şekiller 4.35, 4.37) kalmaktadır. Bunun

Çizelge 4.9. Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-3 için $R_{13} = 0,01$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

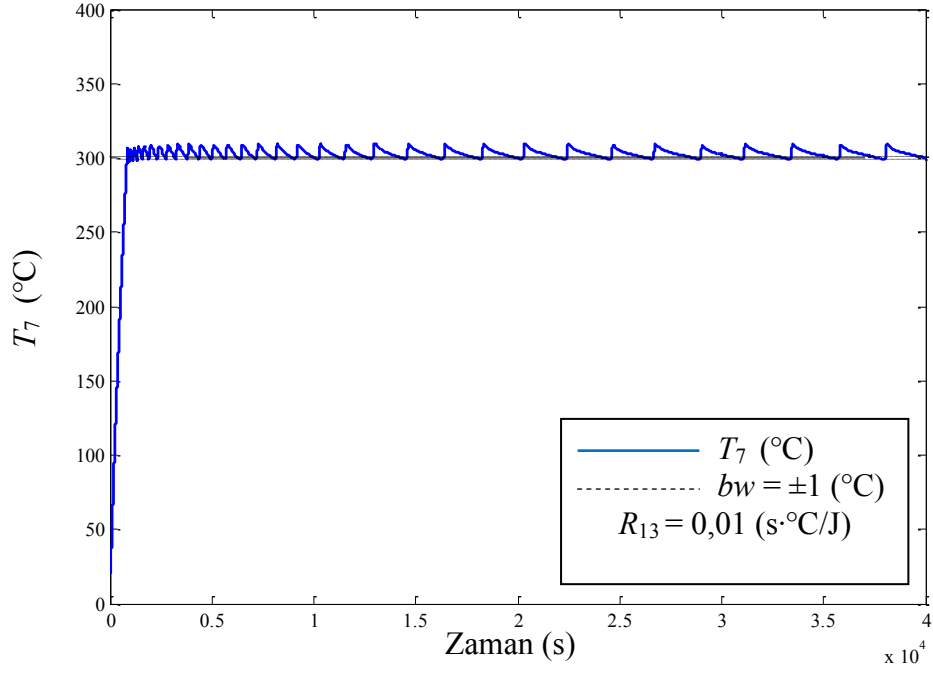
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, b_w | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 354,9 | 354,9 | 354,9 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 682,2 | 682,2 | 682,0 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 833,7 | 833,7 | 833,7 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 871,5 | 887,5 | 902,5 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 306,4 | 310,7 | 315,6 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 2,1 | 3,6 | 5,2 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | 309,9 | 317,2 | 322,7 |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | 12996,0 | 31752,0 | 15307,0 |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | 2266,0 | 4775,0 | 7343,0 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, b_{w+} | (°C) | 8,27 | 18,43 | 12,38 |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, b_w | (°C) | 0,007 | 0,004 | 0,005 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | 4262 | 4266 | 4239,4 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 106,5 | 106,6 | 106,0 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 246,8 | 243,6 | 243,7 |

Çizelge 4.10. Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-3 için $R_{13} = 0,1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

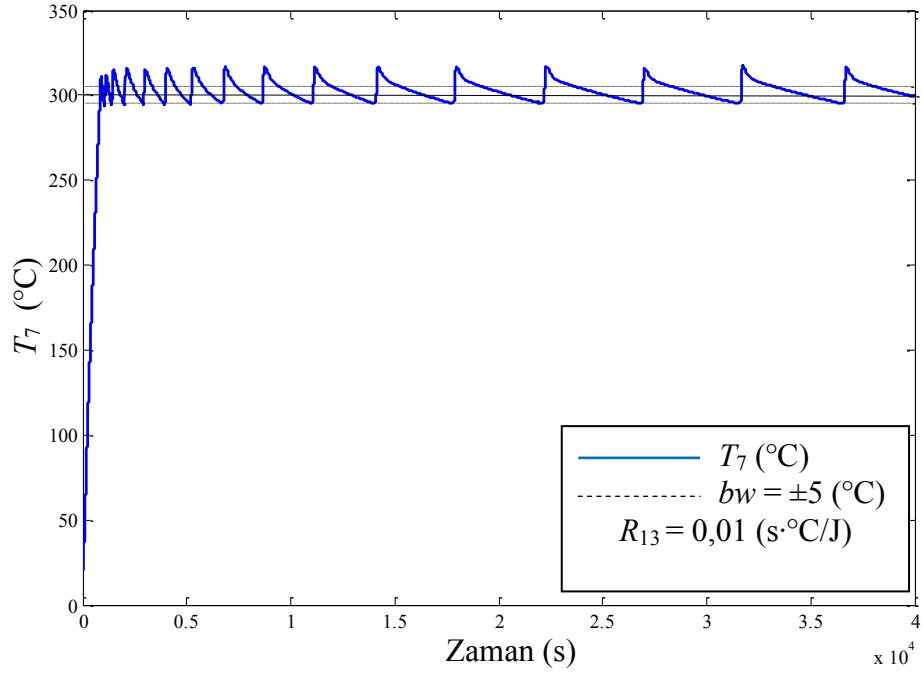
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | |
|---|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, bw | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,2 | 637,2 | 637,2 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,3 | 946,3 | 946,3 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1175,7 | 1175,7 | 1175,7 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1919,5 | 1925,6 | 1940,5 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 349,8 | 353,7 | 358,7 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 16,6 | 17,9 | 19,6 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | 5338,0 | 11380,0 | 16564,0 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, bw_+ | (°C) | 11,49 | 22,48 | 29,83 |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, bw_- | (°C) | 0,01 | 0,90 | 0,007 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | 4328,4 | 4412 | 4632 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 108,2 | 110,9 | 111,6 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 249,5 | 249,6 | 260,0 |

Çizelge 4.11 Aç-kapa kontrol işleminde Fırın-3 için $R_{13} = 1$ durumunda elde edilen performans değerlendirme kartı.

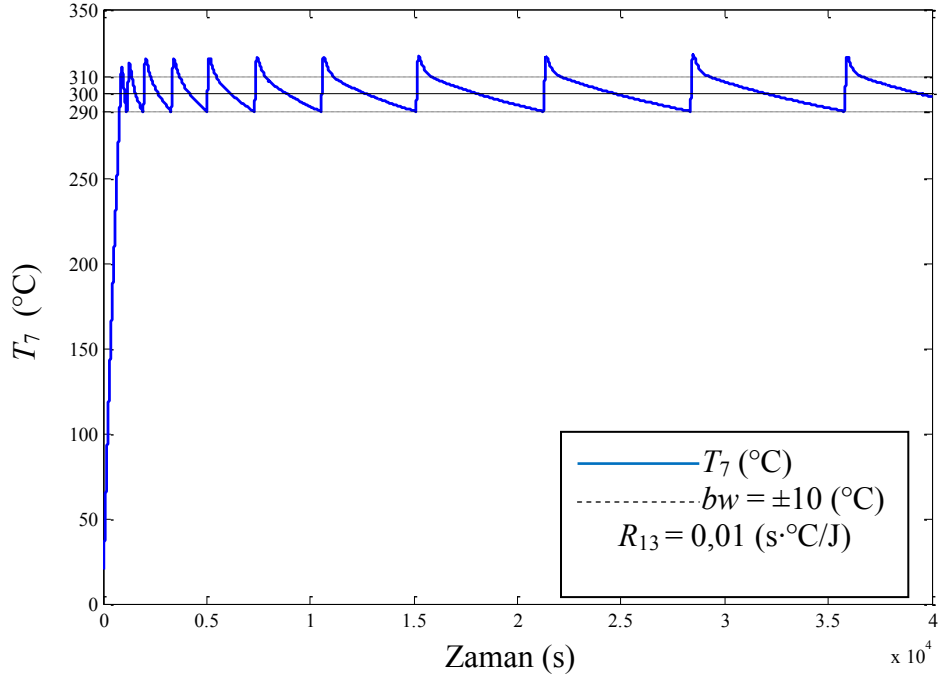
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | |
|--|----------|---|---|---|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Diferansiyel Aralık, b_w | (°C) | ±1 | ±5 | ±10 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 1 | 1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 40000 | 40000 | 40000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 1855,1 | 1855,1 | 1855,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 2968,7 | 2968,7 | 2968,7 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 2360,5 | 2360,5 | 2360,5 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 11646,0 | 11660,0 | 11684,0 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 629,2 | 634,8 | 641,2 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 110,0 | 111,6 | 113,7 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| Anahtarlama Periyodu, t_a | (s) | >40000 | >40000 | >40000 |
| Diferansiyel Aralığın Üst Sınır Değerinden (+) Sapma, b_{w+} | (°C) | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. |
| Diferansiyel Aralığın Alt Sınır Değerinden (-) Sapma, b_w | (°C) | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa giremiyor. |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (J) | 8813,7 | 8893,1 | 8982,2 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 220,3 | 222,3 | 224,5 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 436,9 | 440,8 | 445,8 |



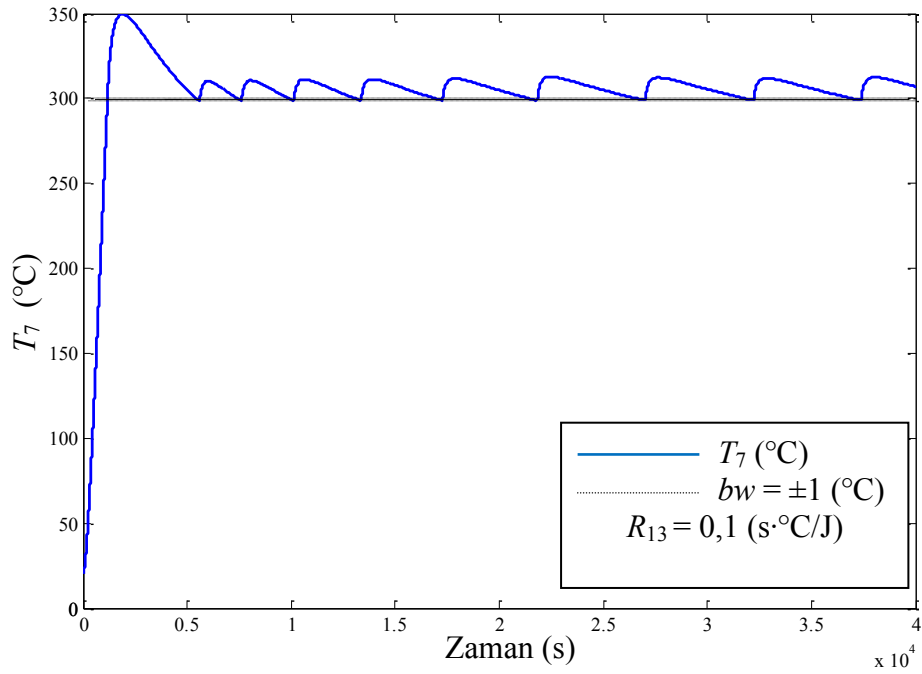
Şekil 4.32. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



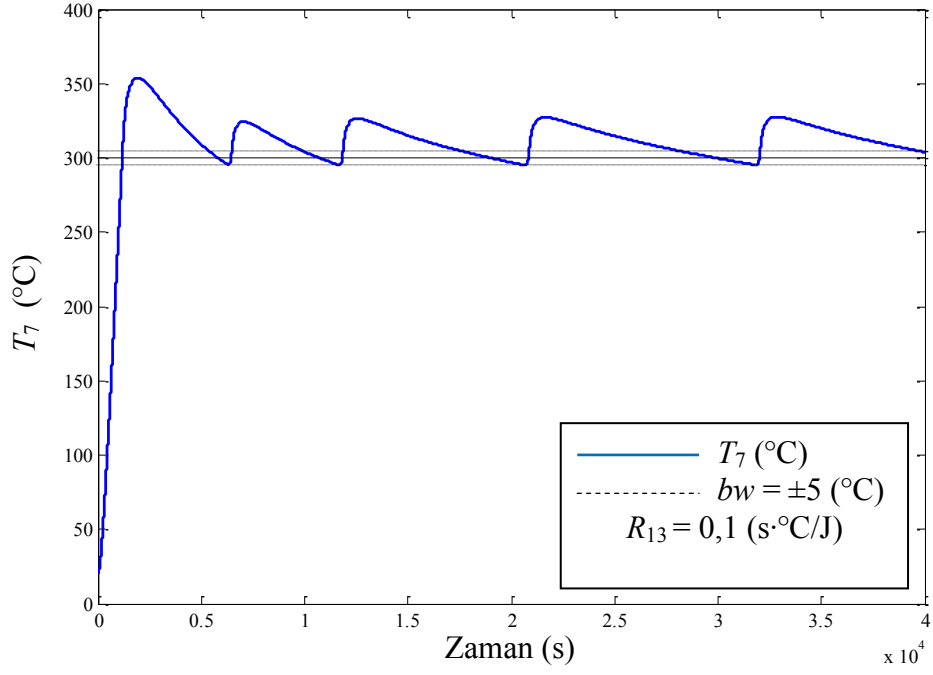
Şekil 4.33. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



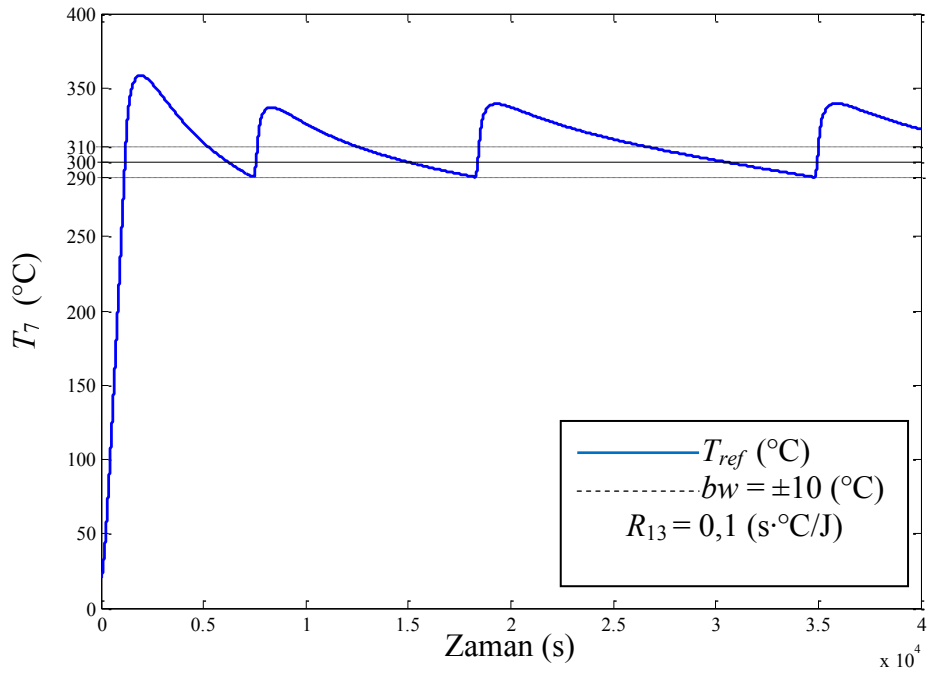
Şekil 4.34. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



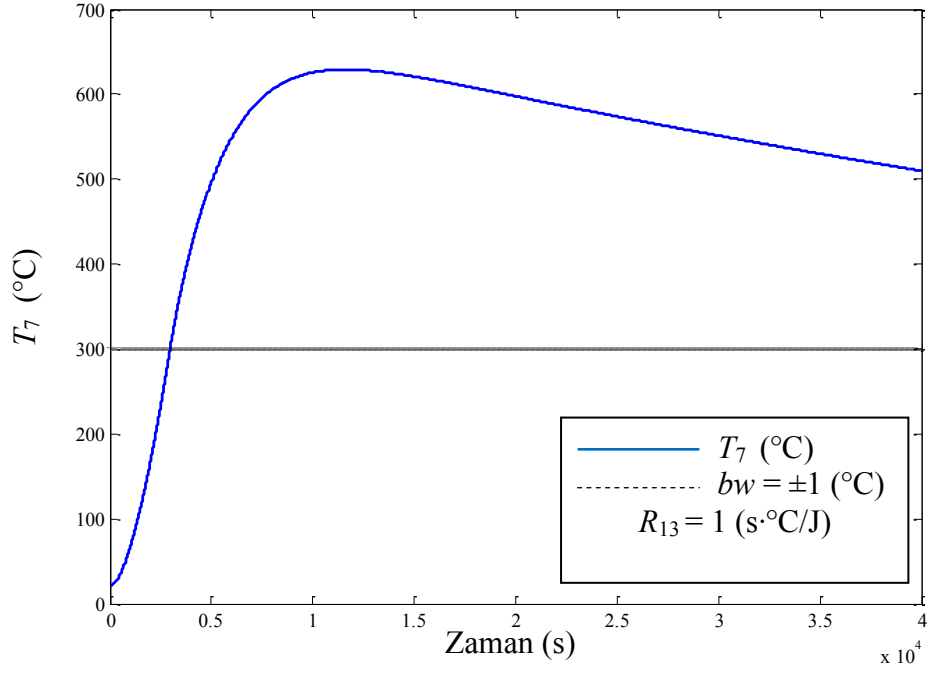
Şekil 4.35. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



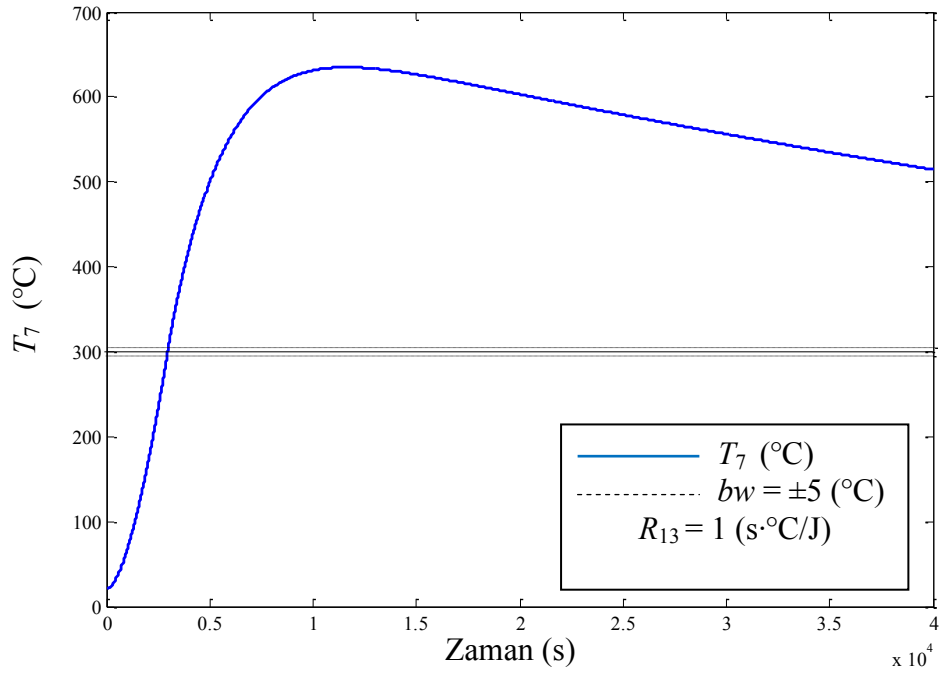
Şekil 4.36. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



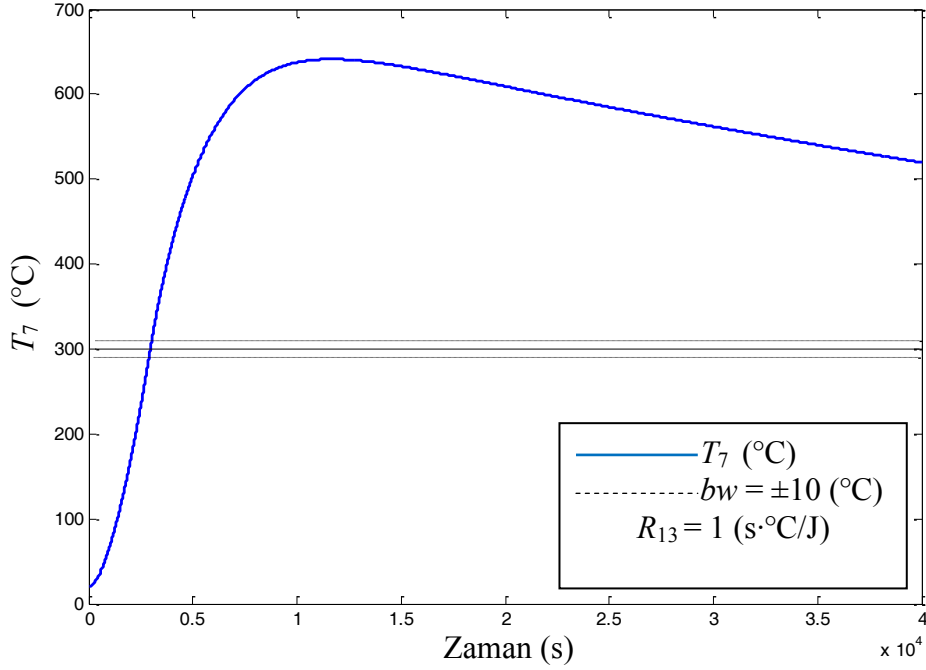
Şekil 4.37. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



Şekil 4.38. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



Şekil 4.39. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.



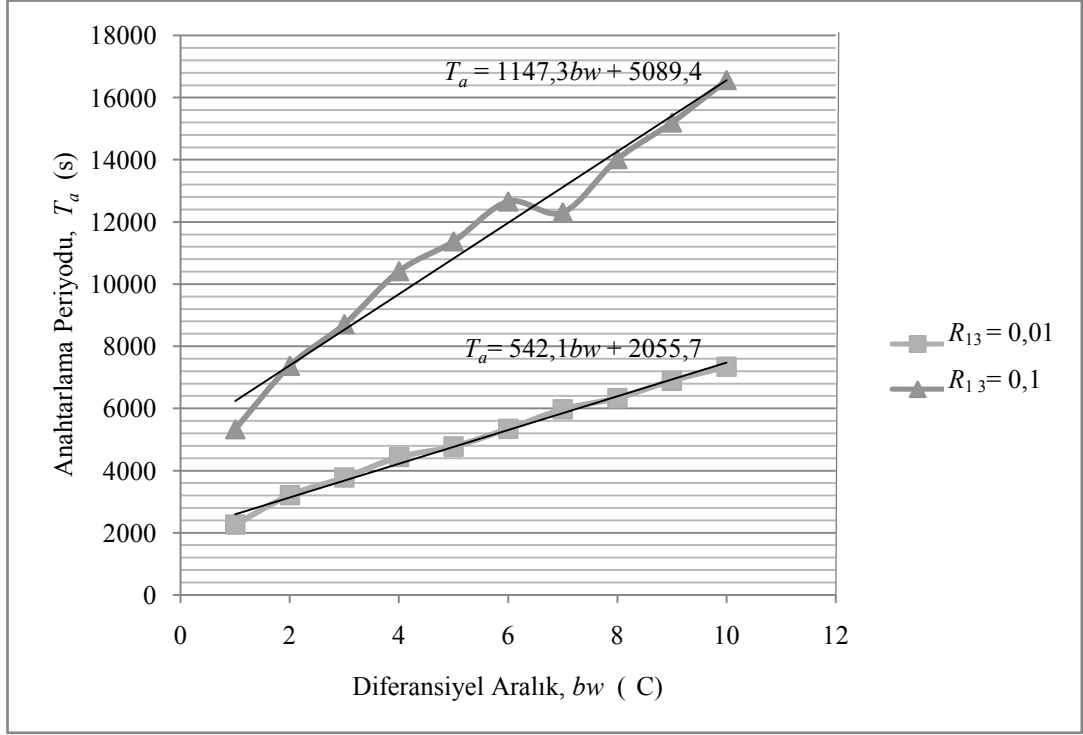
Şekil 4.40. Fırın-3’de malzeme sıcaklığının iki konumlu kontrolü.

sebebi, $R_{13} = 0,01$ durumunda malzemeye olan ısı akışının $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumlarına göre daha kolay olmasıdır. $R_{13} = 1$ durumunda ise simulasyon boyunca ilk tepe aşmasından sonra ısı kaynak tekrar devreye giremediğinden ikinci bir tepe değeri elde edilememektedir (Şekiller 4.38, 4.40).

Fırın-3’de görülen anahtarlama periyotları, Fırın-1 ve Fırın-2’dekilere göre daha büyüktür. Özellikle $R_{13} = 1$ durumu için 120000 saniye sonunda bile bir tepe değerinden diğerine erişilememekte ve sistem düzenli rejime gelememektedir. Bu durum dışarıdaki yalıtımın çok iyi olması ve kullanılan kontrol yönteminin yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Malzeme referans sıcaklığına ulaşana kadar güç kaynağı 12 kW düzeyinde sürekli olarak çalışmaktadır. Malzeme sıcaklığı tolerans bandının üst sınır değerine eriştiğinde, fırına sağlanan enerji fırın dışına atılmadığından özellikle ısı kaynağına yakın katmanlarda büyük miktarda enerji depolanmış olduğundan, güç kaynağı devreden çıkmış olsa bile malzemenin sıcaklığı artmaya devam etmektedir. Dolayısıyla Çizelge 4.12’de ifade edildiği gibi, R_{13} değeri

Çizelge 4.12. Fırın-3 için difransiyel aralığın değişik değerlerinde elde edilen anahtarlama periyotları.

| $R_{13} = 0,01 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
|---|--|--|---------------------------------|
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 | 9,273 | 1,11 | 2266,0 |
| ±2 | 11,393 | 2,01 | 3212,0 |
| ±3 | 13,689 | 3,01 | 3778,0 |
| ±4 | 15,733 | 4,01 | 4441,0 |
| ±5 | 16,427 | 5,01 | 4775,0 |
| ±6 | 18,175 | 6,0 | 5349,0 |
| ±7 | 18,951 | 7,01 | 5976,0 |
| ±8 | 20,172 | 8,01 | 6338,0 |
| ±9 | 21,422 | 9,01 | 6894,0 |
| ±10 | 22,385 | 10,01 | 7343,0 |
| $R_{13} = 0,1 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 | 12,489 | 1,01 | 5338,0 |
| ±2 | 17,636 | 2,01 | 7376,0 |
| ±3 | 21,436 | 3,0 | 8717,0 |
| ±4 | 24,630 | 4,0 | 10421,0 |
| ±5 | 27,482 | 5,0 | 11380,0 |
| ±6 | 30,438 | 6,0 | 12661,0 |
| ±7 | 33,247 | 7,0 | 12312,0 |
| ±8 | 35,034 | 8,01 | 14025,0 |
| ±9 | 37,074 | 9,01 | 15201,0 |
| ±10 | 39,832 | 10,01 | 16564,0 |
| $R_{13} = 1 \text{ (s}^\circ\text{C/J)}$ | | | |
| Difransiyel Aralık, (bw) | bw_+ ($^\circ\text{C}$) | bw_- ($^\circ\text{C}$) | Anahtarlama Periyodu, T_a (s) |
| ±1 - ±10 | Malzeme sıcaklığı difransiyel aralığa giremiyor. | Malzeme sıcaklığı difransiyel aralığa giremiyor. | > 40000 |



Şekil 4.41. Fırın-3'ün aç-kapa denetim organı ile kontrolü sırasında sistem düzenli rejime girdikten sonra elde edilen anahtarlama periyotları ($bw = 1-10$, $R_{13} = 0,01$ ve $0,1$).

arttırıldığında bir değerden sonra anahtarlama zamanları da elde edilememektedir. Çizelgede yer alan değerler kullanılarak elde edilen Şekil 4.41'de de görüldüğü gibi R_{13} değerinin artması aynı bw değerinde anahtarlama zamanlarının artmasına dolayısıyla malzemenin daha geç soğuyup daha geç ısınmasına yol açmaktadır. Bu direncin değeri daha da büyüdüğünde malzeme ısınsa bile dış yalıtımın da etkisiyle tekrardan soğuyamamakta ve aç-kapa denetim organıyla sistemin kontrolü yapılamamaktadır.

Fırın-3'de iyileştirilmiş dış yalıtım dolayısıyla enerji kayıpları tüm durumlar için Fırın-1 ve Fırın-2'ye oranla daha azdır. Enerji kayıplarının azalması güç kaynağının daha uzun süre kapalı konumda kalmasını dolayısıyla fırına sağlanması gereken ortalama güç değerinin de azalmasını sağlamaktadır.

5. *P*, *PI* VE *PID* KONTROL İŞLEMLERİ KULLANARAK MALZEME SICAKLIĞININ KONTROLÜ

PID kontrolcüler endüstriyel uygulamalarda yaygın biçimde kullanılır. Bu kontrolcüler kullanıcının isteğine göre *P* (oransal), *PI* (oransal + integral), *I* (integral), *PD* (oransal + türevsel) veya *PID* (oransal + integral + türevsel) kontrol işlemlerinden birini uygulayabilir. Bu kontrolcülerde sistem çıkış değişkeninin değeri arzu edilen referans değerinden çıkarılarak hata miktarı bulunur; bu hataya yukarıda belirtilen kontrol işlemlerinden biri uygulanarak kontrol girişi elde edilir. Elektrikli fırınlarda kullanılan modern *PID* kontrolcüler sayısal ortamda çalışan cihazlardır. Bu kontrolcülerde kontrol işlemi sonucunda elektrikli fırına verilmesi gereken elektrik geriliminin değeri, sabit bir gerilim değerine (220 V veya 380 V) puls genişliği modülasyonu uygulayarak bir ortalama değer olarak elde edilir.

Şekil 5.1’de *PID* kontrolcünün kullanıldığı bir elektrik fırınının blok diyagramı görülmektedir. Diyagramda kontrolcünün transfer fonksiyonu $G_c(s)$ ile gösterilmiştir. Bu tezde incelenecek olan *P*, *PI* ve *PID* kontrol işlemleri için $G_c(s)$ ifadeleri aşağıdaki gibidir [34, 35].

P-kontrol:

$$G_c(s) = K_p \quad (5.1)$$

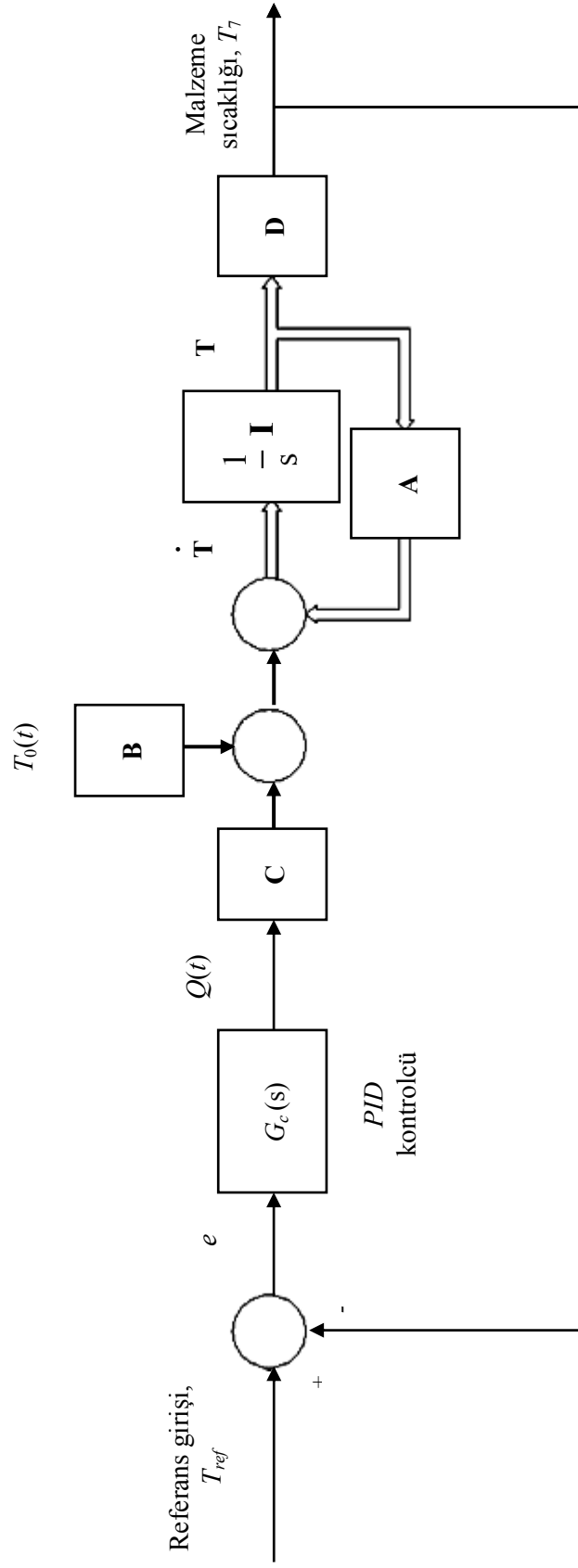
K_p : Oransal kazanç

PI-kontrol:

$$G_c(s) = K_p \left(\frac{1}{T_i s} \right) \quad (5.2)$$

K_p : Oransal kazanç

T_i : İntegral zaman sabiti



Not: Çift çizgili kollar değişkenlerin oluşturduğu matrisleri göstermektedir.

Şekil 5.1. *PID* kontrol işlemi ile kontrol edilen sistemin blok diyagramı.

PID-kontrol:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5.3)$$

K_p : Oransal kazanç

T_i : İntegral zaman sabiti

T_d : Türev zaman sabiti

Tezin bu bölümünde daha önce kabul edilen fırın modeli esas alınarak tanımlanan örnek fırınlara yukarıdaki kontrol işlemleri uygulanacak; bu işlemler sonucunda elde edilecek sistemlerin kontrol doğrulukları ve dinamik davranış özellikleri incelenecektir. Bölüm 2’de oluşturulan fırın modeline *PID* kontrolü uygulandığında ortaya çıkacak sistem davranışını incelemek amacıyla MATLAB ortamında bir program yazılmıştır. Program *P*, *PI*, *PD*, *PID* kontrol işlemlerini uygulayabilen ortak bir programdır. Programda integral zaman sabitinin (T_i) değerini çok büyük alarak integral işlemi; türevsel zaman sabitinin (T_d) değerini sıfır alarak türevsel işlemi etkisiz hale getirmek ve değişik kontrol işlemi kombinasyonlarını elde etmek mümkün olabilmektedir. Bu program esas itibarıyla Bölüm 2’de verilen denklemleri kullanmaktadır. Ancak nümerik ortamda simülasyonlar yapılırken gerçek bir fırında karşılaşılan aşağıdaki sınırlamalar uygulanmıştır:

- i. Sisteme sağlanan elektrik geriliminin maksimum değeri $V_{mak} = 220$ V’dur. Dolayısıyla fırına sağlanabilecek maksimum ısı gücü;

$$Q(t)_{mak1} = \frac{V_{mak}^2}{R_r} \quad (5.4)$$

denklemleri ile tanımlanır. İncelenen örnek fırınlarda bu değer 12 kW olarak alınmıştır.

- ii. Kanthal APM rezistans telinin ulaşabileceği maksimum sıcaklık değeri 1100 °C ile sınırlandırılmıştır. Rezistans telinin ulaşabileceği maksimum sıcaklık (T_{11mak}) değeri göz önüne alınarak Bölüm 2’de elde edilen denklemlerden

fırına sağlanabilecek maksimum güç için ikinci bir kısıtlayıcı değer aşağıdaki gibi elde edilir:

$$Q(t)_{mak2} = \frac{R_6+R_7}{R_6R_7} T_{11mak} - \frac{1}{R_6} T_3 - \frac{1}{R_7} T_4 \quad (5.5)$$

- iii. Herhangi bir anda sisteme sağlanan ısı güç $Q(t)_{mak1}$ ve $Q(t)_{mak2}$ değerlerinin her ikisinden de küçük olmak zorundadır. Eğer kontrolcü tarafından hesaplanan ısı güç bunların birinden ya da her ikisinden daha büyükse, küçük olanının değerine eşitlenir.

Bu bölümde örnek olarak seçilen Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de *PID* kontrolcü ile yapılan çalışmalar, simulasyon sayısını sınırlamak için sadece $R_{13} = 0,1$ için yapılacak ve sonuçlar performans kartlarıyla sunulacaktır. Fırın-1 temel örnek fırın olduğundan bu fırın için elde edilen sonuçlar ve değişik durumlar için elde edilen malzeme sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi her bir kontrol işlemi için grafikler halinde de verilmiştir.

5.1. Oransal (*P*) Kontrol İle Malzeme Sıcaklığının Kontrolü

Fırın-1 için *P*-kontrol uygulamasının sonuçları Çizelge 5.1.(a) ve Çizelge 5.1.(b)'de verilmiştir. Bu çizelgeler incelendiğinde, $K_p = 50$ değeri için aşma olmadığı, $K_p = 85$ değerinden sonra denenen tüm K_p değerlerinde tepe sıcaklıklarının arttığı, $K_p = 500$ değerinde tepe zamanının azaldığı ve bu değerden sonra denenen tüm K_p değerlerinde tepe zamanının arttığı görülmektedir. Yükselme zamanı K_p arttırılırken önce azalmakta, $K_p = 500, 1000, 2000$ ve 6000 değerlerinde sabit kalmaktadır. Geçit zamanı $K_p = 50$ değeri için elde edilemezken, $K_p = 2000$ ve 6000 değerlerinde sabit kalmaktadır. Gecikme zamanı; $K_p = 50$ değerinden sonra denenen K_p değerleri için sabit kalmaktadır. Oransal kazanç değeri belli bir değerin üzerine çıktığında sistem cevap hızının göstergesi olan parametrelerin sabit hale gelmesinin sebebi fırına sağlanan ısı gücün 12 kW ile sınırlı olması ve *P*-kontrolün 12 kW üzerinde hesapladığı kontrol girişi değerleri yerine bu sınır değer kullanılmasıdır. Sistemin

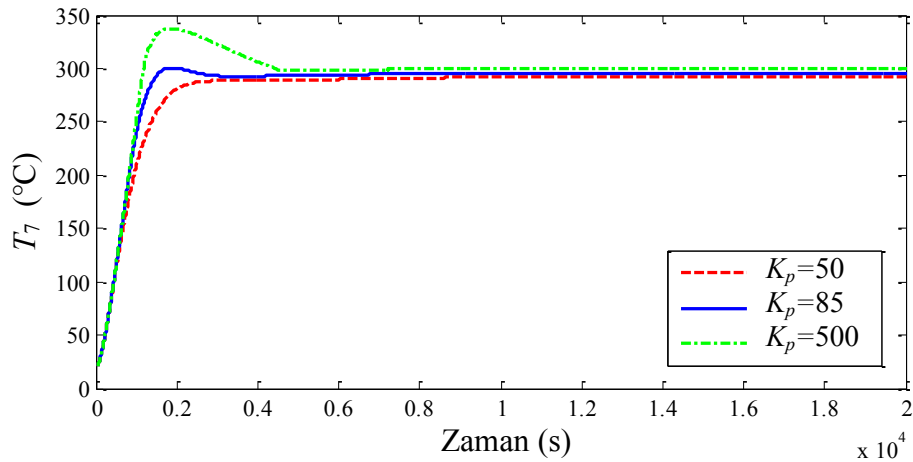
Çizelge 5.1.(a). Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|--|----------|--|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 50 | 85 | 500 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 673,8 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 1572,8 | 1083,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | Aşma yok. | 1776,4 | 1183,1 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | Aşma yok. | 1909,1 | 1888,2 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | Aşma yok. | 300,5 | 337,4 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | Aşma yok. | 0,2 | 12,5 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | Aşma yok. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | Aşma yok. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Sistem 20000 s sonunda yerleşme bandına giremiyor. | 5592,8 | 4031,7 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 17,1 | 4,24 | 0,7 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 5549 | 5676 | 5895 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 277,5 | 283,8 | 293,3 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 353,5 | 357,2 | 361,6 |

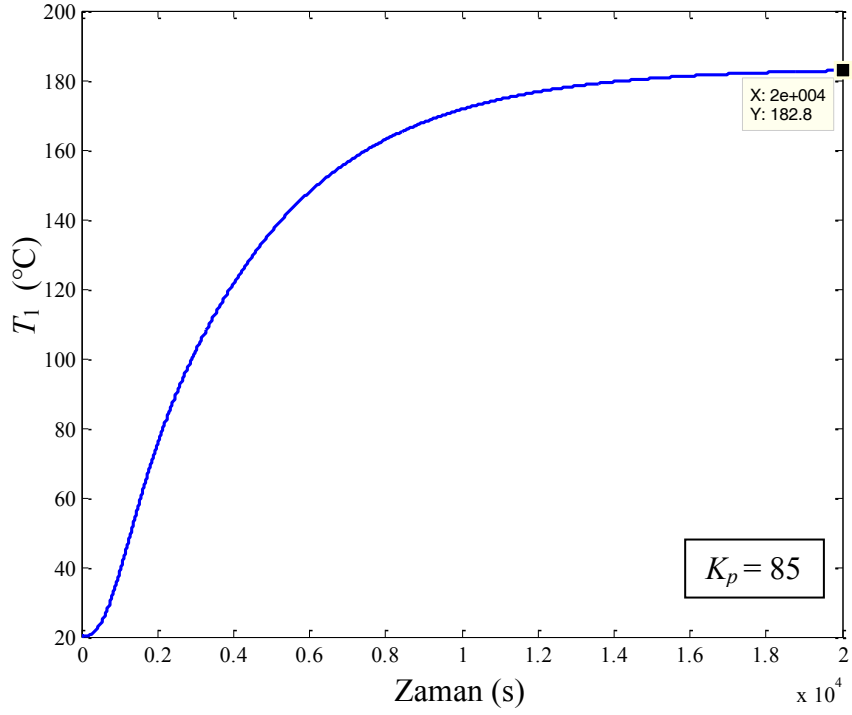
Çizelge 5.1.(b). Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|--|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 1000 | 2000 | 6000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 637,3 | 637,2 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1177,3 | 1176,1 | 1176,1 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1901,1 | 1904,8 | 1911,6 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 342,9 | 345,8 | 347,7 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 14,29 | 15,3 | 15,9 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 4371,3 | 4554,3 | 4678,7 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 0,36 | 0,18 | 0,06 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 5895 | 5911 | 5922 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 294,8 | 295,5 | 296,1 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 362,2 | 362,6 | 362,8 |

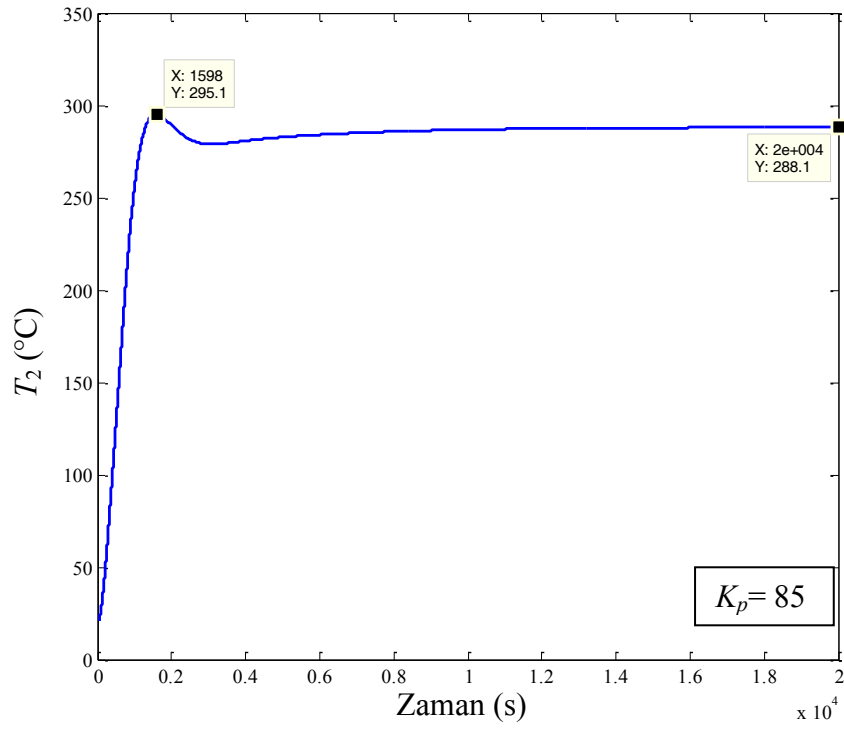
yerleşme zamanının $K_p = 500$ değerinde azalıp bu değerden sonra tekrar arttığı gözlemlenmektedir. Enerji kayıplarında çok büyük değişimler söz konusu olmamaktadır. Kalıcı hata değeri $K_p = 85$ değerinden sonra sürekli azalmaktadır. Ancak Çizelge 5.1(a,b)'deki değerlerden de anlaşıldığı gibi oransal kontrol işlemi kalıcı hatayı sıfıra indirgeyememektedir. Şekil 5.2 $K_p = 50, 85$ ve 500 değerleri için sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimini göstermektedir. İlk tepedeki en az aşma miktarı $K_p = 85$ değerinde elde edilmektedir. Bu değerde malzeme sıcaklığının %2 kriterine göre belirlenen tolerans bandı ($294\text{ °C} - 306\text{ °C}$) sınırları içerisinde kalabildiği gözlemlenmektedir. Tüm bunlar dikkate alındığında oransal kontrol için en uygun K_p değeri denenen değerler arasından 85 olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 1 saat 33 dakika, ilk tepe sıcaklığı (T_m) $300,5\text{ °C}$, tepe zamanı (t_p) $1909,1\text{ s}$, yükselme zamanı (t_r) $1083,5\text{ s}$, geçit zamanı (t_c) $1776,4\text{ s}$, gecikme zamanı (t_d) $637,3\text{ s}$, kalıcı hata (e_{ss}) $4,24\text{ °C}$ 'dir. $K_p = 85$ değeri için Fırın-1'e ait cevap eğrileri Şekil 5.3-5.12'de verilmiştir. Şekil 5.3 dış yalıtım-1 katmanında, Şekil 5.4 dış refrakter-1 katmanında, Şekil 5.5 dış refrakter-2 katmanında, Şekil 5.6 Kanthal APM direnç telinde 20000 saniye boyunca meydana



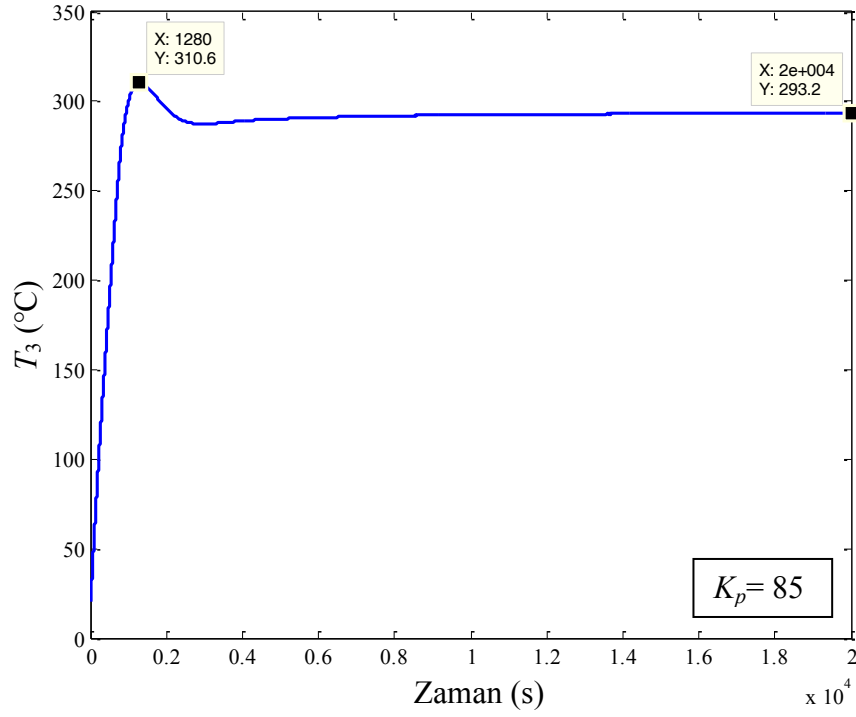
Şekil 5.2. P kontrol uygulamasında K_p 'nin değişik değerleri için Fırın-1'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



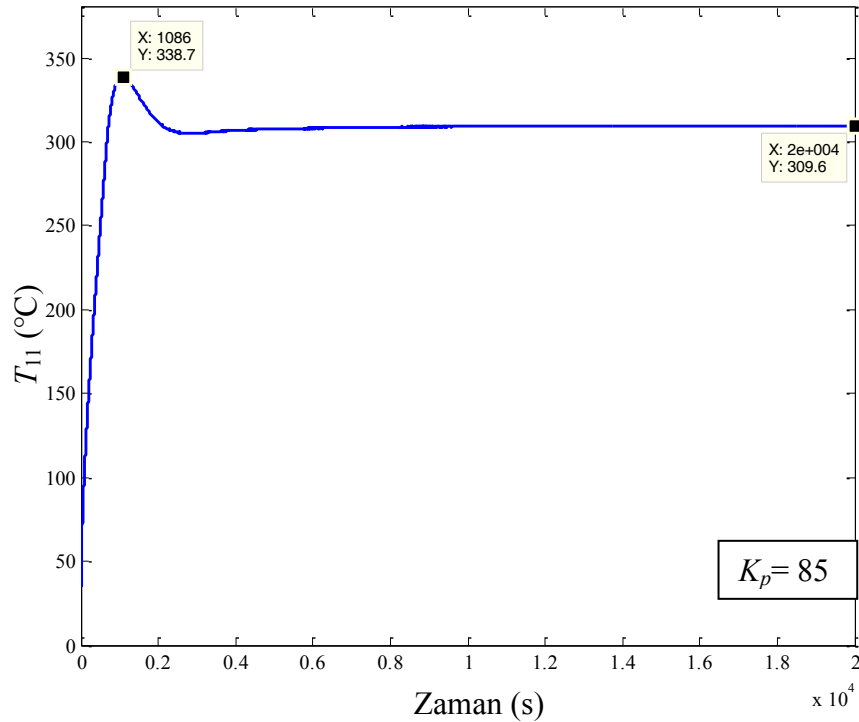
Şekil 5.3. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



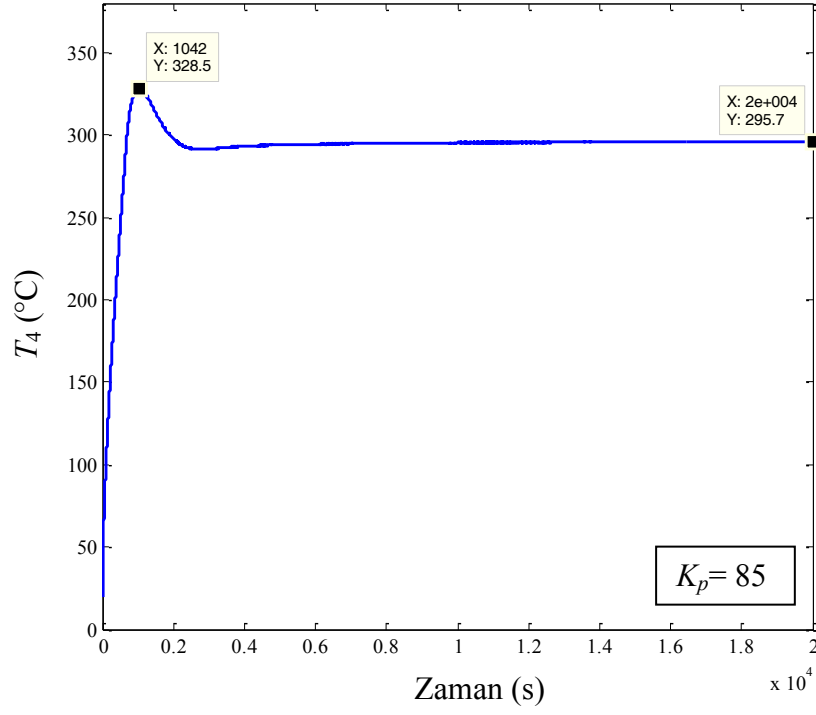
Şekil 5.4. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



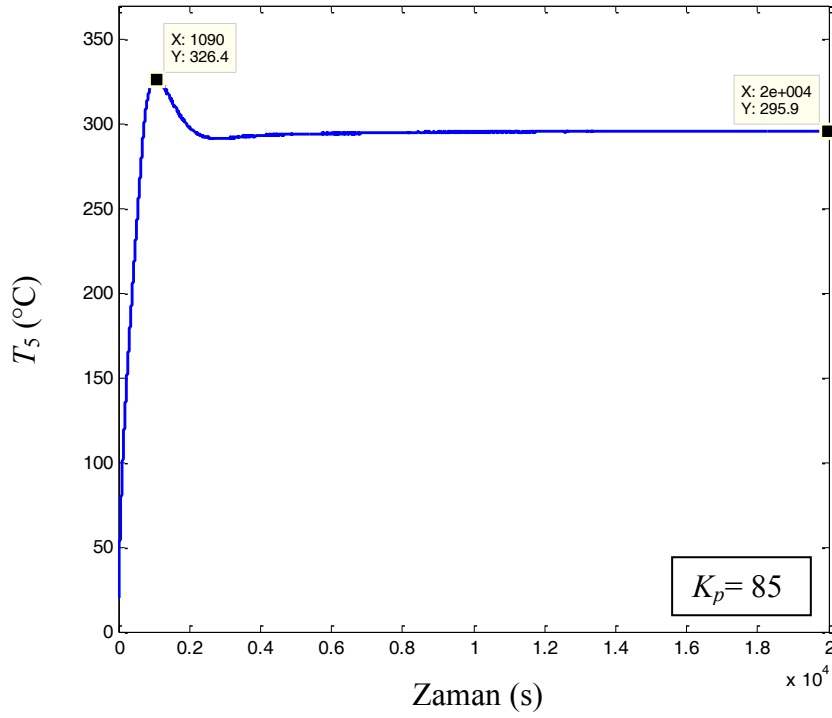
Şekil 5.5. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



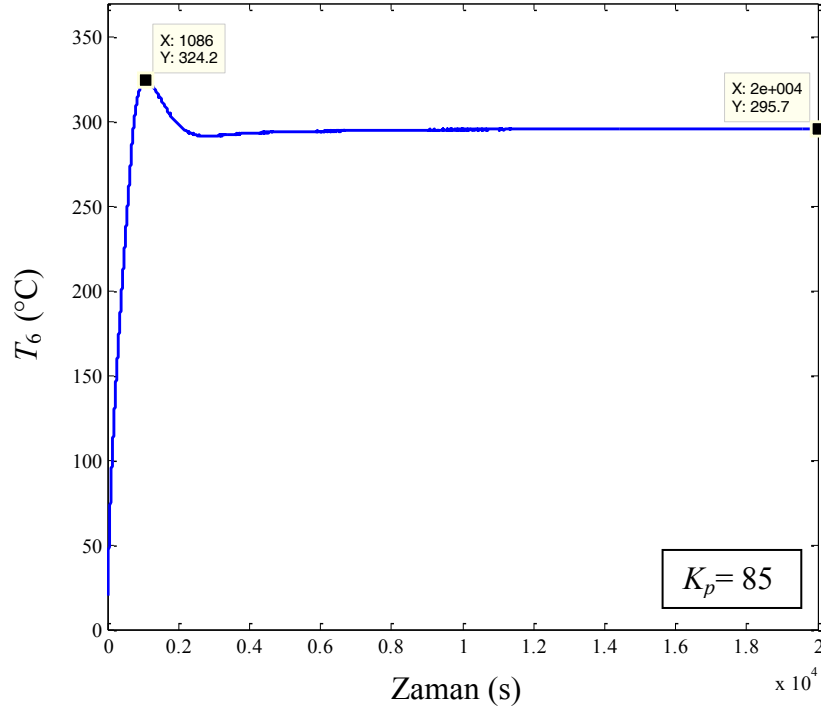
Şekil 5.6. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in Kanthal-APM rezistansında meydana gelen sıcaklık değişiminin zamana bağlı değişimi.



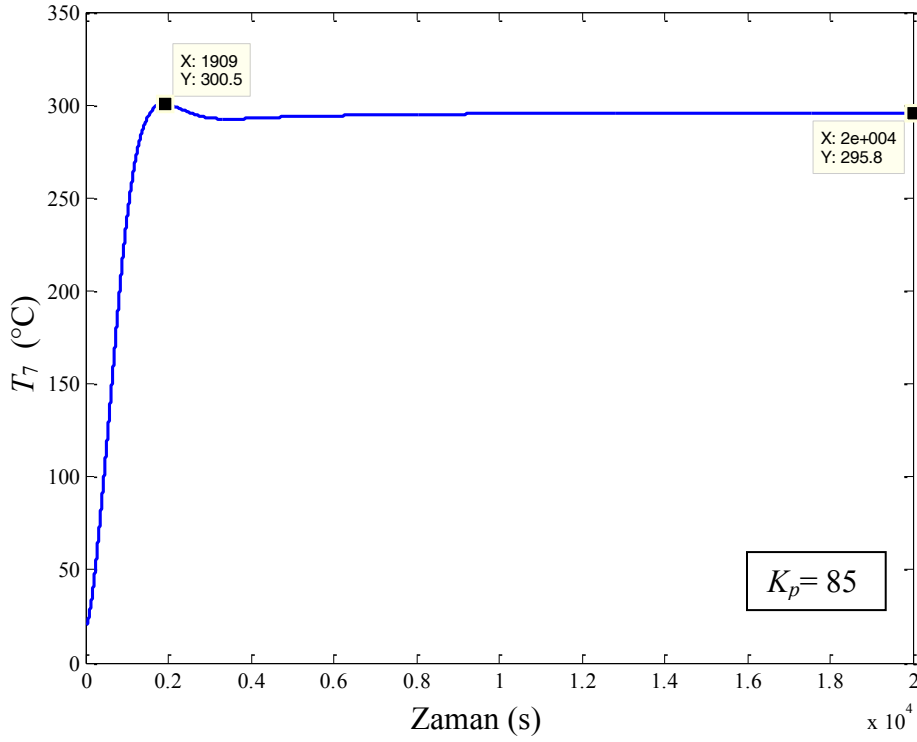
Şekil 5.7. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



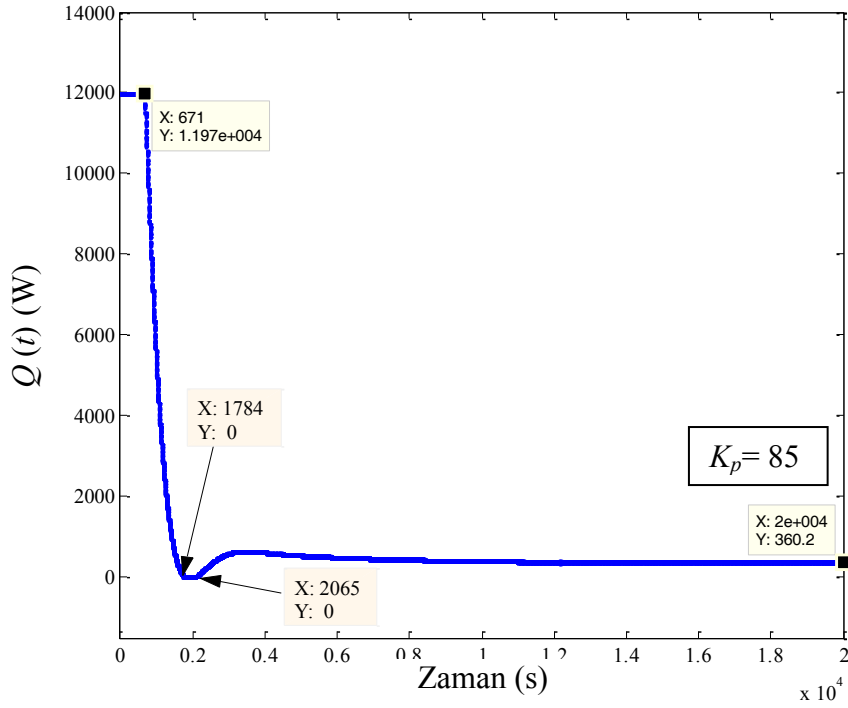
Şekil 5.8. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



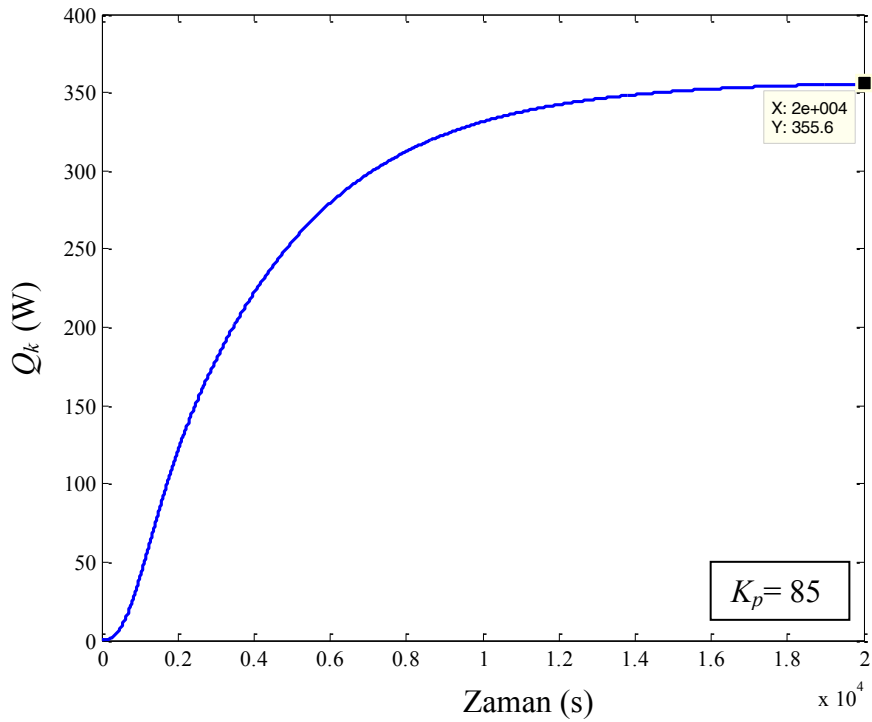
Şekil 5.9. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında Fırın-1'in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.10. Oransal (P) kontrol sırasında Fırın-1'de malzeme sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.11. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında sisteme sağlanan güç değerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.12. Malzeme sıcaklığının oransal (P) kontrolü sırasında fırın dışına olan güç kaybı.

gelen sıcaklık değişimlerini göstermektedir. Direnç telinde meydana gelen sıcaklık değişimi sisteme sağlanan ısı enerjisinin iki konumlu kontroldeki gibi 12 kW olduğu zaman zarfında maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu andaki ulaştığı maksimum sıcaklık değeri 338,7 °C'dir. Bu sıcaklığa gelme süresi 1086 saniye olup bu değer yaklaşık olarak ısı kaynağın sürekli maksimum oranda güç verdiği süreçten 7 dakika sonradır. Rezistans telindeki sıcaklığın durağan hale gelmesinden sonra elde edilen sıcaklık değeri 309,6 °C olup bu süre zarfında dış yalıtım-1 katmanının ulaştığı sıcaklık değeri 182,8 °C'dir. Şekil 5.7 iç refrakter-1, Şekil 5.8 iç refrakter-2, Şekil 5.9 iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 5.10'da malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Malzeme sıcaklığı rezistans telinin maksimum sıcaklığa eriştiği süreden 15 dakika sonra maksimum sıcaklığına erişmektedir. Şekil 5.11, 20000 saniye süresince sisteme sağlanan güç değerindeki değişimi göstermekte olup sisteme sürekli olarak tam güç verildiği yani voltajın 220 V olduğu süreç ve bu süreç için geçen süre grafik üzerinde görülmektedir. Daha sonra ısı kaynak yaklaşık olarak 5 dakika sisteme hiç güç vermemekte ve bu andan sonra da sistemin ısı dengeye gelmeye başlamasıyla sisteme gücü git gide azaltarak vermektedir. Simulasyon süresinin sonuna doğru düzenli rejime erişilmekte ve ısı kaynaktan sağlanan güç yavaş yavaş fırın dışına olan ısı güç kaybına yaklaşmaktadır (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12).

Çizelge 5.2.(a) ve Çizelge 5.2.(b)'de Fırın-2'ye ait *P*-kontrol uygulamasının sonuçları, değişik K_p değerleri için verilmiştir. Bu fırında yalıtım tuğlası katman kalınlığı Fırın-1'dekinin dörtte biri kadar olduğundan enerji kayıplarının Fırın-1'e oranla yaklaşık olarak üç kat daha arttığı, bununla beraber ilk tepe sıcaklığının ve tepe zamanının azaldığı görülmektedir. Dışarıya olan enerji kayıplarının artmasıyla sistemin yükselme, geçit ve gecikme zamanları bir miktar artmaktadır. Sistemin yerleşme bandına girmesi için gerekli olan süre ise Fırın-1'e göre kısalmıştır. $K_p = 50$ ve $K_p = 85$ değerlerinde tepe olmadığı, $K_p = 104$ değerinden sonra denenen tüm K_p değerlerinde tepe sıcaklıklarının ve tepe zamanlarının arttığı görülmektedir. Yükselme zamanı $K_p = 1000$ değerine kadar sürekli azalmakta, $K_p = 1000, 4000$ ve 8000 değerlerinde değişmemektedir. Geçit zamanı $K_p = 50$ ve $K_p = 85$ değerleri için

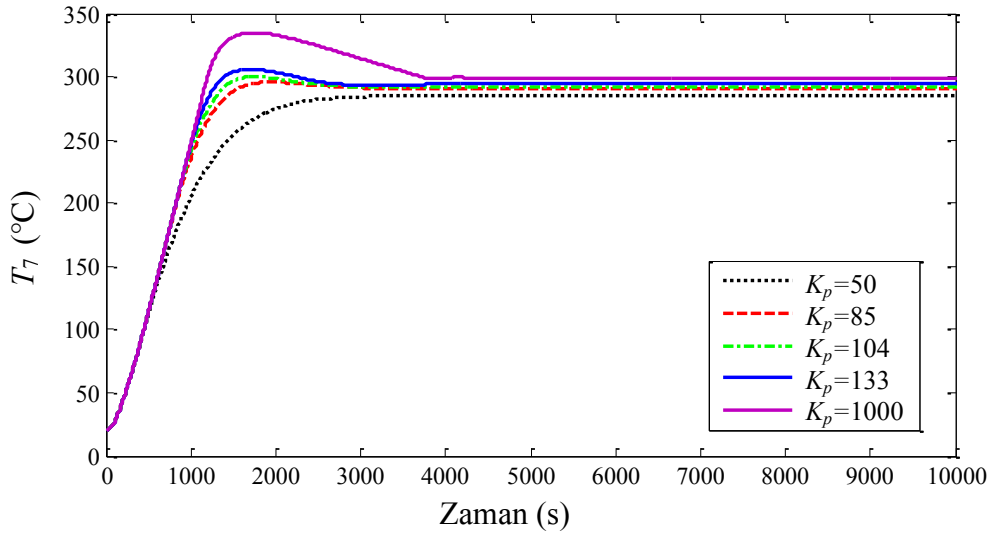
Çizelge 5.2.(a). Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | |
|--|----------|--|--|--|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 50 | 85 | 104 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 678,0 | 640,1 | 640,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 1723,6 | 1119,4 | 1044 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | Aşma yok. | Aşma yok. | 1734,2 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | Aşma yok. | Aşma yok. | 1760,5 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | Aşma yok. | Aşma yok. | 300,0 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | Aşma yok. | Aşma yok. | 0,01 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | Aşma yok. | Aşma yok. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | Aşma yok. | Aşma yok. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Sistem 20000 s sonunda yerleşme bandına giremiyor. | Sistem 20000 s sonunda yerleşme bandına giremiyor. | Sistem 20000 s sonunda yerleşme bandına giremiyor. |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 15,4 | 9,3 | 7,6 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 14640 | 14640 | 15200 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 732 | 732 | 760 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 770,4 | 788,3 | 793,1 |

Çizelge 5.2.(b). Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | | |
|---|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 133 | 1000 | 4000 | 8000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 640,1 | 640,1 | 640,1 | 640,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 996,1 | 961,1 | 961,1 | 961,1 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1398,8 | 1196,3 | 1194,8 | 1194,8 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1707,5 | 1750,3 | 1764,7 | 1764,6 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 305,7 | 334,8 | 339,1 | 339,8 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 1,9 | 11,6 | 13,0 | 13,3 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 3933,6 | 3419,7 | 3620,8 | 3656,1 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 6,0 | 0,8 | 0,2 | 0,06 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 15300 | 15720 | 15780 | 15790 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 765 | 786 | 789 | 789,5 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 797,8 | 812,6 | 815,7 | 914,1 |

elde edilemezken, $K_p = 4000$ ve 8000 değerlerinde aynı olmaktadır. Gecikme zamanı; $K_p = 50$ değerinden büyük K_p değerleri için değişmemektedir. Sistemin yerleşme zamanı $K_p = 50, 85$ ve 104 değerlerinde elde edilememekte $K_p = 1000$ değerinde $K_p = 133$ değerine oranla azalmakta, $K_p = 4000$ ve $K_p = 8000$ değerlerinde ise $K_p = 1000$ değerine oranla artmaktadır. Enerji kayıplarında çok büyük değişimler söz konusu olmamaktadır. Kalıcı hata değeri $K_p = 133$ değerinden sonra sürekli azalmaktadır. Şekil 5.13 $K_p = 50, 85, 104, 133$ ve 1000 değerleri için sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimini göstermektedir. En az aşma miktarı $K_p = 104$ değerinde elde edilmektedir. Fakat bu değerde malzeme sıcaklığının %2 kriterine göre belirlenen tolerans bandı ($294\text{ °C} - 306\text{ °C}$) sınırları içerisinde kalamadığı gözlemlenmektedir. Bu değerden sonra en az aşma miktarı $K_p = 133$ değerinde elde edilmekte ve bu değerden sonraki K_p değerleri için aşma miktarı referans sıcaklığının yaklaşık 40 °C üzerinde olmaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında oransal kontrol için en uygun K_p değeri denenen değerler arasından 133 olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 1 saat 5 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) $305,7\text{ °C}$, tepe zamanı (t_p) $1707,5\text{ s}$, yükselme zamanı (t_r) $996,1\text{ s}$, geçit zamanı (t_c) $1398,3\text{ s}$, gecikme zamanı (t_d) $640,1\text{ s}$, kalıcı hata (e_{ss}) $6,0\text{ °C}$ 'dir.



Şekil 5.13. P kontrol uygulamasında K_p 'nin değişik değerleri için Fırın-2'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

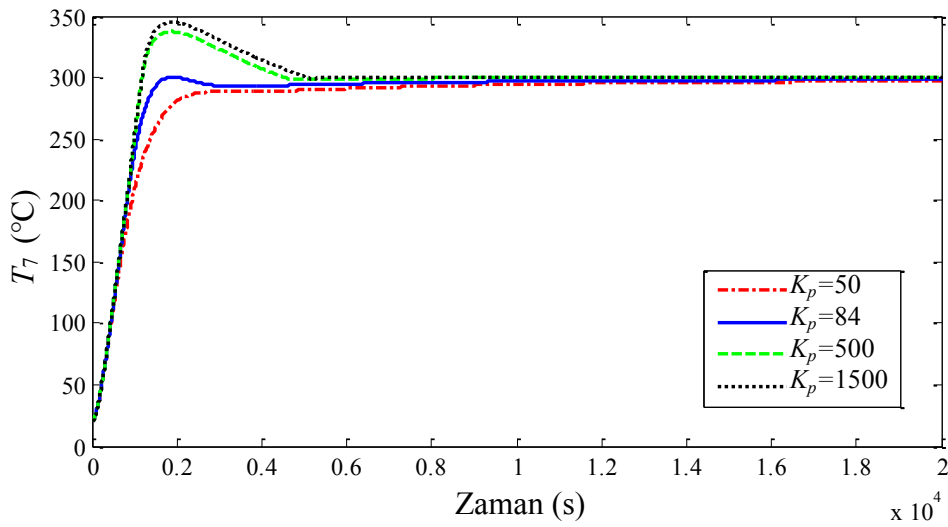
Çizelge 5.3.(a). Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | | |
|--|--------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 50 | 84 | 500 | 1500 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | ($s^{\circ}C/J$) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | ($J/^{\circ}C$) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | ($^{\circ}C$) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 673,8 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 1572,4 | 1088,5 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | Aşma yok. | 1817,7 | 1183,1 | 1176,4 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | Aşma yok. | 1922,2 | 1888,2 | 1904,2 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | ($^{\circ}C$) | Aşma yok. | 300,3 | 337,4 | 344,8 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | Aşma yok. | 0,1 | 12,5 | 14,9 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | ($^{\circ}C$) | Aşma yok. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | Aşma yok. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Sistem 20000 s sonunda yerleşme bandına giremiyor. | 4849,5 | 4102,7 | 4609,2 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | ($^{\circ}C$) | 3,0 | 1,7 | 0,28 | 0,09 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 2372 | 2388 | 2410 | 2414 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 118,6 | 119,4 | 120,5 | 120,7 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 122,2 | 122,6 | 123,0 | 123,0 |

Çizelge 5.3.(b). Oransal (P) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | | |
|--|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 6000 | 7000 | 8000 | 8500 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1176,0 | 1176,000 | 1176,000 | 1176,0 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1913,5 | 1910,900 | 1910,400 | 1917,4 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 347,7 | 348,0 | 348,0 | 348,0 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 15,9 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 4815,700 | 4830,100 | 4832,200 | 4836,100 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 0,022 | 0,016 | 0,009 | 0,013 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 2414 | 2414 | 2414 | 2414 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 120,7 | 120,7 | 120,7 | 120,7 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 123,3 | 122,4 | 122,6 | 122,9 |

Çizelge 5.3.(a) ve Çizelge 5.3.(b) Fırın-3'e P kontrol uygulandığında değişik K_p değerleri için elde edilen sonuçları içermektedir. Bu fırında yalıtım tuğlasına ek olarak fırın dışında bir de yalıtım katmanı olduğundan dışarıya olan enerji kayıpları Fırın-1'in kayıplarının yaklaşık % 42'si, Fırın-2'in kayıplarının yaklaşık % 16'sı kadardır. $K_p = 50$ değerinde aşma olmadığı, $K_p = 84$ değerinden sonra denenen tüm K_p değerlerinde tepe sıcaklıklarının arttığı, tepe zamanlarının ise değişken özellik gösterdiği görülmektedir. Yükselme zamanı $K_p = 500$ değerine kadar sürekli azalmakta, $K_p = 500, 1500, 6000, 7000, 8000$ ve 8500 değerlerinde değişmemektedir. Geçit ve gecikme zamanları Fırın-1'e oranla azalmaktadır. Geçit zamanı $K_p = 50$ değeri için elde edilemezken, $K_p = 1500$ değerinden sonra değişmemektedir. Gecikme zamanı; $K_p = 50$ değerinden sonra denenen K_p değerleri için aynı olmaktadır. Sistemin yerleşme zamanı $K_p = 50$ değerinde elde edilememekte $K_p = 500$ değerinde $K_p = 84$ değerine oranla azalmakta, $K_p = 1500, 6000, 7000, 8000$ ve 8500 değerlerinde ise $K_p = 500$ değerine oranla artmaktadır. Enerji kayıplarında çok büyük değişimler olmamaktadır. Kalıcı hata değeri $K_p = 84$ değerinden sonra sürekli azalmaktadır. Şekil 5.14 $K_p = 50, 84, 500$ ve 1500 değerleri için sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimini göstermektedir. En az aşma miktarı $K_p = 84$ değerinde elde edilmektedir. Bu değerde malzeme sıcaklığı %2 kriterine göre



Şekil 5.14. P kontrol uygulamasında K_p 'nin değişik değerleri için Fırın-3'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

belirlenen tolerans bandı (294 °C - 306 °C) sınırları içerisinde kalmaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında oransal kontrol için en uygun K_p değeri denenen değerler arasından 84 olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 1 saat 20 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 300,3 °C, tepe zamanı (t_p) 1922,2 s, yükselme zamanı (t_r) 1572,4 s, geçit zamanı (t_c) 1817,7 s, gecikme zamanı (t_d) 637,3 s, kalıcı hata (e_{ss}) 1,72 °C'dir.

5.2. Oransal+İntegral (PI) Kontrol ile Malzeme Sıcaklığının Kontrolü

Fırın-1 için PI-kontrol uygulamasının sonuçları Çizelge 5.4.(a), Çizelge 5.4.(b) ve Çizelge 5.4.(c)'de verilmiştir. Çizelge 5.4.(a) $K_p = 85$ değeri ile, Çizelge 5.4.(b) $K_p = 2000$ değeri ile, Çizelge 5.4.(c) $K_p = 6000$ değeri ile denenen farklı T_i değerleri için elde edilen sonuçları içermektedir. Bu çizelgeler incelendiğinde, K_p değerleri sabit kalmak koşuluyla artan T_i değerleriyle beraber tepe sıcaklığının ve tepe zamanının azaldığı görülmektedir. Buna karşın oransal kontrolde $K_p = 85$ değeri için tepe zamanı ve sıcaklık değeri daha küçük olmaktadır. Yükselme zamanı $K_p = 85$ ve $T_i = 2500$ durumunda diğer K_p ve T_i kombinasyonlarına nazaran daha küçük bir değere ulaşmaktadır. $K_p = 85$ ile denenen diğer T_i değerleri için yükselme zamanı değişmemekte ve bu değer $K_p = 2000$ ve $T_i = 4000$, $K_p = 2000$ ve $T_i = 6000$, $K_p = 6000$ ve tüm T_i değerleri için aynı kalmaktadır. Gecikme zamanları, yerleşme zamanının elde edildiği K_p ve T_i değerlerinde değişmezken, geçit zamanı $K_p = 85$ ve $T_i = 5000$ için en büyük değerini almaktadır. Yerleşme zamanları göz önüne alındığında; denenen diğer T_i değerleriyle elde edilen sonuçlara nazaran $K_p = 85$ ve $T_i = 2500$ değerinde elde edilen sonuçlarda ciddi bir iyileşme görülmekte, buna karşılık yerleşme zamanının oransal kontrole oranla kötüleştiği görülmektedir. Kalıcı hata $K_p = 85$ ve $T_i = 1000$, $K_p = 85$ ve $T_i = 2500$ durumlarında simulasyon süresi içinde sıfır olmakta, diğer durumlarda ise sıfıra çok yaklaşmaktadır. Oransal kontrole benzer olarak sisteme sağlanan ısı güç ve sistemden dışarıya olan kayıplar K_p ve T_i değerlerinin değişiminden çok fazla etkilenmemektedir. Şekil 5.15'de $K_p = 85$ ve T_i 'nin 5 farklı değeri için, Şekil 5.16'da $K_p = 2000$ ve T_i 'nin 5 farklı değeri için, Şekil 5.17'de $K_p = 6000$ ve T_i 'nin 5 farklı değeri için sistem çıkışı olan malzeme

Çizelge 5.4.(a). Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-1 İçin elde edilen performans değerlendirme kartı.

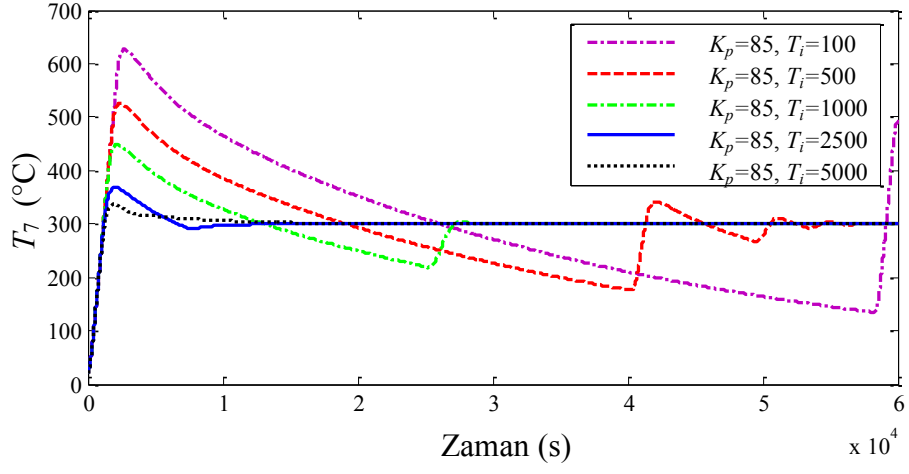
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | | | |
|--|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 100 | 500 | 1000 | 2500 | 5000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 20000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 585,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 951,2 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1201,7 | 1285,7 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2738,7 | 2425,1 | 2224,1 | 2054,0 | 1997,4 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 626,5 | 525,2 | 448,4 | 368,6 | 336,3 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 108,8 | 75,1 | 49,5 | 22,3 | 12,1 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Yerleşme bandına giremiyor. | 53835 | 26955 | 8642,6 | 10112 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 0,22 | 0 | 0 | 0,009 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 21672 | 21762 | 21762 | 21762 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 361,2 | 362,7 | 362,7 | 362,7 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 377,2 | 362,7 | 362,7 | 362,7 |

Çizelge 5.4.(b). Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-1 İçin elde edilen performans değerlendirme kartı.

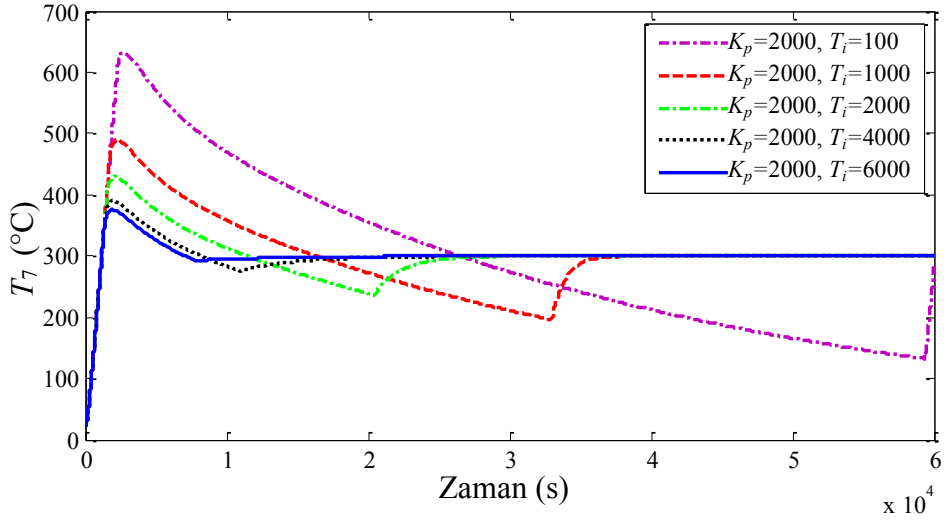
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | | | |
|--|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 100 | 1000 | 2000 | 4000 | 6000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 594,6 | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 1176,0 | 1176,0 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2756,1 | 2309,2 | 2138,0 | 2023,1 | 1987,1 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 632,2 | 489,0 | 429,6 | 390,0 | 375,5 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 110,7 | 63,0 | 43,2 | 30,0 | 25,2 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Yerleşme bandına giremiyor. | 35776 | 25106 | 16545 | 9189,4 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 0,0009 | 0,0009 | 0,001 | 0,002 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 21756 | 21762 | 21762 | 21762 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 362,6 | 362,7 | 362,7 | 362,7 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 363,1 | 362,7 | 363,0 | 362,9 |

Çizelge 5.4.(c). Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-1 İçin elde edilen performans değerlendirme kartı.

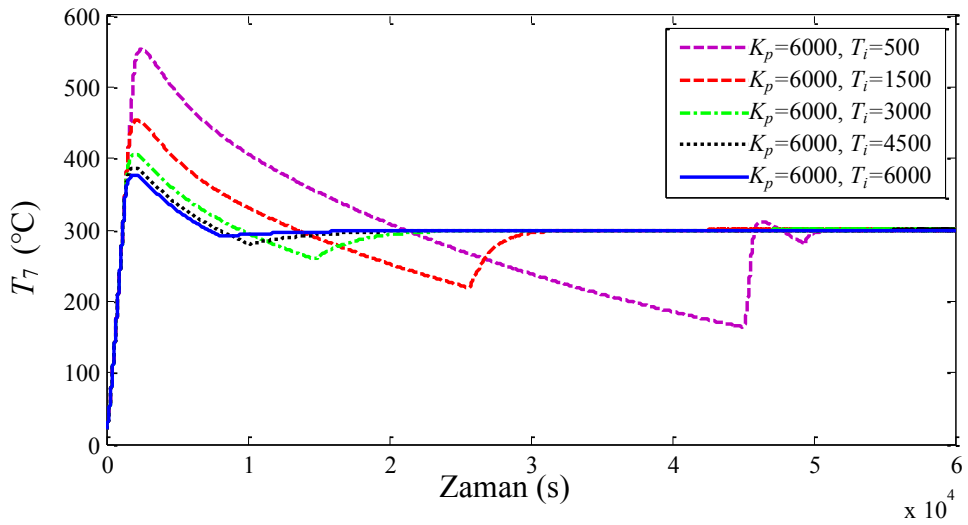
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | | | |
|--|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 500 | 1500 | 3000 | 4500 | 6000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,295 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2498,6 | 2209,8 | 2071,2 | 2018,0 | 1989,1 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 552,3 | 453,9 | 405,7 | 387,1 | 377,4 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 84,41 | 51,3 | 35,0 | 29,0 | 25,6 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Yerleşme bandına giremiyor. | 29618 | 20508 | 15636 | 10459 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 0,009 | 0,0002 | 0,0004 | 0,0007 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 21762 | 21762 | 21762 | 21762 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 362,7 | 362,7 | 362,7 | 362,7 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 361,9 | 361,9 | 361,9 | 361,9 |



Şekil 5.15. *PI* kontrol ile Fırın-1’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



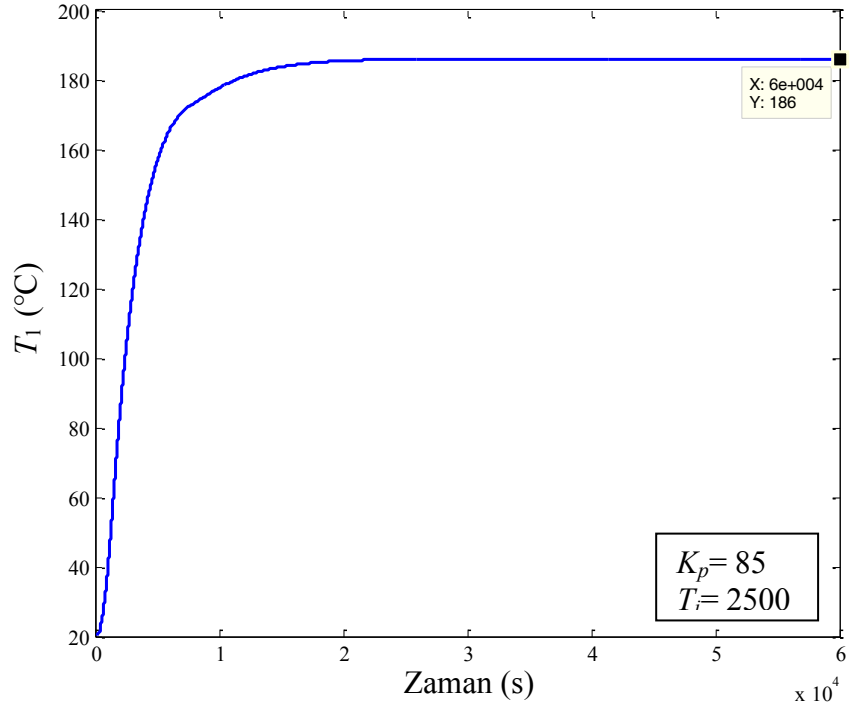
Şekil 5.16. *PI* kontrol ile Fırın-1’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



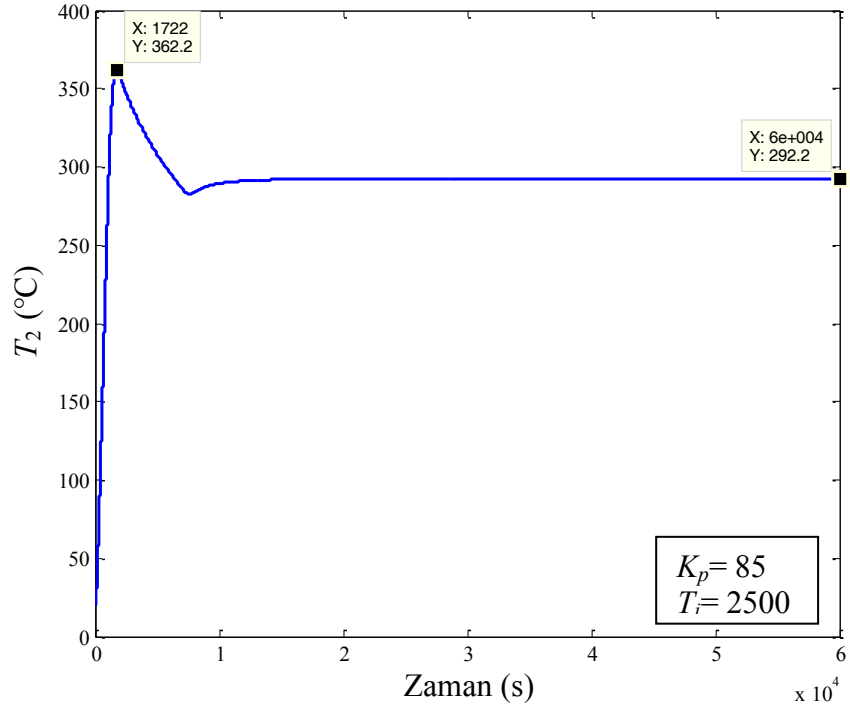
Şekil 5.17. *PI* kontrol ile Fırın-1’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

sıcaklığının zamana bağlı değişimi verilmektedir. Grafikler incelendiğinde en az aşma miktarı $K_p = 85$ ve $T_i = 5000$ değerinde görülmektedir. Bu değerden sonra en az aşma miktarı $K_p = 85$ ve $T_i = 2500$ değerinde elde edilmiştir. $T_i = 2500$ değerinde yerleşme zamanı, $T_i = 5000$ durumuna nazaran yaklaşık olarak 25 dakika daha kısa olmaktadır. Bu değerde malzeme sıcaklığının %2 kriterine göre belirlenen tolerans bandı (294 °C - 306 °C) sınırları içerisinde kalabildiği gözlemlenmektedir. Tüm bunlar dikkate alındığında, denenen değerler arasından, PI kontrol için en uygun K_p değeri 85, en uygun T_i değeri ise 2500 olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 2 saat 54 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 368,6 °C, tepe zamanı (t_p) 2054 s, yükselme zamanı (t_r) 951,2 s, geçit zamanı (t_c) 1201,7 s, gecikme zamanı (t_d) 637,3 s, kalıcı hata (e_{ss}) 0 °C'dir.

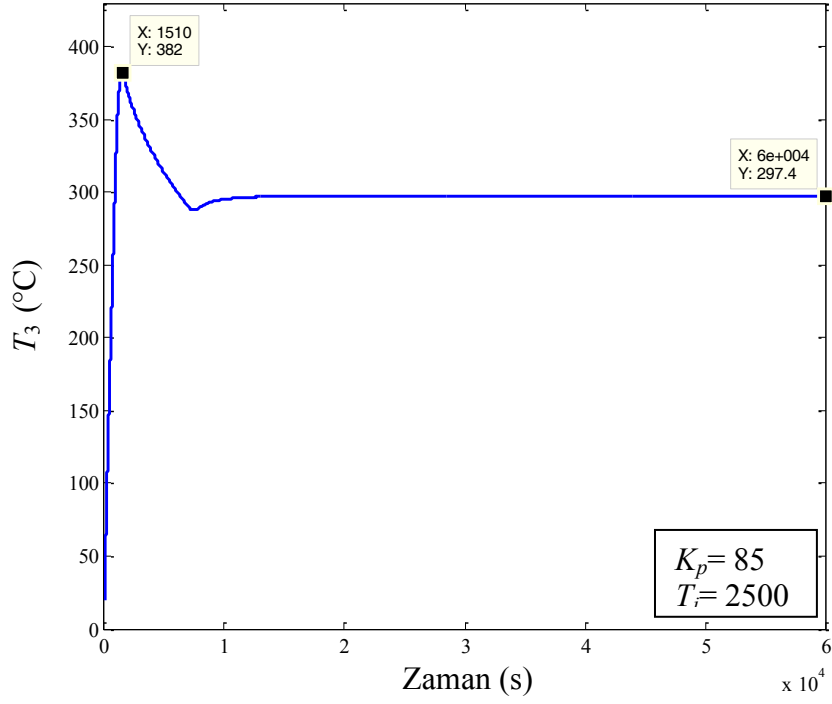
$K_p = 85$ ve $T_i = 2500$ değeri için Fırın-1'e ait cevap eğrileri Şekil 5.18-5.27'de verilmiştir. Şekil 5.18 dış yalıtım-1 katmanında, Şekil 5.19 dış refrakter-1 katmanında, Şekil 5.20 dış refrakter-2 katmanında, Şekil 5.21 Kanthal APM direnç telinde 20000 saniye süresince meydana gelen sıcaklık değişimlerini göstermektedir. Direnç telinde meydana gelen sıcaklık değişimi sisteme sağlanan ısıl enerjinin iki konumlu kontroldeki gibi 12 kW olduğu zaman zarfında maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu andaki ulaştığı maksimum sıcaklık değeri 407 °C olup P kontrolde elde edilen değerinden 67 °C fazladır. Bu sıcaklığa ulaşma süresi 1292 saniye ve P kontroldeki süreden 206 s sonradır. Bu değer ısıl kaynağın sürekli maksimum oranda güç verdiği süreçten 6 dakika sonradır. Isıl kaynak 2025- 7210 s arasında sisteme güç vermemektedir. Bu andan sonra ise sisteme sağlanan güç değeri 362,7 W olup, sistemden dışarıya olan enerji kaçaklarıyla aynı değere sahiptir. Dolayısıyla bu andan sonra ısıl kaynak sadece ısıl kaçakları karşılamak için sisteme güç vermeye başlamıştır. Rezistans telindeki sıcaklığın durağan hale gelmesinden sonra elde edilen sıcaklık değeri 300 °C olup bu süre zarfında dış yalıtım-1 katmanının ulaştığı sıcaklık değeri 186 °C'dir. Şekil 5.22 iç refrakter-1, Şekil 5.23 iç refrakter-2, Şekil 5.24 iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi göstermektedir. Şekil 5.25'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Malzeme



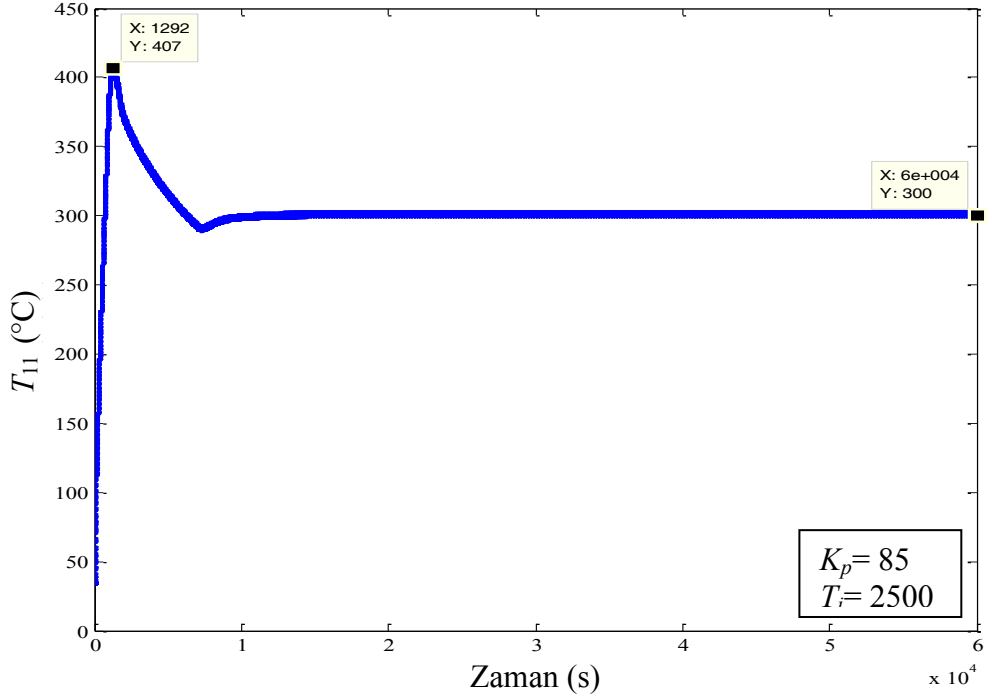
Şekil 5.18. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



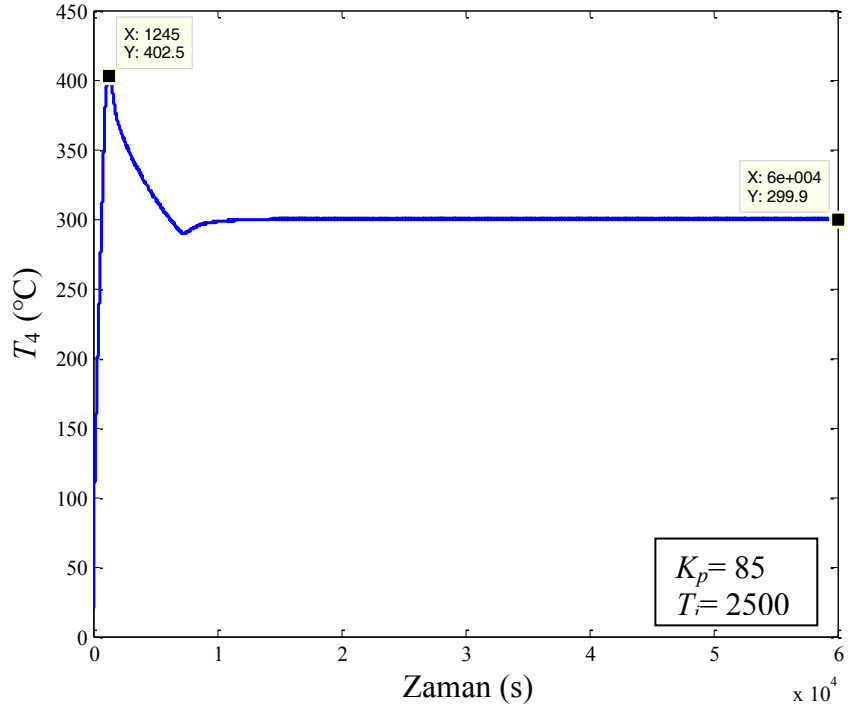
Şekil 5.19. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



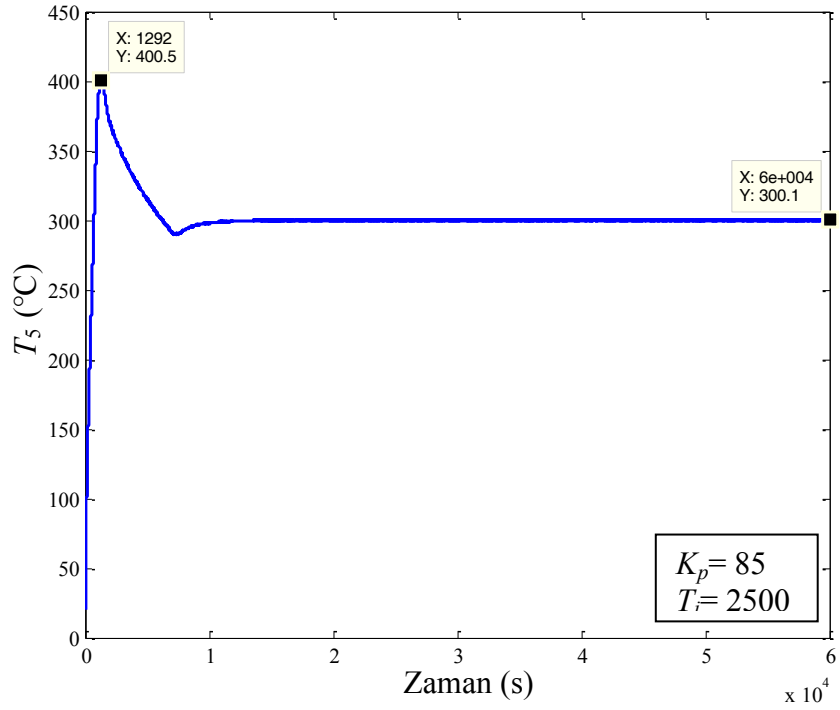
Şekil 5.20. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



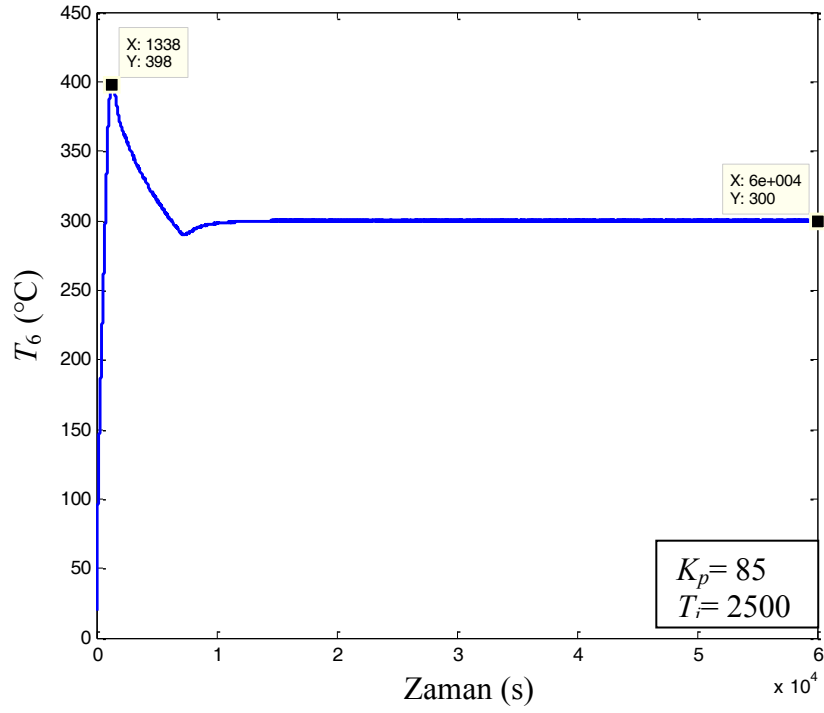
Şekil 5.21. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'in Kanthal-APM rezistansında meydana gelen sıcaklık değişiminin zamana bağlı gösterimi.



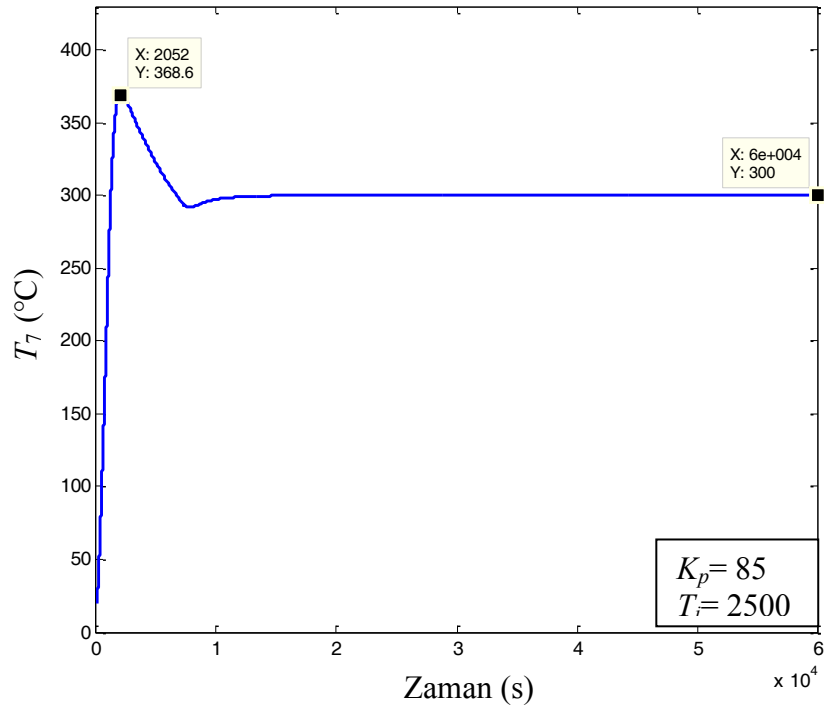
Şekil 5.22. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



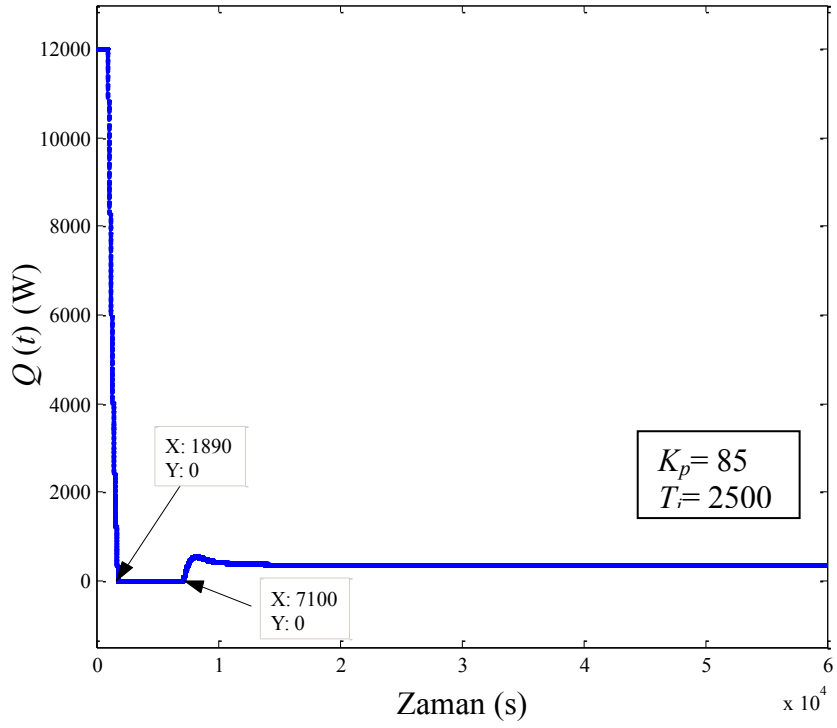
Şekil 5.23. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



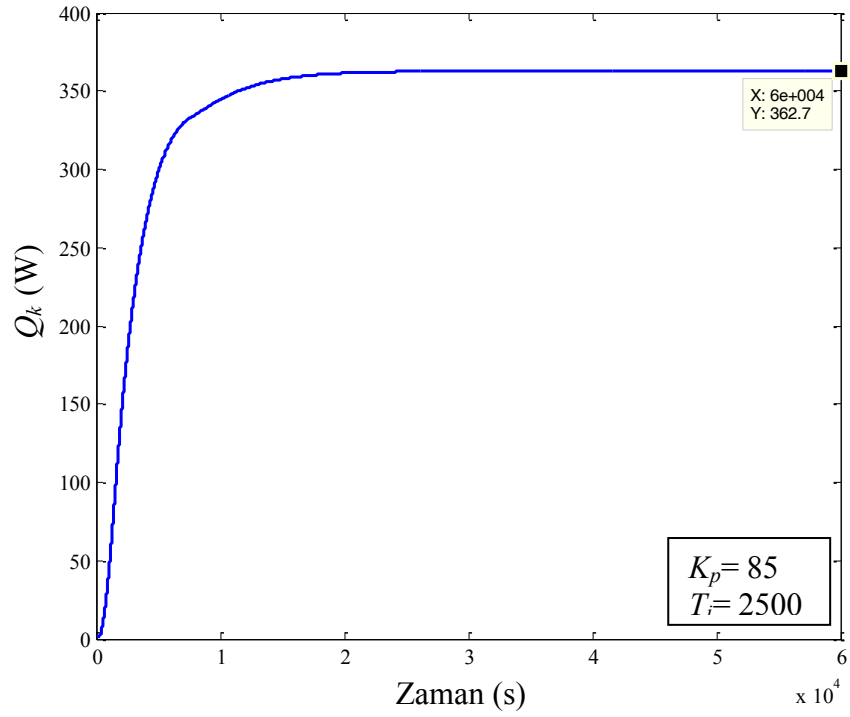
Şekil 5.24. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.25. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.26. *PI* kontrol sırasında sisteme sağlanan güç değerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.27. *PI* kontrol sırasında Fırın-1'den dışarıya olan güç kaybı.

sıcaklığı ise rezistans telinin maksimum sıcaklığa eriştiği süreden 15 dakika sonra maksimum sıcaklığına erişmektedir. Şekil 5.26 20000 saniye süresince sisteme sağlanan güç değerindeki değişimi göstermekte olup sisteme sürekli olarak tam güç verildiği yani voltajın 220 V olduğu süreç ve bu süreç için geçen süre grafik üzerinde gösterilmektedir. Şekil 5.26 ve 5.27’de görüldüğü gibi sisteme sağlanan güç ve sistemden dışarı olan güç değerleri yaklaşık olarak 7500 saniye sonunda sabit ve birbirine eşit olmaktadır.

Fırın-2 için *PI*-kontrol uygulamasının sonuçları Çizelge 5.5.(a), Çizelge 5.5.(b) ve Çizelge 5.5.(c)’de verilmiştir. Çizelge 5.5.(a) $K_p = 133$, Çizelge 5.4.(b) $K_p = 1000$, Çizelge 5.4.(c) $K_p = 4000$ değerleri ile denenen farklı T_i değerleri için elde edilen sonuçları içermektedir. Bu fırında yalıtım tuğlası katman kalınlığı Fırın-1’dekinin dörtte biri kadar olduğundan enerji kayıplarının Fırın-1’e oranla yaklaşık olarak % 45 oranında arttığı, bununla beraber tepe sıcaklığının ve tepe zamanının azaldığı görülmektedir. Dışarıya olan enerji kayıplarının artmasıyla Fırın-1’e oranla sistemin yükselme zamanı yaklaşık olarak 15 s, geçit zamanı 18 s ve gecikme zamanı 3 s artmıştır. Sistemin yerleşme zamanı için gereken en kısa süre $K_p = 133$ ve $T_i = 2500$ değerlerinde elde edilmiş olup bu süre Fırın-1 için elde edilen yerleşme zamanından 2370 s daha az olmaktadır. K_p sabit olmak koşuluyla tepe aşmaları ve tepe zamanları artan T_i değerleriyle azalmaktadır. Ortalama güç kayıpları ve ısı kaynaklarından sisteme sağlanan ortalama güç değeri Fırın-1’e benzer olarak K_p ve T_i değerlerinin değişiminden etkilenmemektedir. Simulasyon süresi sonunda kalıcı hata değeri K_p ve T_i ’nin denenen tüm değerlerinde sıfıra doğru gitmektedir. Şekil 5.28’de; $K_p = 133$, Şekil 5.29’da; $K_p = 1000$, Şekil 5.30’da; $K_p = 4000$ değerleriyle denenen farklı T_i değerleri için sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi görülmektedir. En az aşma miktarı $K_p = 133$ ve $T_i = 4000$ değerinde elde edilmiştir. Bu değerden sonra aşmaların en az olduğu iki değer sırayla $K_p = 133$ ve $T_i = 3500$ ile $K_p = 133$ ve $T_i = 2500$ değerleridir. Her üç değerde de tepe sıcaklığı referans sıcaklığı değerini 50 - 75 °C kadar aşmakta tepe zamanları arasında ise 1-2 dakikalık fark bulunmaktadır. Üç değer için de geçit, gecikme ve yükselme zamanları ile kalıcı hata değerleri aynıdır. Burada en belirgin fark yerleşme zamanlarında meydana gelmektedir. $K_p = 133$ ve $T_i = 2500$ değerinde sistemin

Çizelge 5.5.(a). Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-2 İçin elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | | | |
|--|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 133 | 133 | 133 | 133 | 133 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 100 | 1000 | 2500 | 3500 | 4000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 640,1 | 640,1 | 640,1 | 640,1 | 640,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 961,1 | 961,1 | 961,1 | 961,1 | 961,1 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2676,5 | 2138,8 | 1908,0 | 1853,1 | 1837,1 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 614,6 | 455,0 | 375,3 | 356,4 | 350,3 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 105,0 | 51,7 | 25,1 | 18,8 | 16,8 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Yerleşme bandına giremiyor. | 16553 | 5271,5 | 7483,3 | 8138,9 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor | 0,001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 48918 | 48918 | 48918 | 48918 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 815,3 | 815,3 | 815,3 | 815,3 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 815,3 | 815,3 | 815,3 | 815,3 |

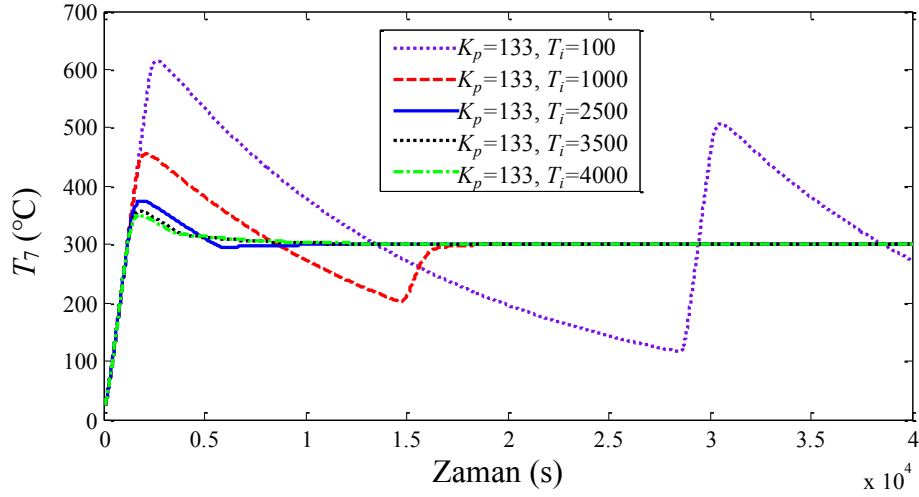
Çizelge 5.5.(b). Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-2 İçin elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | | | |
|---|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 100 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 640,1 | 640,1 | 640,115 | 640,115 | 640,115 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 961,1 | 961,1 | 961,108 | 961,108 | 961,108 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2689,7 | 2415,1 | 2202,4 | 2006,1 | 1885,1 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 617,7 | 540,1 | 478,5 | 419,2 | 379,3 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 105,9 | 80,0 | 59,1 | 39,7 | 26,4 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Yerleşme bandına giremiyor. | 26489 | 19524 | 14795 | 5408,6 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 0,0001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 48918 | 48918 | 48918 | 48918 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 815,3 | 815,3 | 815,3 | 815,3 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 815,3 | 815,5 | 815,5 | 815,3 |

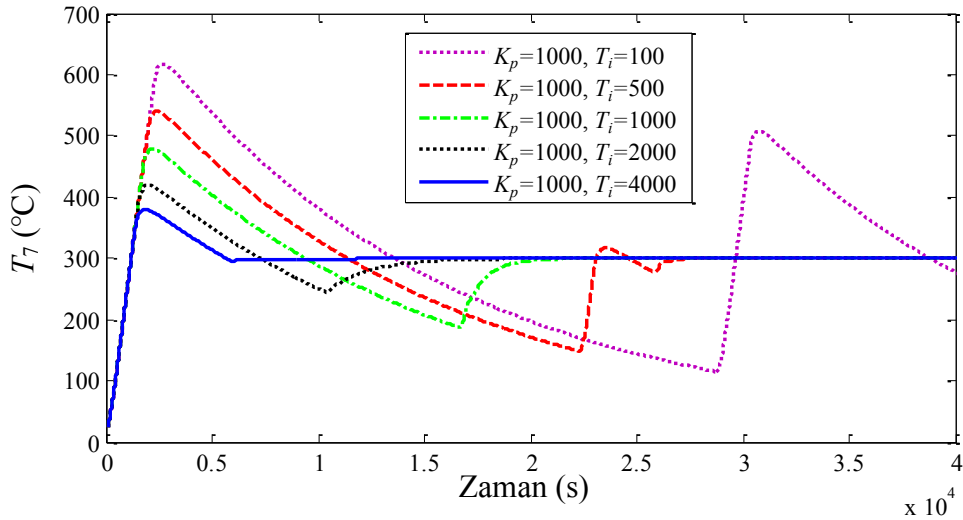
Çizelge 5.5.(c). Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-2 İçin elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | | | |
|---|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 500 | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 640,1 | 640,1 | 640,1 | 640,1 | 640,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 | 1194,8 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 961,1 | 961,1 | 961,1 | 961,1 | 961,1 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2418,4 | 2212,0 | 2022,4 | 1943,3 | 1897,9 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 541,8 | 481,3 | 423,0 | 397,3 | 383,4 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 80,6 | 60,6 | 41,0 | 32,5 | 28,0 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 26671 | 19831 | 15298 | 11984 | 6907,4 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 48760 | 48918 | 48918 | 48918 | 48918 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 812,7 | 815,3 | 815,3 | 815,3 | 815,3 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 815,2 | 814,2 | 816,0 | 815,6 | 816,6 |

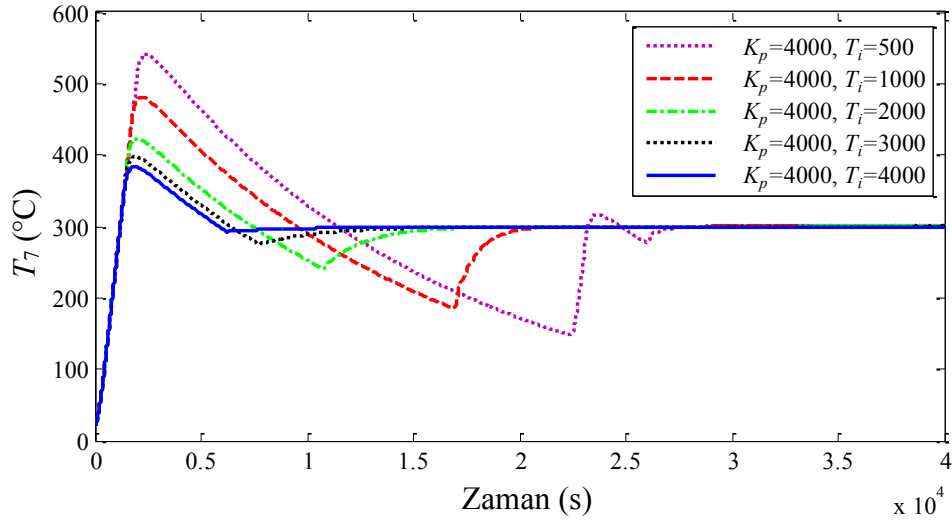
yerleşme zamanı 1 saat 27 dakika iken, $K_p = 133$ ve $T_i = 3500$ değerinde sistemin yerleşme zamanı 2 saat 5 dakika, $K_p = 133$ ve $T_i = 4000$ değerinde ise 2 saat 16 dakikadır. Tüm bunlar dikkate alındığında denenen değerler arasından *PI* kontrol için en uygun K_p değeri 133, T_i değeri 2500 olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 1 saat 27 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 375,3 °C, tepe zamanı (t_p) 1908,0 s, yükselme zamanı (t_r) 961,1 s, geçit zamanı (t_c) 1194,8 s, gecikme zamanı (t_d) 640,1 s, simulasyon süresi sonundaki kalıcı hata (e_{ss}) 0,0001 °C'dir.



Şekil 5.28. *PI* kontrol ile Fırın-2'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.29. *PI* kontrol ile Fırın-2'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.30. *PI* kontrol ile Fırın-2’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

Çizelge 5.6.(a), $K_p = 84$ ile T_i 'nin 5 farklı değeri; Çizelge 5.6.(b), $K_p = 4000$ ile T_i 'nin 5 farklı değeri ve Çizelge 5.6.(c), $K_p = 7000$ ile T_i 'nin 5 farklı değeri için Fırın-3’e *PI* kontrol uygulandığında elde edilen sonuçları içermektedir. Bu fırında yalıtım tuğlasına ek olarak fırın dışında bir de yalıtım katmanı olduğundan dışarıya olan enerji kayıpları Fırın-1’in kayıplarının yaklaşık % 34’ü, Fırın-2’nin kayıplarının yaklaşık % 15’i kadardır. Bununla beraber *PI* kontrolün uygulandığı diğer fırınlara benzer olarak ortalama güç kaybı ve ısıl kaynaktan aktarılan ortalama güç değerleri K_p ve T_i değerlerinin değişiminden etkilenmemektedir. K_p değerleri sabit tutulmak koşuluyla artan T_i değerleri ile tepe zamanları ve sıcaklıkları azalmaktadır. Buna karşın denenen değerler için tepe sıcaklığının referans sıcaklığının en az 40 °C kadar üzerine çıktığı görülmektedir. Yükselme, gecikme ve geçit zamanları K_p ve T_i 'nin değişik değerlerinde aynı değeri almaktadır. En kısa yerleşme zamanı ve kalıcı hatanın en küçük değeri (simulasyon süresi sonunda 0,0001 °C) $K_p = 84$ ve $T_i = 3000$ değerinde elde edilmektedir. Şekil 5.31’de, $K_p = 84$ ile T_i 'nin 5 farklı değeri; Şekil 5.32’de, $K_p = 4000$ ile T_i 'nin 5 farklı değeri ve Şekil 5.33’de, $K_p = 7000$ ile T_i 'nin 5 farklı değeri için elde edilen malzeme sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi grafikleri verilmiştir. En az aşma miktarı $K_p = 84$ ve $T_i = 4000$ değerinde elde edilmektedir. Bu değerden sonra tepe sıcaklığının en az olduğu durum $K_p = 84$ ve

Çizelge 5.6.(a). Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-3 İçin elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | | | |
|--|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 500 | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2426,9 | 2224,1 | 2080,3 | 2037,9 | 2019,7 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 525,0 | 448,0 | 383,4 | 357,9 | 344,4 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 75,0 | 49,3 | 27,8 | 19,3 | 14,8 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Sistem 60000 s sonunda yerleşme bandına giremiyor. | 53065 | 17290 | 6508,8 | 9661,4 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 0,001 | 0,009 | 0,0001 | 0,009 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 7293,6 | 7392 | 7392 | 7392 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 121,5 | 123,2 | 123,2 | 123,2 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 155,0 | 123,7 | 123,2 | 123,2 |

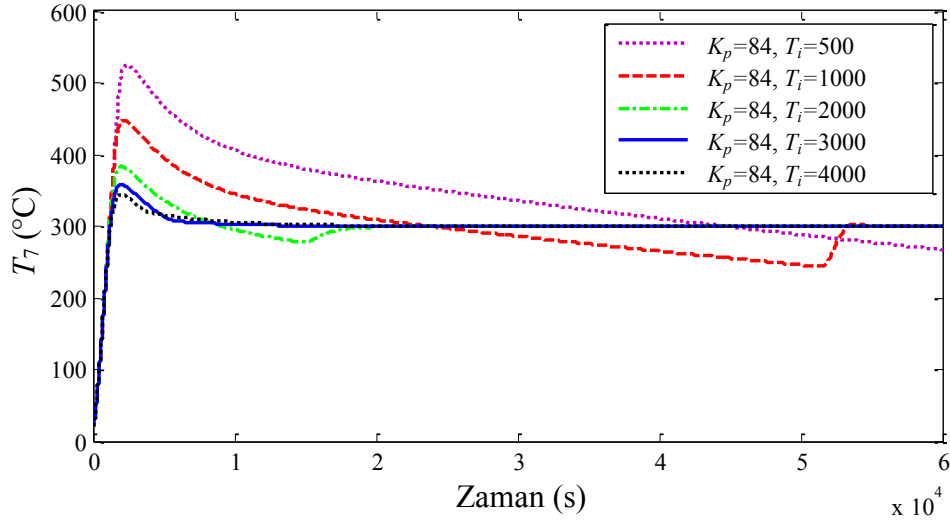
Çizelge 5.6.(b). Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-3 İçin elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | | | |
|--|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2316,2 | 2141,3 | 2073,8 | 2032,6 | 2005,6 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 490,0 | 430,9 | 405,3 | 391,4 | 382,8 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 63,3 | 43,6 | 35,1 | 30,5 | 27,6 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Yerleşme bandına giremiyor. | 44025 | 44025 | 21848 | 17101 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor | 0,0007 | 0,0007 | 0,0005 | 0,0002 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 123,2 | 123,2 | 123,2 | 123,2 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 129,3 | 125,0 | 123,5 | 123,7 |

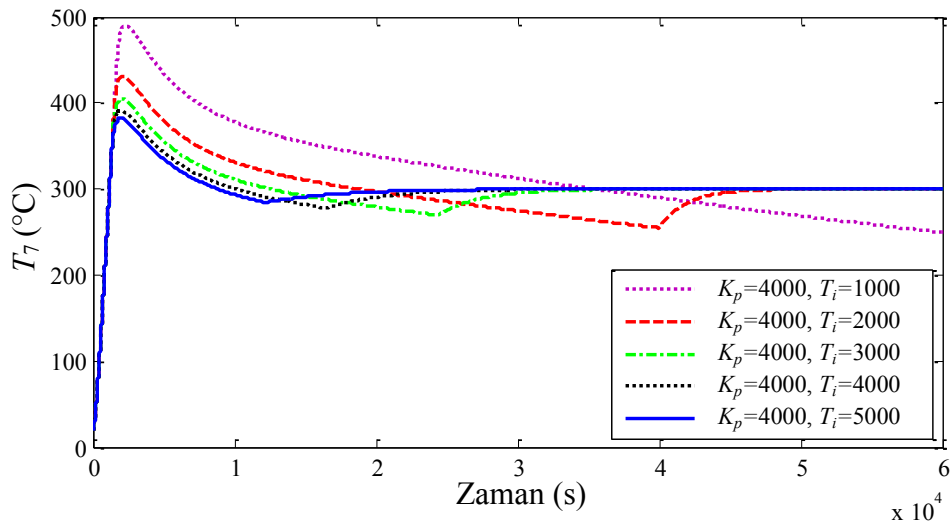
Çizelge 5.6.(c Oransal+İntegral (PI) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | | | |
|--|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 7000 | 7000 | 7000 | 7000 | 7000 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 | 946,5 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 | 1176,0 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2316,6 | 2146,5 | 2070,9 | 2033,1 | 2013,2 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 490,3 | 431,5 | 405,8 | 392,0 | 383,5 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 63,5 | 43,8 | 35,3 | 30,7 | 0,2782 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | Yerleşme bandına giremiyor. | 44394 | 29645 | 22229 | 17480 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor | 0,02 | 0,005 | 0,0008 | 0,002 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 7356 | 7392 | 7392 | 7392 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 122,6 | 123,2 | 123,2 | 123,2 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | Sistem 60000 s sonunda düzenli rejime giremiyor. | 169,1 | 120,0 | 120,4 | 122,9 |

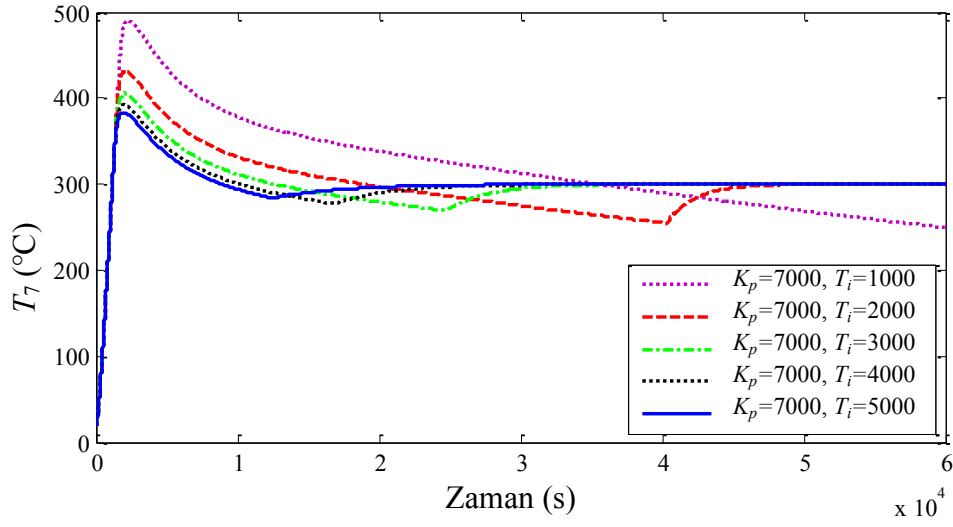
$T_i = 3000$ durumudur. Tepe zamanları arasında 18 s fark olan bu iki değerden $K_p = 84$ ve $T_i = 3000$ değerinde kalıcı hata miktarı daha az ve yerleşme zamanı $K_p = 84$ ve $T_i = 4000$ durumuna göre 52 dakika daha kısadır. Buna göre denenen değerler arasından en uygun K_p değeri 84, T_i değeri ise 3000 olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 1 saat 20 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 357,9 °C, tepe zamanı (t_p) 2037,9 s, yükselme zamanı (t_r) 946,5 s, geçit zamanı (t_c) 1176,0 s, gecikme zamanı (t_d) 637,3 s, simulasyon süresi sonundaki kalıcı hata (e_{ss}) 0,0001 °C'dir.



Şekil 5.31. *PI* kontrol ile Fırın-3'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.32. *PI* kontrol ile Fırın-3'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



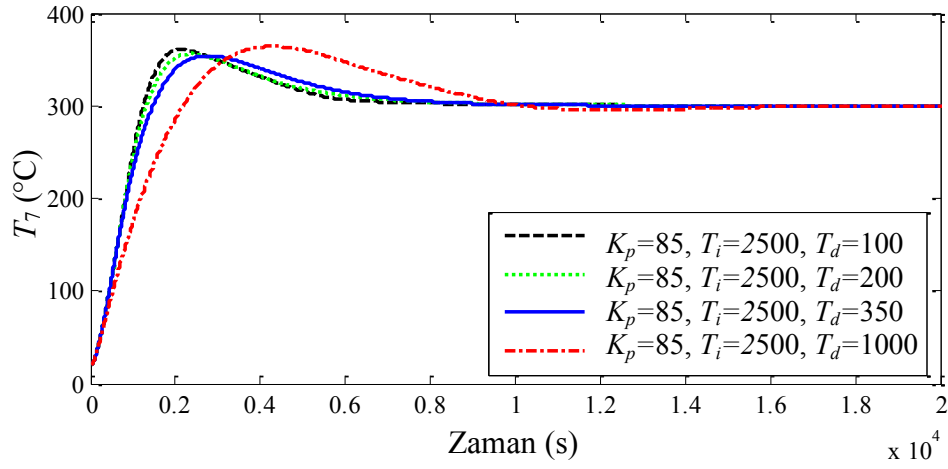
Şekil 5.33. *PI* kontrol ile Fırın-3’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

5.3. Oransal + İntegra + Türevsel (*PID*) Kontrol ile Malzeme Sıcaklığının Kontrolü

Fırın-1 için *PID*-kontrol uygulamasının sonuçları Çizelge 5.7’de verilmiştir. Çizelge; Fırın-1’in *PI* kontrol uygulamasında denenen K_p ve T_i değerlerinden en uygun olarak seçilen $K_p = 85$ ve $T_i = 2500$ değerleriyle denenen 5 farklı T_d değeri baz alınarak oluşturulmuştur. Çizelge incelendiğinde $T_d = 400$ değerlerine kadar tepe sıcaklıklarının azaldığı, $T_d = 400$ ve $T_d = 1000$ değerlerinde tekrar arttığı gözlemlenmektedir. T_d değeri arttıkça tepe zamanı, yükselme zamanı ve geçit zamanları artmaktadır. Fırın-1’e uygulanan *PID* kontrol ile tepe sıcaklıkları ve sistemin yerleşme zamanı *P* kontrole oranla artarken *PI* kontrole oranla azalmaktadır. Gecikme zamanları $T_d = 100$ ve $T_d = 200$ değerleri için aynı olmakta $T_d = 350$ değerinde 2 s, $T_d = 400$ değerinde 8 s, $T_d = 1000$ değerinde yaklaşık 200 s kadar artmaktadır. Ortalama güç kayıpları ve ısı kaynaklı sisteme sağlanan ortalama güç değerleri T_d ’nin değişiminde çok fazla etkilenmemiştir. Bu değerler *P* kontrol ile elde edilen değerlere çok yakındır. Kalıcı hata değeri $T_d = 1000$ değerine kadar sürekli azalmış, $T_d = 1000$ değerinde ise yaklaşık olarak 0,25 °C artmıştır. Şekil 5.34 $T_d = 100, 200, 350$ ve 1000 değerlerinde sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığının zamana

Çizelge 5.7. Oransal+integral+türevsel (PID) kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

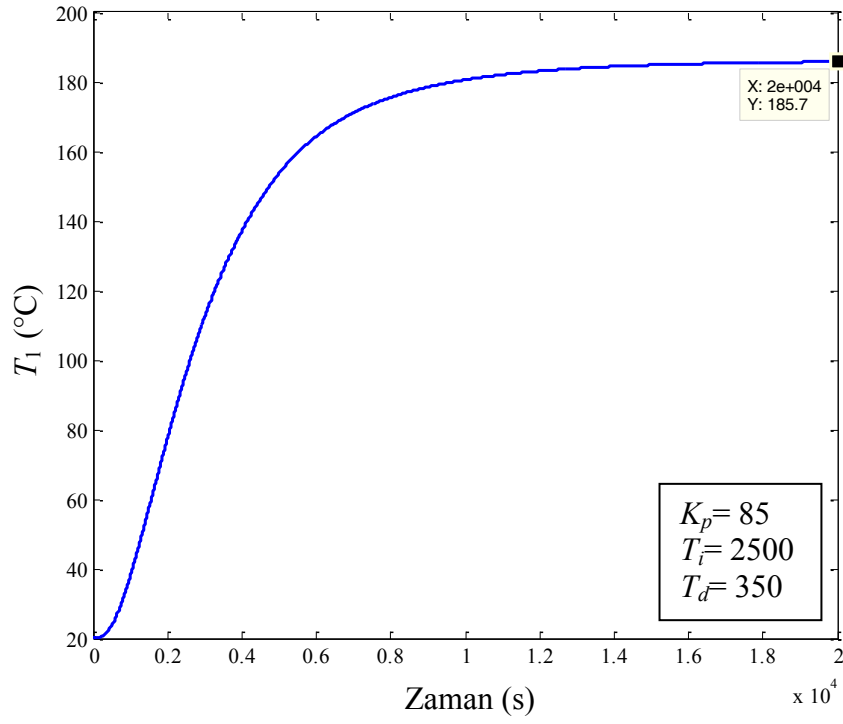
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | | | |
|--|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Türevsel Zaman, T_d | (s) | 100 | 200 | 350 | 400 | 1000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 637,3 | 639,7 | 644,3 | 835,8 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 970,8 | 1011,7 | 1111 | 1151,7 | 1693,7 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1247,6 | 1321,5 | 1471,7 | 1527,8 | 2181,1 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2145,4 | 2382,5 | 2784,6 | 2921,7 | 4297,7 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 360,4 | 356,1 | 353,9 | 354,0 | 364,0 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 20,1 | 18,71 | 18,0 | 18,0 | 21,34 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 6163 | 7224,4 | 7523,6 | 7638,5 | 9355,3 |
| Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,28 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 5995 | 6009 | 6009 | 6009 | 6009 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 362 | 362,1 | 362,1 | 362,1 | 361,8 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 363,1 | 363,0 | 364,5 | 363,7 | 368,6 |



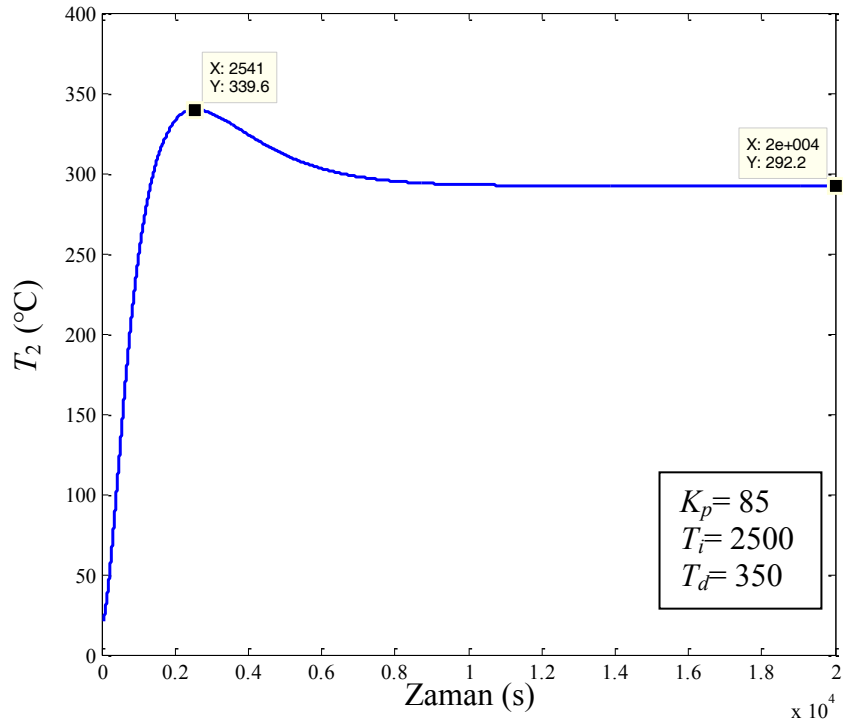
Şekil 5.34. PID kontrol ile Fırın-1'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

bağlı değişimini ifade eden eğrileri içermektedir. İlk tepedeki en az aşma miktarı $T_d = 350$ değerinde elde edilmektedir. Bu değerde malzeme sıcaklığının %2 kriterine göre belirlenen tolerans bandı (294 °C - 306 °C) sınırları içerisinde kalabildiği gözlemlenmektedir. Bu değere kadar denenen T_d değerlerinde tepe sıcaklıkları azalırken, bu değerden sonra tepe sıcaklıkları ve tepe zamanları artmaktadır. Simulasyon süresi sonundaki durağan hata değeri $T_d = 400$ değerine kadar azalmakta $T_d = 1000$ değerinde artmaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında $K_p = 85$, $T_i = 2500$ değeri için en uygun türevsel zaman değeri $T_d = 350$ olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 2 saat 5 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 353,9 °C, tepe zamanı (t_p) 2784,6 s, yükselme zamanı (t_r) 1111,0 s, geçit zamanı (t_c) 1471,7 s, gecikme zamanı (t_d) 639,7 s, simulasyon süresi sonundaki kalıcı hata (e_{ss}) 0,03 °C'dir.

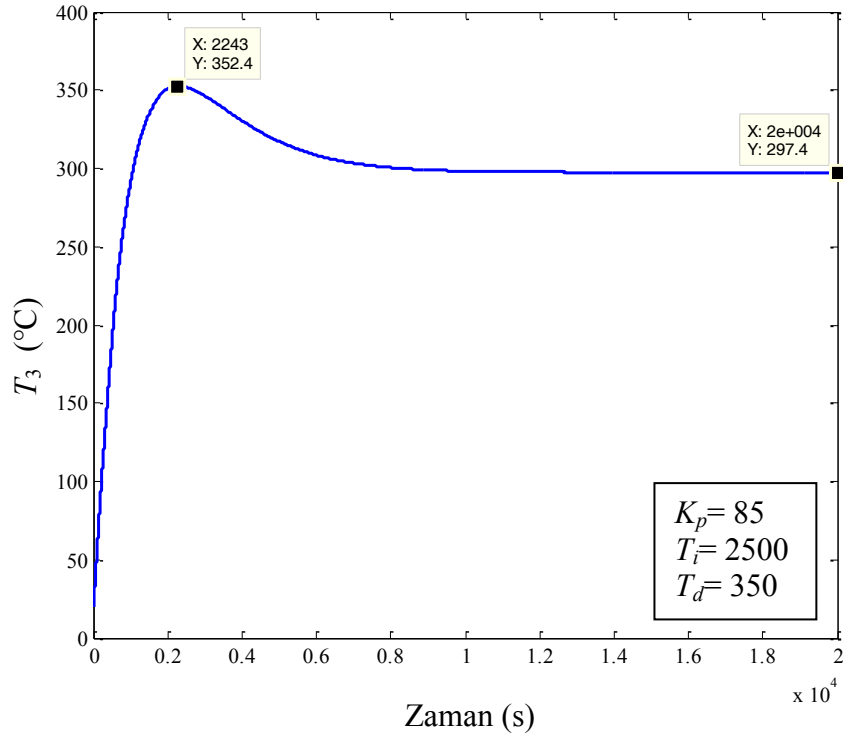
$K_p = 85$, $T_i = 2500$ ve $T_d = 400$ değeri için Fırın-1'e ait cevap eğrileri Şekil 5.35-5.44'de verilmiştir. Şekil 5.35 dış yalıtım-1 katmanında, Şekil 5.36 dış refrakter-1 katmanında, Şekil 5.37 dış refrakter-2 katmanında, Şekil 5.38 Kanthal APM direnç telinde 20000 saniye süresince meydana gelen sıcaklık değişimlerini göstermektedir. Direnç telinde meydana gelen sıcaklık değişimi sisteme sağlanan ısıl enerjinin iki konumlu kontroldeki gibi 12 kW olduğu zaman zarfından yaklaşık 25 dakika sonra



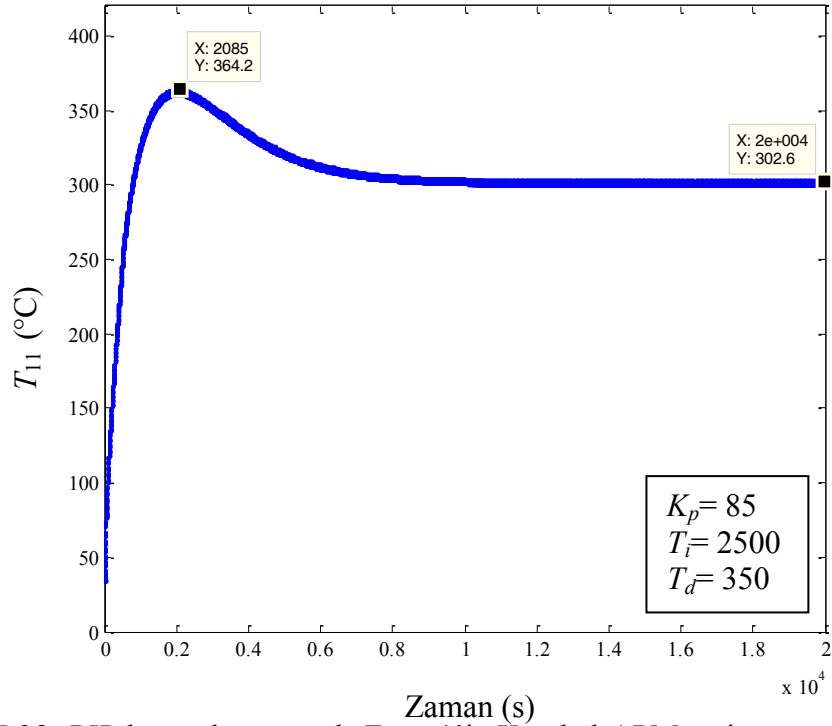
Şekil 5.35. *PID* kontrol sırasında Fırın-1'in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



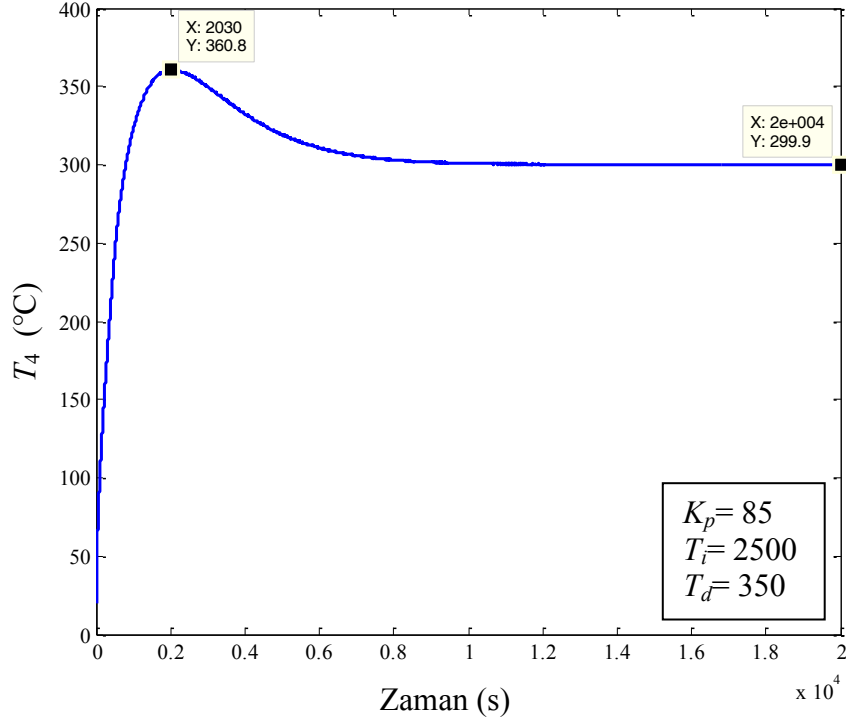
Şekil 5.36. *PID* kontrol sırasında Fırın-1'in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



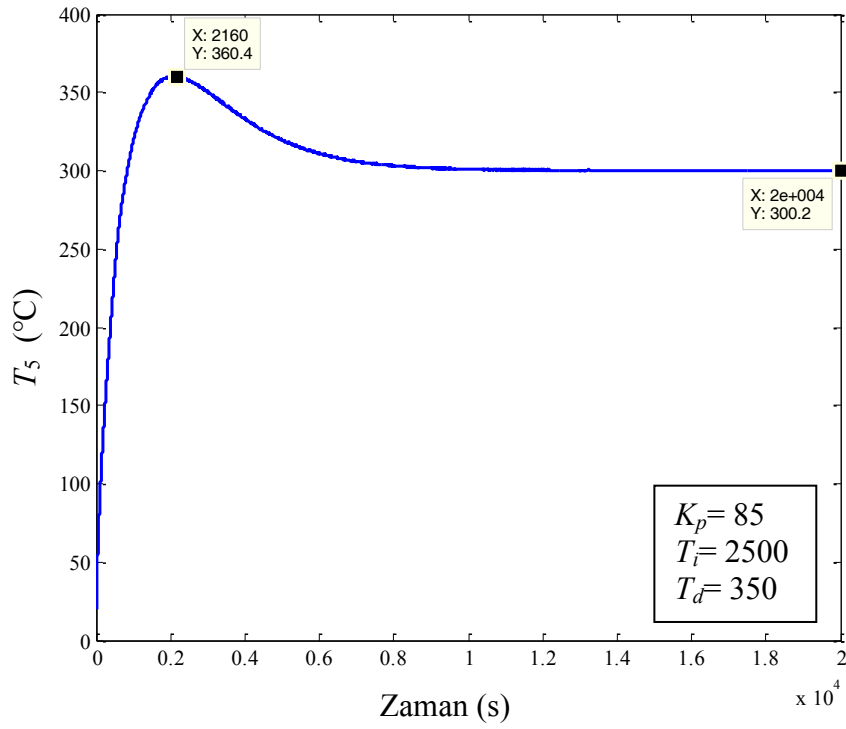
Şekil 5.37. *PID* kontrol sırasında Fırın-1'in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



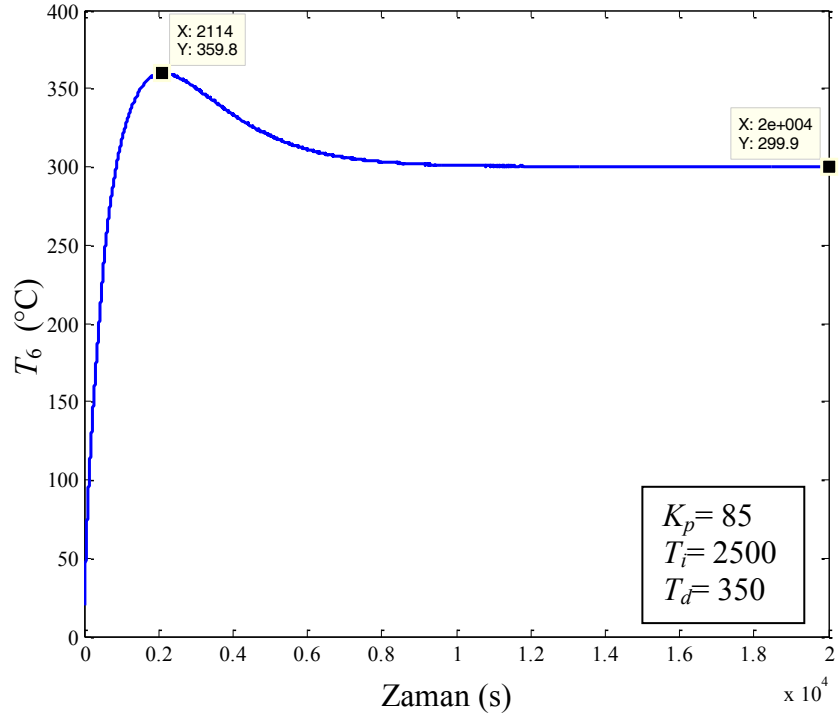
Şekil 5.38. *PID* kontrolü sırasında Fırın-1'in Kanthal-APM rezistansında meydana gelen sıcaklık değişiminin zamana bağlı gösterimi.



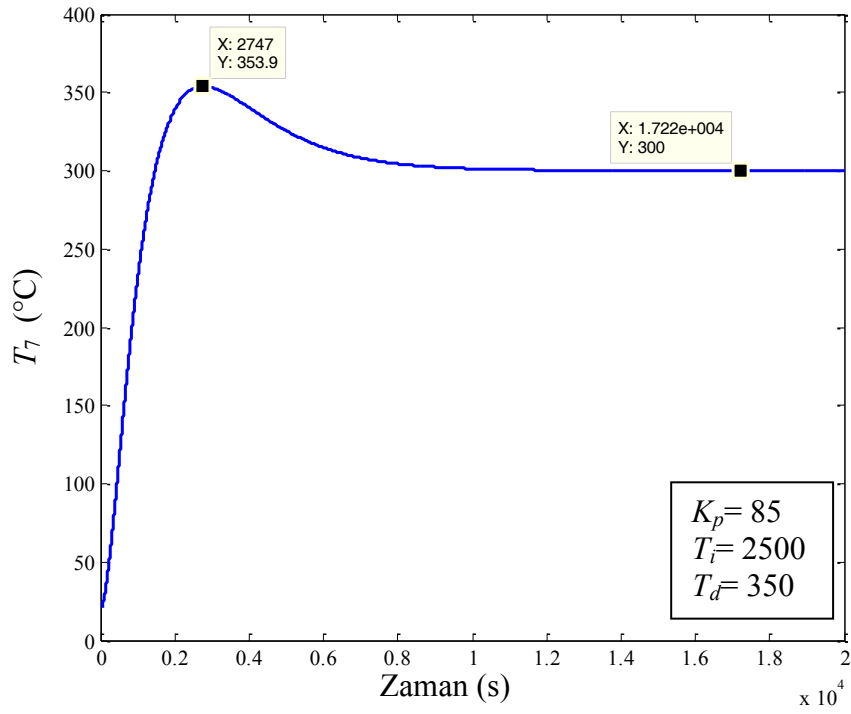
Şekil 5.39. *PID* kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



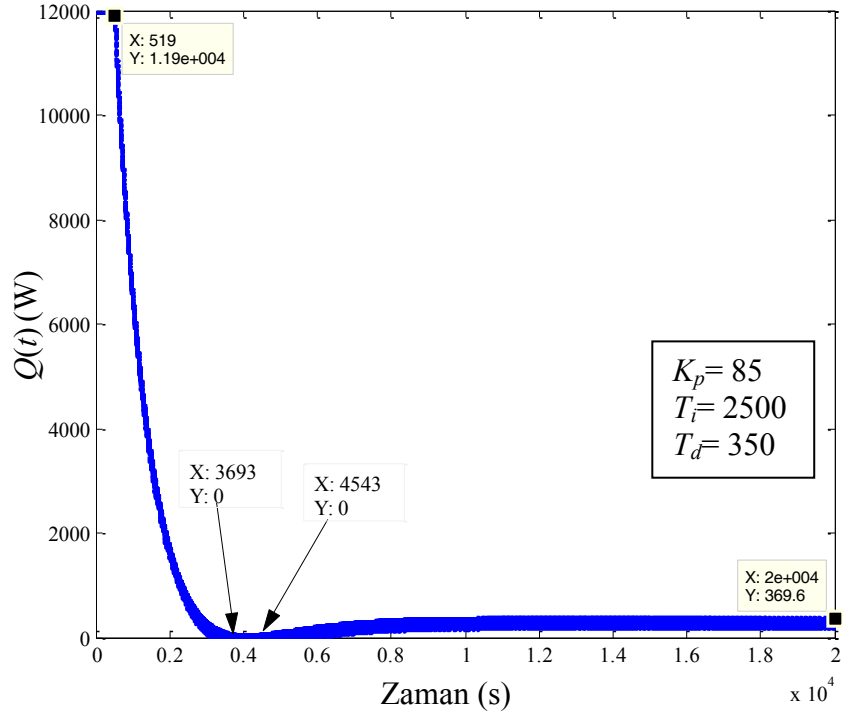
Şekil 5.40. *PID* kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



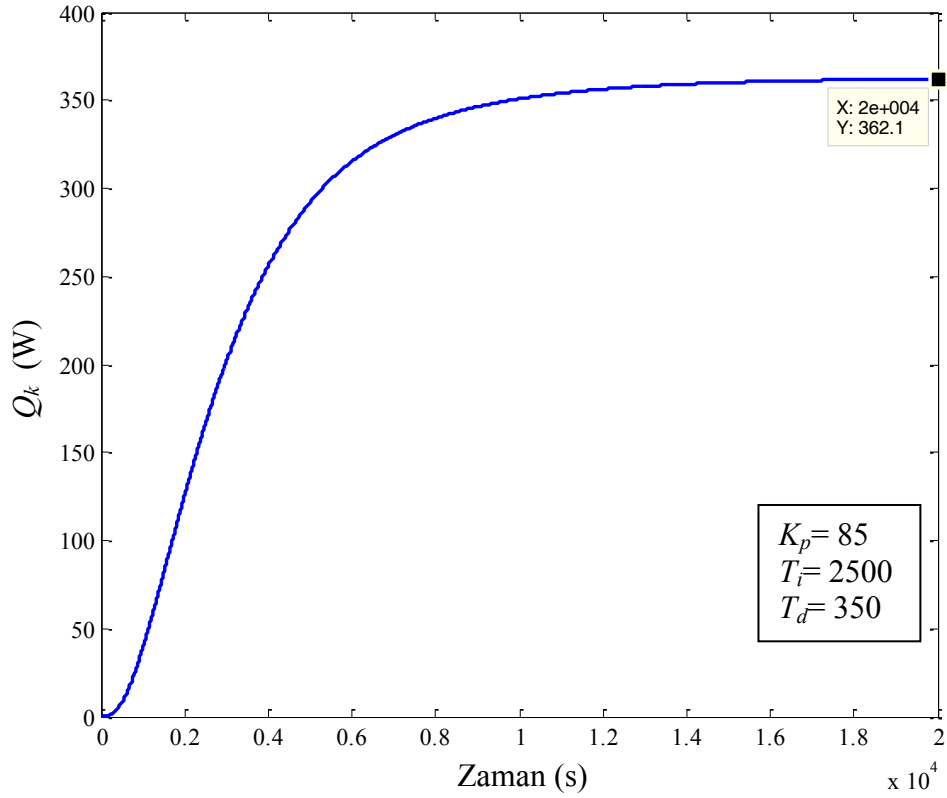
Şekil 5.41. *PID* kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.42. *PID* kontrol sırasında malzeme sıcaklığın zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.43. *PID* kontrol sırasında sisteme sağlanan güç değerinin zamana bağlı değişimi.



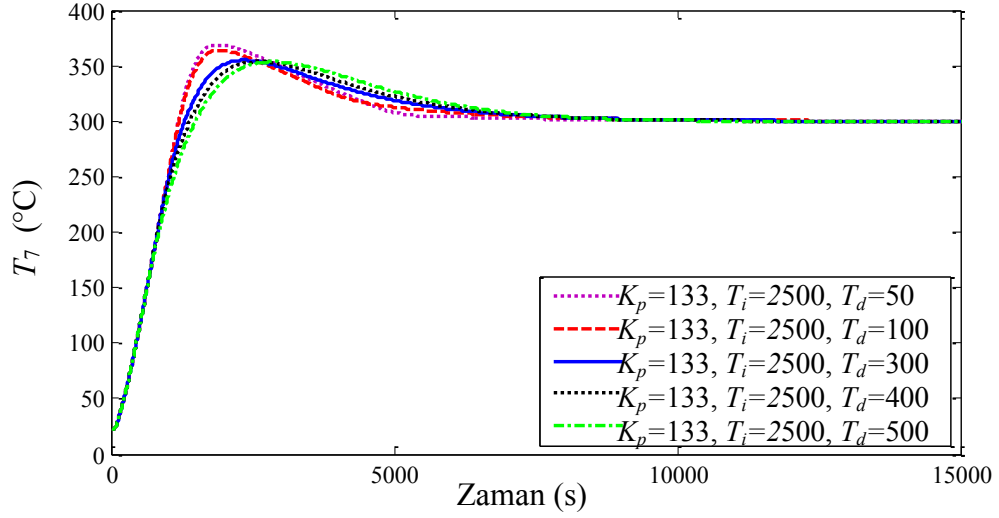
Şekil 5.44. *PID* kontrol sırasında dışarıya olan güç kaybı.

maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu andaki ulaştığı maksimum sıcaklık değeri 373 °C'dir. Bu değer oransal kontroldeki değere oranla 40 °C artmış, PI kontrole oranla 35 °C azalmıştır. Bu sıcaklığa ulaşma süresi 2071 saniye olarak belirlenmiş ve oransal kontrolden yaklaşık 17 dakika, *PI* kontrolden ise yaklaşık 13 dakika sonra bu değere ulaşılmıştır. Rezistans telindeki sıcaklığın durağan hale gelmesinden sonra elde edilen sıcaklık değeri 313,8 °C olup referans sıcaklığından yaklaşık 14 °C fazladır. Bu süre zarfında dış yalıtım-1 katmanının ulaştığı sıcaklık değeri ise oransal kontrolde elde edilen değerle aynı olup 186 °C'dir. Bu süreçten sonra ısı kaynaktan sağlanan güç yavaş yavaş fırının durağan ısı kayıp değerine doğru yaklaşmaktadır. Şekil 5.39 iç refrakter-1, Şekil 5.40 iç refrakter-2, Şekil 5.41 iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 5.42'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Malzeme sıcaklığı ise rezistans telinin maksimum sıcaklığa eriştiği süreden 11 dakika sonra maksimum sıcaklığına erişmektedir. Şekil 5.43 20000 saniye süresince sisteme sağlanan güç değerindeki değişimi göstermekte olup sisteme sürekli olarak tam güç verildiği yani voltajın 220 V olduğu süreç ve bu süreç için geçen süre grafik üzerinde gösterilmektedir. Sisteme sağlanan güç değeri ve sistemden dışarıya olan güç kayıpları (Şekil 5.43, 5.44) yaklaşık olarak 8000 saniye sonunda sabit ve birbirine eşit hale gelmektedir.

Fırın-2 için *PID*-kontrol uygulamasının sonuçları Çizelge 5.8'de verilmiştir. Çizelge; Fırın-2 için *PI* kontrol uygulamasında denenen K_p ve T_i değerlerinden en uygun olarak seçilen $K_p = 133$ ve $T_i = 2500$ değerleriyle denenen 5 farklı T_d değeri baz alınarak oluşturulmuştur. Çizelge incelendiğinde T_d değerleri arttıkça tepe sıcaklıklarının azaldığı buna karşılık tepe zamanı, yükselme zamanı ve geçit zamanlarının arttığı görülmektedir. Gecikme zamanları tüm T_d değerleri için aynı olmaktadır. Ortalama güç kayıpları ve ısı kaynaktan sisteme sağlanan ortalama güç değerleri T_d 'nin değişiminden etkilenmemiştir. Kalıcı hata değeri $T_d = 400$ değerine kadar sürekli azalmış, $T_d = 500$ değerinde ise kalıcı hata değeri sıfır olmuştur. Şekil 5.45, $T_d = 100, 200, 350$ ve 1000 değerlerinde sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimini gösteren eğrileri içermektedir.

Çizelge 5.8. Oransal+integral+türevsel (PID) kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | | | |
|--|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 133 | 133 | 133 | 133 | 133 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Türevsel Zaman, T_d | (s) | 50 | 100 | 300 | 400 | 500 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 640,1 | 640,1 | 640,1 | 640,1 | 640,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 961,1 | 961,4 | 1004,3 | 1052,7 | 1122,7 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1198,2 | 1205,8 | 1305,3 | 1393,2 | 1495,4 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1909,4 | 1935,6 | 2372,9 | 2628,7 | 2874,7 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 368,8 | 363,8 | 354,9 | 353,6 | 353,4 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 22,9 | 21,3 | 18,3 | 17,9 | 17,8 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 5216,6 | 6584,5 | 7033,5 | 7181,9 | 7384,5 |
| Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 0,01 | 0,014 | 0,005 | 0,002 | 0 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 16110 | 16110 | 16110 | 16110 | 16110 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 815,3 | 815,3 | 815,3 | 815,3 | 815,3 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 815,6 | 816,0 | 815,7 | 816,2 | 816,3 |



Şekil 5.45. *PID* kontrol ile Fırın-2’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

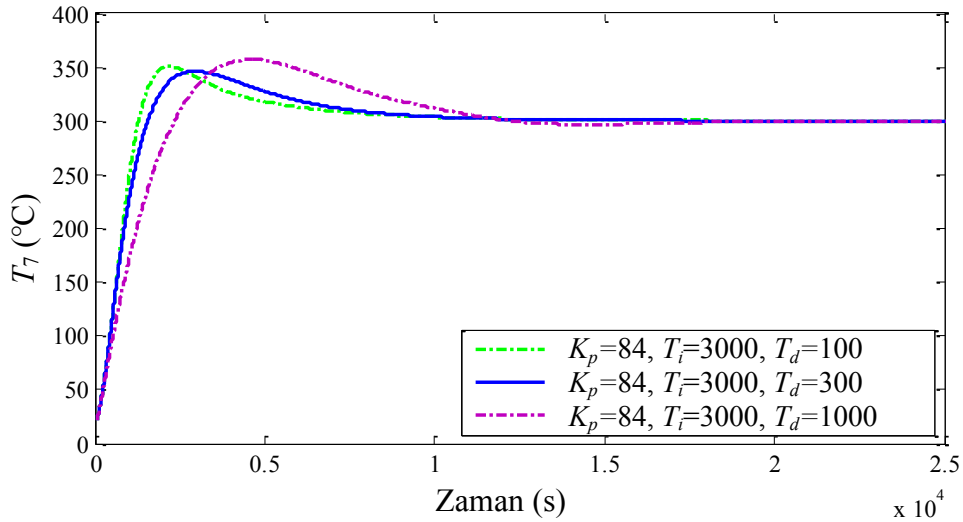
En az aşma miktarı $T_d = 500$ değerinde elde edilmektedir. $T_d = 300$ ve 400 değerlerinde ise tepe sıcaklığı $T_d = 500$ için elde edilen değerden $1,5$ °C kadar fazla olmaktadır. Bu üç değerden yerleşme, geçit, yükselme ve tepe zamanları için en iyi değerler $T_d = 300$ değeri için elde edildiğinden, $K_p = 133$, $T_i = 2500$ değeri için en uygun türevsel zaman $T_d = 300$ olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 1 saat 53 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) $354,9$ °C, tepe zamanı (t_p) $2372,9$ s, yükselme zamanı (t_r) $1004,3$ s, geçit zamanı (t_c) $1305,3$ s, gecikme zamanı (t_d) $640,1$ s, simulasyon süresi sonunda kalıcı hata (e_{ss}) $0,0054$ °C’dir.

Fırın-3 için *PID*-kontrol uygulamasının sonuçları Çizelge 5.9’da verilmiştir. Çizelge; Fırın-3 için *PI* kontrol uygulamasında denenen K_p ve T_i değerlerinden en uygun olarak seçilen $K_p = 84$ ve $T_i = 3000$ değerleriyle denenen 5 farklı T_d değeri baz alınarak oluşturulmuştur. Çizelge incelendiğinde $T_d = 300$ değerine kadar tepe sıcaklığı azalmakta, $T_d = 350$, 400 ve 1000 değerleri için artmaktadır. T_d değeri arttıkça Fırın-1 ve Fırın-2’ye benzer olarak tepe zamanı, yükselme zamanı ve geçit zamanları artmaktadır. Fırın-1 ve Fırın-2 den farklı olarak gecikme zamanları da T_d değerleri arttıkça artmaktadır. Ortalama güç kayıpları ve ısıl kaynaktan sisteme sağlanan ortalama güç değerleri T_d ’nin değişiminden etkilenmemiştir. Kalıcı hata

Çizelge 5.9. Oransal+integral+türevsel (PID) kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | | | |
|--|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 |
| Türevsel Zaman, T_d | (s) | 100 | 300 | 350 | 400 | 1000 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 639,0 | 643,0 | 649,8 | 857,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 988,7 | 1117,9 | 1161,5 | 1208 | 1800 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1286,3 | 1496,8 | 1559,5 | 1623,6 | 2340,6 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2193,2 | 2795,5 | 2950,5 | 3112,7 | 4636,1 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 350,7 | 346,2 | 346,2 | 346,5 | 352,2 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 16,91 | 15,40 | 15,40 | 15,5 | 19,1 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 8398,9 | 8779,9 | 8887,9 | 9005,9 | 11025 |
| Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 0,29 | 0,25 | 0,24 | 0,23 | 0,27 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 1854 | 1854 | 1854 | 1854 | 1856 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 121,5 | 121,5 | 121,5 | 121,5 | 121,4 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 123,4 | 124,6 | 129,1 | 124,1 | 124,4 |

değeri $T_d = 1000$ değerine kadar sürekli azalmakta, $T_d = 1000$ değerinde ise tekrar artmaktadır. Şekil 5.46, $T_d = 100$, 300 ve 1000 değerlerinde sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimini ifade eden eğrileri içermektedir. En az aşma miktarı $T_d = 300$ değerinde elde edilmektedir. Tepe zamanı ise $T_d = 100$ değeri için en az olmakta fakat bu değerde tepe sıcaklığı $T_d = 300$ değerine oranla 4 °C, simulasyon süresi sonundaki kalıcı hata değeri ise 0,04 °C artmaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında, $K_p = 84$, $T_i = 3000$ için denenen türevsel zaman değerlerinden $T_d = 300$, Fırın-3 için en uygun değer olarak alınabilir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 2 saat 30 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 346,2 °C, tepe zamanı (t_p) 2795,5 s, yükselme zamanı (t_r) 1117,9 s, geçit zamanı (t_c) 1496,8 s, gecikme zamanı (t_d) 639,0 s, simulasyon süresi sonundaki kalıcı hata (e_{ss}) 0,25 °C'dir.



Şekil 5.46. PID kontrol ile Fırın-3'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

6. OPTİMUM KONTROL YÖNTEMİ İLE MALZEME SICAKLIĞININ KONTROLÜ

6.1. Doğrusal Optimum Durum Kontrol Problemi

Bir sistemi durum uzayındaki herhangi bir başlangıç durumundan, orijine getiren ve bunu yaparken tanımlanmış belirli bir performans kriterini minimum yapmaya çalışan kontrol problemi, ‘optimum durum kontrol problemi’ olarak adlandırılır. Bu kontrol probleminin doğrusal olmayan sistemler için geliştirilen genel çözüm yöntemi literatürde bulunabilir [36]. Bu genel çözümden elde edilen diferansiyel denklemlerin hem başlangıç hem de son sınır şartları vardır. İki uçlu sınır değer problemi denilen bu problem ancak zahmetli nümerik yöntemlerle çözülebilir. Elde edilen optimum kontrol ifadesi bir zaman fonksiyonu olup (açık çevrim kontrol), her bir başlangıç durumu için çözümlerin ayrı ayrı elde edilmesi gerekir.

Eğer sistem doğrusalsa ve performans kriteri durum değişkenlerinin ve kontrol değişkenlerinin karesel bir integral ifadesi ise yukarıda sözü edilen genel optimum kontrol problemi çözüldüğünde optimum kontrol değişkenleri durum değişkenleri cinsinden (kapalı çevrim kontrol) elde edilir. Karesel performans kriterlerli doğrusal durum kontrol probleminin çözüm yöntemi aşağıda özetlenmiştir.

Sistemin durum denklemleri

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (6.1)$$

ifadesiyle, kontrol sırasında minimum yapılacak performans kriteri de

$$V(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \int_0^{t_f} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{P} \mathbf{u}) dt \quad (6.2)$$

olarak tanımlansın. Denklem (6.2)’de geçen \mathbf{Q} matrisi pozitif yarı definit veya pozitif definit, \mathbf{P} matrisi ise pozitif definittir.

Bu sistem için optimum kontrol kanunu aşağıdaki gibi elde edilir [5, 23, 24].

- i. Aşağıdaki gibi tanımlanan Pontryagin fonksiyonu oluşturulur:

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t) = \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{P} \mathbf{u} + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}) \quad (6.3)$$

Burada $\boldsymbol{\lambda}$, yardımcı durum durum değişkenleri vektörüdür.

- ii. Pontryagin fonksiyonunu minimum yapan optimum kontrol yardımcı durum değişkenleri cinsinden $\mathbf{u}_o(\boldsymbol{\lambda})$ olarak bulunur:

$$\frac{\delta H}{\delta \mathbf{u}} = \mathbf{P} \mathbf{u} + \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (6.4)$$

$$\mathbf{P} \mathbf{u} = -\mathbf{P}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (6.5)$$

ya da

$$\mathbf{u}_o(\boldsymbol{\lambda}) = -\mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (6.6)$$

- iii. Denklem (6.6)'daki optimum kontrol ifadesi denklem (6.3)'de yerine koyularak \mathbf{x} ve $\boldsymbol{\lambda}$ cinsinden optimum Pontryagin fonksiyonu $H_o(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ elde edilir.

$$H_o = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{u}_o^T(\boldsymbol{\lambda}) \mathbf{P} \mathbf{u}_o(\boldsymbol{\lambda}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}_o(\boldsymbol{\lambda})) \quad (6.7)$$

- iv. Optimum Pontryagin fonksiyonundan durum ve yardımcı durum denklemleri \mathbf{x} ve $\boldsymbol{\lambda}$ cinsinden bulunur.

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\delta H}{\delta \mathbf{x}} = -\mathbf{Q} \mathbf{x} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (6.8)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = -\frac{\delta H}{\delta \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (6.9)$$

- v. $\mathbf{R}(t)$ simetrik ve pozitif definit olmak üzere $\boldsymbol{\lambda}(t) = \mathbf{R}(t) \mathbf{x}(t)$ kabul edilir. Denklem (6.8)'deki ifade yeniden düzenlenir:

$$\dot{\lambda} = -\mathbf{Q}\mathbf{x} - \mathbf{A}^T\lambda = \dot{\mathbf{R}}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{R}(t)\dot{\mathbf{x}}(t) \quad (6.10)$$

- vi. Denklem (6.9)'daki ifade denklem (6.10)'da yerine konular ve $\lambda(t) = \mathbf{R}(t)\mathbf{x}(t)$ kabulü göz önüne alınarak aşağıdaki matris Riccati denklemi elde edilir:

$$\dot{\mathbf{R}} + \mathbf{R}\mathbf{A} - \mathbf{R}\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{R} + \mathbf{Q} + \mathbf{A}^T\mathbf{R} = 0 \quad (6.11)$$

- vii. Denklem (6.2) ile verilen performans kriteri için Riccati denkleminin sınır şartı $\mathbf{R}(t_f) = 0$ 'dır. Denklem (6.11) bu sınır şartıyla çözülerek $\mathbf{R}(t)$ elde edilir.
- viii. $\lambda(t) = \mathbf{R}(t)\mathbf{x}(t)$ ifadesi denklem (6.6)'da yerine koyularak optimum kontrol kanunu elde edilir.

$$\mathbf{u}_o(\mathbf{x}) = -\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{R}(t)\mathbf{x}(t) \quad (6.12)$$

ya da

$$\mathbf{K}^T(t) = -\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{R}(t) \quad (6.13)$$

olarak tanımlanırsa,

$$\mathbf{u}_o(\mathbf{x}) = \mathbf{K}^T(t)\mathbf{x} \quad (6.14)$$

- ix. Eğer $t_f \rightarrow \infty$ ise matris Riccati denkleminin çözümü sabit bir \mathbf{R}_o matrisi halini alır. $\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_o$ için denklem (6.14) yeniden düzenlenirse aşağıdaki indirgenmiş Riccati denklemi elde edilir:

$$\mathbf{R}_o\mathbf{A} - \mathbf{R}_o\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{R}_o + \mathbf{Q} + \mathbf{A}^T\mathbf{R}_o = 0 \quad (6.15)$$

İndirgenmiş Riccati denklemi karesel bir yapıda olduğundan çözüm sayısı birden fazladır. Bunlar arasından \mathbf{R}_o matrisini pozitif definit yapan çözüm kullanılır. İndirgenmiş Riccati denkleminin numerik olarak doğrudan çözümü genellikle zordur. Bu yüzden matris Riccati denkleminin $\mathbf{R} = 0$ şartından başlayarak durağan çözüm elde edilinceye kadar negatif zaman yönünde integrali alınır. Bu şekilde elde edilen çözüm durağan \mathbf{R}_o matrisidir. Sabit \mathbf{R}_o

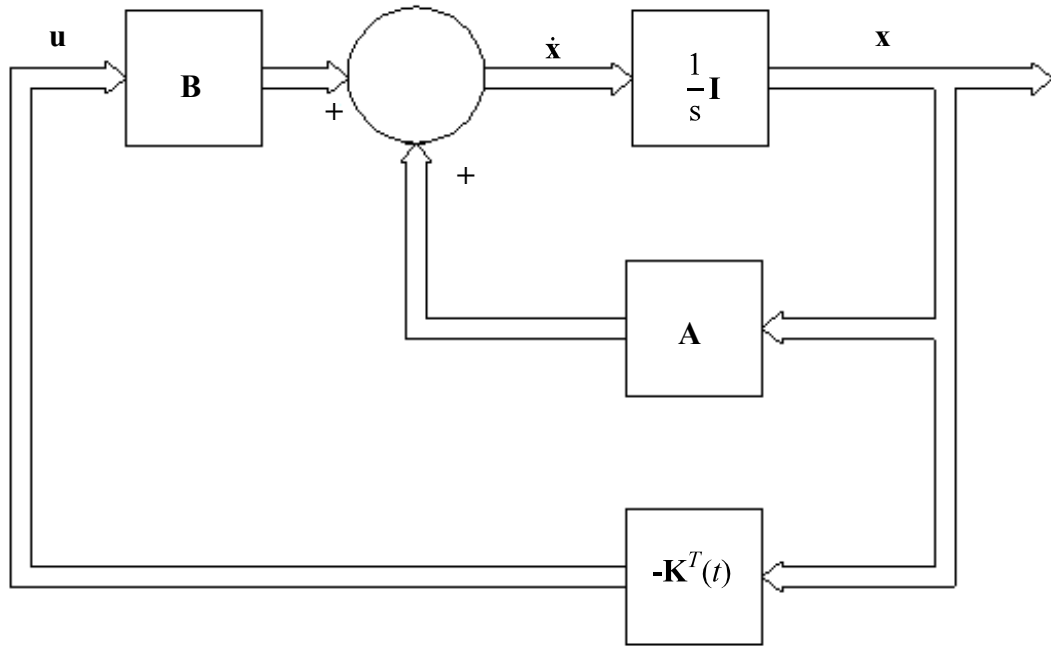
matrisi denklem (6.12)'de yerine konulursa \mathbf{K}^T matrisi de sabit olur. Kontrol edilmiş sistemin durum denklemleri aşağıdaki hali alır:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}\mathbf{K}^T\mathbf{x} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}^T)\mathbf{x} \quad (6.16)$$

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}^T \quad (6.17)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^*\mathbf{x} \quad (6.18)$$

Optimum kontrol ile kontrol edilen bir sisteme ait blok diyagramı Şekil 6.1'deki gibidir.



Şekil 6.1. Optimum kontrol ile kontrol edilen sistemin blok diyagramı.

6.2. Optimum Kontrol İçin Durum Denklemlerinin Yeniden Düzenlenmesi

Bölüm 6.1'de sunulan optimum durum kontrol problemi sistemi bir başlangıç durumundan durum uzayının orijinine getirmeye çalışır. Malzeme sıcaklığı istenen referans değere geldikten sonra fırının erişeceği durağan durum, durum uzayının

orijinine karşılık gelmelidir. Bunu sağlamak için durum değişkenleri aşağıdaki gibi yeniden tanımlanmıştır.

$$x_1 = T_1 - T_{1d} \quad (6.19)$$

$$x_2 = T_2 - T_{2d} \quad (6.20)$$

$$x_3 = T_3 - T_{3d} \quad (6.21)$$

$$x_4 = T_4 - T_{4d} \quad (6.22)$$

$$x_5 = T_5 - T_{5d} \quad (6.23)$$

$$x_6 = T_6 - T_{6d} \quad (6.24)$$

$$x_7 = T_7 - T_{7d} \quad (6.25)$$

Bu ifadelerde T_{id} ($i = 1, 2, \dots, 7$) malzeme sıcaklığı T_{ref} değerine eşitken, orijinal durum değişkenlerinin durağan değerleridir. Bu değerler ortam sıcaklığı (T_0), durağan ısı güç Q_d ve sistemin ısı direnç değerleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_{1d} = Q_d(R_{14} + R_1) + T_0 \quad (6.26)$$

$$T_{2d} = Q_d(R_{14} + R_1 + R_2 + R_3) + T_0 \quad (6.27)$$

$$T_{3d} = Q_d(R_{14} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5) + T_0 \quad (6.28)$$

$$T_{4d} = T_{ref} \quad (6.29)$$

$$T_{5d} = T_{ref} \quad (6.30)$$

$$T_{6d} = T_{ref} \quad (6.31)$$

$$T_{7d} = T_{ref} \quad (6.32)$$

Yukarıdaki ifadelerde geçen durağan ısı güç Q_d ise aşağıdaki gibi elde edilir:

$$Q_d = \frac{T_{ref} - T_0}{(R_{14} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6)} \quad (6.33)$$

Sisteme sağlanan kontrol girişi u durağan halde sisteme sağlanan ısı güç Q_d 'den fark şeklinde aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$u = Q(t) - Q_d \quad (6.34)$$

Denklemler (2.43 - 2.49) yeni durum değişkenleri cinsinden yeniden yazılırsa aşağıdaki yeni durum denklemleri elde edilir.

$$\dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \quad (6.35)$$

$$\dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 \quad (6.36)$$

$$\dot{x}_3 = a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + b_3u \quad (6.37)$$

$$\dot{x}_4 = a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + a_{45}x_5 + b_4u \quad (6.38)$$

$$\dot{x}_5 = a_{54}x_4 + a_{55}x_5 + a_{56}x_6 \quad (6.39)$$

$$\dot{x}_6 = a_{65}x_5 + a_{66}x_6 + a_{67}x_7 \quad (6.40)$$

$$\dot{x}_7 = a_{76}x_6 + a_{77}x_7 \quad (6.41)$$

Burada a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 7$) katsayıları daha önce denklemler (2.50)-(2.68)'de tanımlandığı gibidir. b_3 ve b_4 katsayıları ise, daha önce denklemler (2.70-2.71)'de c_3 ve c_4 olarak tanımlanan katsayılarla aynıdır. Yeni durum denklemleri aşağıdaki gibi standart matris formda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (6.42)$$

Eğer,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} \quad (6.43)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix} \quad (6.44)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.45)$$

matrisleri tanımlanırsa, durum denklemleri kısaca

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (6.46)$$

olarak yazılabilir. Burada \mathbf{B} matrisi, Bölüm 2'de denklem (2.76)'da ifade edilen \mathbf{C} matrisi ile aynıdır.

Sistemin çıkış değişkeni ise malzeme sıcaklığının, durağan malzeme sıcaklığından olan farkı x_7 'dir. Buna göre, çıkış ifadesi matris cinsinden,

$$y = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} \quad (6.47)$$

şeklinde ya da kısaca aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$y = x_7 \quad (6.48)$$

6.3. Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü İçin Performans Kriterinin Belirlenmesi

Performans kriteri olarak, kontrol doğruluğunun ölçütü olduğu için malzeme sıcaklığının referans sıcaklığından farkının karesini (x_7^2); ısı direncin çevresindeki sıcaklığı sınırlayabilmek için ısı kaynağa en yakın olan üçüncü ve dördüncü duvar katman sıcaklıklarının durağan değerlerinden olan farklarının kareleri toplamını ($x_3^2 + x_4^2$); enerji kayıplarının ölçütü olduğu için en dış katman olan birinci katmanın ısı debisinin karesini (Q_8^2) ve sisteme sağlanan gücün durağan değerinden olan farkının karesini (u^2) içeren aşağıdaki integral ifade seçilmiştir.

$$PI = \int_0^{\infty} [x_7^2 + \rho_1(x_3^2 + x_4^2) + \rho_2(Q_8^2) + \rho_3(u^2)] dt \quad (6.49)$$

Yukarıdaki denklemde Q_8 , x_1 ve ısı dirençler cinsinden yazılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$PI = \int_0^{\infty} [x_7^2 + \rho_1(x_3^2 + x_4^2) + \rho_2 \left(\frac{x_1}{R_1 + R_{14}} \right)^2 + \rho_3(u^2)] dt \quad (6.50)$$

Bu ifadede geçen ρ_1 , ρ_2 ve ρ_3 çarptıkları terimlerin göreceli ağırlıklarını belirleyen pozitif katsayılardır.

Bu denklem \mathbf{x} durum vektörü ve \mathbf{u} kontrol vektörü cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$PI = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{P} \mathbf{u}) dt \quad (6.51)$$

Burada \mathbf{Q} matrisi (7×7) boyutunda, \mathbf{P} matrisi ise (1×1) boyutunda olup aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{\rho_2}{(R_1 + R_{14})^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.52)$$

$$\mathbf{P} = [\rho_3] \quad (6.53)$$

6.4. Örnek Fırınlarda Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü

Daha önce Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 olarak tanımlanan örnek fırınlarda malzeme sıcaklığı optimum olarak kontrol edildiğinde, sistemin dinamik davranışını incelemek için MATLAB ortamında bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu program Bölüm 6.2'de optimum kontrol uygulaması için yeniden düzenlenen diferansiyel denklemleri Ode 45 çözücü ile çözmekte, daha sonra sistemin performans parametrelerini (Bölüm 3) hesaplamaktadır.

Bütün simulasyonlarda malzemenin ulaşması istenen referans sıcaklık derecesi (T_{ref}) 300 °C olarak alınmıştır. Fırın iç duvarı ve malzeme arasındaki ısı geçişini modelleyen R_{13} direnci için Fırın-1'de üç farklı değer (0,01; 0,1; 1,0), Fırın-2 ve Fırın-3'de birer değer (0,1) kullanılmıştır. Malzeme sıcaklığının optimum kontrolü için tanımlanan performans kriterinde yer alan ağırlık katsayılarından ρ_1 ve ρ_2 sıfır olarak seçilmiş buna karşılık ρ_3 değerleri denenmiştir. Ancak bu şekilde yapılan

kabul sonucunda direnç sıcaklığı yüksek değerlere erişirse ρ_1 için sıfırdan büyük değerler, ısı kayıplar yüksek olursa ρ_2 için sıfırdan büyük değerler kullanılabilir. Uygun ρ_3 değeri ve optimum geribesleme katsayıları bütün örnek fırınlarda 10 kg malzeme kütlesi için elde edilmiştir. Bu şekilde Fırın-1 için bulunan optimum geribesleme katsayıları, malzeme kütlesi 1 kg iken üç farklı R_{13} değeri için Fırın-1'e tekrar uygulanmış ve sonuçların parametre değişikliklerine (malzeme kütlesi ve R_{13}) duyarlılığı incelenmiştir.

6.4.1. Fırın-1'de Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü

Çizelgeler 6.1-6.3'de verilen performans kartlarında Fırın-1 için $R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 olduğu durumlarda, ısı işlem gören malzemenin kütlesi $m = 10$ kg iken ve optimum kontrol için farklı ρ_3 değerleri kullanıldığında elde edilen performans parametreleri verilmiştir. Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de ise bu R_{13} değerleri, malzeme kütlesi ve ρ_3 değerleri için elde edilen, malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri görülmektedir. Bu çizelgeler ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılabilir.

- 1) Fırın iç duvarıyla malzeme arasındaki ısı direnç olan R_{13} 'ün değeri küçükse optimum sistemin performansı ρ_3 'ün değerinden fazla etkilenmemektedir. Bu direnç değeri büyüdükçe seçilen ρ_3 değerinin sistem cevabı üzerine olan etkisi de artmaktadır.
- 2) $R_{13} = 0,01$ ve $m = 10$ kg için, Gecikme, yükselme, yerleşme zamanları, ısı kaynaktan fırına aktarılan ortalama güç ve fırından dış ortama olan ısı kaçaklar denenen bütün ρ_3 değerleri için aynı olmaktadır. Geçit zamanları ρ_3 değeri azaldıkça azalmakta ve $\rho_3 = 2 \times 10^{-10}$ değerinde 834,4 s ile en küçük değerine erişmektedir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi denenen bütün ρ_3 ağırlık katsayıları için tepe aşmalarının ve tepe zamanlarının birbirine çok yakın olduğu, ρ_3 değeri azaldıkça tepe sıcaklığının arttığı, $\rho_3 = 2 \times 10^{-10}$ değerine kadar ρ_3 değeri azaldıkça tepe zamanının da arttığı, bu değerde ise tepe zamanının tekrar azaldığı görülmektedir. $\rho_3 = 10^{-9}$ değerinde tepe sıcaklığının 302,2 °C, tepe zamanının

Çizelge 6.1. Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

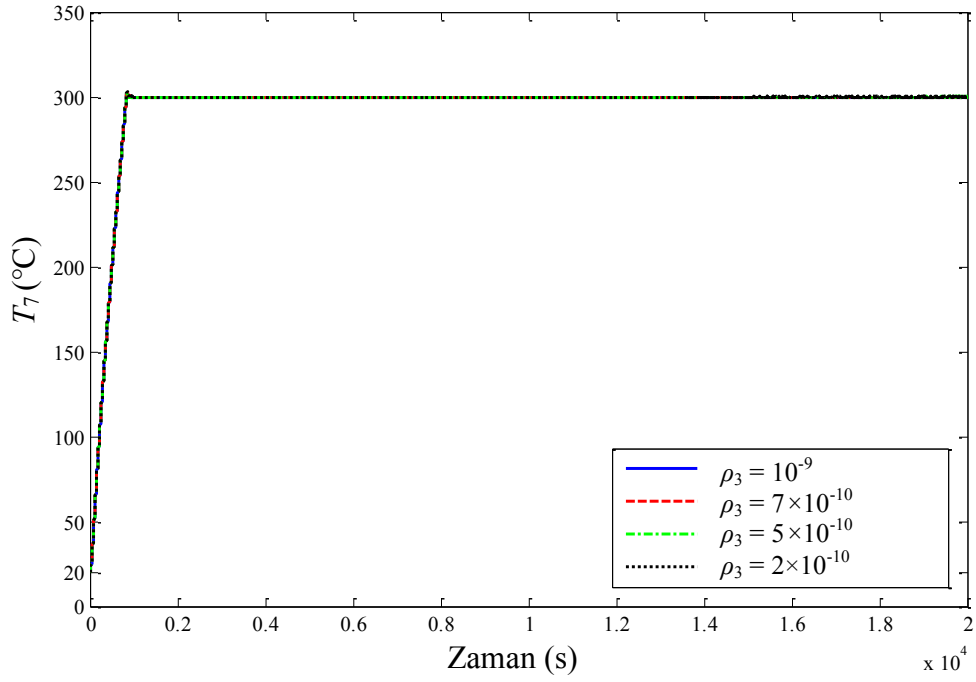
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | | |
|---|--------------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_2 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-9} | 7×10^{-10} | 5×10^{-10} | 2×10^{-10} |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s $^{\circ}$ C/J) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/ $^{\circ}$ C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | ($^{\circ}$ C) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 354,9 | 354,9 | 354,9 | 354,9 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 682,2 | 682,2 | 682,2 | 682,2 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 835,1 | 835,2 | 834,8 | 834,5 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 856,8 | 857,2 | 858,5 | 858,4 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | ($^{\circ}$ C) | 302,0 | 302,0 | 302,3 | 302,6 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,67 | 0,68 | 0,78 | 0,88 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 812,2 | 812,2 | 812,2265 | 812,2 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,6 | 7222,6 | 7222,600 | 7222,6 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 361,1 | 361,1 | 361,1 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,2 | 365,2 | 365,2233 | 365,2 |

Çizelge 6.2. Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

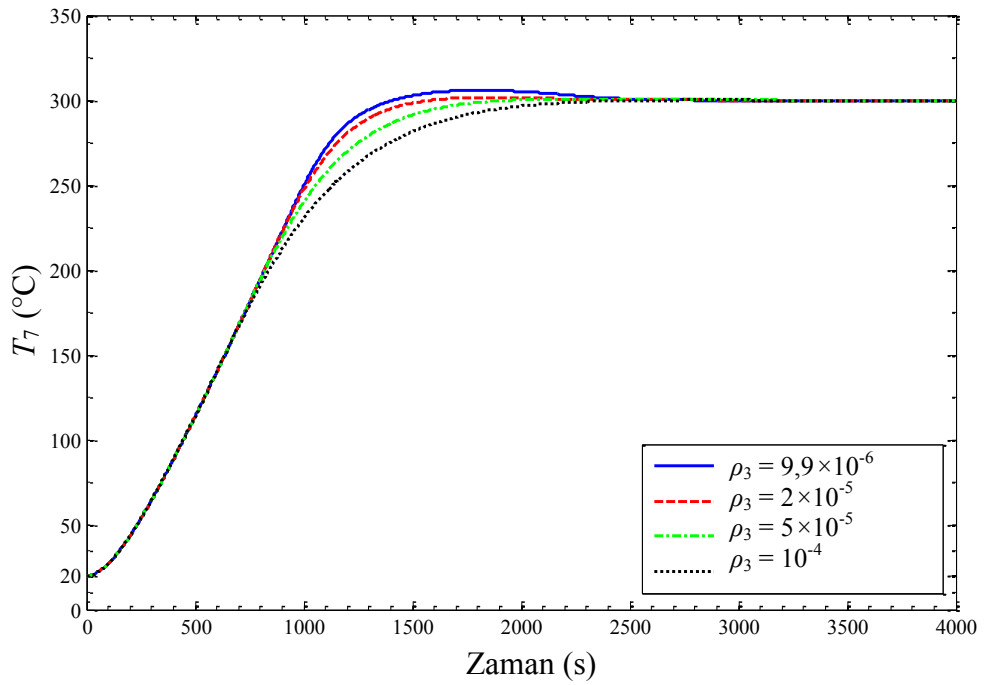
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | | |
|---|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_2 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-4} | 5×10^{-5} | 2×10^{-5} | $9,9 \times 10^{-6}$ |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s $^{\circ}$ C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/ $^{\circ}$ C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | ($^{\circ}$ C) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,4 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 1208,5 | 1081,3 | 998,5 | 969,1 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 2743,7 | 1957,6 | 1589,1 | 1414,6 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2882,6 | 2272,8 | 1834,0 | 1810,4 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | ($^{\circ}$ C) | 300,0 | 300,7 | 301,6 | 305,8 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,009 | 0,23 | 0,52 | 1,9 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 1855,3 | 1579,0 | 1379,9 | 1293,8 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,9 | 7222,4 | 7223,9 | 7222,4 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 361,1 | 361,1 | 361,1 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,2 | 365,2 | 365,1 | 365,1 |

Çizelge 6.3. Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

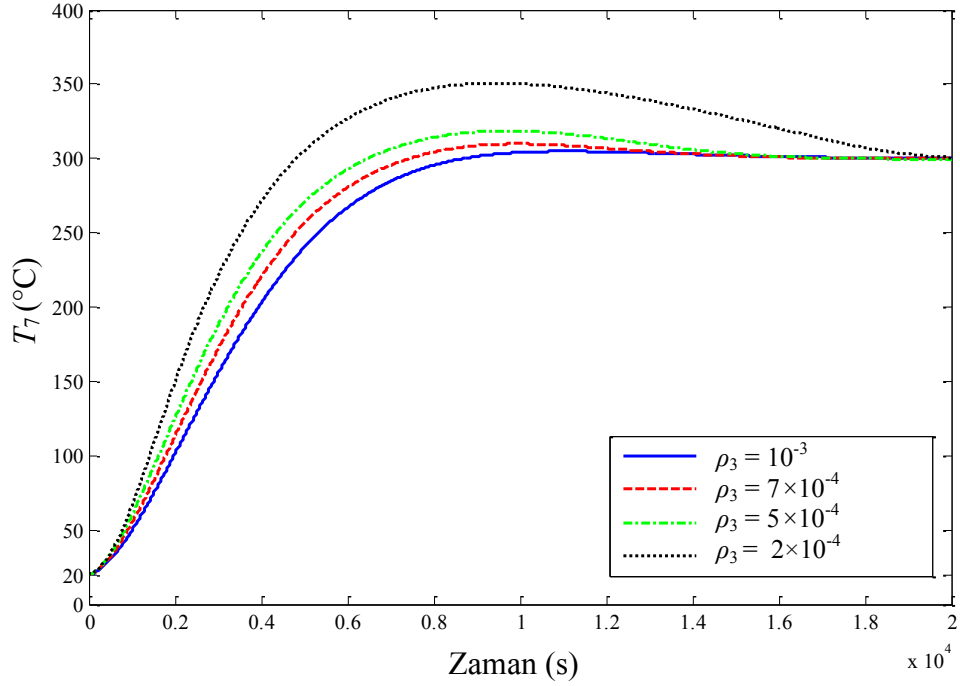
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | | |
|---|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_2 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-3} | 7×10^{-4} | 5×10^{-4} | 2×10^{-4} |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s $^{\circ}$ C/J) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/ $^{\circ}$ C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | ($^{\circ}$ C) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 2892,7 | 2613,1 | 2376,9 | 2010,5 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 5653,0 | 5068,2 | 4573,6 | 3561,4 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 8704,9 | 7451,7 | 6484,6 | 4830,3 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 11098,0 | 9958,8 | 9714,4 | 9456,2 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | ($^{\circ}$ C) | 304,8 | 309,9 | 318,5 | 350,7 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 1,6 | 3,3 | 6,15 | 16,9 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 7838,7 | 12423,0 | 13997,0 | 18249,0 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7271,5 | 7259,0 | 7242,0 | 7202,0 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 363,6 | 362,9 | 362,1 | 360,1 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,7 | 369,1 | 377,2 | 488,5 |



Şekil 6.2. Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de $R_{13} = 0,01$ iken malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



Şekil 6.3. Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de $R_{13} = 0,1$ iken malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



Şekil 6.4. Optimum kontrol sırasında Fırın-1'de $R_{13} = 1$ iken malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

856,8 s ile en küçük değerlerine eriştiği görülmektedir. Tüm bunlar dikkate alındığında optimum kontrol için en uygun ρ_3 değeri 10^{-9} 'dur. Bu değerde % 2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 13,5 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 302,2 °C, tepe zamanı (t_p) 856,8 s, yükselme zamanı (t_r) 682,2 s, geçit zamanı (t_c) 835,1 s, gecikme zamanı (t_d) 354,9 s'dir.

- 3) $R_{13} = 0,1$ ve $m = 10$ kg için, gecikme zamanları çizelgede sunulan bütün ρ_3 değerleri için aynı olmaktadır. Yükselme zamanı, geçit zamanı, tepe zamanı ve yerleşme zamanı değerleri ρ_3 değeri azaldıkça azalmakta, en iyi zamanlar $\rho_3 = 9,9 \times 10^{-6}$ değerinde bu değerden sonra ise $\rho_3 = 2 \times 10^{-5}$ değerinde elde edilmektedir. Tepe sıcaklığı değerleri ise Şekil 6.9' da görüldüğü gibi ρ_3 değeri azaldıkça artmaktadır. En fazla aşma miktarı %1,92 değeri ile $\rho_3 = 9,9 \times 10^{-6}$ görülmekte ve %2 kriterine göre tolerans bandının üst sınır değerine erişmektedir. Bu değerden sonra en fazla aşma miktarı ise $\rho_3 = 2 \times 10^{-5}$ için % 0,5 olarak elde edilmekte ve bu değerdeki aşma miktarı $\rho_3 = 10^{-4}$ ve $\rho_3 = 5 \times 10^{-5}$

değerlerindeki aşma miktarlarına yaklaşımaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında optimum kontrol için en uygun ρ_3 değeri 2×10^{-5} 'dir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 22,998 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 301,6 °C, tepe zamanı (t_p) 1834 s, yükselme zamanı (t_r) 998,4 s, geçit zamanı (t_c) 1589,1 s, gecikme zamanı (t_d) 637,3 s'dir.

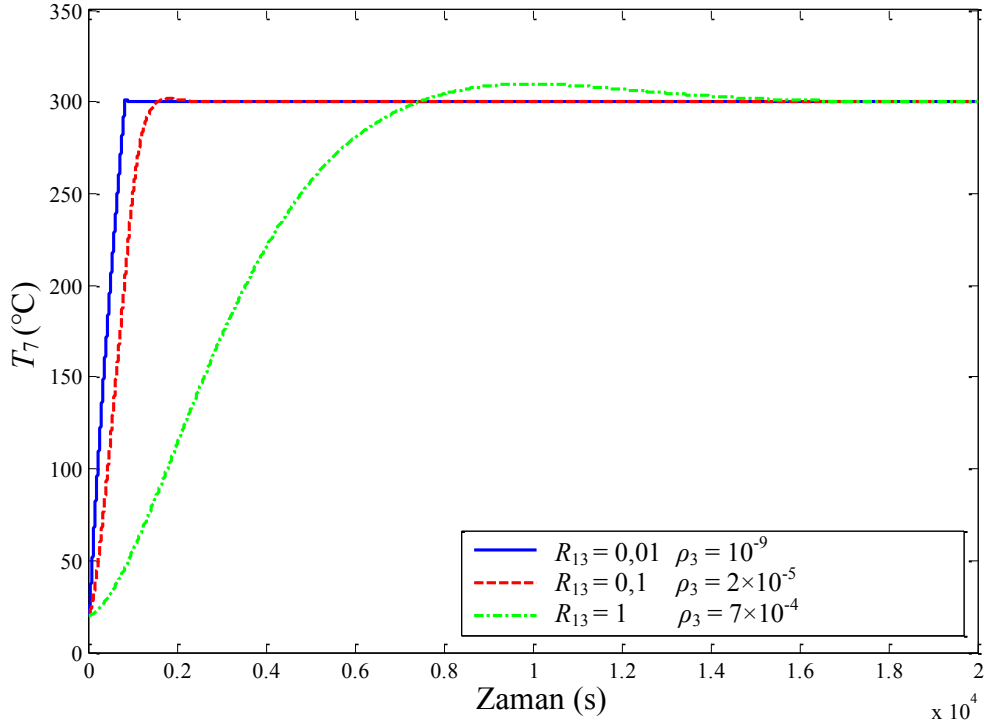
4) $R_{13} = 1$; $m = 10$ kg için, Gecikme zamanı, Yükselme zamanı, geçit zamanı, tepe zamanı değerleri ρ_3 değeri azaldıkça azalmaktadır, yerleşme zamanı değeri ise artmaktadır. Tepe zamanlarında 3 ile 7 dakika fark olmasına karşılık, bu değer $\rho_3 = 10^{-3}$ değerinde yaklaşık yarım saate çıkmaktadır. $R_{13} = 0,1$ durumuna benzer olarak tepe sıcaklığı değerleri Şekil 6.12' de görüldüğü gibi ρ_3 değeri azaldıkça artmaktadır. En fazla aşma miktarı % 16,89 değeri ile $\rho_3 = 2 \times 10^{-4}$ durumunda, bu değerden sonra en fazla aşma ise % 6 ile $\rho_3 = 5 \times 10^{-4}$ durumunda görülmektedir. Aynı iki değerde sisteme sağlanan ortalama güç değeri, sistemden olan güç kaçaklarının çok üzerinde olmaktadır. $\rho_3 = 10^{-3}$ ve $\rho_3 = 7 \times 10^{-4}$ değerlerinde ise sistemin yerleşme zamanı dışında cevap hızının ölçütü olan tüm parametrelerde $\rho_3 = 7 \times 10^{-4}$ değeri daha iyi sonuçlar vermektedir. Bütün bunlar dikkate alındığında optimum ağırlık katsayısı $\rho_3 = 7 \times 10^{-4}$ seçilmelidir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 2 saat 11 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 309,9 °C, tepe zamanı (t_p) 11098 s, yükselme zamanı (t_r) 5653 s, geçit zamanı (t_c) 8704,9 s, gecikme zamanı (t_d) 2892,7 s'dir.

5) $m = 10$ kg ve farklı R_{13} değerleri için belirlenen ρ_3 değerleri ile geribesleme katsayıları Çizelge 6.4'de verilmiştir. Çizelgedeki geribesleme katsayılarının değerleri R_{13} 'ün değerlerinin değişmesiyle önemli miktarda değişmektedir. Dolayısıyla bir fırına optimum kontrol uygulanacaksa R_{13} 'ün değerinin mümkün olduğunca belirlenmesi ya da bu fırın için en uygun ρ_3 değerinin ve optimum geribesleme katsayılarının amprik olarak denemelerle bulunması gereklidir.

6) $m = 10$ kg ve farklı R_{13} değerleri için belirlenen en iyi ρ_3 değerine karşılık gelen malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri Şekil 6.5'de verilmiştir. Cevap eğrileri

Çizelge 6.4. Optimum kontrol işleminde Fırın-1 'de malzeme kütlesi 10 kg iken farklı R_{13} değerleri için elde edilen optimum geribesleme katsayı matrisleri.

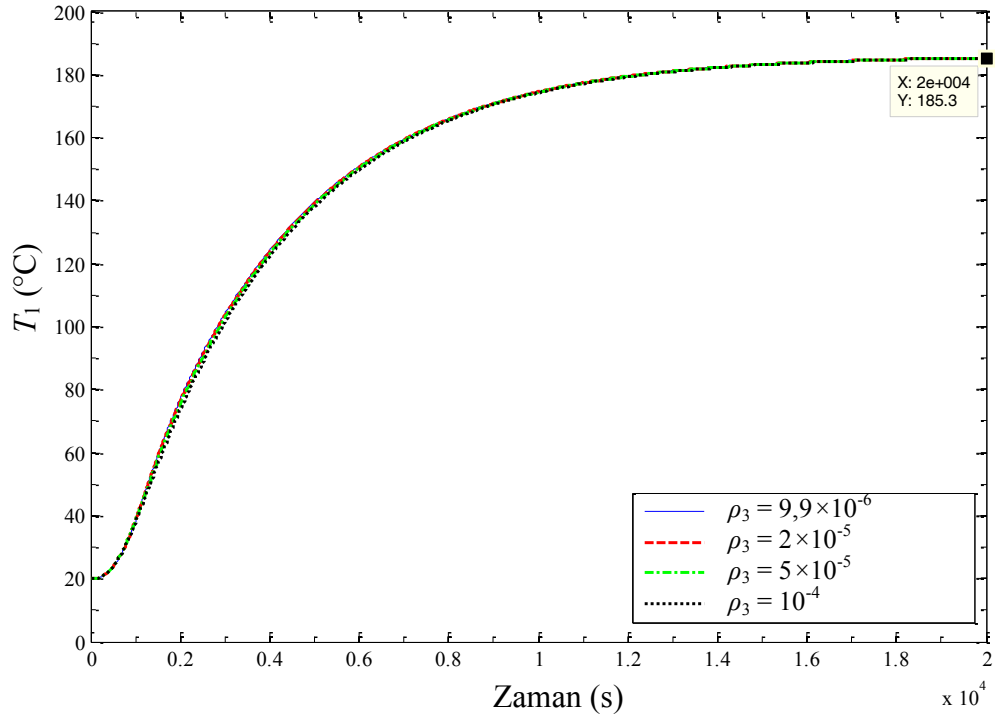
| Örnek Fırın: FIRIN-1 | | | | | |
|--|--------------------|-----------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s $^{\circ}$ C/J) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/ $^{\circ}$ C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-9} | 7×10^{-10} | 5×10^{-10} | 2×10^{-10} |
| Geri Besleme Katsayı matrisi, \mathbf{K} | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,0 |
| | | 138,0 | 138,0 | 138,0 | 139,0 |
| | | 756,0 | 825,0 | 894,0 | 1104,0 |
| | | 1681,0 | 1901,0 | 2135,0 | 2915,0 |
| | | 3608,0 | 4207,0 | 4860,0 | 7187,0 |
| | | 25438,0 | 30724,0 | 36691,0 | 59362,0 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s $^{\circ}$ C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/ $^{\circ}$ C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-4} | 5×10^{-5} | 2×10^{-5} | $9,9 \times 10^{-6}$ |
| Geri Besleme Katsayı matrisi, \mathbf{K} | | 1,4603 | 1,2516 | 0,9445 | 0,7144 |
| | | 15,0799 | 17,5070 | 20,1119 | 21,3793 |
| | | 21,0254 | 26,6531 | 35,3891 | 43,0337 |
| | | 5,6210 | 7,6282 | 11,2454 | 14,9733 |
| | | 6,1342 | 8,4700 | 12,7957 | 17,3787 |
| | | 6,6819 | 9,3764 | 14,4958 | 20,0568 |
| | | 43,9179 | 70,4877 | 128,603 | 200,274 |
| | | | | | |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s $^{\circ}$ C/J) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/ $^{\circ}$ C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-3} | 7×10^{-4} | 5×10^{-4} | 2×10^{-4} |
| Geri Besleme Katsayı matrisi, \mathbf{K} | | 1,7533 | 1,8287 | 1,8873 | 1,9809 |
| | | 4,5116 | 5,1008 | 5,7014 | 7,5606 |
| | | 4,8714 | 5,5474 | 6,2467 | 8,4842 |
| | | 1,0412 | 1,1941 | 1,3545 | 1,8833 |
| | | 1,0651 | 1,2245 | 1,3922 | 1,9504 |
| | | 1,0903 | 1,2564 | 1,4322 | 2,0222 |
| | | 16,9051 | 21,3089 | 26,4147 | 46,6404 |
| | | | | | |



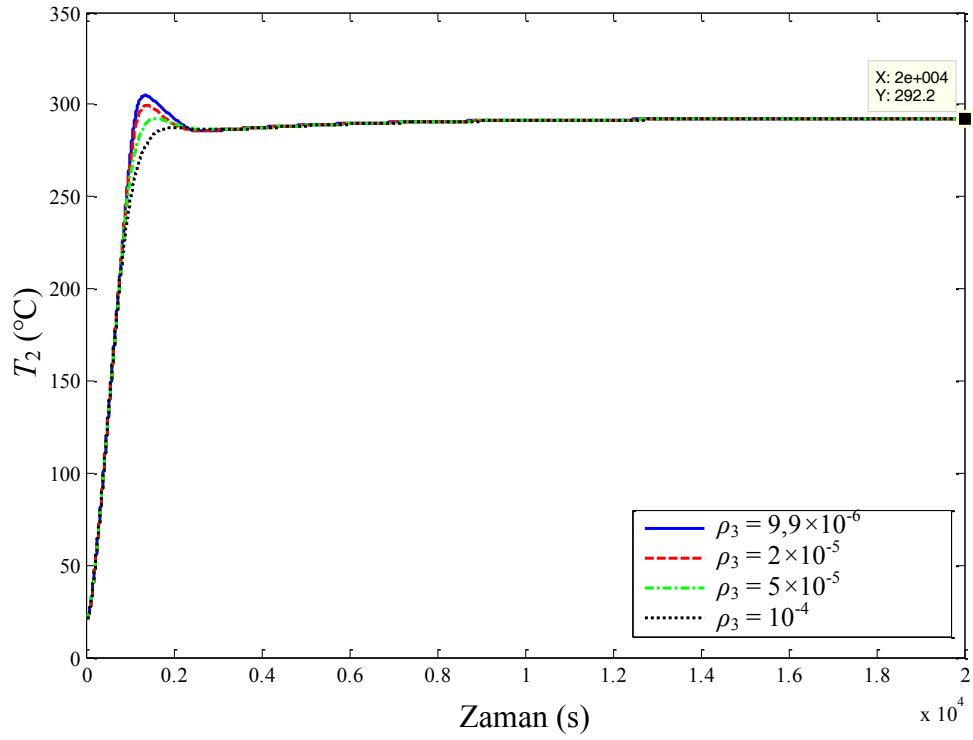
Şekil 6.5. Optimum kontrol sırasında Fırın-1'de farklı R_{13} değerleri ve $m = 10$ kg iken belirlenen en iyi ρ_3 değerlerine karşılık gelen T_7 'nin cevap eğrileri.

incelendiğinde sistem kararlılığının bir ölçütü olan yüzde aşmanın $R_{13} = 0,1$ durumunda en az $R_{13} = 1$ durumunda ise en fazla olduğu görülmektedir. R_{13} değerinin artması cevap hızının ölçütü olan gecikme zamanı, yükselme zamanı ve tepe zamanı değerleri ile görece kararlılığının bir ölçütü olan yerleşme zamanının arttığı görülmektedir. Dolayısıyla en uygun olarak belirlenen ρ_3 değerleri ile optimum geri besleme katsayıları, R_{13} 'ün değerine bağlı olarak sistemin optimum kontrolünü sağlamakta ve her bir durum için elde edilen cevap eğrileri birbirinden farklı olmaktadır.

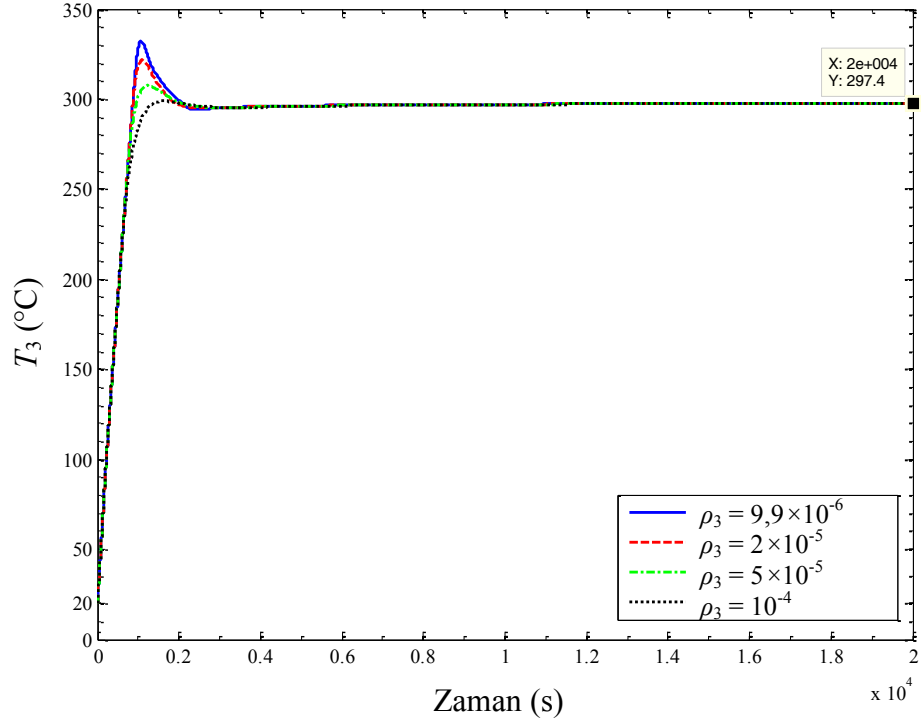
$R_{13} = 0,1$ ve $m = 10$ kg durumunda, ağırlık katsayıları $\rho_1 = 0$, $\rho_2 = 0$ iken ρ_3 'ün dört farklı değerinde elde edilen cevap eğrileri örnek olarak Şekiller 6.6-6.12'de verilmiştir. Şekil 6.6 dış yalıtım-1 katmanındaki, Şekil 6.7 dış refrakter-1 katmanındaki ve Şekil 6.8 dış refrakter-2 katmanlarındaki sıcaklıkların zamana bağlı değişimlerini göstermektedir. Şekillerde belirtilen ρ_3 'ün tüm değerleri içinde simülasyon sonunda erişilen son sıcaklıklar dış yalıtım-1 katmanı için $185,3^\circ\text{C}$; dış



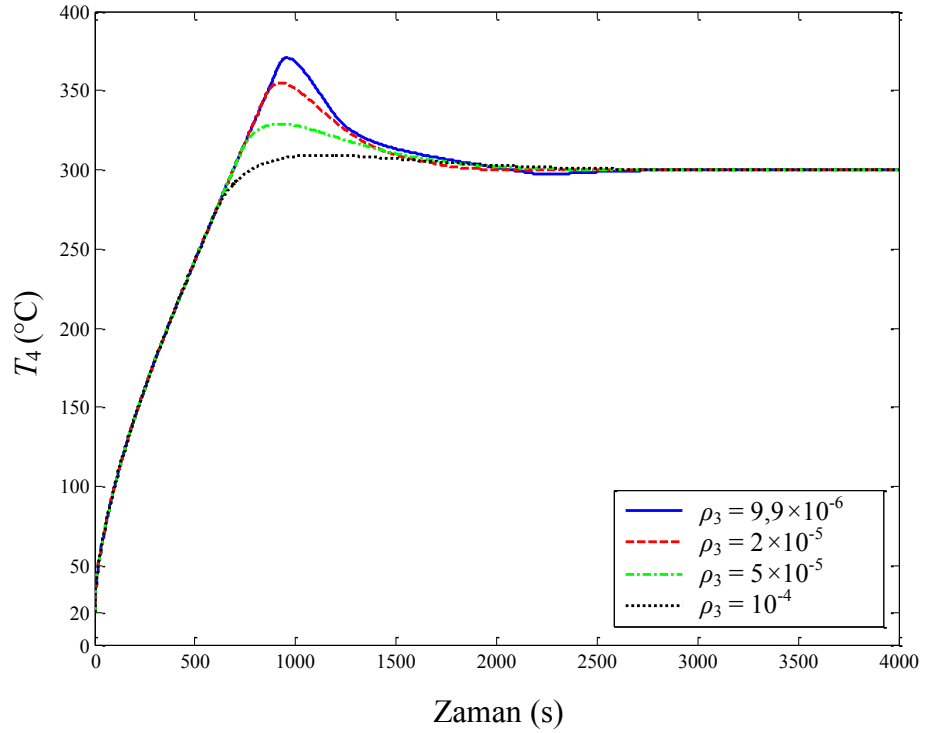
Şekil 6.6. Optimum kontrol sırasında Fırın-1'in dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg).



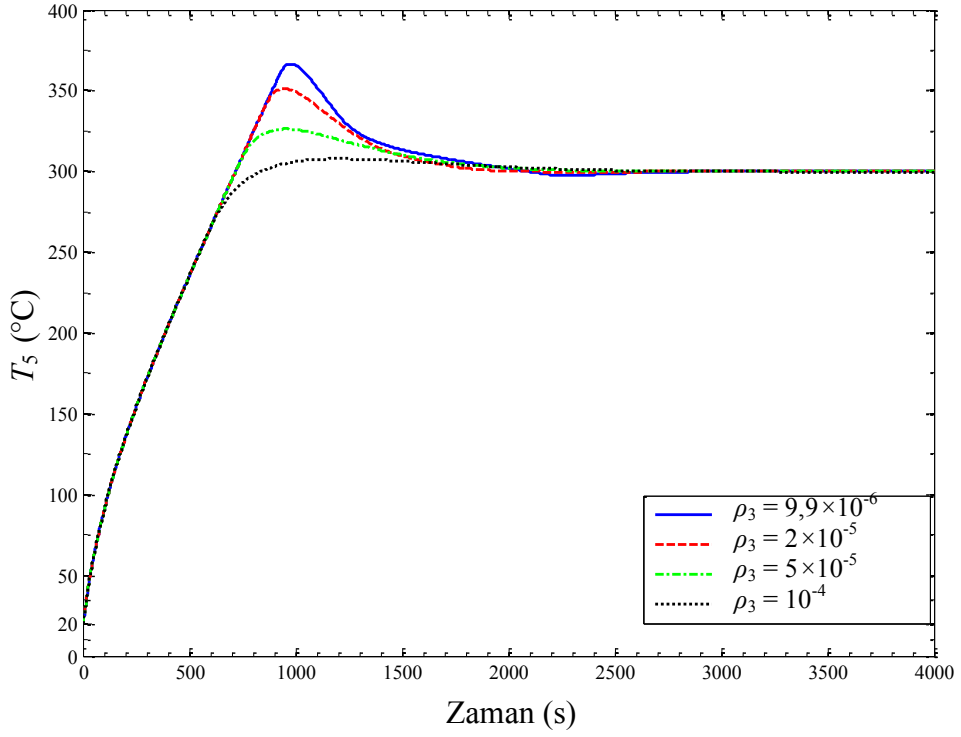
Şekil 6.7. Optimum kontrol sırasında Fırın-1'in dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg).



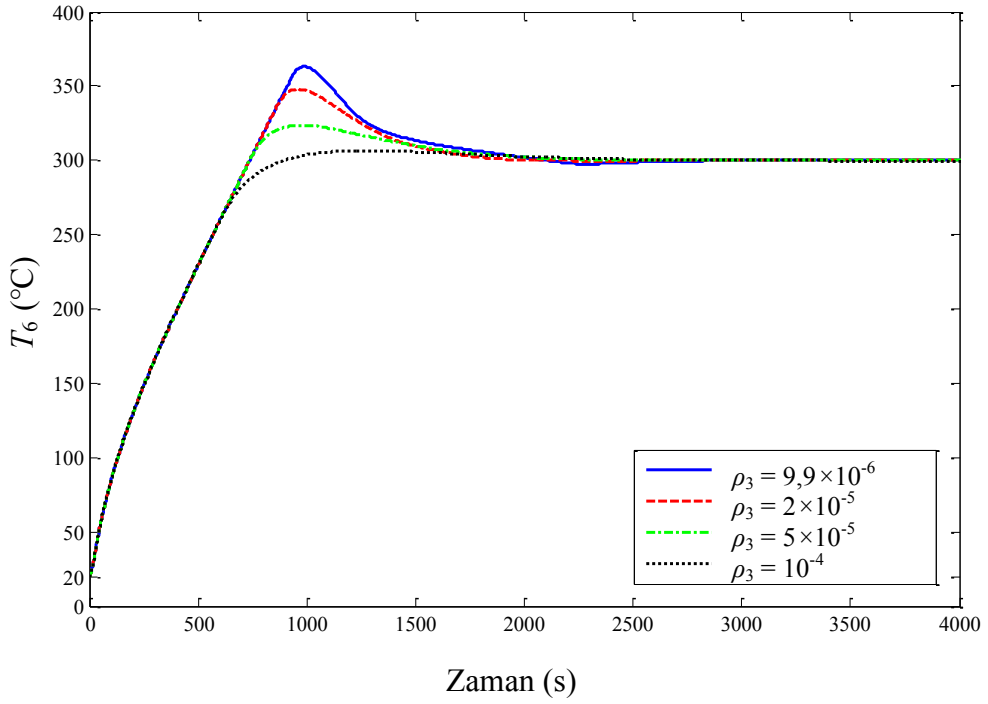
Şekil 6.8. Optimum kontrol sırasında Fırın-1'in dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg).



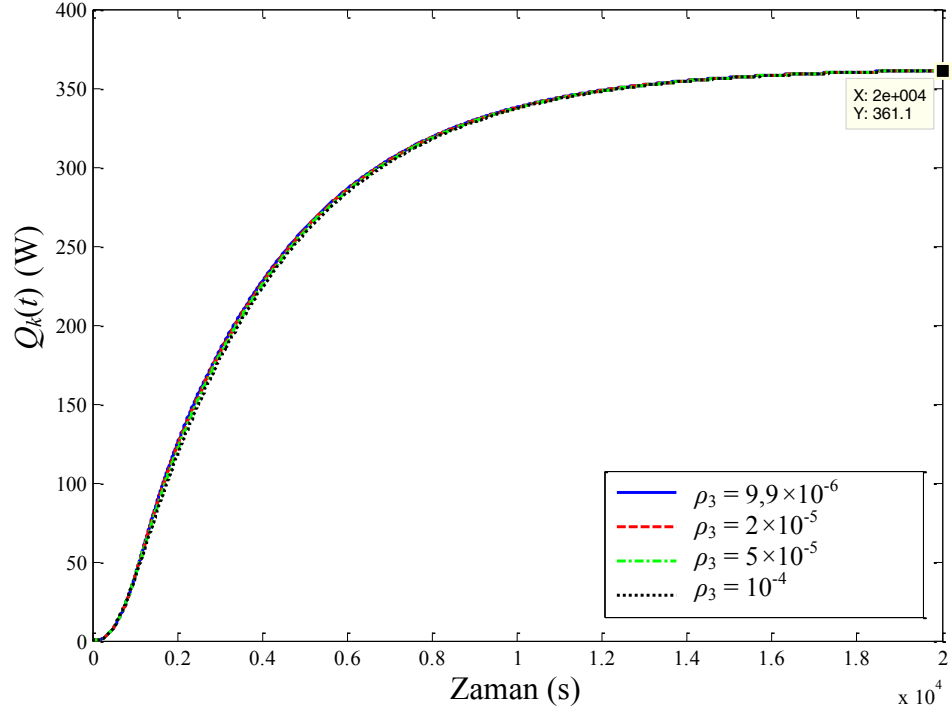
Şekil 6.9. Optimum kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg).



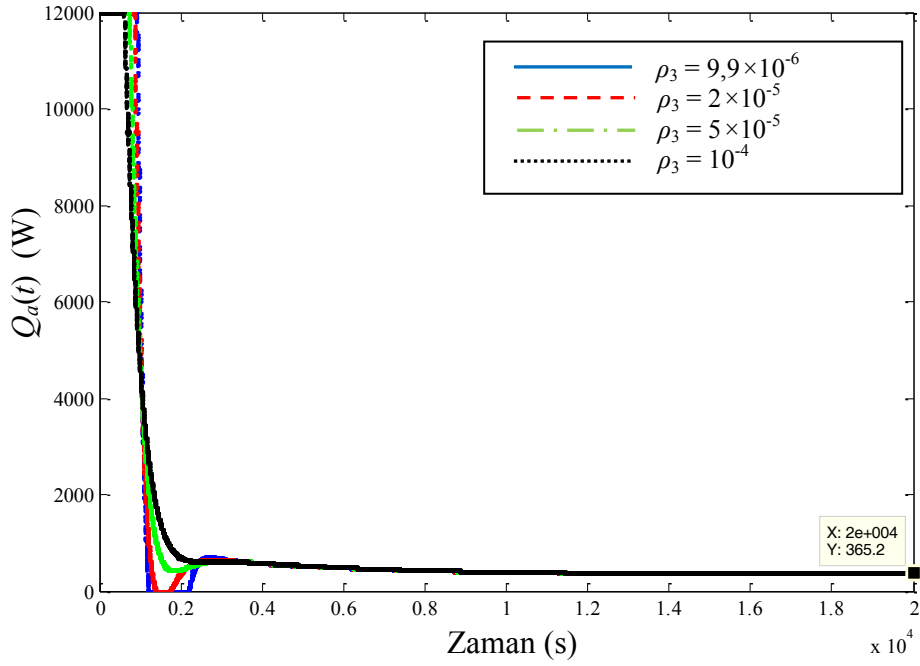
Şekil 6.10. Optimum kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg).



Şekil 6.11. Optimum kontrol sırasında Fırın-1'in iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg).



Şekil 6.12. Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de güç kayıplarının zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg).



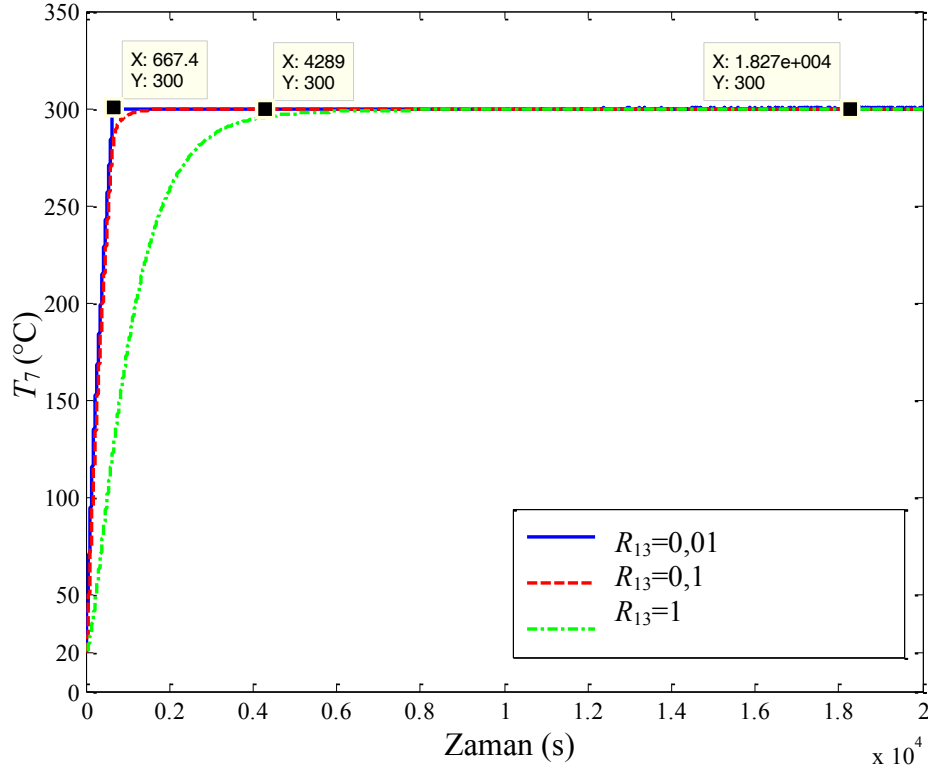
Şekil 6.13. Optimum kontrol sırasında Fırın-1’e ısıl kaynaktan aktarılan gücün zamana bağlı değişimi ($R_{13} = 0,1$; $m = 10$ kg).

refrakter-1 katmanı için 291,3 °C; dış refrakter-2 katmanı için 297,1 °C'dir. Şekil 6.9; iç refrakter-1, Şekil 6.10; iç refrakter-2, Şekil 6.11; iç refrakter-3 katmanlarındaki sıcaklık değişimini göstermekte ve son sıcaklık değerinin referans sıcaklığı ile aynı olduğu görülmektedir. Şekil 6.12'de fırından dışarıya olan güç kayıpları görülmekte ve tüm ρ_3 değerlerinde yaklaşık olarak aynı değere sahip olmaktadır. Şekil 6.13; malzeme sıcaklığının optimum kontrolü sırasında sisteme sağlanan ısı akış miktarını göstermektedir. Isıl kaynak açıldığında tüm durumlarda sisteme ilk başta 12 kW güç verilmektedir. Uygulanan ağırlık katsayılarına bağlı olarak bir süre sonra sisteme verilen güç yavaş yavaş azalmakta ve sistem durağan hale geldikçe ve istenen sıcaklık değerine ulaşıldıkça sisteme verilen ortalama güç 365 W civarında olmaktadır. Sistem durağan hale geldikten sonra dışarıya olan ortalama güç kayıpları ise yaklaşık olarak 362 W olmaktadır. Dolayısıyla bu andan sonra güç kaynağı sadece ısı kayıplardan dolayı malzeme sıcaklığının referans sıcaklığından sapmasını önlemek için sisteme güç vermektedir.

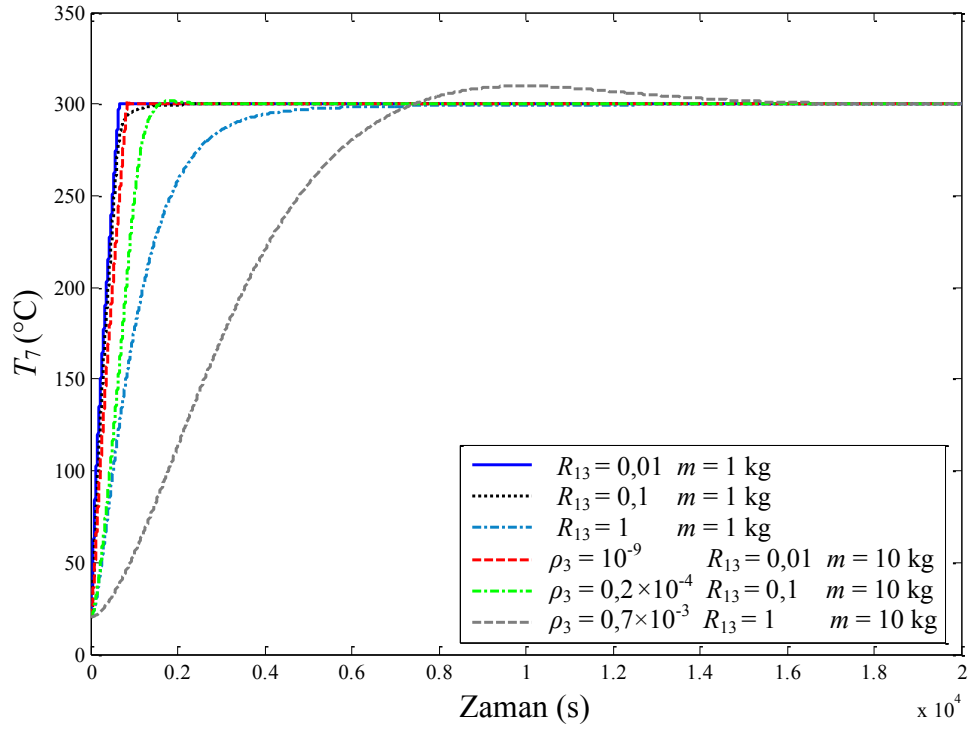
Çizelge 6.5'de verilen performans kartında Fırın-1 için $R_{13} = 0,01$; 0,1 ve 1 olduğu durumlarda, ısı işlem gören malzemenin kütlesi $m = 1$ kg iken ve optimum kontrol için $m = 10$ kg durumunda saptanan optimum geri besleme katsayıları aynen kullanıldığında elde edilen performans parametreleri verilmiştir. Şekil 6.14'de ise bu R_{13} değerleri, malzeme kütlesi ve optimum geribesleme katsayıları için elde edilen, malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri görülmektedir. Çizelge ve cevap eğrileri incelendiğinde; $m = 10$ kg iken ki duruma benzer olarak sistem cevap hızının ölçütü olan gecikme ve yükselme zamanları ile sistem kararlılığının bir ölçütü olan yerleşme zamanının R_{13} değerinin artmasıyla arttığı görülmektedir. $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumlarında referans sıcaklığından aşma olmamakta, $R_{13} = 0,1$ durumundan ise % 0,03 oranında aşma meydana gelmektedir. R_{13} değerinin değişmesi fırından dış ortama olan ortalama güç kayıplarını çok fazla etkilememektedir. Göreli kararlılığın bir ölçütü olan yüzde aşmanın $R_{13} = 0,1$ durumunda en az $R_{13} = 1$ durumunda ise en fazla olduğu görülmektedir. Şekil 6.15'de $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg iken, farklı R_{13} değerlerinde, aynı geri besleme katsayıları kullanılarak elde edilen malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri görülmektedir. Cevap eğrileri incelendiğinde $m = 10$ kg iken

Çizelge 6.5. Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı ($m = 1$ kg).

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|--|--|--|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Geribesleme Katsayı Matrisi, \mathbf{K} | | $m = 10$ kg için elde edilen geribesleme katsayı matrisidir. | $m = 10$ kg için elde edilen geribesleme katsayı matrisidir. | $m = 10$ kg için elde edilen geribesleme katsayı matrisidir. |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 440 | 440 | 440 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 238,8 | 279,5 | 818,8 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 543,4 | 565,2 | 2180,2 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 659,9 | Aşma yok | Aşma yok |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 662,9 | Aşma yok | Aşma yok |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 300,1 | Aşma yok | Aşma yok |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,03 | Aşma yok | Aşma yok |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 639,3 | 854,8 | 3931,1 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,3 | 7222,8 | 7215 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 361,1 | 360,7 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,2 | 361,1 | 366,0 |



Şekil 6.14. Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de $m = 1$ kg iken malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



Şekil 6.15. Optimum kontrol sırasında Fırın-1’de $m=1$ kg ve $m=10$ kg iken farklı R_{13} değerlerinde malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

iken bulunan optimum geribesleme katsayıları, $m = 1$ kg iken ki duruma uygulandığında sistem cevap hızının ve görelî kararlılığın bütün R_{13} değerleri için iyileştiği görülmektedir. $R_{13} = 0,01$ ve $R_{13} = 0,1$ durumlarında $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg için elde edilen cevap eğrilerinde çok fazla bir değişim meydana gelmediği buna karşılık $R_{13} = 1$ durumunda $m = 1$ kg iken elde edilen cevap eğrisinde $m = 10$ kg iken ki durumdan farklı olarak aşmanın olmadığı ve sistem cevap hızının önemli miktarda iyileştiği görülmektedir. Dolayısıyla R_{13} 'ün büyük değerlerinde, sistem cevap hızı, malzeme kütesinin değişimine daha duyarlı olmaktadır. $m = 10$ kg iken bulunan optimum geribesleme katsayılarının $m = 1$ kg için de iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Dolayısıyla aynı fırında malzeme kütesinin değişmesi geribesleme katsayılarının yeniden bulunmasını gerektirmemektedir.

6.4.2. Fırın-2'de Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü

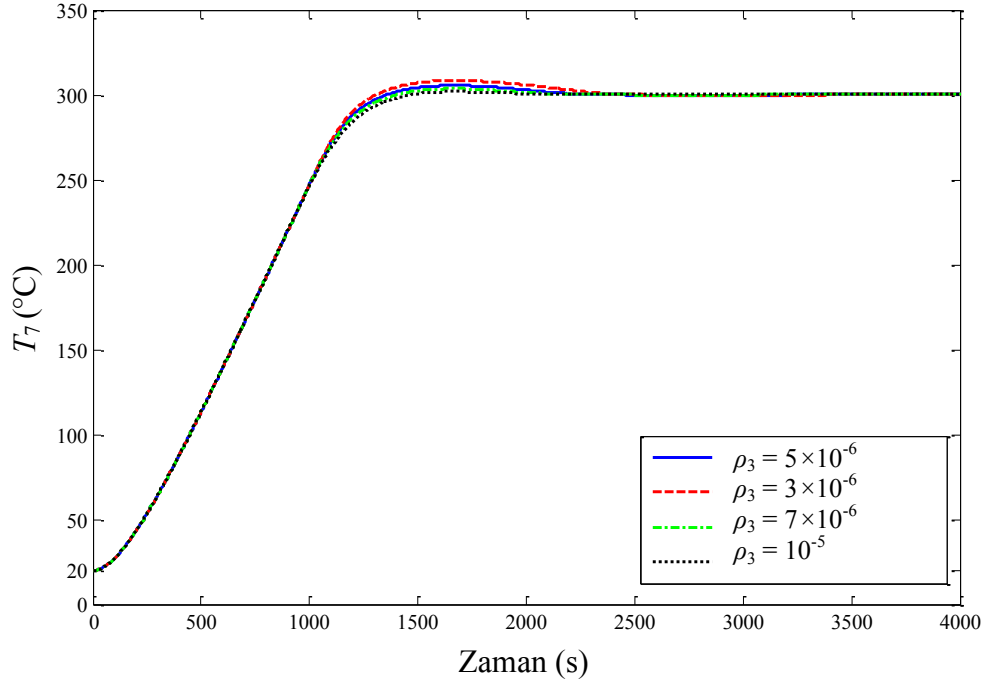
Çizelge 6.6'da verilen performans kartında Fırın-2 için $R_{13} = 0,1$ durumunda malzemenin kütesi $m = 10$ kg iken sistem geçici zaman cevaplarını tanımlayan performans parametreleri görülmektedir. Sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri Şekil 6.16' da verilmiştir.

Çizelge ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- 1) $R_{13} = 0,1$ değerinde optimum sistemin performansı ρ_3 'ün değerinden fazla etkilenmemektedir.
- 2) Gecikme zamanları, ısı kaynakından fırına aktarılan ortalama güç ve fırından dış ortama olan ısı kaçaklar denenen bütün ρ_3 değerleri için aynı olmaktadır. Yükselme ve geçit zamanları ρ_3 değeri azaldıkça azalmakta ve $\rho_3 = 3 \times 10^{-6}$ için en küçük değerine erişmektedir. Denenen bütün ρ_3 değerleri için tepe aşmalarının ve tepe zamanlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. ρ_3 değeri azaldıkça tepe sıcaklığı artmakta, $\rho_3 = 7 \times 10^{-6}$ değerinde tepe zamanı en az olmaktadır. Denenen değerlerden $\rho_3 = 5 \times 10^{-6}$ değerinde sistemin yerleşme zamanının en az olduğu görülmektedir. Sistemin bu değer için yerleşme zamanı

Çizelge 6.6. Optimum kontrol işleminde Fırın-2 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-2 | | | | | |
|---|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_2 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-5} | 7×10^{-6} | 5×10^{-6} | 3×10^{-6} |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s $^{\circ}$ C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/ $^{\circ}$ C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | ($^{\circ}$ C) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 640,1 | 640,1 | 640,1 | 640,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 981,5 | 973,5 | 968,4 | 963,8 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1469,1 | 1402,5 | 1357,7 | 1309,6 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1668,2 | 1666,6 | 1668,3 | 1673,5 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | ($^{\circ}$ C) | 301,8 | 303,6 | 305,4 | 308,4 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,8 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 1312,2 | 1282,4 | 1258,8 | 1985,8 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 16306,1 | 16306,1 | 16306,1 | 16306,1 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 815,3 | 815,3 | 815,3 | 815,3 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 815,3 | 815,3 | 815,3 | 815,3 |



Şekil 6.16. Optimum kontrol sırasında Fırın-2’de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

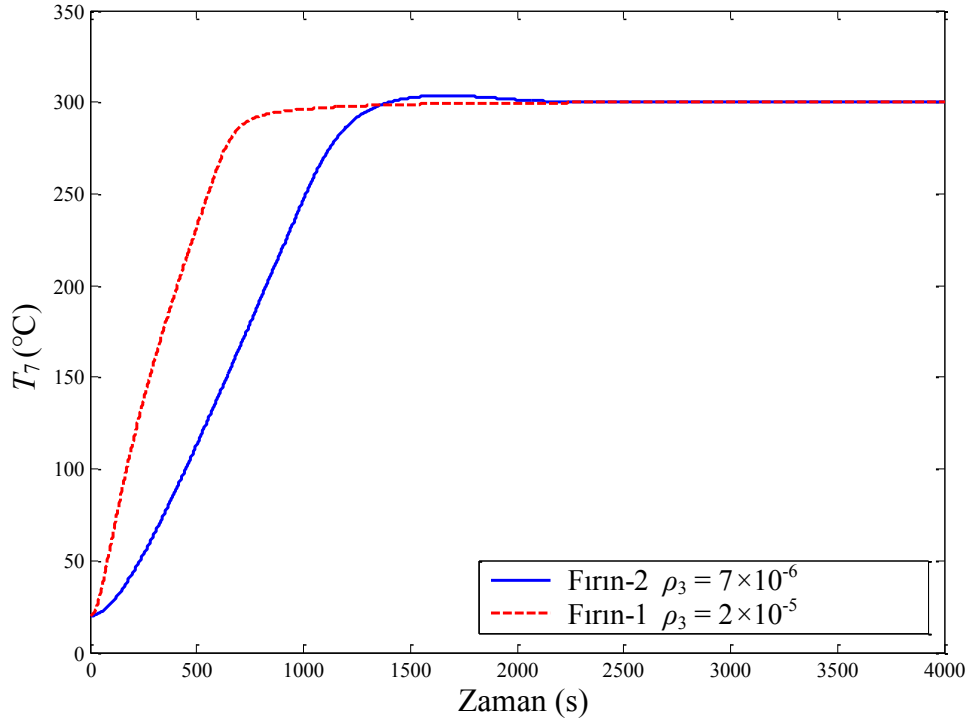
yaklaşık olarak 21 dakikadır. Diğer parametrelere bakıldığında birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Tüm bunlar göz önüne alındığında $\rho_3 = 7 \times 10^{-6}$ değeri için sistemin optimum kontrolü gerçekleşmektedir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 21 dakika, tepe sıcaklığı (T_m) 303,6 °C, tepe zamanı (t_p) 1666,6 s, yükselme zamanı (t_r) 973,5 s, geçit zamanı (t_c) 1402,5 s, gecikme zamanı (t_d) 640,1 s’dir.

3) $m = 10$ kg ve $R_{13} = 0,1$ durumu için belirlenen ρ_3 değerleri ile geribesleme katsayıları Çizelge 6.7’de verilmiştir. Optimum geribesleme katsayıları, ağırlık katsayısı ρ_3 ’ün 7×10^{-6} değeriyle birlikte verilen değerlerdir.

4) $m = 10$ kg ve $R_{13} = 0,1$ durumunda Fırın-1 ve Fırın-2 için en iyi olarak belirlenen ρ_3 değerleri ve optimum geribesleme katsayılarıyla malzeme sıcaklığının optimum kontrolü ile elde edilen T_7 ’ye ait cevap eğrileri Şekil 6.17’de verilmiştir. Fırın-2 dış yalıtım katman kalınlığının, Fırın-1’e oranla $\frac{1}{4}$ oranında azaltıldığı bir fırın olduğundan fırından dışarıya olan güç kayıpları artmakta ve sistemin cevap

Çizelge 6.7. Optimum kontrol işleminde Fırın-2’de $m = 10$ kg ve $R_{13} = 0,1$ değeri için elde edilen optimum geribesleme katsayı matrisleri.

| Örnek Fırın: FIRIN-2 | | | | | |
|--|----------|--|--|--|--|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-5} | 7×10^{-6} | 5×10^{-6} | 3×10^{-6} |
| Geri Besleme Katsayı matrisi, \mathbf{K} | | 1,9401 20,3288 42,5148 14,8617 17,2604 19,9274 199,214 | 1,7621 20,7233 46,7116 17,1384 20,1066 23,4365 247,963 | 1,5820 20,9188 50,8246 19,5575 23,1678 27,2543 303,829 | 1,3001 20,8834 57,3076 23,7948 28,6122 34,1450 411,276 |



Şekil 6.17. Optimum kontrol sırasında Fırın-1 ve Fırın-2’de $R_{13} = 0,1$ durumu için malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

hızı daha yavaş olmaktadır. Sistemin yerleşme zamanı ise Fırın-1' e oranla yaklaşık 5 dakika kadar iyileşmektedir. Optimum kontrol yöntemi aynı R_{13} ve m değerlerinde, dış yalıtım katmanının daha kalın olduğu Fırın-1 için, Fırın-2'ye oranla sistem cevap hızı bakımından daha iyi, sistemin göreceli kararlılığı için ise Fırın-2 ile yakın sonuçlar vermektedir. Fırın-2'de dışarıya olan güç kayıplarının daha fazla olduğu bundan dolayı sistemin ısı dengeye geldiği ana kadar ve ısı dengeye geldikten sonra fırından dışarıya olan ısı kaçakları karşılamak için ısı kaynağın daha fazla ısı güç sağlaması gerektiği göz önüne alınmalıdır. Fırın üreticilerinin fırın dış yalıtım katman kalınlığını artırıp optimum kontrol uyguladığı bir fırında daha avantajlı sonuçlar elde edeceği görülmektedir.

6.4.3. Fırın-3'de Malzeme Sıcaklığının Optimum Kontrolü

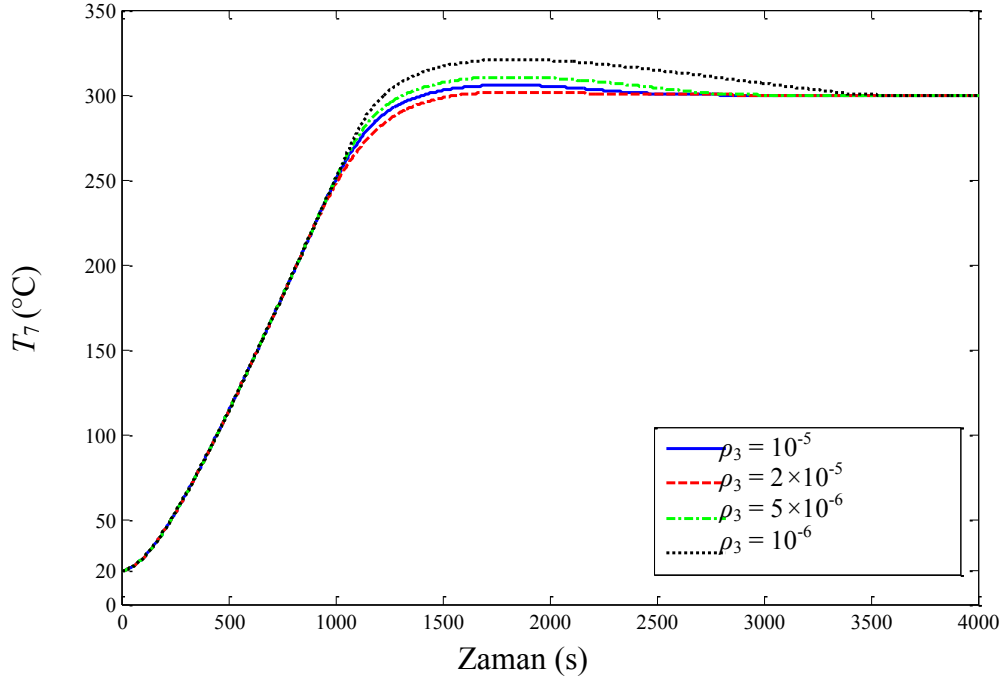
Çizelge 6.8'de verilen performans kartında Fırın-3 için $R_{13} = 0,1$ durumunda malzemenin kütlesi $m = 10$ kg iken sistem geçici zaman cevaplarını tanımlayan performans parametreleri görülmektedir. Sistem çıkışı olan malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri Şekil 6.18' de verilmiştir.

Çizelge ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- 1) $R_{13} = 0,1$ değerinde optimum sistemin performansı Fırın-1 ve Fırın-2'ye oranla ρ_3 'ün değerinden daha fazla etkilenmektedir. Bütün ρ_3 değerleri için cevap eğrileri benzer özellik göstermedir.
- 2) Gecikme zamanları ve fırından dışarıya olan ortalama güç kayıpları tüm ρ_3 değerleri için aynı olmaktadır. Sisteme sağlanan ortalama güç değerleri ρ_3 'ün değişik değerlerinde birbirine çok yakın olmaktadır. Yükselme ve geçit zamanları ile tepe sıcaklıkları ρ_3 değeri azaldıkça artmaktadır. Yerleşme ve tepe zamanları $\rho_3 = 10^{-5}$ değerinde azalmakta ve en küçük değerine ulaşmakta bu değerden sonra tekrar artmaktadır. Bütün bunlar göz önüne alındığında sistemin optimum kontrolünü gerçekleştirmek için seçilmesi gereken değer $\rho_3 = 10^{-5}$ 'dir. Bu değerde %2 kriterine göre sistemin yerleşme zamanı (t_s) 22 dakika, tepe sıcaklığı

Çizelge 6.8. Optimum kontrol işleminde Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-3 | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_2 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 2×10^{-5} | 10^{-5} | $0,5 \times 10^{-5}$ | 10^{-6} |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s $^{\circ}$ C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/ $^{\circ}$ C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | ($^{\circ}$ C) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 637,3 | 637,3 | 637,3 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 998,5 | 969,4 | 955,1 | 946,6 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1589,3 | 1416,4 | 1324,0 | 1230,0 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 1833,5 | 1812,6 | 1819,2 | 1842,9 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | ($^{\circ}$ C) | 301,6 | 305,7 | 310,5 | 320,8 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,52 | 1,9 | 3,5 | 6,9 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 1381,7 | 1295,5 | 2365,2 | 3048,0 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 2408,3 | 2408,6 | 2409 | 2410,1 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 120,4 | 120,4 | 120,4 | 120,5 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 142,2 | 142,06 | 141,9 | 141,6 |



Şekil 6.18. Optimum kontrol sırasında Fırın-3'de malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

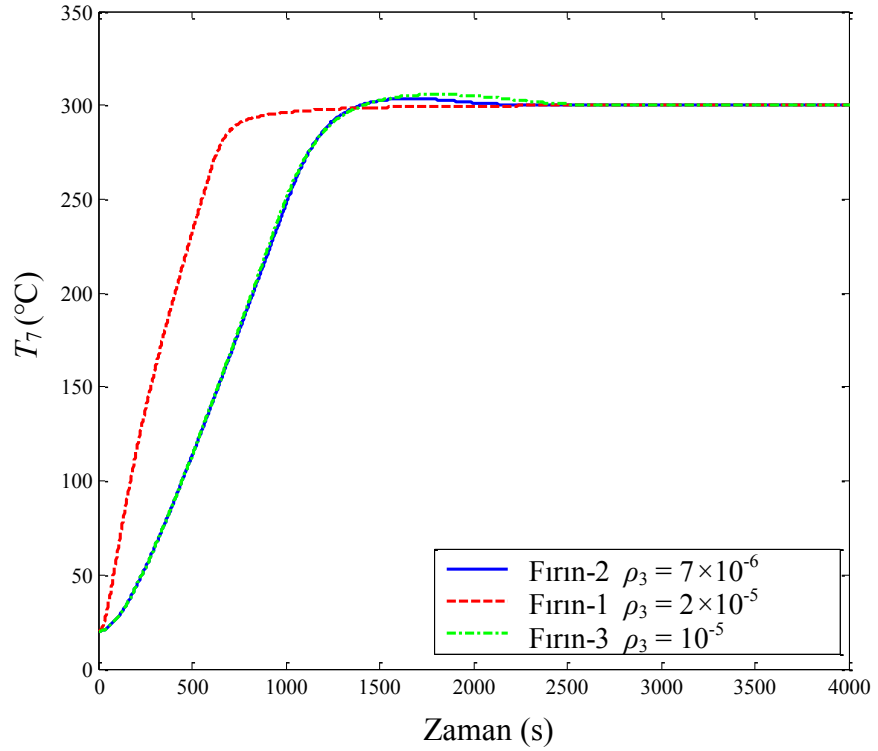
(T_m) 305,7 °C, tepe zamanı (t_p) 1812,6 s, yükselme zamanı (t_r) 969,4 s, geçit zamanı (t_c) 1416,4 s, gecikme zamanı (t_d) 637,3 s'dir.

3) $m = 10$ kg ve $R_{13} = 0,1$ durumu için belirlenen ρ_3 değerleri ile geribesleme katsayıları Çizelge 6.9'de verilmiştir. Optimum geribesleme katsayıları, ağırlık katsayısı ρ_3 'ün 10^{-5} değeriyle birlikte verilen değerlerdir.

4) $m = 10$ kg ve $R_{13} = 0,1$ durumunda Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 için en iyi olarak belirlenen ρ_3 değerleri ve optimum geribesleme katsayılarıyla malzeme sıcaklığının optimum kontrolü ile elde edilen T_7 'ye ait cevap eğrileri Şekil 6.19'da verilmiştir. Fırın-3, Fırın-1'in en dışına cam yününden bir yalıtım katmanının eklenmesiyle elde edilen bir fırın olduğundan fırından dışarıya olan güç kayıpları Fırın-1'e oranla yaklaşık 2,5 kat, Fırın-3'e oranla 7 kat azalmaktadır. Bu katmandaki direnç değerinin diğer fırınlara oranla çok fazla artmış olması, malzeme sıcaklığının referans sıcaklığı değerine erişmesi için geçen sürenin Fırın-1'e oranla bir miktar artmasına yol açmaktadır. Fırın-3'de

Çizelge 6.9. Optimum kontrol işleminde Fırın-3’de $m = 10$ kg ve $R_{13} = 0,1$ değeri için elde edilen optimum geribesleme katsayı matrisleri.

| Örnek Fırın: FIRIN-3 | | | | | |
|---|----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Parametre | Birim | Değer | | | |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 | 4400 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 2×10^{-5} | 10^{-5} | 5×10^{-6} | 10^{-6} |
| Geri Besleme Katsayı matrisi, K | | 1,9401 | 1,7621 | 1,5820 | 1,3001 |
| | | 20,3288 | 20,7233 | 20,9188 | 20,8834 |
| | | 42,5148 | 46,7116 | 50,8246 | 57,3076 |
| | | 14,8617 | 17,1384 | 19,5575 | 23,7948 |
| | | 17,2604 | 20,1066 | 23,1678 | 28,6122 |
| | | 19,9274 | 23,4365 | 27,2543 | 34,1450 |
| | 199,214 | 247,963 | 303,829 | 411,276 | |



Şekil 6.19. Optimum kontrol sırasında Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3’de $R_{13} = 0,1$ durumu için malzeme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

sistem cevap hızı Fırın-1'e oranla daha yavaş, Fırın-2 ile çok yakın olmaktadır. Fırının duvar katmanlarında depolanan ısı miktarı dışarıya olan ısı kayıplarının azalmasından dolayı diğer fırınlara oranla daha fazla olduğundan sistemin tepe sıcaklığının eriştiği değer de daha fazla olmaktadır. Sistemin yerleşme zamanı Fırın-1'e oranla yaklaşık 15 dakika, Fırın-2'ye oranla 20 dakika fazla olmaktadır. Dış yalıtım katman kalınlığının artması sistemin yerleşme zamanının artmasına yol açmaktadır. Bütün bunlar göz önüne alındığında fırın duvar katman kalınlıklarını optimum bir değerde tutarak sisteme optimum kontrol uygulanmasının hem sistemin cevap hızı ile görece kararlılığını iyileştireceği hem de fırından dışarıya olan ısı kaçakları optimum seviyeye indirildiğinden fırına sağlanması gereken ısı gücünü optimum seviyede tutulabileceği görülmektedir.

7. GÖZLEMLEYİCİ KULLANARAK MALZEME SICAKLIĞININ OPTİMUM KONTROLÜ

7.1 Gözlemleyiciler ve Çalışma Prensipleri

Bölüm 6'da bahsedilen optimum kontrol uygulamasında Riccati denklemi kullanılarak en iyi geri besleme katsayılarının elde edilebilmesi için, sistemin bütün durum değişkenlerinin bilinmesi gerekir. Ancak özellikle yüksek mertebeli sistemlerde tüm durum değişkenlerinin ölçülmesi için gereken ölçüm ve veri toplama sistemleri yatırım maliyetini arttırdığı gibi, sistemin bakım – onarımını da güçleştirir. Örneğin bu tezde incelenen ısı işlem fırınında bütün duvar katmanlarının ve işlem gören malzemenin sıcaklıklarının yedi yerde ayrı ayrı ölçülmesi uygulayıcı yönünden arzu edilmeyen bir durumdur. Birçok sistemde ise durum değişkenlerinin ölçüldüğü yerlere erişimin mümkün olmaması ya da bazı durum değişkenlerinin ölçülmesi için gerekli transdüserlerin piyasada bulunmaması gibi nedenlerden dolayı tüm durum değişkenlerinin ölçülmesi mümkün değildir. Bu durumda da ölçülemeyen durum değişkenlerinin, ölçülebilenler cinsinden kestirilmesi gerekir. Bu amaçla, ölçüm gürültüsünün fazla olduğu durumlarda Kalman filtresinden, gürültünün az olduğu durumlarda ise gözlemleyicilerden yararlanır. Çalışmanın bu aşamasında ısı işlem fırınının ölçülemeyen durum değişkenlerinin kestirilebilmesi için gözlemleyicilerin tasarlanması ve kestirilen değişkenleri kullanarak optimum kontrolün gerçekleştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Gözlemleyicilerle ilgili ilk çalışmaları yapan Luenberger bir çalışmada değişik tipte gözlemleyicilerin (mertebesi düşürülmüş, doğrusal, çoklu) ulaşılamayan durum değişkenlerinin kestirilmesinde iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur [37]. Luenberger bir başka çalışmada n sayıda durum değişkenine ve m sayıda bağımsız çıkış değişkenine sahip olan çok değişkenli bir sistem için $(n - m)$ 'inci mertebeden gözlemleyici kullanarak sistem denklemlerini yeniden elde etmiş ve çalışma sonucunda gözlemleyicilerle tahmin edilmiş olan durum değişkenlerinin sistemin

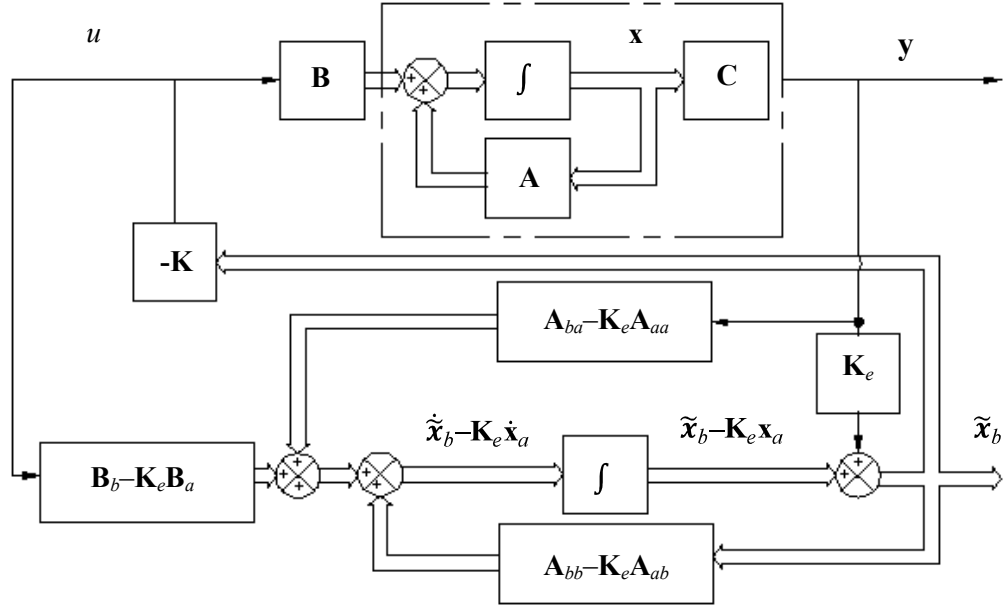
kararlılığını bozmadan, doğrusal olan ve olmayan geri beslemeli sistemlerdeki durum vektörlerinin yerine kullanılabileceğini ortaya koymuştur [38].

Luenberger'in başlattığı çalışmalardan bu yana gözlemleyicilerle ilgili olarak pek çok araştırma yürütülmüş ve sonuçlar literatürde yayınlanmıştır. Gözlemleyici tasarım yöntemleri artık ders kitaplarında yerini almış, gözlemleyici tasarımını kolaylaştırmak için bazı paket programlara modül olarak dahil edilmiştir [34]. Bu tezin amacı gözlemleyici tasarımına bir yenilik getirmek olmadığından gözlemleyicilerin bu günlere gelmesi için yapılan araştırmalara değinilmeyecektir. Bunun yerine tasarım yöntemi özetlenecek ve bu yöntemin ısı işlem fırınlarının kontrolüne uygulanması incelenecektir.

Eğer kontrol edilecek sistem tek çıkışlıysa, durum değişkenlerinin kestirilmesi için kullanılması gereken gözlemleyicinin mertebesi kontrol edilecek sistemin mertebesinden bir eksiktir. Eğer sistemin mertebesi n , sistemin çıkış sayısı m ise (örneğin m sayıda durum değişkeni çıkış ise), bu durumda gözlemleyici mertebesinin $(n - m)$ olması yeterlidir. Bu tür gözlemleyicilere düşük mertebeli ya da minimum mertebeli durum gözlemleyicisi denir[23, 34]. Bu tezde iki farklı hal için düşük mertebeli durum gözlemleyicisi denenecek ve bu gözlemleyiciler kullanılarak yapılan optimum kontrol işlemlerinin sonuçları karşılaştırılacaktır. Kullanılacak gözlemleyicilerden ilkinde hem ısı işlem gören malzemenin sıcaklığı hem de enerji kayıplarının bir ölçütü olduğundan fırının en dış duvar katmanı sıcaklığı ölçülmekte ve bundan sistemin diğer durum değişkenleri kestirilmektedir. İkinci gözlemleyicide ise sadece fırında ısı işlem gören malzemenin sıcaklığı ölçülüp diğer durum değişkenleri kestirilmektedir.

7.2. Düşük Mertebeden Durum Gözlemleyicilerinin Çalışma Prensibi

Şekil 7.1'de düşük mertebeden durum gözlemleyicisi kullanılarak tasarlanmış kapalı çevrimli bir kontrol sisteminin blok diyagramı görülmektedir [22]. Kontrol edilen ana sistem tek kontrol girişli, gözlemlenebilir ve kontrol edilebilir bir sistem olup aşağıdaki denklemlerle tanımlanmıştır.



Şekil 7.1. Düşük mertebeden durum gözlemleyicisi kullanılarak tasarlanmış kapalı döngü bir kontrol sisteminin blok diyagramı.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (7.1)$$

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (7.2)$$

Durum vektörü \mathbf{x} ; n boyutlu, çıkış vektörü \mathbf{y} ; m boyutlu bir vektör ve ölçülebilen değerlere sahip iken, m çıkış değişkenleri, durum değişkenlerinin doğrusal bir kombinasyonudur ve kestirimlerine gerek yoktur. Bu durumda $(n - m)$ mertebeye bir gözlemleyici tasarlanması ve sadece $(n - m)$ tane durum değişkeninin kestirilmesi gerekmektedir. Ana sistemin kontrol girişi u ve çıkışı \mathbf{y} , gözlemleyicinin girişleridir. $\tilde{\mathbf{x}}$ ise kestirilen değişkenlerinde içinde yer aldığı durum vektörüdür.

Sistem çıkışı olarak m sayıda durum değişkeni ölçülüyorsa, \mathbf{x} durum vektörü; \mathbf{x}_a (m boyutunda bir vektör) ve \mathbf{x}_b ($n - m$ boyutunda bir vektör) şeklinde ikiye bölünebilir. Burada \mathbf{x}_a doğrudan ölçülebilir. Sistemin ölçülemeyen durum değişkenleri ise \mathbf{x}_b ile ifade edilmektedir. Bu şekilde ikiye bölünmüş durum denklemleri ve sistemin çıkış denklemi, denklemler (7.3) ve (7.4) ile ifade edildiği gibidir. Burada; \mathbf{A}_{aa} , $m \times m$;

\mathbf{A}_{ab} , $m \times (n - m)$; \mathbf{A}_{ba} , $(n - m) \times m$; \mathbf{A}_{bb} , $(n - m) \times (n - m)$; \mathbf{B}_a , $m \times 1$, \mathbf{B}_b ; $(n - m) \times 1$; \mathbf{C}_a , $1 \times m$, \mathbf{C}_b ; $1 \times (n - m)$ boyutunda matrislerdir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_a \\ \dots \\ \dot{\mathbf{x}}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{aa} & \mathbf{A}_{ab} \\ \dots & \vdots \\ \mathbf{A}_{ba} & \mathbf{A}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a \\ \dots \\ \mathbf{x}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_a \\ \dots \\ \mathbf{B}_b \end{bmatrix} u \quad (7.3)$$

$$y = [\mathbf{C}_a \vdots \mathbf{C}_b] \begin{bmatrix} x_a \\ \dots \\ x_b \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Denklemler (7.3) ve (7.4) kullanılarak durum değişkenlerinin ölçülebilen kısmı için denklemler;

$$\dot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{A}_{aa}x_a + \mathbf{A}_{ab}\mathbf{x}_b + \mathbf{B}_a u \quad (7.5)$$

veya

$$\dot{\mathbf{x}}_a - \mathbf{A}_{aa}x_a - \mathbf{B}_a u = \mathbf{A}_{ab}\mathbf{x}_b \quad (7.6)$$

şeklinde yazılır. Denklem (7.6)'nın solunda kalan değişkenler ölçülebilen değişkenlerdir.

Ölçülemeyen durum değişkenleri ise

$$\dot{\mathbf{x}}_b = \mathbf{A}_{ba}x_a + \mathbf{A}_{bb}\mathbf{x}_b + \mathbf{B}_b u \quad (7.7)$$

olarak yazılır.

Ölçülemeyen durum değişkenlerinin kestirilen değerleri $\tilde{\mathbf{x}}_b$ ile gösterilmiştir. $\tilde{\mathbf{x}}_b$ aynı zamanda gözlemleyicinin de durum vektörüdür.

Düşük mertebeden gözlemleyiciye ait durum denklemleri Şekil 7.1'den aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_b = (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}) \tilde{\mathbf{x}}_b + (\mathbf{A}_{ba} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{aa}) \mathbf{x}_a + (\mathbf{B}_b - \mathbf{K}_e \mathbf{B}_a) u + \mathbf{K}_e \dot{\mathbf{x}}_a \quad (7.8)$$

Bu ifadede geçen \mathbf{K}_e gözlemleyici kazanç matrisi olup ana sistemin sistemin çıkış değeri gözlemleyici tarafından kestirilen çıkış değeri arasındaki farkı çarpan bir katsayı olarak tanımlanır.

Denklem (7.7)'den denklem (7.8) çıkarılırsa

$$\dot{\mathbf{x}}_b - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_b = (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab})(\mathbf{x}_b - \tilde{\mathbf{x}}_b) \quad (7.9)$$

elde edilir.

Düşük mertebeden gözlemleyiciye ait hata vektörü \mathbf{e} ,

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_b - \tilde{\mathbf{x}}_b \quad (7.10)$$

olarak tanımlanırsa

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}) \mathbf{e} \quad (7.11)$$

olur. Dolayısıyla $\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}$ matrisinin öz değerleri hatanın dinamik davranışını belirler. $\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}$ kararlı ise hata da zaman ilerledikçe sifıra doğru gider. Yani \mathbf{K}_e seçilirken denklem (7.11)'in kararlı olması ve cevap hızının yeterli olması dikkate alınmak zorundadır [22].

Kontrol edilen ana sistem bozuculardan etkilenmiyorsa denklem (7.11) ile tanımlanan hata, $\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}$ kararlı ise zamanla sifıra doğru gider. Ancak fiziksel sistemlerde bozucu etkiler daima bulunduğundan genel kural denklem (7.11)'in cevap hızını, kontrol edilen sistemin cevap hızına göre çok daha yüksek almaktır. Bunun için \mathbf{K}_e seçilirken $\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}$ matrisinin öz değerlerinin, \mathbf{A} matrisinin öz değerlerine göre sanal eksenden çok daha uzakta olması sağlanır.

Denklem 7.19'da $\tilde{\mathbf{x}}_b$ değerlerinin kestirimi için $\dot{\mathbf{x}}_a$ değerlerinin bulunması gerekir. Bu istenmeyen bir durumdur ve denklemlerin yeniden düzenlenerek \mathbf{x}_a değerlerinin bulunmasına gerek kalmadan işlemleri devam ettirebilmeyi sağlayacak denklemler

elde edilmelidir. Ancak bu tezde yararlanılacak olan MATLAB kodlarında \dot{x}_a değerlerini bulmayı sağlayacak şekilde bir döngü elde edildiğinden üzerinde çalışılan sistem için bu düzenlemenin yapılmasına gerek yoktur.

7.3. Malzeme Sıcaklığının Gözlemleyiciyle Optimum Kontrolü İçin Düşük Mertebeden Durum Gözlemleyicisinin Tasarımı

Gözlemleyicilerle malzeme sıcaklığının optimum kontrolünde Bölüm 6.2’de optimum kontrol için yeniden düzenlenen sistem matrisi (denklem (6.41)) kullanılmıştır. Düşük mertebeden durum gözlemleyicisine ait blok diyagramında (Şekil 7.1) yer alan geribesleme katsayıları (**K**) için, optimum kontrolde elde edilen optimum geribesleme katsayıları kullanılarak malzeme sıcaklığının gözlemleyicilerle optimum kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Düşük mertebeden durum gözlemleyicisi ile malzeme sıcaklığının optimum kontrolü için iki farklı gözlemleyici tasarlanmıştır. Bu gözlemleyicilerden ilkinde sadece malzeme sıcaklığının (T_7) referans sıcaklığından (T_{ref}) olan farkının (x_7) ölçülebildiği varsayılmıştır. Bu durumda tasarlanan düşük mertebeden durum gözlemleyicisi x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve x_6 olmak üzere altı farklı sıcaklığın kestirimini gerçekleştireceğinden altıncı mertebeden bir durum gözlemleyicisidir. Tasarlanan diğer gözlemleyici ise dış duvar katmanının sıcaklığının durağan halden olan farkının (x_1) ve malzeme sıcaklığının (T_7) referans sıcaklığından (T_{ref}) olan farkının (x_7) ölçülebildiği varsayılmıştır. Bu durumda tasarlanan düşük mertebeden durum gözlemleyicisi ise x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve x_6 sıcaklıklarının kestirimini gerçekleştireceğinden beşinci mertebeden bir durum gözlemleyicisidir.

7.3.1. Malzeme Sıcaklığının Gözlemleyiciyle Optimum Kontrolü İçin Altıncı Mertebeden Durum Gözlemleyicisinin Tasarımı

Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisinin tasarımı için denklemler Bölüm (7.2)’de belirtilen formda düzenlenmelidir. Bu amaçla denklemler (6.44) ve (6.45)

$$\mathbf{A} = \left[\begin{array}{cccccc|c} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} \end{array} \right] \quad (7.12)$$

$$\mathbf{B} = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \quad (7.13)$$

şeklinde yazılır.

Buradan;

$$[A_{aa}] = [a_{77}] \quad (7.14)$$

$$[\mathbf{A}_{ab}] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{76}] \quad (7.15)$$

$$[\mathbf{A}_{ba}] = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_{67} \end{array} \right] \quad (7.16)$$

$$[\mathbf{A}_{bb}] = \left[\begin{array}{cccccc} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{array} \right] \quad (7.17)$$

$$[B_a] = [0] \quad (7.18)$$

$$[\mathbf{B}_b] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

matrisleri elde edilir.

Denklem (7.8)'de belirtilen gözlemleyici durum vektörünün elde edilebilmesi için denklemler (7.14)-(7.19) kullanılır. Bu eşitliklerden elde edilen değerler kestirilecek her bir sıcaklık değeri için denklem (7.8)'de yerine konulur.

Eğer;

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e(\mathbf{A}_{ab}) \quad (7.20)$$

tanımı yapılırsa ve x_2 'nin gözlemleyici ile kestirilen değeri x_8 , x_3 'ün gözlemleyici ile kestirilen değeri x_9 , x_4 'ün gözlemleyici ile kestirilen değeri x_{10} , x_5 'in gözlemleyici ile kestirilen değeri x_{11} ve x_6 'nın gözlemleyici ile kestirilen değeri x_{12} ile ifade edilirse bu tanım ve ifadelerden yararlanarak;

$$\begin{aligned} \dot{x}_8 = & F_{1,1}x_8 + F_{1,2}x_9 + F_{1,3}x_{10} + F_{1,4}x_{11} + F_{1,5}x_{12} + F_{1,6}x_{13} + A_{ba_{1,1}}x_7 + B_{b_{1,1}}u(t) \\ & + K_{e_{1,1}}[\dot{x}_7 - a_{7,7}x_7] \end{aligned} \quad (7.21)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_9 = & F_{2,1}x_8 + F_{2,2}x_9 + F_{2,3}x_{10} + F_{2,4}x_{11} + F_{2,5}x_{12} + F_{2,6}x_{13} + A_{ba_{2,1}}x_7 + B_{b_{2,1}}u(t) \\ & + K_{e_{2,1}}[\dot{x}_7 - a_{7,7}x_7] \end{aligned} \quad (7.22)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{10} = & F_{3,1}x_8 + F_{3,2}x_9 + F_{3,3}x_{10} + F_{3,4}x_{11} + F_{3,5}x_{12} + F_{3,6}x_{13} + A_{ba_{3,1}}x_7 + B_{b_{3,1}}u(t) \\ & + K_{e_{3,1}}[\dot{x}_7 - a_{7,7}x_7] \end{aligned} \quad (7.23)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{11} = & F_{4,1}x_8 + F_{4,2}x_9 + F_{4,3}x_{10} + F_{4,4}x_{11} + F_{4,5}x_{12} + F_{4,6}x_{13} + A_{ba_{4,1}}x_7 + B_{b_{4,1}}u(t) \\ & + K_{e_{4,1}}[\dot{x}_7 - a_{7,7}x_7]\end{aligned}\quad (7.24)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{12} = & F_{5,1}x_8 + F_{5,2}x_9 + F_{5,3}x_{10} + F_{5,4}x_{11} + F_{5,5}x_{12} + F_{5,6}x_{13} + A_{ba_{5,1}}x_7 + B_{b_{5,1}}u(t) \\ & + K_{e_{5,1}}[\dot{x}_7 - a_{7,7}x_7]\end{aligned}\quad (7.25)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{13} = & F_{6,1}x_8 + F_{6,2}x_9 + F_{6,3}x_{10} + F_{6,4}x_{11} + F_{6,5}x_{12} + F_{6,6}x_{13} + A_{ba_{6,1}}x_7 + B_{b_{6,1}}u(t) \\ & + K_{e_{6,1}}[\dot{x}_7 - a_{7,7}x_7]\end{aligned}\quad (7.26)$$

elde edilir. Denklemler (7.21), (7.22), (7.23), (7.24), (7.25) ve (7.26) altıncı mertebeden gözlemleyiciye ait durum denklemleridir.

7.3.2. Malzeme Sıcaklığının Gözlemleyiciyle Optimum Kontrolü İçin Beşinci Mertebeden Durum Gözlemleyicisinin Tasarımı

Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisinin tasarımı için de altıncı mertebeden durum gözlemleyicisinin tasarımına benzer şekilde denklemler Bölüm (7.2)'de belirtilen formda düzenlenmelidir. Bu amaçla denklemler (6.44) ve (6.45)

$$\mathbf{A} = \begin{array}{c|cccccc|c} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} \end{array}\quad (7.27)$$

$$\mathbf{B} = \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}\quad (7.28)$$

şeklinde yazılır.

Buradan;

$$[A_{aa0}] = [a_{11}] \quad (7.29)$$

$$[A_{aai}] = [a_{77}] \quad (7.30)$$

$$[\mathbf{A}_{ab0}] = [a_{12} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (7.31)$$

$$[\mathbf{A}_{abi}] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{76}] \quad (7.32)$$

$$[\mathbf{A}_{ba0}] = \begin{bmatrix} a_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.33)$$

$$[\mathbf{A}_{bai}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_{67} \end{bmatrix} \quad (7.34)$$

$$[\mathbf{A}_{bb}] = \begin{bmatrix} a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \quad (7.35)$$

$$[B_{a0}] = [0] \quad (7.36)$$

$$[B_{ai}] = [0] \quad (7.37)$$

$$[\mathbf{B}_b] = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{31} \\ b_{41} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.38)$$

matrisleri elde edilir.

Denklem (7.8)'de belirtilen gözlemleyici durum vektörünün elde edilebilmesi için denklemler (7.29)-(7.38) kullanılır. Bu eşitliklerden elde edilen değerler kestirilecek her bir sıcaklık değeri için denklem (7.8)'de yerine konulur.

Eğer;

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e(\mathbf{A}_{ab0} + \mathbf{A}_{abi}) \quad (7.39)$$

tanımı yapılırsa ve x_1 'in gözlemleyici ile kestirilen değeri x_7 ; x_2 'nin gözlemleyici ile kestirilen değeri x_8 , x_3 'ün gözlemleyici ile kestirilen değeri x_9 , x_4 'ün gözlemleyici ile kestirilen değeri x_{10} , x_5 'in gözlemleyici ile kestirilen değeri x_{11} ve x_6 'nın gözlemleyici ile kestirilen değeri x_{12} ile ifade edilirse bu tanım ve ifadelerden yararlanarak;

$$\begin{aligned} \dot{x}_8 = & F_{1,1}x_8 + F_{1,2}x_9 + F_{1,3}x_{10} + F_{1,4}x_{11} + F_{1,5}x_{12} + A_{ba0_{1,1}}x_1 + A_{bai_{1,1}}x_7 + B_{b_{1,1}}u(t) \\ & + K_{e_1}[\dot{x}_1 - a_{1,1}x_1 + \dot{x}_7 - a_{7,7}x_7] \end{aligned} \quad (7.40)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_9 = & F_{2,1}x_8 + F_{2,2}x_9 + F_{2,3}x_{10} + F_{2,4}x_{11} + F_{2,5}x_{12} + A_{ba0_{2,1}}x_1 + A_{bai_{2,1}}x_7 + B_{b_{2,1}}u(t) \\ & + K_{e_2}[\dot{x}_1 - a_{1,1}x_1 + \dot{x}_7 - a_{7,7}x_7] \end{aligned} \quad (7.41)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{10} = & F_{3,1}x_8 + F_{3,2}x_9 + F_{3,3}x_{10} + F_{3,4}x_{11} + F_{3,5}x_{12} + A_{ba0_{3,1}}x_1 + A_{bai_{3,1}}x_7 + B_{b_{3,1}}u(t) \\ & + K_{e_3}[\dot{x}_1 - a_{1,1}x_1 + \dot{x}_7 - a_{7,7}x_7] \end{aligned} \quad (7.42)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{11} = & F_{4,1}x_8 + F_{4,2}x_9 + F_{4,3}x_{10} + F_{4,4}x_{11} + F_{4,5}x_{12} + A_{ba0_{4,1}}x_1 + A_{bai_{4,1}}x_7 + B_{b_{4,1}}u(t) \\ & + K_{e_4}[\dot{x}_1 - a_{1,1}x_1 + \dot{x}_7 - a_{7,7}x_7] \end{aligned} \quad (7.43)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{12} = & F_{5,1}x_8 + F_{5,2}x_9 + F_{5,3}x_{10} + F_{5,4}x_{11} + F_{5,5}x_{12} + A_{ba0_{5,1}}x_1 + A_{bai_{5,1}}x_7 + B_{b_{5,1}}u(t) \\ & + K_{e_5}[\dot{x}_1 - a_{1,1}x_1 + \dot{x}_7 - a_{7,7}x_7]\end{aligned}\quad (7.44)$$

elde edilir. Denklemler (7.40), (7.41), (7.42), (7.43) ve (7.44) beşinci mertebeden gözlemleyiciye ait durum denklemleridir.

7.4. Malzeme Sıcaklığının Düşük Mertebeden Gözlemleyiciler İle Optimum Kontrolü

Daha önce Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 olarak tanımlanan örnek fırınlarda malzeme sıcaklığı düşük mertebeden durum gözlemleyicisi ile kontrol edildiğinde, sistemin dinamik davranışını incelemek için MATLAB ortamında bir bilgisayar programı yazılmıştır.

Malzeme sıcaklığının düşük mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrolü için, geri besleme katsayıları olarak Bölüm 6'da her bir fırın için elde edilen optimum geri besleme katsayıları kullanılmıştır.

Bütün simülasyonlarda malzemenin ulaşması istenen referans sıcaklık derecesi (T_{ref}) 300 °C olarak alınmıştır. Fırın iç duvarı ve malzeme arasındaki ısı geçişini modelleyen R_{13} direnci için Fırın-1'de üç farklı değer (0,01; 0,1; 1,0), Fırın-2 ve Fırın-3'de birer değer (0,1) kullanılmıştır.

Çalışmalara iki farklı gözlemleyici için yürütülmüştür. Bunlardan biri beşinci mertebe olup, bu gözlemleyiciyle hem malzeme sıcaklığı (T_7) hem de en dıştaki yalıtım katmanı sıcaklığının (T_1) ölçüldüğü kabul edilmektedir. Diğer gözlemleyici ise altıncı mertebedir ve sadece malzeme sıcaklığının ölçüldüğü varsayımıyla tasarlanmıştır.

Çizelge 7.1. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi tasarımında seçilen K_e değerleri.

| Örnek Fırın: Fırın-1 | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------|---------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,10 | 1 |
| C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| K_{e1} | | 5,2386 | 0,1840 | -0,7262 |
| K_{e2} | | 2,0227 | 6,2607 | 0,3186 |
| K_{e3} | | 0,6149 | 2,3510 | 0,5929 |
| K_{e4} | | 0,2826 | 1,5128 | 0,6962 |
| K_{e5} | | 0,1092 | 0,9049 | 0,7355 |
| Örnek Fırın: Fırın-1 | | | | |
| Parametre | Birim | Değer | | |
| R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,10 | 1 |
| C_7 | (J/°C) | 440 | 440 | 440 |
| K_{e1} | | 0,5309 | 0,0554 | -4,1871 |
| K_{e2} | | 0,2103 | 0,6462 | 5,2195 |
| K_{e3} | | 0,0675 | 0,2597 | 2,4742 |
| K_{e4} | | 0,0335 | 0,1541 | 1,6773 |
| K_{e5} | | 0,0152 | 0,0915 | 1,1872 |
| Örnek Fırın: Fırın-2 | | | | |
| Parametre | Birim | Değer | | |
| R_{13} | (s·°C/J) | 0,10 | | |
| C_7 | (J/°C) | 4400 | | |
| K_{e1} | | -2,6814 | | |
| K_{e2} | | 6,1068 | | |
| K_{e3} | | 4,9123 | | |
| K_{e4} | | 4,4896 | | |
| K_{e5} | | 4,1569 | | |
| Örnek Fırın: Fırın-3 | | | | |
| Parametre | Birim | Değer | | |
| R_{13} | (s·°C/J) | 0,10 | | |
| C_7 | (J/°C) | 4400 | | |
| K_{e1} | | 0,1840 | | |
| K_{e2} | | 6,2607 | | |
| K_{e3} | | 2,5351 | | |
| K_{e4} | | 1,5128 | | |
| K_{e5} | | 0,9049 | | |

Çizelge 7.2. Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi tasarımında seçilen K_e değerleri.

| Örnek Fırın: Fırın-1 | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|----------|----------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,10 | 1 |
| C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| K_{e1} | | 116,0437 | 104,1253 | 145,5985 |
| K_{e2} | | 7,3002 | 7,0083 | 14,1097 |
| K_{e3} | | 2,2524 | 7,1027 | 57,5421 |
| K_{e4} | | 0,7061 | 2,7314 | 23,4153 |
| K_{e5} | | 0,3478 | 1,5899 | 14,1417 |
| K_{e6} | | 0,1581 | 0,9304 | 8,6542 |
| Örnek Fırın: Fırın-2 | | | | |
| Parametre | Birim | Değer | | |
| R_{13} | (s·°C/J) | 0,10 | | |
| C_7 | (J/°C) | 4400 | | |
| K_{e1} | | 316,9329 | | |
| K_{e2} | | 30,8049 | | |
| K_{e3} | | 4,0254 | | |
| K_{e4} | | 1,0165 | | |
| K_{e5} | | 0,4411 | | |
| K_{e6} | | 0,1769 | | |
| Örnek Fırın: Fırın-3 | | | | |
| Parametre | Birim | Değer | | |
| R_{13} | (s·°C/J) | 0,10 | | |
| C_7 | (J/°C) | 4400 | | |
| K_{e1} | | 78,8480 | | |
| K_{e2} | | 6,6939 | | |
| K_{e3} | | 2,2100 | | |
| K_{e4} | | 0,6989 | | |
| K_{e5} | | 0,3457 | | |
| K_{e6} | | 0,1576 | | |

Beşinci ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi ile her bir fırında malzeme sıcaklığının optimum kontrolünün gerçekleştirilmesi için gözlemleyici kazanç matrisi \mathbf{K}_e , $\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}$ matrisinin öz değerlerinin sanal eksende \mathbf{A} matrisinin öz değerlerinden 10-15 kat uzakta olmasını sağlayacak şekilde MATLAB programı yardımıyla hesaplanmıştır.

Beşinci ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicilerine ait gözlemleyici kazanç matrisleri (\mathbf{K}_e), Fırın-1'de $m = 10$ kg iken bütün R_{13} durumları için (0,01; 0,1; 1), Fırın-2 ve Fırın-3'de $R_{13} = 0,1$ durumu için elde edilmiştir. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisine ait \mathbf{K}_e değerleri Fırın-1'de $m = 1$ kg iken bütün R_{13} durumları için de bulunmuş sonuçların parametre değişikliklerine (m , R_{13} ve \mathbf{K}_e) duyarlılığını incelemek amacıyla Fırın-1'de $m = 10$ kg iken elde edilen beşinci mertebeden durum gözlemleyicisine ait \mathbf{K}_e değerleri $m = 1$ kg iken ki duruma da uygulanmıştır. Bulunan gözlemleyici kazanç matrisleri Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de verilmiştir.

7.5. Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de Malzeme Sıcaklığının Düşük Mertebeden Gözlemleyiciyle Kontrolü

Çizelge 7.3 ve 7.4'de Fırın-1 için $R_{13} = 0,01$; 0,1 ve 1 olduğu durumlarda, işlem gören malzemenin kütlesi $m = 10$ kg iken, beşinci ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi ile malzeme sıcaklığının optimum kontrolünde elde edilen performans değerleri verilmiştir. Gözlemleyici kazanç katsayıları olarak, beşinci mertebeden gözlemleyici ile malzeme sıcaklığının kontrolü için Çizelge 7.1'de belirtilen Fırın-1'e ait değerler; altıncı mertebeden gözlemleyici ile malzeme sıcaklığının kontrolü için Çizelge 7.2'de verilen değerler kullanılmıştır. Şekil 7.2 ve 7.3'de ise bu değerler için elde edilen, malzeme sıcaklığı T_7 'ye ait cevap eğrileri görülmektedir. Bu çizelge ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır.

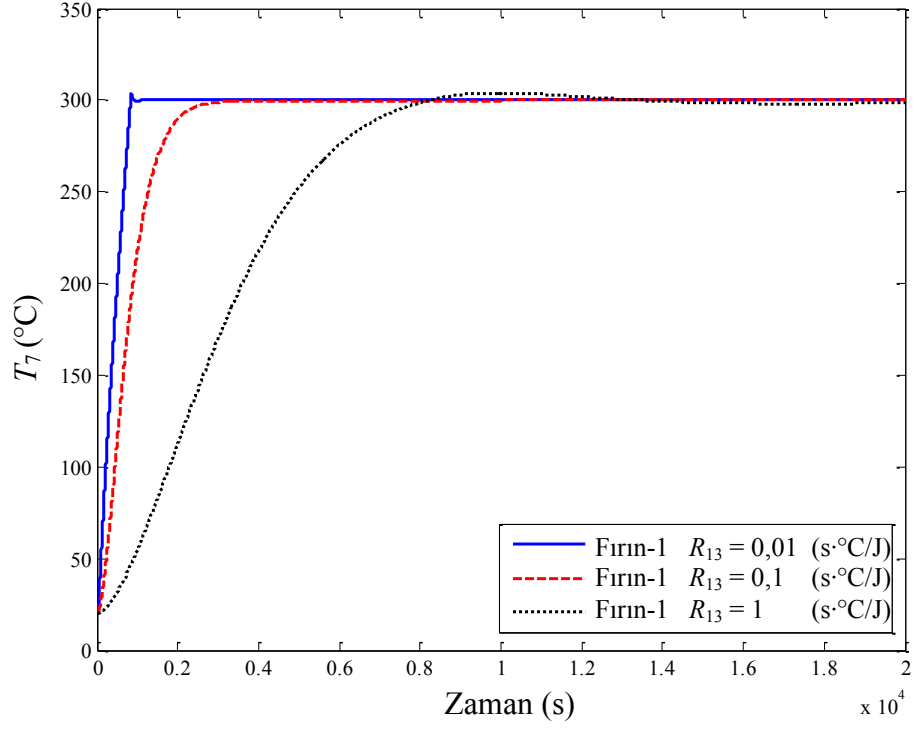
Fırın iç duvarıyla malzeme arasındaki ısı direnç olan R_{13} 'ün değerinin artması ile sistemin gecikme, yükselme ve yerleşme zamanları da artmaktadır. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle malzeme sıcaklığının optimum kontrolünde $R_{13} = 0,1$ durumunda aşma olmamakta diğer durumlarda ise tepe sıcaklık değerleri

Çizelge 7.3. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

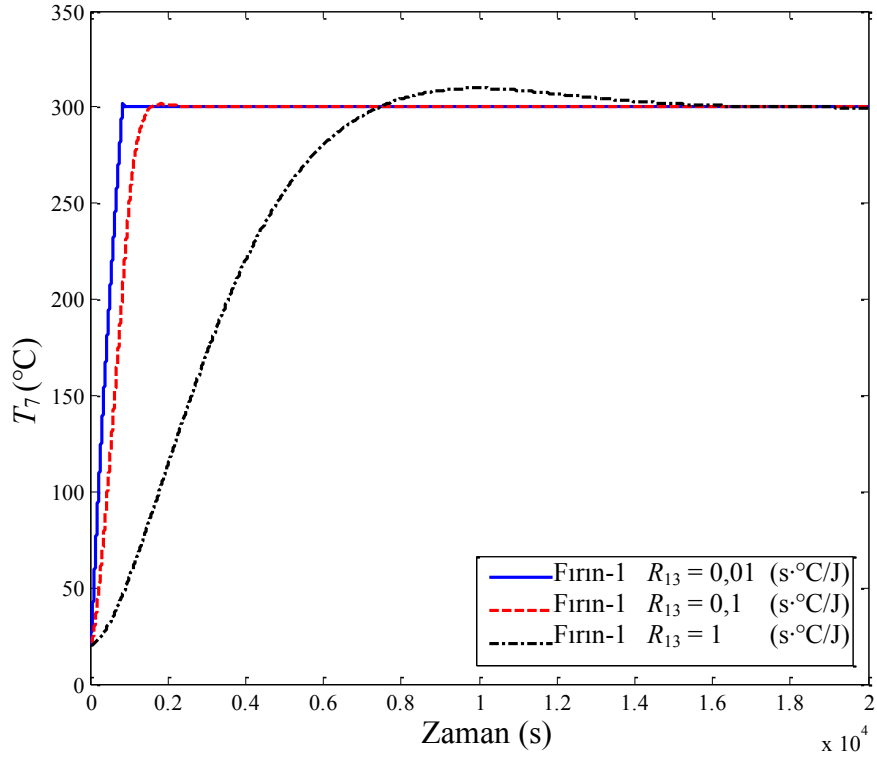
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|--------|-----------|--------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 354,9 | 648,7 | 2635,8 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 682,3 | 1398,9 | 5267,7 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 834,0 | Aşma yok. | 8236,9 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 861,7 | Aşma yok. | 9960,8 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 303,4 | Aşma yok. | 304,0 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 1,13 | Aşma yok. | 1,33 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 812,5 | 2240,3 | 7382,3 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Kalıcı Hata, e_{ss} | (°C) | 0,0 | 0,0 | 0,16 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,0 | 7222,0 | 7228,0 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 361,1 | 361,4 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,4 | 365,4 | 365,5 |

Çizelge 7.4. Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|--------|--------|---------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 282,4 | 239,6 | 290,7 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 650,0 | 604,5 | 867,6 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 762,8 | 717,9 | 1088,3 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 822,6 | 951,0 | 3244,2 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 302,0 | 301,6 | 309,8 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,67 | 0,53 | 3,3 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 877,4 | 1618,3 | 10340,0 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Kalıcı Hata, e_{ss} | (°C) | 0,0 | 0,0 | 0,2 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,7 | 7223,9 | 7559,2 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 361,2 | 377,9 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,2 | 365,1 | 369,1 |



Şekil 7.2. Fırın-1 için malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.



Şekil 7.3. Fırın-1 için malzeme sıcaklığının altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.

referans sıcaklığından yaklaşık olarak 3 °C üzerine çıkmaktadır. Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi kullanıldığında R_{13} değeri arttıkça tepe sıcaklığı ve tepe zamanı değerleri de artmaktadır. R_{13} 'ün bütün değerlerinde tepe zamanlarının altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi için beşinci mertebeden durum gözlemleyicisine oranla daha az olmasına karşılık tepe sıcaklığı değerleri beşinci mertebeden durum gözlemleyicisine oranla $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ için artmaktadır. Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi kullanıldığında elde edilen tepe sıcaklıkları $R_{13} = 0,01$ durumunda 302,0 °C , $R_{13} = 0,1$ durumunda 301,6 °C, $R_{13} = 1$ 309,8 °C'dir. $R_{13} = 0,01$ ve $R_{13} = 0,1$ durumlarında yerleşme zamanı değerleri her iki gözlemleyici içinde birbirine yakın olmakta $R_{13} = 1$ durumunda altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi ile elde edilen yerleşme zamanı beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile elde edilen değere oranla 50 dakika daha fazladır. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile elde edilen tepe zamanları $R_{13} = 0,01$ durumunda yaklaşık olarak 14 dakika iken $R_{13} = 1$ durumunda 2 saat 45 dakikadır. Bunun sebebi R_{13} değerinin artmasıyla malzemeye olan ısı akışının zorlaşmasıdır. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi kullanıldığında ısı kaynaktan fırına aktarılan ortalama ısı güç değerleri ve fırından dış ortama olan ortalama güç kayıpları R_{13} değerinin değişiminden etkilenmemekte altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolde ise $R_{13} = 1$ durumunda $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumuna oranla bu değerler artmaktadır. $R_{13} = 1$ durumunda altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle yapılan kontrol işlemi ile simulasyon süresi sonunda 0,2 °C'lik, beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle yapılan kontrol işleminde ise 0,16 °C'lik bir kalıcı hataya meydana gelmektedir. Sistemde ölçülebilen değerlerin artması yani gözlemleyicinin derecesinin düşürülmesi kalıcı hataların biraz azalmasını sağlamaktadır, ancak hatalar her iki gözlemleyici için de oldukça küçüktür. Bütün bunlar dikkate alındığında örnek fırınlarda R_{13} 'ün küçük değerleri için altıncı dereceden bir durum gözlemleyicisi ile malzeme sıcaklığının optimum kontrolünde sistem cevap hızının ve kararlılığının beşinci mertebeden gözlemleyici ile benzer sonuçlar verdiği, R_{13} 'ün büyük değerlerinde ise beşinci mertebeden bir gözlemleyici ile sistem kararlılığın daha iyi olduğu görülmektedir. Dolayısıyla R_{13} değerinin bilinmesi tasarlanacak gözlemleyicinin mertebesi açısından önem arz etmektedir.

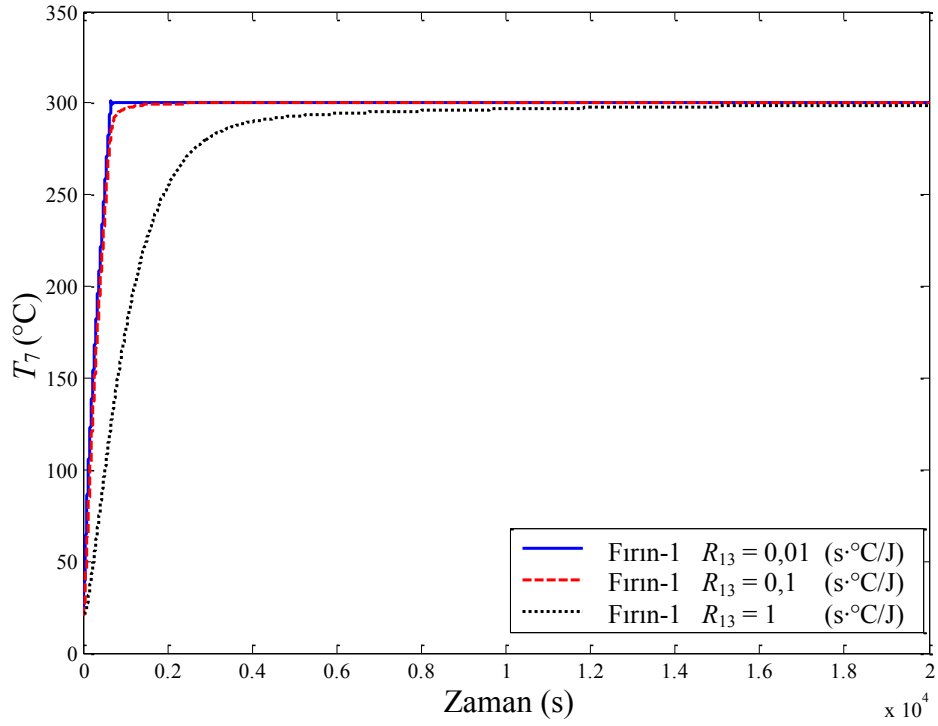
Çizelge 7.1’de ve Çizelge 7.2’de Fırın-1 için bulunan gözlemleyici kazanç katsayıları incelendiğinden R_{13} değerinin değişmesiyle K_e ’nin de önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla bir fırına gözlemleyiciyle kontrol uygulandığında R_{13} ’ün mümkün olduğunca belirlenmesi ya da bu fırın için en uygun K_e değerininin amprik olarak denemelerle bulunması gerekir.

Fırın-1 için elde edilen sonuçların fırında işlem gören malzemenin kütlesine olan duyarlılığını anlamak için Çizelge 7.1’de $m = 10$ kg iken belirtilen gözlemleyici kazanç katsayıları kullanılarak $R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 olduğu durumlarda $m = 1$ kg iken simülasyonlar tekrarlanmıştır. Bunun sonuçları Çizelge 7.5 ’de görülmektedir. Şekil 7.4’de bu değerler için elde edilen, malzeme sıcaklığı T_7 ’ye ait cevap eğrileri verilmiştir. Şekil 7.5, Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de ise Şekil 7.2 ve Şekil 7.4’de R_{13} ’ün değişik değerlerinde T_7 için elde edilen cevap eğrileri karşılaştırılmaktadır. Bu çizelge ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

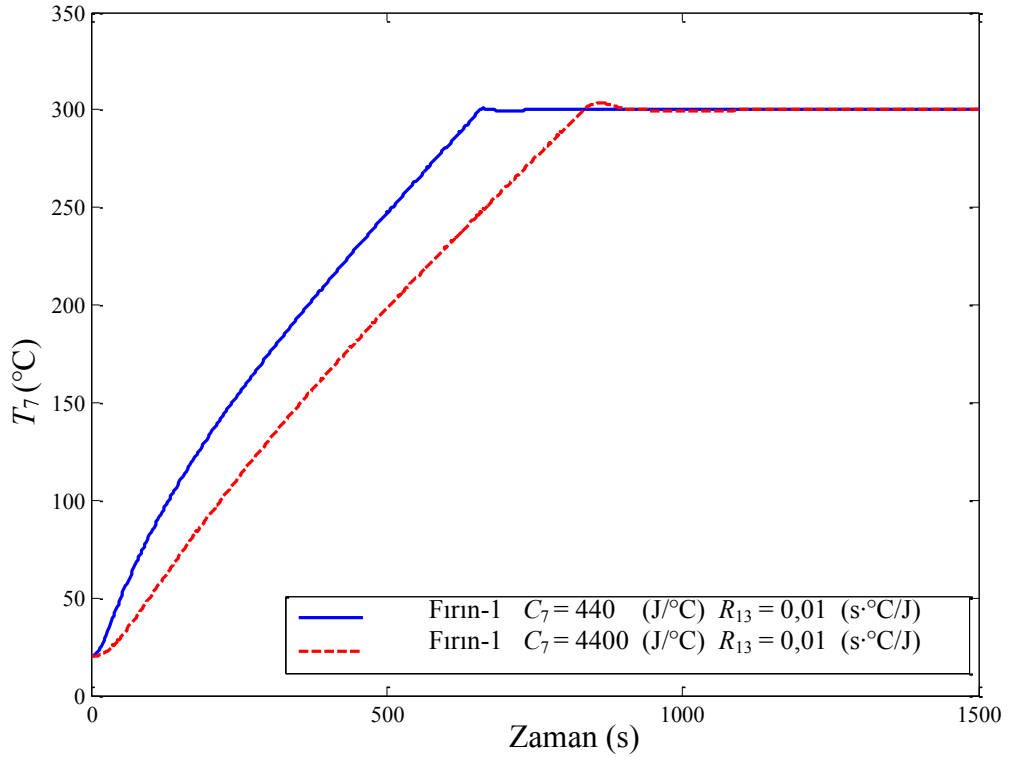
Fırın iç duvarıyla malzeme arasındaki ısı direnç R_{13} ’ün değerinin artması ile, Fırın-1’in $m = 10$ kg iken ki durumuna benzer olarak, sistemin gecikme, yükselme ve yerleşme zamanları da artmaktadır. Bu zamanlar Fırın-1’in $m = 10$ kg iken ki durumuna oranla daha kısa olmaktadır. $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumlarında aşma olmamakta $R_{13} = 0,01$ durumunda tepe sıcaklığı $300,8$ °C olmaktadır. Isıl kaynaktan fırına aktarılan ortalama ısı güç değerleri ve fırından dış ortama olan ortalama güç kayıpları R_{13} değerinin değişiminden etkilenmemektedir. Simülasyon süresi sonunda $R_{13} = 0,01$ ve $0,1$ durumlarında simülasyon süresi sonunda kayla değer bir kalıcı hata meydana gelmemektedir ($< 10^{-3}$). $R_{13} = 1$ durumunda ise $0,1008$ °C’lik bir kalıcı hata meydana gelmektedir ve bu kalıcı hata değeri Fırın-1’in $m = 10$ kg iken ki durumuna oranla $0,06$ °C daha azdır. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle malzeme sıcaklığının optimum kontrolünde ısı kaynaktan fırına aktarılan ortalama ısı güç değerleri ve fırından dış ortama olan ortalama güç kayıpları $R_{13} = 0,01$ ve $0,1$ durumlarında benzer değerlere ulaşırken $R_{13} = 1$ durumunda fırından dış ortama olan ortalama güç kayıplarının azaldığı buna karşılık sisteme sağlanan ortalama güç değerinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 7.5. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

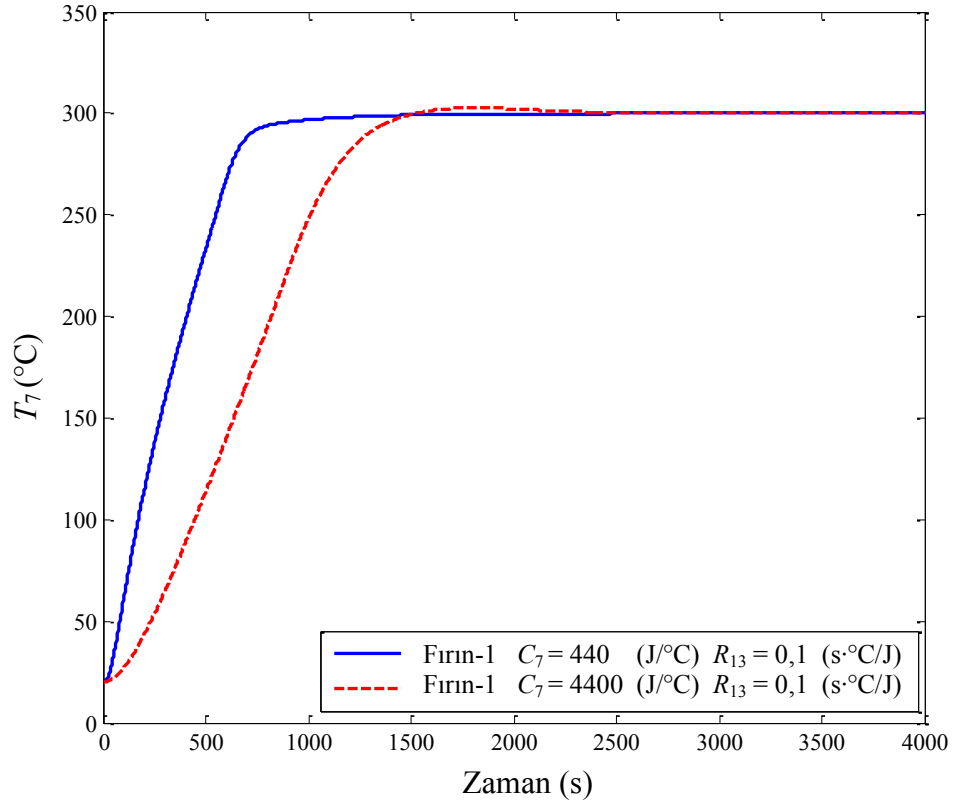
| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|--|--|--|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Gözlemleyici Kazanç Matrisi, K_e | | m = 10 kg için bulunan gözlemleyici kazanç matrisidir. | m = 10 kg için bulunan gözlemleyici kazanç matrisidir. | m = 10 kg için bulunan gözlemleyici kazanç matrisidir. |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 440 | 440 | 440 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 238,7 | 279,5 | 824,8 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 543,5 | 564,0 | 2307,0 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 658,4 | Aşma yok. | Aşma yok. |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 664,5 | Aşma yok. | Aşma yok. |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 300,8 | Aşma yok. | Aşma yok. |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,26 | Aşma yok. | Aşma yok. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 637,7 | 805,8 | 5765,7 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Kalıcı Hata, e_{ss} | (°C) | 0,0 | 0,0006 | 0,1008 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7223,0 | 7222,9 | 7176,9 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,2 | 361,1 | 358,8 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,2 | 365,2 | 369,3 |



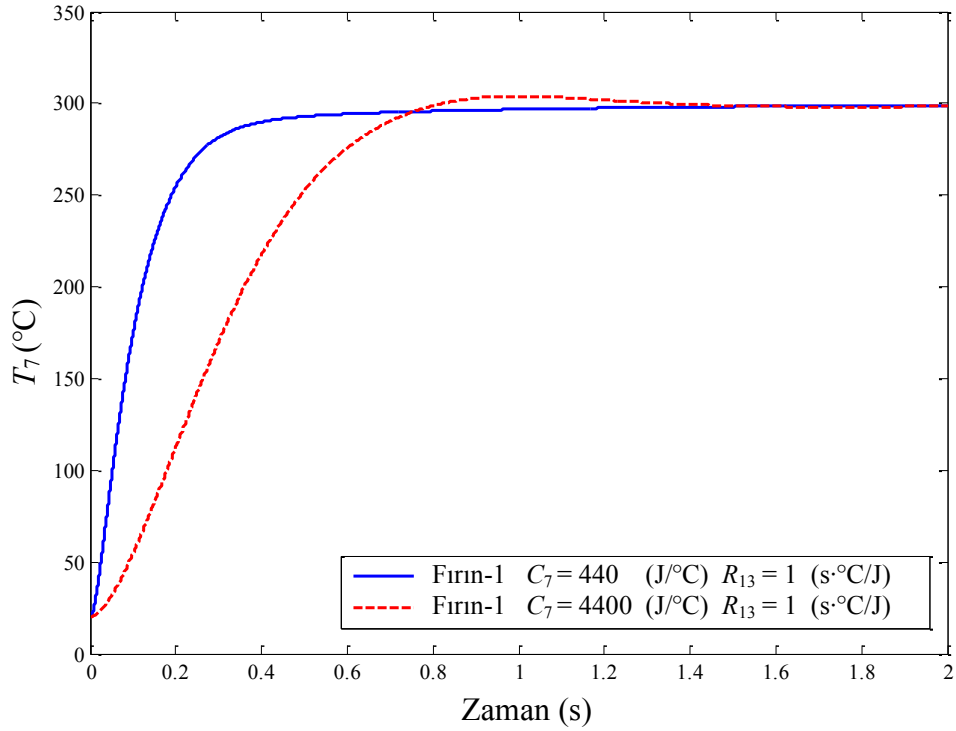
Şekil 7.4. Fırın-1’de $m = 1$ kg iken malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.



Şekil 7.5. Fırın-1’de $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg iken malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.



Şekil 7.6. Fırın-1’de $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg iken malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.



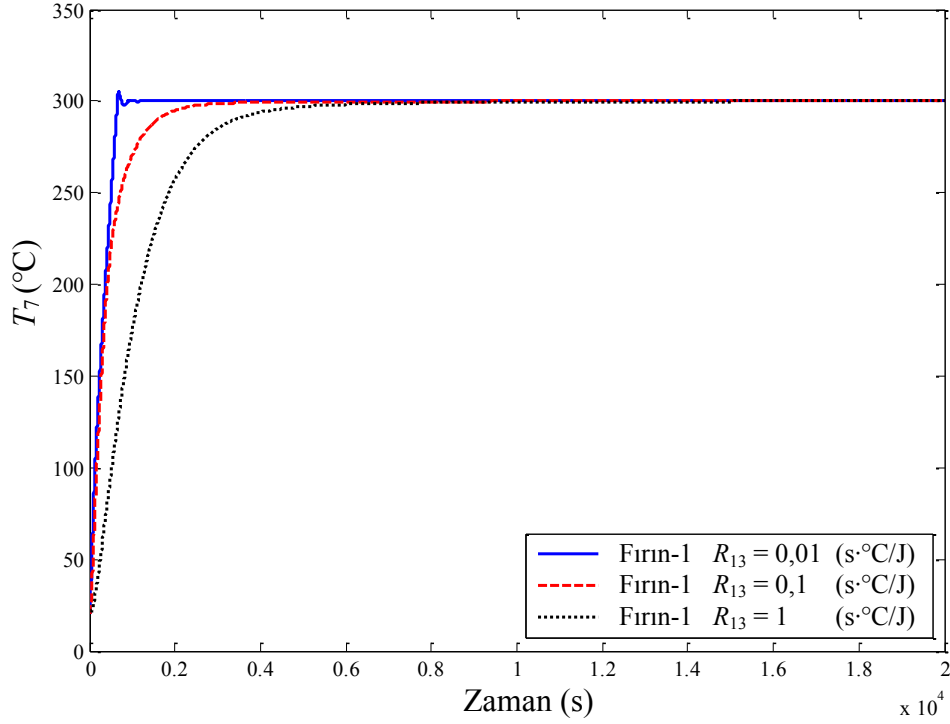
Şekil 7.7. Fırın-1’de $m = 1$ kg ve $m = 10$ kg iken malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.

Bu sonuçların kabul edilebilirliğinin anlaşılması için Çizelge 7.1’de $m = 1$ kg iken belirtilen gözlemleyici kazanç katsayıları kullanılarak $R_{13} = 0,01$; 0,1 ve 1 olduğu durumlarda $m = 1$ kg iken simülasyonlar tekrarlanmış, performans değerleri Çizelge 7.6’da verilmiştir. Şekil 7.8’de bu değerler için elde edilen, malzeme sıcaklığı T_7 ’ye ait cevap eğrileri görülmektedir. Çizelge 7.5 ve 7.6’daki performans değerleri ile Şekil 7.4 ve Şekil 7.8’deki cevap eğrileri karşılaştırıldığında $m = 1$ kg iken ki duruma uygulanan 2 farklı K_e matrisi için de benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Her iki durumda da $R_{13} = 0,01$ ve $R_{13} = 0,1$ için sistemin gecikme zamanı, yükselme zamanı, geçit zamanı, fırından dış ortama olan ortalama güç kayıpları ve ısı kaynaktan fırına aktarılan ortalama güç değerleri aynı kalmıştır. $R_{13} = 1$ durumu için Çizelge 7.6’daki değerler, Çizelge 7.5’deki değerlerle karşılaştırıldığında; gecikme zamanının yaklaşık olarak 3,4 s, yükselme zamanının 1,5 dakika, ortalama güç kayıplarının 2 W, ısı kaynaktan fırına aktarılan ortalama güç değerinin 3 W azaldığı görülmektedir. Aynı karşılaştırma $R_{13} = 0,01$ durumu için yapıldığında; geçit zamanının aynı kaldığı, tepe zamanının 3,2 s azaldığı, yüzde aşmanın 1,44 oranında arttığı görülmektedir. Çizelge 7.5’deki duruma benzer olarak $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumlarında aşma meydana gelmemektedir. Yerleşme zamanları $R_{13} = 0,01$ durumunda aynı kalmakta, $R_{13} = 0,1$ durumunda 28 s, $R_{13} = 1$ durumunda 29 dakika azalmaktadır. Çizelge 7.5’den farklı olarak Çizelge 7.6’da kullanılan K_e matrisleri için $R_{13} = 0,1$ ve $R_{13} = 1$ durumlarında da kalıcı hata meydana gelmemektedir. Bütün bunlar dikkate alındığında;

- 1) Fırın-1’de $m = 10$ kg iken elde edilen K_e değerlerinin $m = 1$ kg durumuna uygulanmasının, bütün R_{13} değerlerinde, $m = 10$ kg durumuna uygulanmasına oranla sistem cevap hızı ve görelî kararlılığı açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.
- 2) $R_{13} = 0,01$ için; $m = 10$ kg iken elde edilen K_e değerlerinin $m = 1$ kg iken ki duruma uygulanmasının, $m = 1$ kg iken elde edilen K_e değerlerinin aynı duruma uygulanmasına oranla sistemin görelî kararlılığı açısından daha iyi, cevap hızı açısından ise aynı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Çizelge 7.6. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|---|---|---|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Gözlemleyici Kazanç Matrisi, K_e | | m = 1 kg için bulunan gözlemleyici kazanç matrisidir. | m = 1 kg için bulunan gözlemleyici kazanç matrisidir. | m = 1 kg için bulunan gözlemleyici kazanç matrisidir. |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s.°C/J) | 0,01 | 0,1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 440 | 440 | 440 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 238,6 | 279,5 | 821,4 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 543,5 | 564,0 | 2209,4 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 658,1 | Aşma yok. | Aşma yok. |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 667,7 | Aşma yok. | Aşma yok. |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 305,1 | Aşma yok. | Aşma yok. |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 1,7 | Aşma yok. | Aşma yok. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 637,6 | 777,1 | 4036,5 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,0 | 7222,9 | 7214,7 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 361,1 | 360,7 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,2 | 365,2 | 366,04 |



Şekil 7.8. Malzeme ağırlığı 1kg iken Fırın-1 için malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.

- 3) $R_{13} = 0,1$ için; $m = 10$ kg iken elde edilen K_e değerleri ile $m = 1$ kg iken elde edilen K_e değerlerinin $m = 1$ kg iken ki duruma uygulanmasının sistem cevap hızı açısından aynı, sistemin görelî kararlılığı açısından ise çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir
- 4) $R_{13} = 1$ için; Fırın-1'de $m = 10$ kg iken elde edilen K_e değerlerinin $m = 1$ kg iken ki duruma uygulanmasının, $m = 1$ kg iken elde edilen K_e değerlerinin aynı duruma uygulanmasına oranla sistemin görelî kararlılığı ve cevap hızı açısından daha kötü sonuçlar verdiği, en önemli değişim ise sistemin yerleşme zamanında meydana geldiği görülmektedir.
- 5) Küçük R_{13} değerlerinde tasarlanan gözlemleyici için bulunan K_e değerleri farklı m değerleri için iyi sonuç verdiği için sadece bir m değeri için bulunması yeterlidir.

- 6) R_{13} değerinin artmasıyla değişen malzeme kütlesi için bulunan yeni K_e değerlerinin sistem performansı için daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durumda malzeme kütlesinden çok R_{13} değerinin belirlenmesi K_e değerlerinin belirlenmesinde önem arz etmektedir.

Çizelgeler 7.7 ve 7.8'de Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 için $R_{13} = 0,1$ olduğu durumda, işlem gören malzemenin kütlesi $m = 10$ kg iken, beşinci ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi ile malzeme sıcaklığının optimum kontrolünde elde edilen performans değerleri verilmiştir. Gözlemleyici kazanç katsayıları olarak, Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de belirtilen değerler kullanılmıştır. Şekiller 7.9 ve 7.10'da Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de $R_{13} = 0,1$ iken beşinci ve altıncı mertebeden gözlemleyiciler kullanıldığında malzeme sıcaklığı T_7 ' için elde edilen cevap eğrileri görülmektedir.

Fırın-2'de, ceraboard katman kalınlığı, Fırın-1'dekinin $\frac{1}{4}$ 'ü kadar alınmıştır. Fırın-3 ise Fırın-1'in en dışına cam yününden bir yalıtım katmanının eklenmesiyle elde edilmiştir. Bu durumlar göz önüne alınıp çizelge ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

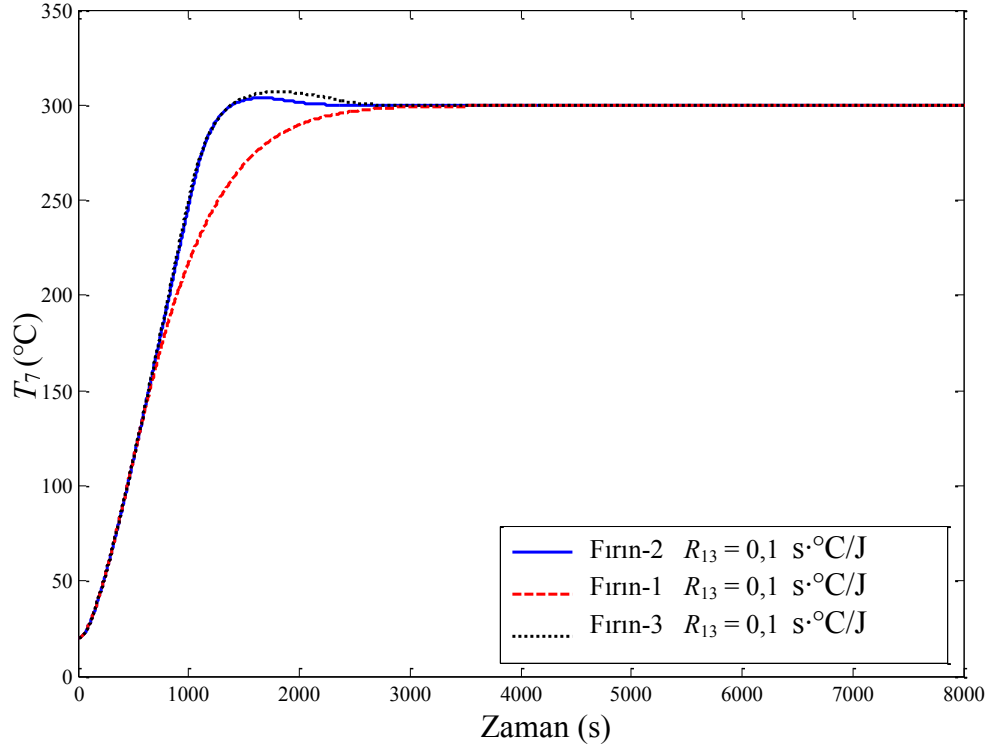
Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi için elde edilen gecikme zamanları, beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle elde edilen değerlere nazaran; Fırın-1 için 6,5 dakika, Fırın-2 için 27 s, Fırın-3 için 33 s azalmaktadır. Yükselme zamanları Fırın-2 ve Fırın-3 için aynı kalmakta Fırın-1 için beşinci mertebeden gözlemleyicisiyle 13 dakika artmaktadır. Beşinci mertebeden gözlemleyicisiyle Fırın-1'de aşma olmamakta sistemin yerleşme zamanı altıncı mertebeden gözlemleyicinin kullanıldığı duruma nazaran Fırın-1 için 10 dakika sonra, Fırın-2 için 5 dakika önce, Fırın-3 için 5 dakika sonra elde edilmektedir. Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisinin kullanılmasıyla Fırın-1'de $1,6$ °C'lik aşma meydana gelmektedir. Beşinci mertebeden gözlemleyicinin kullanılmasında meydana gelen aşmalar, altıncı mertebeden gözlemleyiciye oranla Fırın-2'de 2 °C fazla, Fırın-3'de 2 °C az olmaktadır. Fırından dışarıya olan ortalama güç kayıpları ile fırına sağlanan ortalama güç değerleri her iki gözlemleyici içinde aynı olmaktadır. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisinin

Çizelge 7.7. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1, Fırın-2, Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

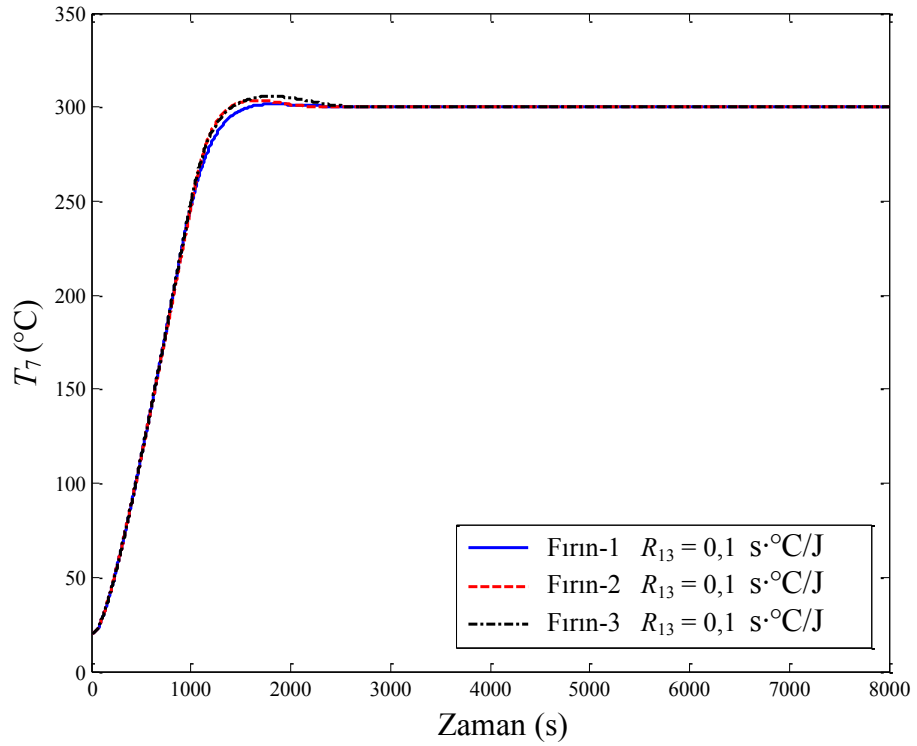
| ÖRNEK FIRIN | | FIRIN-1 | FIRIN-2 | FIRIN-3 |
|---|----------|-----------|---------|-----------|
| Parametre | Birim | Değer | Değer | Değer |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 648,7 | 640,1 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 1398,9 | 973,2 | 966,6 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | Aşma yok. | 1399,4 | 1389,1 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | Aşma yok. | 1667,1 | 1815,5 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | Aşma yok. | 303,7 | 307,0 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | Aşma yok. | 1,24 | 2,34 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 2240,3 | 1280,9 | 2034,5 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,0 | 16310,0 | 2409,0000 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 815,5 | 120,4500 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,4 | 815,3 | 142,0 |

Çizelge 7.8. Altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi ile optimum kontrol işleminde Fırın-1, Fırın-2, Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN | | FIRIN-1 | FIRIN-2 | FIRIN-3 |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Parametre | Birim | Değer | Değer | Değer |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 239,6 | 613,5 | 604,5 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 604,5 | 973,2 | 966,6 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 717,9 | 731,4 | 717,9 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 951,0 | 1011,1 | 978,4 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 301,6 | 305,6 | 305,7 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,8 | 1,9 | 1,9 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 1618,3 | 1587,8 | 1791 |
| Simulasyon Süresi Sonunda Kalıcı Hata, e_{ss} | (°C) | 0,001 | 0,0 | 0,002 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,0 | 16306,0 | 2409,0 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 7223,9 | 815,3 | 120,4 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 361,2 | 813,3 | 142,0 |



Şekil 7.9. Fırın-1, 2 ve 3 için malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.



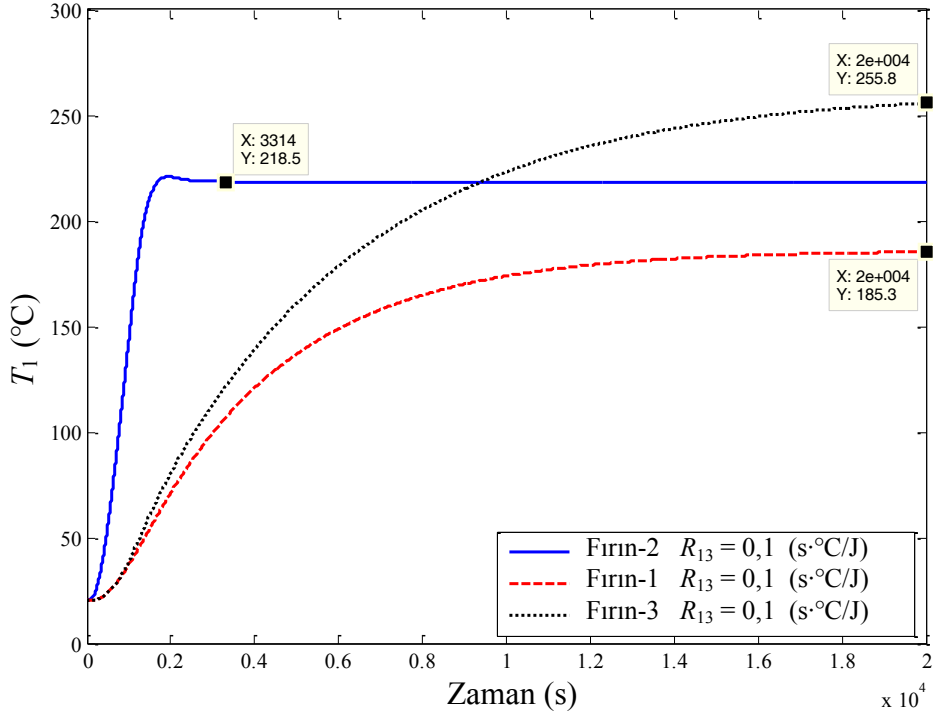
Şekil 7.10. Fırın-1, 2 ve 3 için malzeme sıcaklığının altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü.

ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicisinin kullanıldığı örnek fırınların hiç birinde kayla değeri bir kalıcı hata meydana gelmemektedir ($< 10^{-2}$). Bütün bunlar dikkate alındığında sistemin cevap hızı ve kararlılığı açısından her iki gözlemleyicisinde birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Dolayısıyla $R_{13} = 0,1$ iken aynı fırında farklı mertebeden gözlemleyici kullanılması çok büyük farklar yaratmamaktadır.

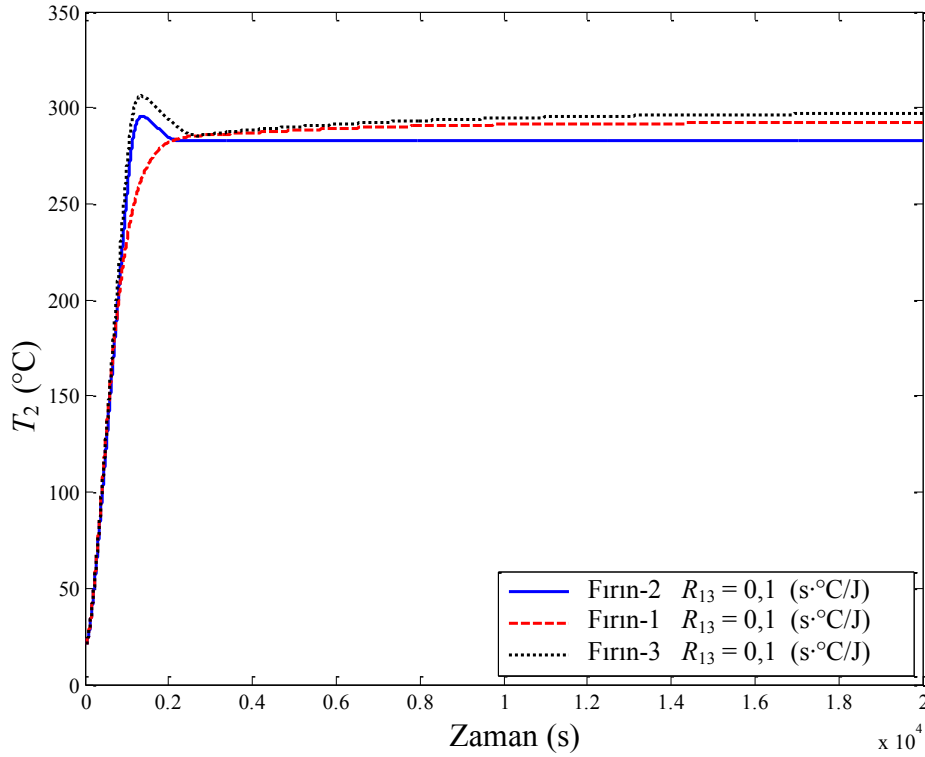
Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisinin kullanılmasıyla Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 için elde edilen performans değerleri ve cevap eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

Dış yalıtım-1 katmanının kalınlığının Fırın-1'in aynı katman kalınlığına oranla artması veya azalması uygulanan optimum geribesleme katsayıları ve gözlemleyici kazanç katsayılarıyla, gecikme ve yükselme zamanlarını azaltmaktadır. Sistem cevap hızının ölçütü olan gecikme ve yükselme zamanlarının en küçük değerleri Fırın-3 için elde edilmektedir. Fırın-1'de referans sıcaklığından aşma olmadığından, tepe sıcaklığı, tepe zamanı ve geçit zamanı değerleri elde edilememektedir. Tepe sıcaklığı değerleri Fırın-2 için $303,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iken Fırın-3 için $307 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olmaktadır. Sistemin yerleşme zamanı Fırın-1 ve Fırın-3 için birbirine çok yakın olmakta, Fırın-1'de ise diğer fırınlara oranla yaklaşık 15 dakika iyileşmektedir. Fırına sağlanan ortalama güç değeri ve fırından dışarıya olan ortalama güç kayıpları dış yalıtım katman kalınlığı azaldıkça artmaktadır (Şekil 7.17 ve Şekil 7.18). Şekiller 7.9, 7.11-7.18'de her üç fırın için elde edilen cevap eğrileri verilmiştir.

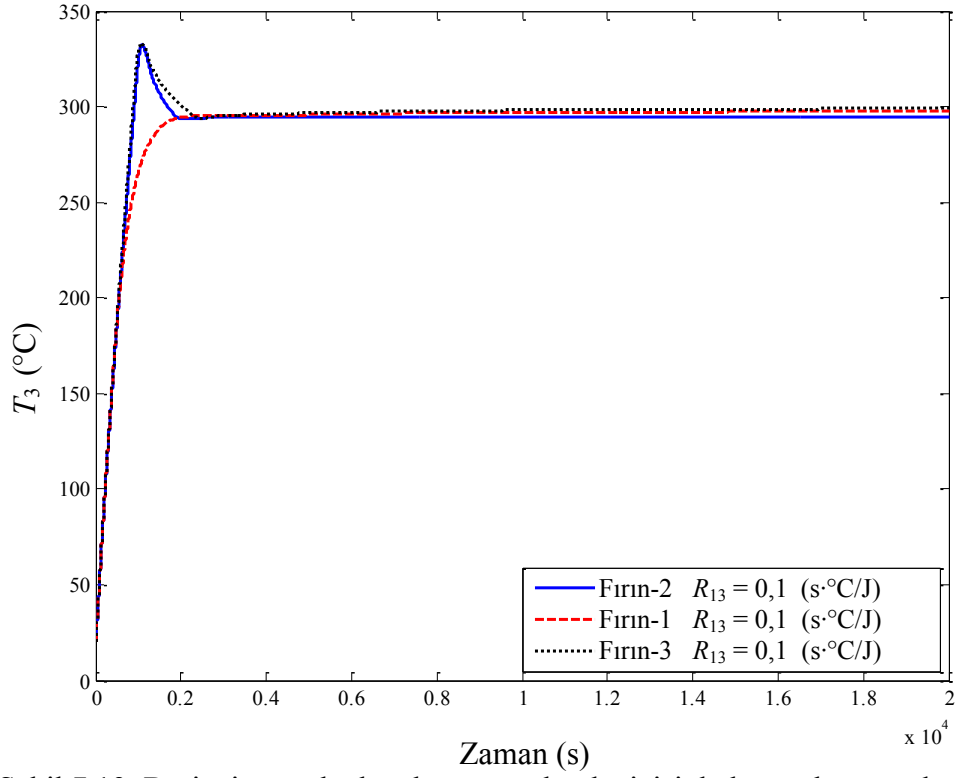
Şekil 7.11'de Fırın-1,2 ve 3'ün dış yalıtım-1 katmanında, malzeme sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolü sırasında meydana gelen sıcaklık değişimini göstermektedir. Fırın-2 için dış yalıtım-1 katmanının sıcaklığı 3314 saniye sonunda $185,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye, Fırın-1 için simülasyon sonunda $218,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ve Fırın-3 için simülasyon sonunda $255,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmaktadır.



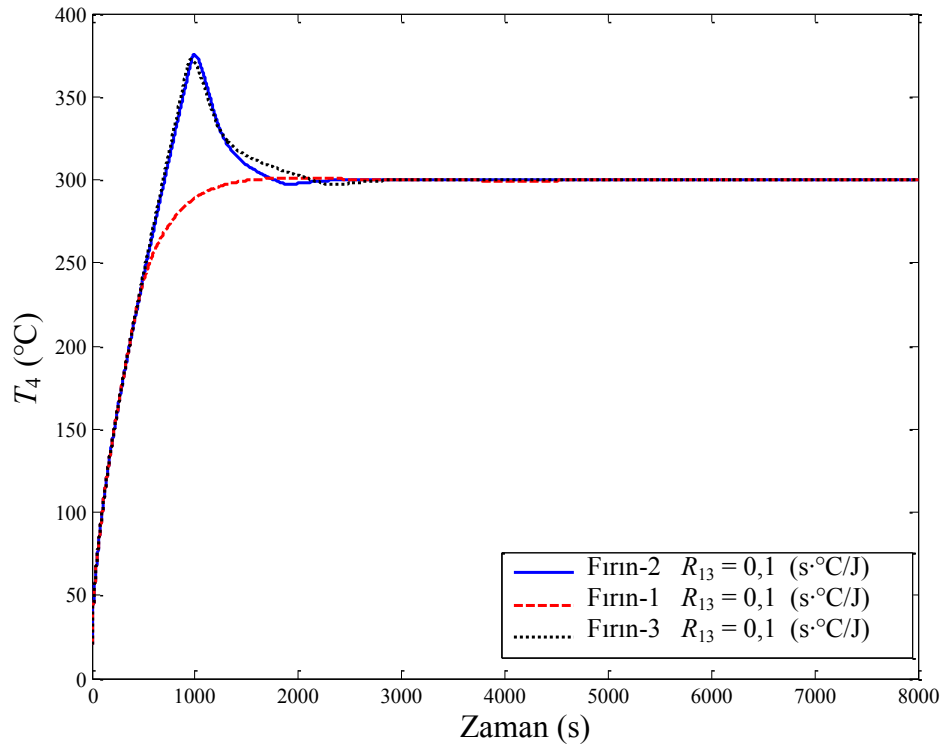
Şekil 7.11. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında dış yalıtım-1 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi.



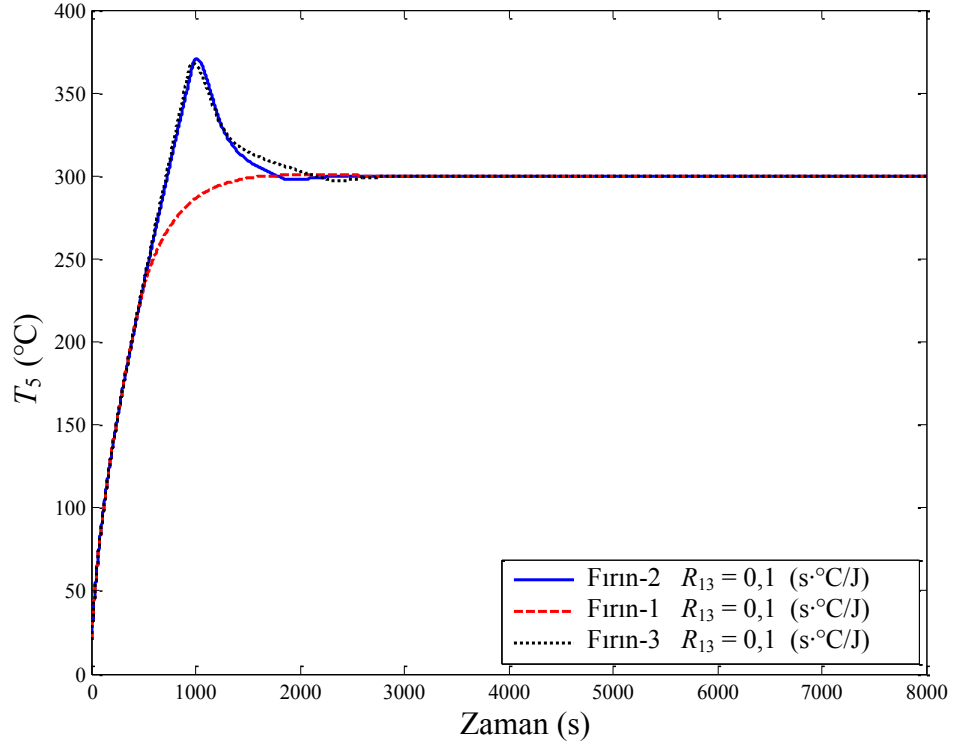
Şekil 7.12. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi.



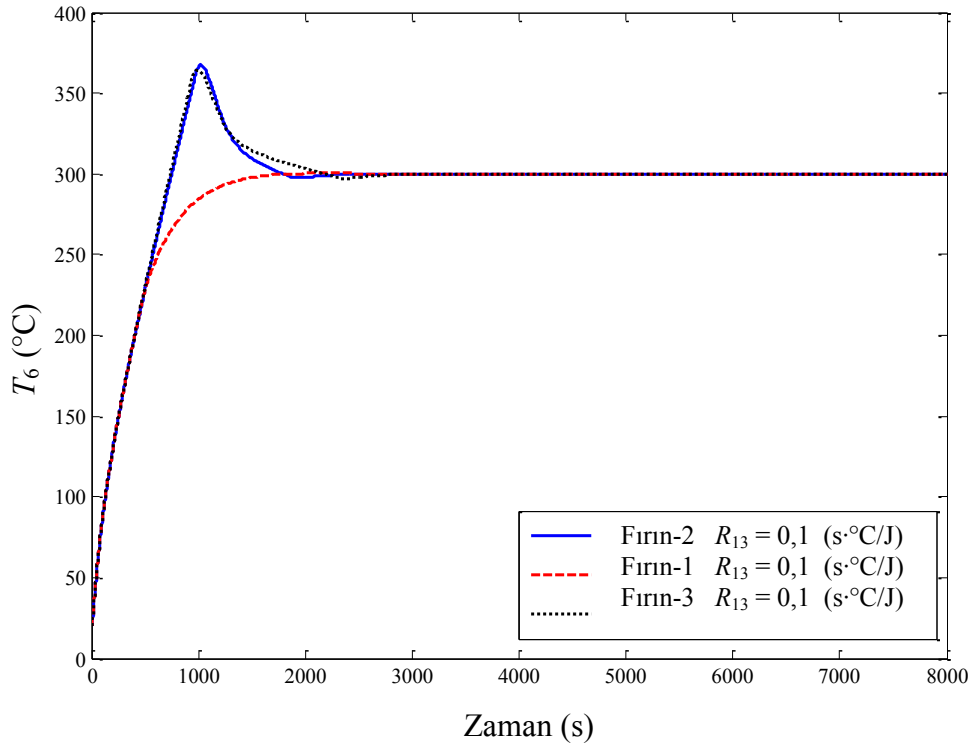
Şekil 7.13. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi.



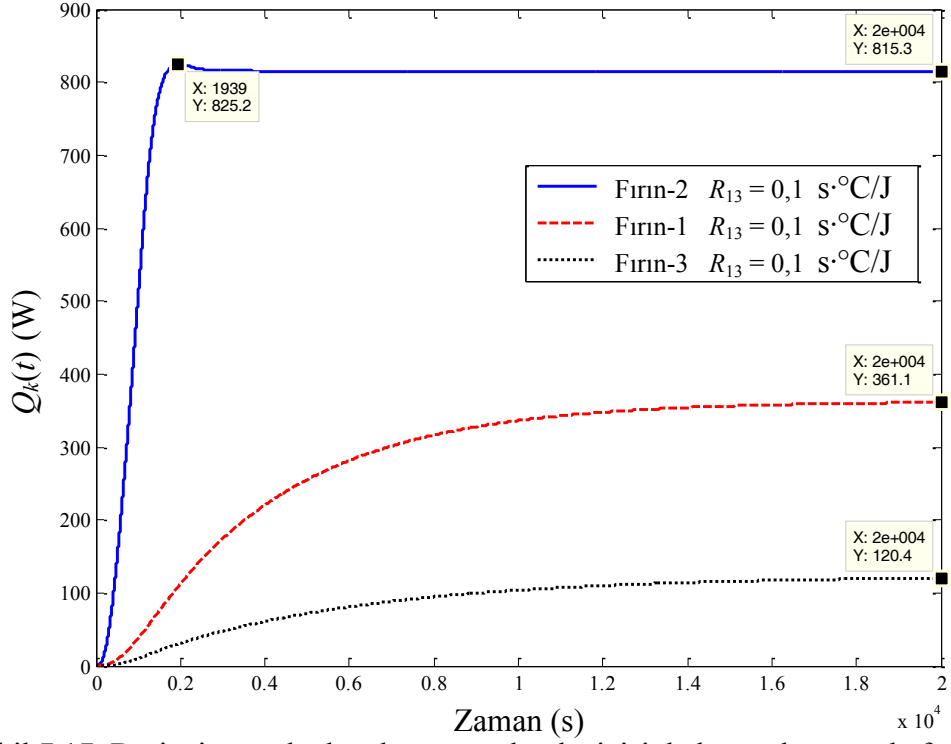
Şekil 7.14. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi.



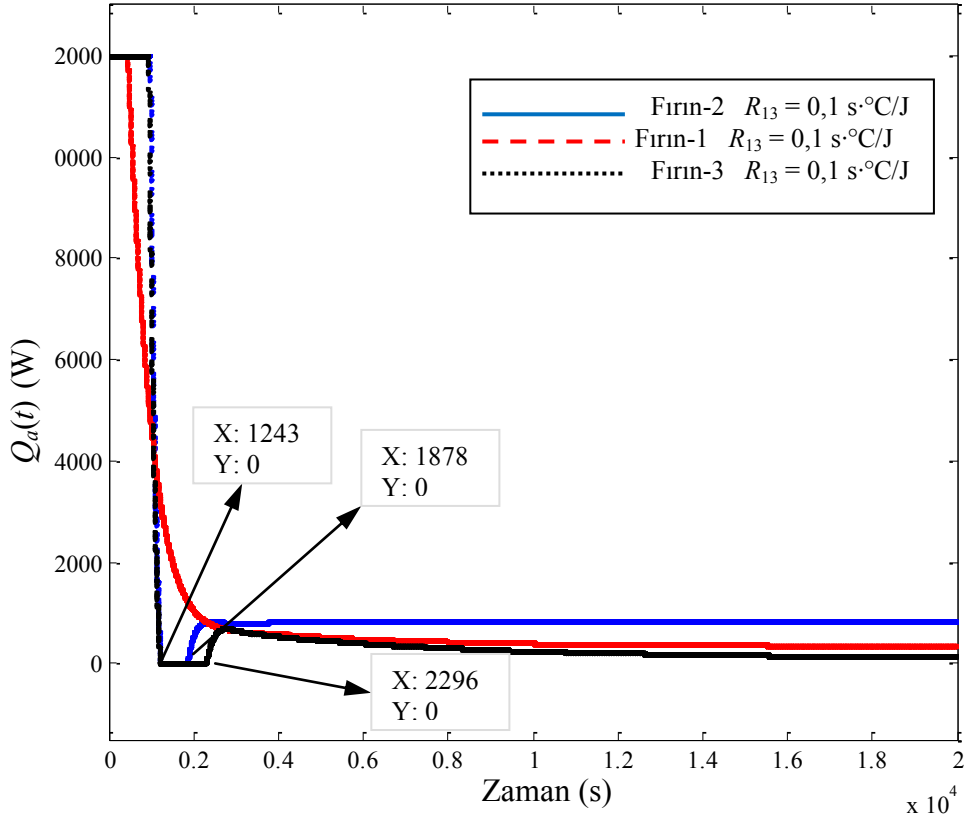
Şekil 7.15. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında iç refrakter-2 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi.



Şekil 7.16. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında iç refrakter-3 katmanındaki sıcaklığın Fırın-1, 2 ve 3 için zamana bağlı değişimi.



Şekil 7.17. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında fırından dışarıya olan güç kayıpları.



Şekil 7.18. Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol sırasında ısı kaynakından fırına aktarılan güç.

Şekil 7.12’de dış refrakter-1 katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi verilmektedir. Simulasyon süresi sonunda bu katmanın ulaştığı sıcaklık değeri Fırın-1 için 292,2 °C, Fırın-2 için 282,5 °C, Fırın-3 için 297 °C olmaktadır. Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’de ısı kaynağına en yakın iki duvar katmanındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi görülmektedir. Bu iki duvar katmanındaki sıcaklık değişimi birbirine benzer özellik göstermekle beraber iç refrakter-1 katmanındaki sıcaklık değeri bir süre sonra referans sıcaklığına eşit olmakta, dış refrakter-2 katmanındaki sıcaklık ise dışarıya olan ısı kayıplarından dolayı referans sıcaklığının altında seyretmektedir. Şekil 7.15 ve Şekil 7.16’da iç refrakter-2 ve iç refrakter-3 katmanlarındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi görülmektedir. Bu katmanlardaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi de iç refrakter-1 katmanının sıcaklık değişimine benzemektedir ve bir süre sonra bu katmanlardaki sıcaklık değeri de referans sıcaklığına ulaşmaktadır. Malzeme sıcaklığının da referans sıcaklığına erişmesinden sonra ısı kaynağına sadece dışarıya olan enerji kayıplarını karşılamak üzere ısı gücü vermektedir.

Şekil 7.17’de Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3’den dış ortama olan güç kayıpları görülmektedir. Fırından dışarıya olan güç kayıpları Fırın-2 için en fazla değere sahiptir. Dış yalıtım katman direncinin en fazla olduğu Fırın-3’de ise dışarıya olan enerji kayıpları 120,4 W değeriyle Fırın-1’deki değerin % 33’ü Fırın-2’deki değerin %15’i kadardır. Dış yalıtımın artırılması ile dışarıya olan enerji kayıplarının önemli ölçüde azalması sağlanmaktadır. Fakat böyle bir sistemde malzeme sıcaklığının kontrolü fırın duvar katmanlarında depolanan enerjinin dışarıya aktarılamaması ve malzeme sıcaklığı referans sıcaklığına eriştikten sonra bile malzemeye aktarılmaya devam etmesinden dolayı zorlaşmaktadır. Beşinci mertebeden malzeme sıcaklığının optimum kontrolü dış yalıtımın artırılıp enerji kayıplarının azaltıldığı Fırın-3 için cevap hızı ve sistem kararlılığı bakımından diğer fırınlarla benzer özelliklere sahip olmasını sağlayabilmektedir.

Şekil 7.18’de Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3’de ısı kaynağından fırına aktarılan ısı gücünün zamana bağlı değişimi görülmektedir. Fırından dışarıya olan enerji kayıpları arttıkça fırının referans sıcaklığında tutulması için sisteme sağlanacak olan ısı gücünün de arttığı görülmektedir. Dolayısıyla sisteme sağlanması gereken ısı gücü Fırın-2’de en

fazla iken, Fırın-3'de en az olmaktadır. Simulasyon süresi sonunda Fırın-1 için sisteme sağlanması gereken ortalama ısı güç yaklaşık olarak 360 W, Fırın-2 için 815 W, Fırın-3 için 142 W olmaktadır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elektrikli ısıtım fırınlarının modellenmesi ve sıcaklık kontrolü üzerine çalışılmış, modellenen fırına uygulanan kontrol yöntemlerinin değişik parametreler altında sistemin kontrol doğruluğu ve dinamik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Elektrikli ısıtım fırınının duvar katmanlarından meydana geldiği ve ısıtım kaynaktan gücün fırına aktarılmasını sağlayan rezistans telinin duvar katmanları arasına yerleştirilmiş olduğu kabul edilmiş, fırının ısıtım karakteristiğini ortaya koyan bir dinamik model oluşturulmuştur. Isıtım davranışının yeterince ayrıntılı olarak tanımlanması için ısıtım kaynaktan, fırının içine doğru olan refrakter duvar bölgesi 3 katman halinde, ısıtım kaynaktan fırın dışına doğru olan refrakter bölge 2 katman olarak ele alınmış ayrıca fırının en dışında bir yalıtım katmanı olduğu kabul edilmiştir. Isıtım kaynaktan fırın içine doğru duvar katmanları iç refrakter-1, iç-refrakter-2 ve iç refrakter-3 olarak, ısıtım kaynaktan fırın dışına doğru duvar katmanları dış refrakter-2, dış refrakter-1 ve dış yalıtım-1 katmanı olarak adlandırılmıştır. Fırına ait 7 adet durum denklemi; ısıtım kaynaktan fırına aktarılan ısıtım güç, duvar katmanlarından fırın dışına aktarılan ısıtım, her bir duvar katmanının ısıtım kapasitesinden dolayı duvar katmanlarında depolanabilen ısıtım ve malzemeye geçen ısıtım dikkate alınarak elde edilen eleman, süreklilik ve yalıtım denklemlerinin çözümlenmesiyle bulunmuştur. Aç-kapa kontrol için durum denklemleri ısıtım kaynak devrede değilken de elde edilmiştir. Isıtım kaynak devredeyken elde edilen durum denklemleri *PID* kontrol uygulaması için aynen kullanılmış, optimum kontrol yönteminin uygulanması için ise yeniden tanımlanan durum değişkenleri cinsinden tekrardan düzenlenmiştir. Tekrardan düzenlenen bu denklemler düşük mertebeden durum gözlemleyicileriyle kontrol yöntemi için de kullanılmıştır.

Tezde önerilen kontrol yöntemlerinin denemelerinde fırına ait 3 parametre önem arz etmiştir. Bunlardan birincisi yalıtımın etkisidir. Önerilen kontrol yöntemleri için sadece yalıtım katmanları birbirinden farklı olan ve Fırın-1, Fırın-2, Fırın-3 olarak adlandırılan üç farklı sistem kullanılmıştır. Diğer önem arz eden parametre fırın iç yüzeyinde meydana gelen konveksiyon/radyasyon direncinin belirlenmesidir. Bu

direnç için $R_{13} = 0,01; 0,1$ ve 1 ($s^{\circ}C/J$) değerleri kullanılmıştır. Önem arz eden bir diğer parametre de malzeme kütesidir. Optimum kontrol ve düşük mertebeden durum gözlemleyicileriyle kontrol uygulamalarında fırında ısıl işlem gören malzemenin birim fırın alanına düşen miktarı için 1 kg/m^2 ve 10 kg/m^2 olmak üzere 2 farklı değer kullanılmıştır.

Tezde önerilen kontrol yöntemlerinden ilki olan açık-kapalı kontrolcü ile malzeme sıcaklığının kontrolü örnek fırınlarda $m = 10 \text{ kg}$ iken farklı R_{13} durumları ve diferansiyel aralık (bw) değerleri için yürütülmüştür. İkinci olarak önerilen kontrol yöntemi P , PI ve PID kontrolcülerle malzeme sıcaklığının kontrolüdür. Örnek fırınlarda $m = 10 \text{ kg}$ iken $R_{13} = 0,1$ olduğu durumda P kontrol yöntemi farklı oransal kazanç katsayıları (K_p) için; PI kontrol yöntemi oransal kazanç katsayısı (K_p) sabit tutularak farklı integral zamanı (T_i) değerleri için; PID kontrol yöntemi ise oransal kazanç katsayıları (K_p) ve integral zamanı (T_i) değerleri sabit tutularak farklı türevsel zaman (T_d) değerleri için uygulanmıştır. Üçüncü olarak önerilen optimum kontrol yönteminde örnek fırınların performansı, malzeme sıcaklığının referans sıcaklığından farkının karesini, ısıl kaynağa en yakın olan dış refrakter-2 ve iç-refrakter-1 duvar katman sıcaklıklarının durağan değerlerinden olan farklarının kareleri toplamını; dış yalıtım-1 katmanının ısıl debisinin karesini ve sisteme sağlanan gücün durağan değerinden olan farkının karesini içeren integral biçiminde bir davranış kriteriyle tanımlanmıştır. Davranış kriterindeki terimlerin birbirine göre önemlerini ortaya koymak için ağırlık katsayıları belirlenmiştir. Davranış kriterini minimum yapan optimum geribesleme katsayıları Fırın-1'de $m = 10 \text{ kg}$ iken bütün R_{13} durumları için bulunmuş ve aynı geribesleme katsayıları $m = 1 \text{ kg}$ iken ki duruma uygulanmıştır. Fırın-2 ve Fırın-3'de ise optimum geribesleme katsayıları $m = 10 \text{ kg}$ iken $R_{13} = 0,1$ durumu için bulunmuştur. Son olarak önerilen düşük mertebeden durum gözlemleyicileriyle malzeme sıcaklığının optimum kontrolü için beşinci ve altıncı mertebeden iki farklı gözlemleyici tasarlanmıştır. Geribesleme katsayıları olarak optimum kontrol yönteminde örnek fırınlar için bulunan optimum geribesleme katsayıları kullanılmıştır. Gözlemleyici kazanç matrisleri Fırın-1'de $m = 1 \text{ kg}$ ve $m = 10 \text{ kg}$ için bütün R_{13} durumlarında, Fırın-2 ve Fırın-3'de ise $m = 10 \text{ kg}$ için ve $R_{13} = 0,1$ durumunda bulunmuştur.

Tezde önerilen her bir kontrol yöntemi için MATLAB programında kodlar yazılmış, sonuçlar sistemin kontrol doğruluğu ve dinamik davranışını özetleyen performans kartları ve şekillerle sunulmuştur.

Örnek fırınlarda aç-kapa kontrolcü ile malzeme sıcaklığının kontrolünün değerlendirilmesinde kontrol doğruluğu, sistem cevap hızı, görelî kararlılık (yüzde aşma, diferansiyel aralığa girme süresi), diferansiyel aralık (bw) değerleri ve anahtarlama periyotları gibi unsurlar ön plana çıkmaktadır. Bu unsurlar göz önüne alındığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır.

- 1) Diferansiyel aralık (bw) değeri azaldıkça kontrol doğruluğu ve görelî kararlılık artmakta, bütün fırınlarda en iyi sonuçlar $bw = 1$ değerinde elde edilmektedir. Sistem cevap hızı bw değişiminden çok fazla etkilenmemektedir (Çizelgeler 4.1-4.3, 4.5-4.7, 4.9-4.11).
- 2) Kontrol doğruluğunu bw değerinden artı (bw_+) ve eksi (bw_-) yönde olan sapmalar belirlemektedir. $R_{13} = 0,01$ ve $R_{13} = 0,1$ olduğu durumlarda $bw = 1$ değerinden artı (bw_+) sapmalar bütün fırınlarda 7 °C ile 11 °C aralığında olmakta ve bu değerler diğer bw değerleri için elde edilen değerlerden daha küçük olmaktadır. $R_{13} = 1$ durumunda Fırın-1 ve Fırın-3'de malzeme sıcaklığının hiçbir bw değerinde diferansiyel aralığa giremediği görülmektedir (Çizelgeler 4.1-4.3, 4.5-4.7, 4.9-4.11). R_{13} 'ün değeri arttıkça malzemeye olan ısı akışı zorlaşmakta ve dolayısıyla sistem güç kaynağını daha uzun süre açık konumda tutarak, malzemenin sıcaklığının referans giriş değerindeki sıcaklığa ulaşmasına çalışmaktadır. Bunun sonucu olarak duvar katmanlarının sıcaklıkları da sürekli artmakta; malzemenin sıcaklığı tolerans bandının üst sınır değerine ulaştıktan sonra ısı kaynak kapalı konuma gelse bile, yüksek sıcaklığa erişmiş olan duvar katmanlarından malzemeye olan ısı akışı devam etmekte ve malzeme sıcaklığının tolerans bandı üst sınır değerini çok fazla aşmasına sebep olmaktadır.

- 3) Malzeme ile fırının iç duvar katmanı arasındaki konveksiyon/radyasyon direnci olan R_{13} 'ün, dışyalıtım-1 katmanındaki ısı direnç olan R_1 ve R_2 'nin ve bw değerlerinin azalması anahtarlama periyotlarını kısalmaktadır (Çizelgeler 4.4, 4.8, 4.12).
- 4) Yüzde aşma miktarı $R_{13} = 0,01$ olması durumunda tüm fırınlar için % 2,1 değerinde iken; $R_{13} = 0,1$ olduğunda Fırın-1 için % 16,5, Fırın-2 için % 13,8, Fırın-3 için %16,6 ve $R_{13} = 1$ durumunda ise Fırın-1 için % 103,4, Fırın-2 için % 84,1, Fırın-3 için % 110 olmaktadır (Çizelgeler 4.1-4.3, 4.5-4.7, 4.9-4.11). Bu durumda R_{13} 'ün küçük değerlerinde fırının dış yalıtım katman kalınlığının değişmesi görece kararlılığı etkilemezken, R_{13} 'ün büyük değerlerinde sistemin görece kararlılığı daha da kötüleşmekte malzeme sıcaklığı diferansiyel aralığa girememektedir.

Bütün bunlar dikkate alındığında bw 'nin denenen bütün değerlerinde malzeme sıcaklığının diferansiyel aralıkta kalamadığı ve tepe sıcaklıklarının yalıtım katman kalınlığının ve R_{13} değerinin artmasıyla çok fazla arttığı görülmektedir. Örnek fırınlarda Aç-kapa kontrol yöntemi, malzeme sıcaklığının kontrolünde, sistemin kontrol doğruluğu ve görece kararlılığı bakımından yetersiz kalmaktadır.

Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de $R_{13} = 0,1$ olması durumunda P , PI , PID kontrol uygulamaları için denenen değerler arasından (Çizelgeler 5.1-5.9) en uygun olarak seçilen K_p , T_i ve T_d değerleri Çizelge 8.1'de görülmektedir. PID kontrol uygulaması için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır.

- 1) Simulasyon süresi sonunda P kontrol uygulamasıyla Fırın-1'de 4,24 °C, Fırın-2'de 6 °C ve Fırın-3'de 1,76 °C kalıcı hata meydana gelmektedir. PI kontrol ile örnek fırınlarda (Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3) simulasyon süresi sonunda kayla değer bir kalıcı hata meydana gelmemektedir ($< 10^{-4}$ °C). PID kontrol ile simulasyon süresi sonunda Fırın-1 için 0,03 °C, Fırın-2 için 0,054 °C ve Fırın-3 için 0,25 °C kalıcı hata meydana gelmektedir. Kontrol doğruluğu bakımından en

Çizelge 8.1. Oransal+integral+türevsel (*PID*) kontrol işleminde Fırın-1-2 ve 3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: | | FIRIN-1 | FIRIN-2 | FIRIN-3 |
|--|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Oransal Kazanç, K_p | | 85 | 133 | 84 |
| İntegral Zamanı, T_i | (s) | 2500 | 2500 | 3000 |
| Türevsel Zaman, T_d | (s) | 350 | 100 | 300 |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 639,7 | 640,1 | 639,0 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 1111 | 961,4 | 1117,9 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 1471,7 | 1205,8 | 1496,8 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 2784,6 | 1935,6 | 2795,5 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 353,9 | 363,8 | 346,2 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 18,0 | 21,3 | 15,40 |
| Maksimum Aşma (İlk Aşmadan Farklı İse), T_{mak} | (°C) | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. | T_m ile aynı. |
| Maksimum Aşma Zamanı, (İlk Aşmadan Farklı İse), t_{pmak} | (s) | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. | t_p ile aynı. |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 7523,6 | 6584,5 | 8779,9 |
| Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 0,03 | 0,014 | 0,25 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 6009 | 16110 | 1854 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 362,1 | 815,3 | 121,5 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 364,5 | 816,0 | 124,6 |

iyi sonuçlar *PI* kontrol ile elde edilmekte, *PID* kontrol ile, *P* kontrolde meydana gelen kalıcı hatalar Fırın-1 ve Fırın-2'de % 99, Fırın-3'de % 85 oranında azalmaktadır. *P* kontrol uygulamasıyla kalıcı hataların bu denli yüksek olması kontrol doğruluğu bakımından bu yöntemin malzeme sıcaklığının kontrolünde yetersiz kaldığını göstermektedir.

- 2) *P* kontrol ile Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de yüzde aşmalar % 0,16; % 1,9; % 0,1 kadar, sistemin yerleşme zamanları ise 1 saat 33 dakika, 1 saat 5 dakika ve 1 saat 20 dakika olmaktadır. *PI* kontrol ile Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de yüzde aşmalar % 22,8; % 23,1; % 19,3; sistemin yerleşme zamanları 2 saat 54 dakika, 1 saat 27 dakika ve 1 saat 20 dakika olmaktadır. *PID* kontrol ile Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de yüzde aşmalar % 17,9; % 18,3; % 15,4; sistemin yerleşme zamanları 2 saat 5 dakika, 1 saat 53 dakika ve 2 saat 30 dakika olmaktadır. Bu durumda sistemin görelî kararlılığı bakımından en iyi sonuçlar *P* kontrol ile elde edilmektedir.
- 3) Sistem cevap hızı bakımından en iyi sonuçlar *P* kontrol ile elde edilmekte, *PI* kontrol ile elde edilen sistem cevap hızları *PID* kontrole oranla daha iyi olmaktadır (Çizelgeler 5.1-5.9).

Bu sonuçlar dikkate alındığında kalıcı hataların ortadan kaldırıldığı *PI* kontrol ile tepe sıcaklığı çok yüksek sıcaklıklara ulaşmakta, sistem cevap hızı ve görelî kararlılığı kötüleşmektedir. *PID* kontrol kullanıldığında *PI* kontrol ile görülen tepe sıcaklıklarının azalması sağlanabilmekte, fakat bu durumda da çok küçük oranlarda da olsa kalıcı hatalar meydana gelmektedir. Örnek fırınlara *PI* kontrol yönteminin uygulanmasıyla meydana gelen tepe sıcaklıklarının ve *P* kontrol ile meydana gelen kalıcı hataların büyük ölçüde azaltılmasından dolayı malzeme sıcaklığının kontrolünde bu üç yöntemden *PID* kontrol tercih edilmelidir. Örnek fırınlara *PID* kontrol uygulanması ile elde edilen performans kartları Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3'de optimum kontrol uygulaması için en uygun olarak belirlenen ağırlık katsayılarıyla ve optimum geribesleme katsayılarıyla (Çizelgeler

6.4, 6.7, 6.9) elde edilen sistem cevapları Çizelgeler 8.2 ve 8.3’de görülmektedir. Optimum kontrol uygulamasıyla sistemin kontrol doğruluğu, görelî kararlılığı ve sistem cevap hızı bakımından aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır.

- 1) Optimum kontrol yöntemi ile örnek fırınlarda kalıcı hata meydana gelmemektedir. Bu durum kontrol doğruluğu açısından optimum kontrolün hem *PI* hem de *PID* kontrol uygulamalarına oranla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.
- 2) Çizelge 8.2’de görüldüğü gibi sistemin yerleşme zamanı R_{13} değeri arttıkça artmakta sistemin cevap hızı da kötüleşmektedir. En az aşma miktarı $R_{13} = 0,1$ durumunda, en fazla aşma miktarı ise $R_{13} = 1$ durumunda meydana gelmektedir (Şekil 6.5). R_{13} değerinin çok küçük olduğu durumlarda malzemeye ısı akışı kolaylaşmakta duvar katmanlarının depoladıkları ısı daha kolay malzemeye aktarılmaktadır. R_{13} değerinin çok büyük olduğu durumlarda ise malzemeye ısı akışı zorlaştığından ısı kaynak sisteme daha fazla ısı güç vermekte bu da duvar katmanlarının sıcaklıklarının daha çok artmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla malzemeye aktarılabilecek ısı miktarı daha fazla olmakta ve yüzde aşma miktarı artmaktadır. Buna karşılık optimum kontrolle R_{13} ’ün bütün değerleri için sistemin ulaştığı maksimum sıcaklık değeri % 2 kriterine göre belirlenen tolerans bandı sınırlarını aşmamaktadır. Bu durum kontrol doğruluğunun $R_{13} = 1$ durumunda açık-kapalı kontrole oranla yaklaşık olarak % 200 oranında arttığını göstermektedir.
- 3) Çizelge 8.3 incelendiğinde Fırın-2 ve Fırın-3 için sistem cevap hızı bakımından benzer sonuçlar elde edildiği, elde edilen değerlerin Fırın-1’e oranla 5 ile 10 dakika daha fazla olduğu görülmektedir. yerleşme zamanları içinde benzer sonuçlar elde edilmekte, yüzde aşma oranları % 2 kriterine göre belirlenen tolerans bandı sınırları içinde kalmaktadır. Fırın-3, dışarıya olan enerji kayıplarının yaklaşık olarak Fırın-1’e oranla % 30, Fırın-2’ye oranla %

Çizelge 8.2. Optimum kontrol işleminde Fırın-1 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: FIRIN-1 | | | | |
|---|----------|-----------|--------------------|--------------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_1 | | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_2 | | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-9} | 2×10^{-5} | 7×10^{-4} |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,01 | 0,1 | 1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 354,9 | 637,3 | 2613,1 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 682,2 | 998,5 | 5068,2 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 835,1 | 1589,1 | 7451,7 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 856,8 | 1834,0 | 9958,8 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 302,0 | 301,6 | 309,9 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,67 | 0,52 | 3,3 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 812,2 | 1379,9 | 12423,0 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,6 | 7223,9 | 7259,0 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 361,1 | 362,9 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,2 | 365,1 | 369,1 |

Çizelge 8.3. Optimum kontrol işleminde Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 için elde edilen performans değerlendirme kartı.

| ÖRNEK FIRIN: | | FIRIN-1 | FIRIN-2 | FIRIN-3 |
|---|----------|-----------|--------------------|-----------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_1 | | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_2 | | 0 | 0 | 0 |
| Ağırlık Katsayısı, ρ_3 | | 10^{-9} | 7×10^{-6} | 10^{-5} |
| Konveksiyon/Radyasyon Direnci, R_{13} | (s·°C/J) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Malzeme Kapasitansı, C_7 | (J/°C) | 4400 | 4400 | 4400 |
| Simulasyon Süresi | (s) | 20000 | 20000 | 20000 |
| Referans Sıcaklığı, T_{ref} | (°C) | 300 | 300 | 300 |
| Gecikme Zamanı, t_d | (s) | 354,9 | 640,1 | 637,3 |
| %10-%90 Kriterine Göre Yükselme Zamanı, t_r | (s) | 682,2 | 973,5 | 969,4 |
| Geçit Zamanı, t_c | (s) | 835,1 | 1402,5 | 1416,4 |
| Tepe Zamanı, t_p | (s) | 856,8 | 1666,6 | 1812,6 |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 302,0 | 303,6 | 305,7 |
| Yüzde Aşma, $P.O.$ | (%) | 0,67 | 1,2 | 1,9 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 812,2 | 1282,4 | 1295,5 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Enerji Kaybı, E_k | (kJ) | 7222,6 | 16306,1 | 2408,6 |
| Fırından Dış Ortama Olan Ortalama Güç Kaybı, $Q_{ko}(t)$ | (W) | 361,1 | 815,3 | 120,4 |
| Isıl kaynaktan Fırına Aktarılan Ortalama Güç, $Q_{ao}(t)$ | (W) | 365,2 | 815,3 | 142,06 |

65 oranında azaldığı, buna bağlı olarak ısı kaynaktan fırına sağlanan ısı gücün de bu oranlarda azaldığı bir fırındır. Dolayısıyla enerji kayıplarının azaldığı böyle bir fırının tasarımı tercih edilmelidir. *PID* kontrol uygulamasıyla aynı fırın için cevap hızı kötüleşmekte, sistemin yerleşme zamanı optimum kontrolle yaklaşık 21 dakikada elde edilirken *PID* kontrolle 2 saat 31 dakikaya uzamakta ve yüzde aşmalar optimum kontrole oranla % 13,5 oranında artmaktadır. Görüldüğü gibi optimum kontrol yöntemi ile elde edilen sonuçlar görece kararlılık ve cevap hızı bakımından da çok daha iyi olmaktadır.

- 4) Optimum kontrol yöntemi uygulamasında elde edilen optimum geribesleme katsayıları fırında duvar katman kalınlığının ve R_{13} 'ün değişimine duyarlıdır. Bunun için üretici firmanın tasarım aşamasında enerji kayıplarını da göz önüne alarak fırın duvar katmanlarını optimum bir değerde tutması, bir fırına optimum kontrol uygulanacaksa R_{13} 'ün değerinin mümkün olduğunca belirlenmesi ya da bu fırın için en uygun ρ_3 değerinin ve optimum geribesleme katsayılarının ampirik olarak denemelerle bulunması gerekmektedir.
- 5) Fırın-1'de $m = 10$ kg iken bulunan optimum geribesleme katsayıları, $m = 1$ kg iken ki duruma uygulandığında sistem cevap hızının ve görece kararlılığın bütün R_{13} değerleri için $m = 10$ kg iken ki duruma oranla iyileştiği görülmektedir (Çizelge 6.5, Şekiller 6.14,6.15). R_{13} 'ün büyük değerlerinde, sistem cevap hızı, malzeme kütlelerinin değişimine daha duyarlı olmaktadır. $m = 10$ kg iken bulunan optimum geribesleme katsayılarının $m = 1$ kg için de iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Dolayısıyla aynı fırında malzeme kütlelerinin değişmesi geribesleme katsayılarının yeniden bulunmasını gerektirmemektedir.

Düşük mertebeden gözlemleyicilerle malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında geribesleme katsayıları olarak, optimum kontrolde her bir fırın için bulunan geribesleme katsayıları kullanılmıştır. Önerilen beşinci ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicileri için bulunan gözlemleyici kazanç katsayılarının (Çizelge 7.1 ve

Çizelge 7.2) örnek fırınlarda uygulanmasıyla elde edilen sistem cevapları (Çizelgeler 7.3-7.8, Şekiller 7.2-7.18) incelenip *PID* ve optimum kontrol uygulamalarıyla karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır.

1) Fırın-1’de $R_{13} = 0,01$ ve $R_{13} = 0,1$ olduğu durumlar ile Fırın-2 ve Fırın-3’de $R_{13} = 0,1$ olduğu durumda, beşinci ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicileriyle malzeme sıcaklığının kontrolünde simulasyon süresi sonunda kayla değer bir kalıcı hata meydana gelmemekte ($R_{13} = 0,01$ olduğu durumda $< 10^{-4}$, $R_{13} = 0,1$ olduğu durum $< 10^{-3}$) buna karşılık Fırın-1’de $R_{13} = 1$ durumunda beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle $0,16$ °C, altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle simulasyon süresi sonunda $0,2$ °C’lik kalıcı hata oluşmaktadır (Çizelgeler 7.3 ve 7.4). Altıncı mertebeden durum gözlemleyicileri kullanıldığında simulasyon süresi sonunda kalıcı hataların çok az da olsa arttığı görülmektedir. Bu durum enerji kayıplarının bir ölçütü olan dış yalıtım katman sıcaklığının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle ölçülürken altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle tahmin edilmesinden kaynaklanmaktadır. Buna rağmen kontrol doğruluğu bakımından beşinci veya altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi kullanılması R_{13} ’ün değişik değerlerinde ve farklı yalıtım katmanı kalınlıklarında çok büyük farklar yaratmamaktadır. Kontrol doğruluğu önerilen *PID* kontrol yöntemine oranla iyileşmekte, optimum kontrol yöntemi ile benzeşmektedir (Çizelgeler 7.3, 7.4, 7.8, 8.1-8.3).

2) Fırın-1’de $R_{13} = 0,01$ olduğu durumda sistemin geçit zamanı, gecikme zamanı, yükselme zamanı ve tepe zamanı değerleri için, optimum kontrol yöntemi ile beşinci ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicileriyle kontrolün benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3’de $R_{13} = 0,1$ olduğu durumda, optimum kontrol yönteminde elde edilen gecikme zamanı, geçit zamanı ve tepe zamanları beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle edilen değerlerle aynı ya da benzer olmakta, altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle bu değerler 5 ile 15 dakika arasında kısalmaktadır. Fırın-1’de $R_{13} = 1$ olduğu durumunda da $R_{13} = 0,1$ durumunda

olduğu gibi, optimum kontrol yönteminde elde edilen gecikme zamanı, geçit zamanı ve tepe zamanları beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle edilen değerlerle aynı olmakta, altıncı mertebeden durum gözlemleyicisinin kullanılmasıyla elde edilen gecikme zamanı, yükselme zamanı, geçit zamanı ve tepe zamanı değerlerinin optimum kontrol ve beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol yöntemlerine oranla yaklaşık olarak sırasıyla 40 dakika, 1 saat 26 dakika, 1 saat 40 dakika ve 2 saat 5 dakika daha kısa olduğu görölmektedir. Dolayısıyla Fırın-1’de R_{13} ’ün değişik değerlerinde ve Fırın-2 ve Fırın-3’de $R_{13} = 0,1$ olduğu durumda sistem cevap hızı bakımından en iyi sonuçlar, optimum kontrole ve beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrole oranla, altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle elde edilmektedir.

- 3) Fırın-1’de $R_{13} = 0,01$; $0,1$ ve 1 olduğu durumlarda meydana gelen yüzde aşmalar optimum kontrol ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicileriyle kontrol için aynı iken, beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle yüzde aşmalar optimum kontrole oranla $R_{13} = 0,01$ durumunda % $0,5$ oranında artmakta, $R_{13} = 0,1$ durumunda aşma olmamakta, $R_{13} = 1$ durumunda % 2 oranında azalmaktadır. Fırın-2’de $R_{13} = 0,1$ olduğu durumda meydana gelen yüzde aşmalar optimum kontrol ve beşinci mertebeden durum gözlemleyicileriyle aynı iken, altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle % $0,7$ oranında azalmaktadır. Fırın-3’de $R_{13} = 0,1$ olduğu durumda meydana gelen yüzde aşmalar optimum kontrol ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicileriyle aynı iken, beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle optimum kontrole oranla % $0,5$ oranında azalmaktadır. Sistemin yerleşme zamanı Fırın-1’de $R_{13} = 0,01$ ve $R_{13} = 0,1$ durumları için, Fırın-2 ve Fırın-3’de $R_{13} = 0,1$ olduğu durum için optimum kontrol, beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol için aynı veya birbirine yakın olmaktadır. Fırın-1’de $R_{13} = 1$ olduğu durumda optimum kontrol yöntemiyle elde edilen yerleşme zamanının beşinci mertebeden durum gözlemleyicisi kullanıldığında 1 saat 23 dakika, altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi kullanıldığında 37 dakika azaldığı

görülmektedir. R_{13} 'ün küçük değerlerinde sistemin görelî kararlılığı bakımından optimum kontrol yönteminin ve düşük mertebeden durum gözlemleyicisinin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Fırın-1'de $R_{13} = 1$ durumunda sistemin görelî kararlılığı bakımından en iyi sonuçlar beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle elde edilmektedir (Şekiller 6.5, 7.2, 7.3). Sistemin görelî kararlılığı bakımından R_{13} değerinin bilinmesi tasarlanacak gözlemleyicinin mertebesi açısından önem arz etmektedir. Dış yalıtım katmanının farklı değerlerinde sistemin görelî kararlılığı bakımından optimum kontrol ile beşinci ve altıncı mertebeden durum gözlemleyicileriyle kontrolün yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

- 4) Beşinci mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrol $m = 1$ kg iken ki duruma, iki farklı gözlemleyici kazanç matrisi kullanılarak uygulanmıştır. Bunlardan birincisi $m = 10$ kg iken bulunan gözlemleyici kazanç katsayılarının $m = 1$ kg iken ki duruma uygulanması, diğeri ise $m = 1$ kg iken bulunan gözlemleyici kazanç katsayılarının $m = 1$ kg iken ki duruma uygulanması şeklindedir. Burada da optimum kontrole benzer olarak, $m = 10$ kg iken bulunan gözlemleyici kazanç katsayılarının $m = 1$ kg iken ki duruma uygulanmasının $m = 10$ kg iken ki duruma oranla sistem cevap hızı, görelî kararlılığı ve kontrol doğruluğu açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca her iki gözlemleyici kazanç matrisinin de $m = 1$ kg iken ki duruma uygulanmasının benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Dolayısıyla burada da sadece bir malzeme kütlesi için gözlemleyici kazanç katsayılarının bulunması yeterli olmaktadır. Gözlemleyici kazanç katsayıları yine optimum kontrole benzer olarak dış yalıtım katman kalınlığının ve özellikle R_{13} değerinin değişmesiyle büyük oranda değişmektedir. Bunun için burada da R_{13} değerinin mümkün olduğu kadar belirlenmesi veya amprik olarak deneylerle bulunması önem arz etmektedir.

Tezde önerilen optimum kontrol yönteminde, 7 adet durum değişkeninin ölçülebildiği ve geribeslendiği kabul edilmiştir. Ancak bu, tüm durum değişkenlerinin ölçülmesi için gereken ölçüm ve veri toplama sistemleri yatırım

maliyetini arttırdığı gibi, sistemin bakım – onarımını da güçleştirir. Dolayısıyla incelenen ısı işlem fırınında bütün duvar katmanlarının ve işlem gören malzemenin sıcaklıklarının yedi yerde ayrı ayrı ölçülmesi uygulayıcı yönünden arzu edilmeyen bir durumdur. Bu tezde elektrikli ısı işlem fırınlarında malzeme sıcaklığının kontrolünde, optimum geribesleme katsayılarını kullanan ve ölçülmesi gereken durum değişkenlerinin sayısının minimum olduğu altıncı mertebeden bir gözlemleyicisinin, kontrol doğruluğu ve sistemin dinamik özellikleri bakımından optimum kontrol yöntemi kadar iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolayısıyla böyle bir sistemde ölçülen durum değişkenlerinin mümkün olduğu kadar azaltıldığı ve ölçülemeyen durum değişkenlerinin kestirildiği altıncı mertebeden bir durum gözlemleyicisinin tercih edilmesinin yukarıda bahsedilen sorunların çözümlenmesi için iyi bir yöntem olduğu sonucuna varılmaktadır.

Tezde önerilen kontrol yöntemlerinin birbirleriyle karşılaştırılıp en uygun kontrol yönteminin önerilmesi için sistemin görelî kararlılığının ölçütü olan tepe sıcaklığı ve yerleşme zamanı değerleri ile kontrol doğruluğunun bir ölçütü olan simülasyon süresi sonundaki durağan hata değerleri belirleyici unsurlar olmaktadır. Çizelge 8.4’de örnek fırınlara değişik kontrol yöntemlerinin uygulanması ile elde edilen tepe sıcaklığı, yerleşme zamanı ve simülasyon süresi sonundaki kalıcı hata değerleri verilmiştir. Bu değerler Fırın-1, Fırın-2 ve Fırın-3 için fırın iç duvarı ile ısı işlem gören malzeme arasındaki konveksiyon/radyasyon direnci olan R_{13} ’ün 0,1 olduğu durumda, *PID* kontrolün denenen değerler arasından en uygun olarak belirlenen oransal kazanç (K_p), integral zamanı (T_i), türevsel zaman (T_d) değerleri ile uygulanmasıyla, optimum kontrolün optimum geribesleme katsayı matrisi (\mathbf{K}) ile uygulanmasıyla, altıncı mertebeden durum gözlemleyiciyle optimum kontrolün belirlenen gözlemleyici kazanç matrisi (\mathbf{K}_e) ile uygulanmasıyla edilen değerlerdir. Çizelgedeki değerler altıncı mertebeden durum gözlemleyicisi kullanılarak yapılan optimum kontrolün, tüm durum değişkenlerinin geribeslendiği optimum kontrol kadar iyi olduğunu; diğer önerilen kontrol yöntemlerinden çok daha iyi kontrol doğruluğu ve görelî kararlılık sağladığını göstermektedir.

Çizelge 8.4. Değişik kontrol yöntemlerinin uygulanmasıyla Fırın-1-2 ve 3 için elde edilen performans değerlendirme kartı ($R_{13} = 0,1 \text{ s}^\circ\text{C}/\text{J}$, $C_7 = 4400 \text{ J}/^\circ\text{C}$, simülasyon süresi = 20000 s, $T_{ref} = 300^\circ \text{C}$).

| ÖRNEK FIRIN: | | FIRIN-1 | FIRIN-2 | FIRIN-3 |
|--|-------|------------------|------------------|------------------|
| Parametre | Birim | Değer | | |
| Oransal (P) Kontrol | | | | |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 300,5 | 305,7 | 300,3 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 5592,8 | 3933,6 | 4849,5 |
| Simülasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 4,24 | 6,0 | 3,0 |
| Oransal+İntegral (PI) Kontrol | | | | |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 368,6 | 375,3 | 357,9 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 8646,2 | 5271,5 | 6508,8 |
| Simülasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | <10 ⁴ | 0,0001 | 0,0001 |
| Oransal+İntegral+Türevsel (PID) Kontrol | | | | |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 353,9 | 363,8 | 346,2 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 7523,6 | 6584,5 | 8779,9 |
| Simülasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | 0,03 | 0,014 | 0,25 |
| Optimum Kontrol | | | | |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 302,0 | 303,6 | 305,7 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 812,2 | 1282,4 | 1295,5 |
| Simülasyon Süresi Sonunda Durağan Hata, e_{ss} | (°C) | <10 ⁴ | <10 ⁴ | <10 ⁴ |
| Altıncı Mertebeden Durum Gözlemleyicisi ile Optimum Kontrol | | | | |
| İlk Aşma Tepesinde Sıcaklık, T_m | (°C) | 301,6 | 305,6 | 305,7 |
| %2 Kriterine Göre Yerleşme Zamanı, t_s | (s) | 1618,3 | 1587,8 | 1791 |
| Simülasyon Süresi Sonunda Kalıcı Hata, e_{ss} | (°C) | 0,001 | <10 ⁴ | 0,002 |

Yapılan çalışmada fırına dıştan gelen bozucu etkiler doğrudan incelenmemektedir. Optimum kontrol ve düşük mertebeden durum gözlemleyicileriyle kontrolde, kontrol sistemi sadece durum değişkenleri durağan haldeki değerlerinden saptıklarında devreye girmekte ve bu sapmaları engellemeye çalışmaktadır. İleri ki çalışmalarda dıştan gelen bu bozucu etkiler de incelenmelidir. Durum değişkenlerinin ölçümünde gürültü etkisi fazla ise sisteme uygun filtre devrelerinin de tasarlanması gerekecektir [24].

Fırın iç duvarıyla malzeme arasındaki ısı direncin 3 farklı değerinde sistemin dinamik özelliklerinin ve kontrol doğruluğunun büyük oranda değiştiği görülmüştür. Optimum geribesleme katsayıları ve gözlemleyici kazanç katsayıları bu değerinin değişimine duyarlı olmaktadır. Dolayısıyla ileri ki çalışmalarda bu direnç değerinin belirlenmesi veya amprik olarak bulunması önem teşkil etmektedir.

Tezde önerilen kontrol yöntemlerinin ekonomikliği araştırılmamıştır. Buna karşılık, fırın duvar katman kalınlığının değişik değerlerinde uygulanan kontrol yöntemleriyle elde edilen sistem cevapları ve sisteme sağlanan ısı güç değerleri incelenmiştir. Dış katman kalınlığının artması tüm yöntemlerde sistemin görece kararlılığını azaltmakta ve sistemin yerleşme zamanını arttırmaktadır. Buna karşılık optimum kontrol ve düşük mertebeden optimum kontrolcüyle kontrol işlemlerinde yüzde aşmalar % 2'lik bant genişliğinin dışına çıkmamaktadır. Dış katman kalınlığı arttıkça sisteme sağlanması gereken ortalama ısı güç değeri de büyük oranda azalmaktadır. Tüm bunlar dikkate alınarak fırın duvar katman kalınlığının optimum bir değerde tutulup sisteme uygulanacak düşük mertebeden durum gözlemleyicisiyle kontrolün ekonomikliğin araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Smith, F., W., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür yayınları, (65),Ekim 2001
- [2] Trinks, W. & Mawhinney, M., H. & Shannon, R., A. & Reed, R., J. & Garvey, J. R., ‘Industrial Furnaces’, John Willey & Sons, INC., 6th edition.
- [3] Eroğlu, Mehmet, Akaryakıtla Çalışan Endüstriyel Tav Fırınlarında Yanma, Sıcaklık ve Basıncın Optimum Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şubat 1987.
- [4] ‘Kobi bilgi sektörler günlüğü’ erişim adresi <http://www.sektorler.kobibilgi.org/dunyada-enerji-kaynaklari>, erişim tarihi: Mart,2009.
- [5] ‘Enerji Piyasaları Denetleme Kurumu’ erişim adresi www.epdk.gov.tr , erişim tarihi: Şubat, 2009.
- [6] ‘Uluslar Arası Enerji Kuruluşu’ erişim adresi <http://www.iea.org/Textbase/stats/surveys/mes.pdf> , erişim tarihi: Mart, 2009.
- [7] ‘Uluslar Arası Enerji Ajansı’ erişim adresi <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/electricity.html>, erişim tarihi: Mart, 2009.
- [8] Kelly C.D. & Watanpongse D. & Gaskey K.M., Application of Modern Control to a Continuous Anneal Line, IEEE,8(2), 32-37,1998.
- [9] Yager, E., J. & Soukup, T., F. & Boughtonl J.,R., Computer Integrated Manufacturing at LTV Steel’s Continuous Annealing Line, Iron and Stell Engineer, (12), 15-20, 1994.
- [10] Martineau, S., Burnham, K., J., Haas, O., Andrews, G., Heeley, A., Four-term Bilinear *PID* Controller Applied to an Industrial Furnace, Control Engineering Practice, (12), 457-464, 2004.
- [11] Martineau, S., Burnham, K., J., Haas, James D., J. G., Bilinear Self-tuning Control of a High Temperature Plant, IEEE, Control Theory and Applications, 141(1), 12-18.
- [12] Laurinen, P.& Roning, J., An Adaptive Neural Network Model for Pretecting the Post Roughning Mill Temperature of Steel Slabs in the Reheating Furnace, Journal of Material Processing Technology, No.168, 423-430.
- [13] Kelly C.D. & Watanpongse D. & Gaskey K.M., ‘Application of Modern Control to a Continuous Anneal Line’, IEEE,8(2):32-37,1998.
- [14] Cao, Shu-kun & Xu, Jing & Shi, Lei, The Temperature Control System of Continuously Multi-Segments Sintering Furnaces, IEEE, 978-0-7695-3391-9, 2008.
- [15] Soumik, B., Dipankar, S., Swarnendu, S., Ishwar, K., P., A, International Journal of Heat and Mass Transfer, (47), 5247-5256, 2004.
- [16] Papalexandirs, M., V., Millman, M., H., Active Control and Parameter Uptating Techniques for Nonlinear Thermal Network Models, Comput. Mech., (27), 11-22, 2001.
- [17] Ming, Z. & Datai, Y., ‘ A New Strip Temperature Control Method for the Heating Section of Continuous Annealing Line’, IEEE, 978-1-4244-1674-5, 2008.

- [18] Ramirez, M. & Haber, R. & Penap, V. & Rodriguez, I., Fuzzy Control of a Multiple Hearth Furnace, Computers in Industry, No.54, 105-113.
- [19] Radakovic Z., R., Milosevic V., M., Radakovic, S.,B., Application of Temperature Fuzzy Controller in an Indirect Resistance Furnace, Applied Energy, (73), 167-182, 2002.
- [20] Abilov, A., G., Zeybek, Z., Tuzunalp, O., Telatar, Z., Fuzzy Temperature Control of Industrial Refineries Furnaces Through Combined Feedforward/Feedback Multivariable Cascade Systems, Chemical Engineering and Processing, (41), 87-98, 2002.
- [21] Mota, A. M. & Fonseca, J., A. & Santos, M., D., An Adaptive Control System for for an Industrial Tunnel Kiln, IEEE Electrotechnical Conference, Budapest,102-105, 1993
- [22] Fallahpour, M. & Fatahi, A. & Babak, N., Araabi & Azizi, M., A Supervisory Fuzzy Control of Back-End Temperature of Rotary Cement Kilns, ICROS, 978-89-950038-6-2-98560, 2007.
- [23] Erhan İZMİR, Observers for Linear Time-Invariant Systems, Boğaziçi Üniversitesi, 1982.
- [24] Eroğlu, M., Ercan, Y., Akaryakıtla Çalışan Endüstriyel Tav Fırınlarında Yanma, Sıcaklık ve Basıncın Optimum Kontrolü, 6. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 1987.
- [25] Ercan, Yücel, Mühendislik Sistemlerinin Modellenmesi ve Dinamiği, Literatür yayınları, İstanbul 2003.
- [26] Perry, H., R., Chilton, H., C., Chemical Engineers Handbook, Mc-Graw-Hill, Koga-Kusha, 5th edition.
- [27] ‘TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi’ Erişim adresi http://www.imoistanbul.org.tr/ist-bulten/IMO_67/bultn67-L.pdf , erişim tarihi: Mayıs 2009.
- [28] Kakaç, Sadık, Yüncü, H., Temel Isı Transferi, Bilim Yayıncılık, Ankara, 1999.
- [29] Altınışik, Kemal, Uygulamalarla Isı Transferi, Nobel yayınları, Mayıs 2004.
- [30] Ercan, Y., Durmaz, A., Sönmez, M., Akaryakıtlı Fırınların Enerji Ekonomisi Yönünden İncelenmesi, 4. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Gaziantep, Eylül 1983.
- [31] Karabay, M., Ercan, Y., Durmaz, A., Endüstride Enerji Tasarrufu Çalışmalarında Yöntemsel Yaklaşımlar, 4. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Gaziantep, Eylül 1983.
- [32] Ercan, Y., Durmaz, A., Sönmez, M., Akaryakıtlı Bir Tav Fırınının Atık Isısının Fabrika Isıtılmasında Kullanımı, 5. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, İstanbul, Eylül 1985.
- [33] Kanthal Company, Kanthal Super Electric Heating Element Handbook, Catalogue 2-A-1-3, 1999.
- [34] Ogata, Katsuhiko, Modern Control Engineering, Prentice-Hall international, 3th edition.
- [35] Yüksel, İbrahim, Otomatik Kontrol-Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri, Uludağ Üniversitesi, 2001.
- [36] Schultz & Meltza, State Functions and Linear Control Systems, McGraw-Hill Series in Electronic Systems, NY 1967.

- [37] Luenberger, D., G., An Introduction to Observers, IEEE Transactions on Automatic Control , Vol. AC-16 , No 6 , December 1971.
- [38] Luenberger, D., G., Observers for Multivariable Systems, IEEE Transactions on Automatic Control , Vol. AC-11 , No 2 , December 1966.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ARIKAN, Onur
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 06.08.1982 Gaziantep
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 234 10 10/1459
Faks : 0 (312) 292 10 57
e-posta : arikano@etu.edu.tr
arikano@baskent.edu.tr

Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi | Mezuniyet tarihi |
|---------------|---------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | TOBB ETU/Makine Müh. | 2009 |
| Lisans | Selçuk Üniversitesi/Makine Müh. | 2005 |

İş Deneyimi

| Yıl | Yer | Görev |
|-----------|--|---------------------|
| 2009- | Başkent Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |
| 2006-2009 | TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |

Yabancı Dil

İngilizce