

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SLAB ISITMA FIRINLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNE YÖNELİK
UYARLAMALI VE MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL**

DOKTORA TEZİ

Deniz KAVAK

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SLAB ISITMA FIRINLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNE YÖNELİK
UYARLAMALI VE MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL**

DOKTORA TEZİ

**Deniz KAVAK
(504072108)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yaprak YALÇIN

AĞUSTOS 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY★ GRADUATE SCHOOL

**ADAPTIVE NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR ENERGY
EFFICIENCY IN SLAB REHEATING FURNACES**



PhD THESIS

**Deniz KAVAK
(504072108)**

Department of Control and Automation Engineering

Control and Automation Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Yaprak YALÇIN

AUGUST 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504072108 numaralı Doktora Öğrencisi Deniz KAVAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SLAB ISITMA FIRINLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNE YÖNELİK UYARLAMALI VE MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yaprak YALÇIN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

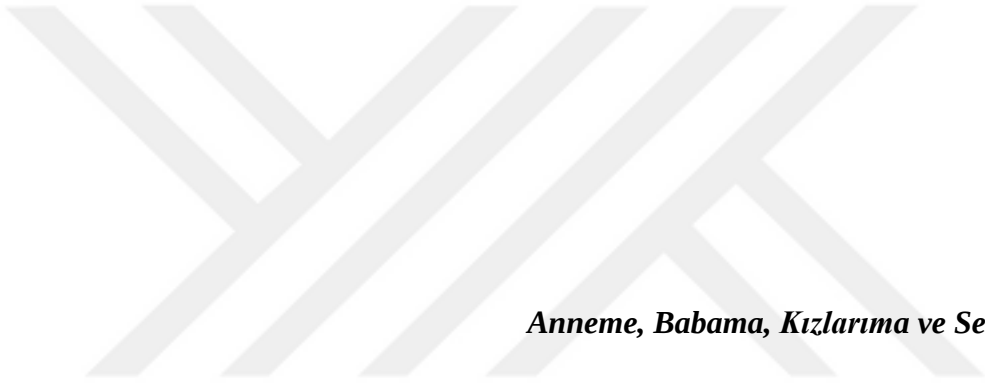
Prof. Dr. Erkan KAPLANOĞLU
University of Tennessee at Chattanooga

Prof. Dr. Salman KURTULAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat Erhan ÇİMEN
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Teslim Tarihi : 14 Haziran 2024
Savunma Tarihi : 06 Ağustos 2024





Anneme, Babama, Kızlarıma ve Sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Doktora tezime başladığımda ülkemiz sanayisine bir katkı sunabilmek için karşılaştığım zorluklar karşısında yılmadan, azimle yaşadığım sıkıntıların üstesinden gelmeye çalıştım. Yoğun iş temposunda zaman zaman motivasyonum düşse de danışman hocamın ve ailemin destekleriyle bu yorucu süreci başarıya ulaştırmanın mutluluğunu sevdiklerimle beraber yaşamaktayım.

Bu çalışmada hem iş hem de günlük hayatımda karşılaştığım zorlukları benimle birlikte yaşayan aileme, her konuda bana destek olan anne ve babama, tezimle birlikte büyüyen kızlarım Zehra Nur ve Zeynep'e, doktora devam etmemde beni cesaretlendiren hayat arkadaşım Nergizhan ANAÇ'a, dua ve desteklerini esirgemeyen tüm sevdiklerime teşekkür ederim.

Doktora çalışmam sırasında verdiği destek, gösterdiği anlayış ve zaman zaman motivasyonum düştüğünde uzattığı yardım eli nedeniyle danışman hocam Prof. Dr. Yaprak YALÇIN'a ve jürideki hocalarıma çok teşekkür ederim.

Son olarak burada anamadığım fakat tezdeki araştırmalarım ve saha uygulamaları sırasında bilgilerini paylaşan, destek ve yardımlarını esirgemeyen iş arkadaşlarıma da şükranlarımı sunarım.

Ağustos 2024

Deniz KAVAK
(Elektrik-Elektronik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Literatür Araştırması	7
1.3 Çalışmanın Katkıları.....	14
2. SLAB FIRINI TERMAL MODELLERİ.....	19
2.1 Slab Termal Modeli.....	19
2.2 Slab Fırını Refrakter Duvarı Termal Modeli.....	24
2.3 Fırının Işıma Yoluyla Isı Transfer Modeli	24
2.4 Termal Model Hesaplaması.....	25
2.5 Isı Transfer Dengesini Baz alan Matematiksel Model	26
2.6 Fırın Transfer Fonksiyon Modeli	27
3. EREĞLİ DEMİR ÇELİK TESİSLERİ 4. SLAB FIRINI DOĞRUSAL OLMAYAN DURUM UZAYI MODELİ.....	31
3.1 Fırın Bölgesi Enerji Dengesi	34
3.2 Fırın Dinamik Modeli Durum Uzay Denklemleri.....	42
4. DALDIRMA ve DEĞİŞMEZLİK (I&I) YAKLAŞIMI.....	49
4.1 Ön bilgiler	49
4.2 Ölçülemeyen Bozucuların I&I ile Kestirilmesi.....	51
5. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÖR TASARIMI	53
5.1 Ön Bilgiler.....	53
5.2 4.Slab Fırını modelinin doğrusal olmayan model öngörülü kontrolü (NMPC)60	
6. SAHA ÇALIŞMALARI ve MATLAB UYGULAMALARI	63
6.1 Matlab Simulink ve PLC Haberleşme Testleri.....	63
6.1.1 Matlab Simulink ve PLC TCP/IP testi.....	63
6.1.2 Matlab simulink ve PLC OPC testi.....	66
6.2 4.Slab Fırını verilerinin Matlab Simulink ortamına aktarılması	70
6.3 4.Slab Fırını Simulink Modeli ve Kestirici Matlab-Simulink Uygulaması.....	73
6.4 ARMAX Modeli	73
6.5 NMPC Matlab-Simulink Uygulaması.....	74
7. SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMALAR.....	75
7.1 Kestirici Performanslarının Sonuçları	75
7.2 ARMAX Modeli ile Önerilen Modelin Karşılaştırılması	80

7.3 Slab Fırını Modelinin NMPC ile Kontrolü.....	88
7.4 Sonuçlar ve Tartışmalar.....	93
KAYNAKLAR.....	97
EKLER.....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	127



KISALTMALAR

ACC	: Otomatik Yanma Kontrolü (Automatic Combustion Control)
ANN	: Artificial Neural Network
ARMAX	: Extra Girişli Otoregresif Hareketli Ortalama
ARX	: Oto Regresif Extra Girişli (Auto Regressive with Extra input)
BISRA	: British Iron and Steel Research Association
BP	: Backpropagation
CFD	: Hesaplamalı Akış Dinamiği (Computational Flow Dynamics)
CPU	: Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit)
DMC	: Dinamik Matriks Kontrolör (Dynamic Matrix Controller)
DMPC	: Dağıtık Model Öngörülü Kontrol
DCS	: Dağıtılmış Kontrol Sistemi (Distributed Control Systems)
EKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter)
FNN	: İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları (Feedforward Neural Network)
FNND	: Fuzzy Neural Network Decoupling Controller
HFD	: Isı Akış Dağılımı (Heat Flow Distribution)
I&I	: Daldırma ve Değişmezlik (Immersion & Invariance)
MPC	: Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control)
NMPC	: Doğrusal olmayan Model Öngörülü Kontrol (Nonlinear Model Predictive Control)
OPC	: OLE Process Kontrol Objesi (OLE for Process Control)
PID	: Oransal Integral Türev (Proportional Integral Derivative)
PLC	: Programlanabilir Mantıksal Kontrolör (Programmable Logic Controller)
QP	: Quadratik Programlama
RNN	: Tekrarlayan Yapay Sinir Ağları (Recurrent Neural Network)
SQP	: Ardışık Quadratik Programlama (Sequential Quadratic Programming)



SEMBOLLER

λ	: Malzeme iletkenliği [W/(m.K)]
ϕ	: Isı akı oranı [W/m ²]
S	: Slab yüzey alanı [m ²]
T	: Sıcaklık [K]
J	: Joule [J]
kJ	: kiloJoule [kJ]
W	: Watt (güç) (birim zamandaki enerjiyi ifade eder)
K	: Kelvin
KC	: 273.15 (Santigrat derece Kelvin dönüşüm sabiti)
t	: Zaman
Q	: Enerji [W/s]
Q_s	: Slabın absorbe ettiği enerji
Q_L	: Toplam Enerji kayıpları
Q_{mloss}	: Ölçülebilen enerji kayıpları
Q_w	: Fırın duvarının absorbe ettiği enerji
q_L	: Birim yüzey alanı başına düşen enerji kaybı
Q_{wg}	: Kirli gazın enerjisi
T_{gi}	: i. bölge sıcaklığı [K]
F_f	: Bölge gaz akış miktarı [m ³ /h]
H_f	: Kok gazı enerji oranı [W/m ³]
R_i	: Bölge hava gaz oranı
ζ	: Kok gazı kalorifik değeri düzeltme katsayısı
c_{pa}	: Yakma havası spesifik ısı indeksi [W/(K.m ³)]
c_{fg}	: Kok gazı spesifik ısı indeksi [W/(K.m ³)]
c_{pg}	: Kirli gaz spesifik ısı indeksi [W/(K.m ³)]
Φ	: Kirli gaz akışı [m ³ /h]
N	: Bölgedeki slab sayısı
q_k	: Slab yüzeyinin ışımsal ısı akısı [W/m ²]
A	: Slabın yüzey alanı [m ²]

ε	: Emissivite katsayısı
σ	: Stefan-Boltzman katsayısı [W/(m ² .K ⁴)]
α	: Kirli gaz yayılım katsayısı, [0..1] aralığında serbest seçilebilir
N_u	: Kontrol ufku
N_p	: Öngörü ufku



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Önemli fırın parametreleri.....	46
Çizelge 3.2 : Fırın bilgileri.	46
Çizelge D.1 : İba PDA verilerinin Matlab workspace eklenmesi (fileimport.m.	111
Çizelge D.2 : 4.Slab Fırını modeli (function furnace_model_ayrik).....	113
Çizelge D.3 : 4.Slab Fırını parametreleri (function furnace_dataparams).....	115
Çizelge D.4 : 4.Slab Fırını kayıpları (function furnace_losses).	117
Çizelge D.5 : Bozucu kestiricisi (function disturbance_estimation_I_I).....	118
Çizelge D.6 : 4.Slab Fırını ARMAX modeli.	118
Çizelge D.7 : Model karşılaştırma çizim fonksiyon bloğu.	119
Çizelge D.8 : NMPC fonksiyon blokları	120
Çizelge D.9 : NMPC EOFmincon fonksiyon bloğu	121
Çizelge D.10 : NMPC Fur_ObjectiveFCNz12 fonksiyon bloğu	121
Çizelge D.11 : NMPC Fur_ConstraintFCNz12 fonksiyon bloğu.....	124



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 1.Sıcak Haddehane genel şeması.....	2
Şekil 1.2 : Sıcak slab ve soğuk rulo.....	2
Şekil 1.3 : 4.Slab Fırını şeması.....	3
Şekil 1.4 : 4.Slab Fırını genel görünüm operatör ekranı.....	4
Şekil 1.5 : Seviye1 ve Seviye Akış Şeması.....	6
Şekil 1.6 : (a) Seviye 1 PID kontrolör ve (b) I&I bozucu kestirimine sahip uyarlamalı MPC şeması.....	7
Şekil 2.1 : Online slab ölçümü (a) Test slabı (b) Termokupl yerleşimi.....	21
Şekil 2.2 : Optimum ısınma eğrisi ve ısıtma stratejisi.....	22
Şekil 2.3 : Fırın seviye 2 kontrol ekranları (a) Fırın boyunca slab sıcaklık grafiği. (b) Termal diyagram.....	23
Şekil 2.4 : Fırın cehennemlik bölgesi basamak referansına göre ısıtma bölgesinin ısı etkileşimi.....	27
Şekil 2.5 : 4.Slab Fırını bölge etkileşimli kontrol blok diyagramı.....	29
Şekil 3.1 : 4.Slab Fırını ısıtma kontrol ekranı.....	32
Şekil 3.2 : 4.Slab Fırını yürüyen taban hareketi.....	33
Şekil 3.3 : 4.Slab Fırını bölgeleri kirli gaz akış şeması.....	34
Şekil 3.4 : Bir bölgedeki enerji dengesi.....	35
Şekil 5.1 : Basit bir MPC.....	54
Şekil 5.2 : Doğrusal ve doğrusal olmayan kontrolör.....	55
Şekil 5.3 : (a) MPC basit blok şeması (b) MPC detay blok şeması.....	57
Şekil 5.4 : MPC'nin temel prensibini gösteren kaydırma stratejisi.....	58
Şekil 6.1 : Matlab Simulink notebook ve PLC haberleşme testleri.....	64
Şekil 6.2 : 4.Slab Fırını ısıtma kontrolü yedek PLC.....	65
Şekil 6.3 : Matlab simulink ve mühendislik bilgisayarı arasında TCP/IP testi.....	65
Şekil 6.4 : 4.Slab Fırını PLC simatic manager yazılımı.....	66
Şekil 6.5 : 4.Slab Fırını redundant ısıtma PLC sistemi.....	66
Şekil 6.6 : Matlab simulink OPC haberleşme modeli.....	67
Şekil 6.7 : Fırın IBA dataserver PC'ye KEPServerEX6 kurulumu.....	68
Şekil 6.8 : Matlab simulink notebook PC'de KEPServerEX6 konfigürasyonu.....	69
Şekil 6.9 : Matlab Simulink modelinin gerçek zamanlı OPC üzerinden haberleşmesi.....	69
Şekil 6.10 : Siemens S7400'de model verilerini almak için oluşturulan datablok....	70
Şekil 6.11 : (a) Siemens PCS7 datablok programlama (b) iba trend sistemi.....	72
Şekil 7.1 : θ_{di} bozucusunun kestirimi.....	76
Şekil 7.2 : θ_{di} bozucusunun kestirimi (a) $T=1sn$ (b) $T=0.1sn$	77
Şekil 7.3 : Gerçek slab fırını verileriyle θ_{di} bozucusunun kestirimi.....	78
Şekil 7.4 : Gerçek slab fırını x durumlarının grafiği.....	79
Şekil 7.5 : Gerçek slab fırını bozucularının durum vektörlerine oranı.....	79
Şekil 7.6 : 4.Slab Fırını önısıtma bölgesi (Bölge 1-4) için önerilen model ile ARMAX modelinin sıcaklık çıktıların karşılaştırması.....	82

Şekil 7.7 : 4.Slab Fırını ön ısıtma bölgesi için önerilen model ve ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının gerçek fırın sıcaklıkları ile hatalarının karşılaştırması	83
Şekil 7.8 : 4.Slab Fırını ısıtma bölgesi (Bölge 5-8) için önerilen model ile ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının karşılaştırması	84
Şekil 7.9 : 4.Slab Fırını ısıtma bölgesi için önerilen model ve ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının gerçek fırın sıcaklıkları ile hatalarının karşılaştırması	85
Şekil 7.10 : 4.Slab Fırını cehennemlik bölgesi (Bölge 9-12) için önerilen model ile ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının karşılaştırması	86
Şekil 7.11 : 4.Slab Fırını cehennemlik bölgesi için önerilen model ve ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının gerçek fırın sıcaklıkları ile hatalarının karşılaştırması.....	87
Şekil 7.12 : NMPC kontrolü altında θ_{di} bozucularının kestirimi	88
Şekil 7.13 : Uyarlamalı NMPC kontrol işareti	89
Şekil 7.14 : Uyarlamalı NMPC çıkış sinyali($y=T_{gi}$)	89
Şekil 7.15 : ζ parametresinin değişiminde bozucu kestirimi	90
Şekil 7.16 : Uyarlamalı NMPC kontrol işaretinin bozucu değişimine cevabı.....	91
Şekil 7.17 : Uyarlamalı NMPC çıkış sinyalinin bozucu değişiminden etkilenmemesi ($T_{ref_{gi}} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	91
Şekil 7.18 : Uyarlamalı olmayan NMPC kontrol işaretinin bozucu değişimine cevabı	92
Şekil 7.19 : Uyarlamalı olmayan NMPC çıkış sinyalinin bozucu değişiminden etkilenmesi ($T_{ref_{gi}} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$)	92
Şekil C.1 : Bozucu kestirimi için hazırlanan Matlab Simulink modeli.	106
Şekil C.2 : 4.Slab Fırını ARMAX modeli.	107
Şekil C.3 : 4.Slab Fırını doğrusal olmayan ayırık modeli.	108
Şekil C.4 : NMPC için hazırlanan Matlab Simulink Modeli.....	109

SLAB ISITMA FIRINLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNE YÖNELİK UYARLAMALI VE MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL

ÖZET

Günümüzde sanayi tesislerinde özellikle demir çelik endüstrisinde rekabet giderek daha fazla artmaktadır. Bu rekabet ortamı demir çelik endüstrilerinin üretim maliyetlerini her geçen sene daha aşağı çekmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle rekabetin çok çetin olduğu ve ürünlerin tedarik kaynağı alternatiflerinin çok çeşitli olduğu sanayilerde en küçük maliyet avantajları bile çok önemlidir. Büyük endüstri tesislerinde ve tezin uygulandığı alan olan demir çelik endüstrisinde en önemli maliyet kalemlerinin başında enerji tüketimleri gelmektedir. Birim ton başına düşen enerji maliyetlerindeki %1 tasarruf bile büyük üretim yapan demir çelik tesislerine çok ciddi maliyet düşürücü etkiler yapmakta ve benzer ürünleri üreten diğer demir çelik tesislerine nazaran maliyet avantajları sağlamaktadır. Entegre demir çelik fabrikaları hammaddeden nihai satılacak ürüne ve üretim için gereken yan kaynakların da üretildiği yardımcı tesislere kadar bütün üretim mekanizmalarına sahiptir. Entegre demir çelik tesisleri ana üretim tesisleri olarak yüksek fırınlar, demir ve çelik üretim, sürekli dökümler, sıcak haddehaneler ve soğuk haddehanelerden oluşmaktadır. Yüksek fırınlarda kok kömürü ile eritilen demir cevheri siparişe uygun kalitelerin üretilebilmesi için çelik üretim potalarında çeşitli alaşım elementlerinin ilave edilmesinden sonra sürekli döküm tesislerinde slablar haline getirilmektedir. Slablar slab ısıtma fırınlarında haddeleme sıcaklığına kadar yeniden ısıtıldıktan sonra sıcak haddehanelerde haddelenerek nihai sıcak rulo haline getirilmektedir. Üretilen sıcak rulolar sipariş durumuna göre ya direkt müşteriye veya soğuk haddeleme için soğuk haddehanelere transfer edilmektedir. Demir çelik tesislerinde demir cevherinin kömürle eritildiği yüksek fırınlardan sonra en fazla enerjinin tüketildiği alanların başında slab ısıtma fırınları gelmektedir. Slab ısıtma fırınlarında yakıt olarak genellikle doğalgaz, kok gazı veya bu iki gaz birlikte aynı fırının farklı bölgelerinde ihtiyaca göre kullanılabilir. Kok gazı demir çelik tesislerinin kok tesislerinde kömürün yüksek fırına şarj edilebilmesi için koklaştırılması sonucu ortaya çıkan kirli bir yan üründür. Kok gazının yoğunluğunun ve kalorifik değerinin kömürün cinsine göre sürekli değişmesinden ve çok kirli olmasından dolayı fırında yanma prosesi olumsuz etkilenebilmektedir. Bundan dolayı kaliteyi etkileyen ve slab yüzeyinde tufalleşmenin yoğun olduğu cehennemlik gibi ısıtma bölgelerinde doğalgaz kullanımı tercih edilmektedir. Fırına şarj edilen slabları ısıtmak enerji açısından oldukça maliyetli bir prosestir. Fırınlardaki ısıtma prosesinin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi saha ekipmanlarının problemsiz çalışmasına ve fırının yanma kontrolünün daha hassas hale getirilmesine bağlıdır. Sahadaki ölçüm cihazları ve valf gibi kontrol ekipmanlarının periyodik bakım planlamaları ve arızalı parçaların yedekleriyle değişimi gibi aksiyonlarla problemsiz çalışması sağlanabilmektedir. Bundan dolayı ısıtma prosesinde hassas ve etkili bir sıcaklık kontrolü çalışmalarına odaklanılmaktadır.

Tezin saha uygulamasında kullanılan slab fırını Türkiye'nin en büyük demir çelik fabrikasının sıcak rulo üretiminin yapıldığı sıcak haddehanelerin ihtiyacı olan slabları ısıtmak için kullanılmaktadır. Tesiste 1.Sıcak Haddehane, 2.Sıcak Haddehane ve Levha Haddehanesi olmak üzere 3 ana üretim hattı bulunmaktadır. Bunlardan Levha Haddehanesi Türkiye'nin ilk ve tek levha üreten tesisi olup savunma sanayi saclarının üretiminde önemli bir görev üstlenmektedir. Bunun yanı sıra rüzgar türbinleri, gemi sanayi, iş makineleri gibi çeşitli önemli endüstrilere de girdi olarak levha hammaddesini üretmektedir. Tezde modellenen ve MPC uygulamasının yapıldığı 4.Slab fırını olarak isimlendirilen slab ısıtma fırını hem Levha Haddehanesini hem de 1.Sıcak Haddehane tesislerini beslemektedir. Slablar fırına şarj olduktan sonra haddehanedeki haddeleme proseslerinin belirlediği 1160-1250°C sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Bu sıcaklık haddelenecek malzeme cinsi ve ebatlarına ve nihai ürünün özelliklerine göre hadde yükleri ve mekanik dayanımları baz alınarak haddeleme modelleri tarafından belirlenmekte ve Slab Isıtma Fırını Kontrol Sistemine referans olarak aktarılmaktadır. Slab ısıtma fırınları genel olarak önısıtma, ısıtma ve cehennemlik olarak isimlendirilen üç bölgeden oluşmaktadır. Bu ısıtma kontrolünün yapıldığı bölgelerin dışında fırının giriş kısmında ısınan havanın slablarla teması yoluyla konvektif ısı transferinin yapıldığı herhangi bir yakıcı ve kontrolün bulunmadığı reküperatif bölge bulunmaktadır. 4.slab ısıtma fırını 13 metre genişliğinde ve 30 metre uzunluğundadır. 220 ton/saat ısıtma kapasitesi bulunan fırında şarj edilebilen en büyük slab ebatları 12 metre boyunda 1.5 metre genişliğinde ve 300mm kalınlığındadır. Enerji sarfiyatı olarak 350Mcal/ton civarı harcanan 4.slab fırınında kok ve doğalgaz yakıt olarak kullanılmaktadır.

Slab fırınlarında proses otomasyonu Seviye1 ve Seviye2 olarak isimlendirilen iki seviyede ele alınmaktadır. Seviye1 otomasyonu, saha enstrümanlarından gelen verilerin işlendiği ve valf gibi kontrol ekipmanlarının geleneksel PID metotları kullanılarak sıcaklığa göre PLC vasıtasıyla kontrol edildiği ve SCADA üzerinden izlendiği kontrol katmanıdır. Seviye 2 olarak adlandırılan otomasyon katmanı ise, fırındaki malzemelerin izlendiği, slablara ve fırına ilişkin tüm verilerin tutulduğu veritabanının bulunduğu, slabların termal ısınma modelinin ve optimum ısınma eğrilerinin oluşturulduğu, buna bağlı ısı ihtiyaçlarının (heat demand) belirlenerek bulanık mantık (fuzzy logic) üzerinden sıcaklık referansı ve PID parametrelerinin oluşturularak Seviye 1 sistemine gönderildiği kontrol katmanıdır.

Tezin uygulamasının yapıldığı Seviye1 kontrol katmanında kullanılan geleneksel PID kontrolörü fırının dinamik değişimlerine ve fırındaki belirsiz parametre ve bozucu değişimlerine yeteri kadar adapte olamamaktadır. Her ne kadar Seviye2 kontrol katmanındaki bulanık mantık PID katsayılarını güncellese de, sıcaklık kontrolü için kullanılan PID kontrolörü fırının dinamik değişimleri karşısında etkili bir kontrol sağlayamamaktadır. Bu konuda literatürde geliştirilmiş çok farklı kontrol yaklaşımları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi ve endüstride de kullanımı giderek yaygınlaşan MPC olarak bilinen model öngörülü kontrol metodudur. MPC yaklaşımı dinamik değişiklikleri rahatlıkla ele alabilen, sistem kısıtlarını da içerebilen, doğrusal olmayan modellerde de çok etkili bir kontrol metodudur. Endüstri de giderek yaygınlaşmasından dolayı literatürde MPC yaklaşımının da çok farklı çeşitleri geliştirilmiştir. MPC metodu her iki seviyede de uygulanabilmektedir. MPC metodunun başarısı kontrol edilecek sistemin doğru modellenmesine bağlıdır. Slab fırınları doğrusal olmayan sistem dinamiklerine sahip, yüksek zaman gecikmeleri ve zaman sabitleri olan, ölçülemeyen bozucuların olduğu kompleks proseslerdir.

Dolayısıyla hassas ve etkili bir kontrol mekanizması oluşturabilmek için prosese uygun en doğru modeli elde etmek gerekmektedir.

Slab fırınları proses itibarıyla kompleks olması ve doğrusal olmayan modele sahip olmasının yanında bölgelerin birbiriyle güçlü ısı etkileşimlerinin olduğu, hesaplanabilen kayıpların yanında öngörülemeyen ısı kayıplarının da sıcaklık modellerini etkilediği ve bir çok parametrenin sistem üzerinde etkili olduğu karmaşık proseslerdir. Tezde 4.slab fırını, ısıtma prosesini etkileyen tüm parametre ve bozucuları da içerecek şekilde çok detaylı olarak modellenmiştir. Bölgeler arası sıcaklık etkileşimleri matematiksel olarak detaylı bir şekilde elde edilerek modelde yer verilmiştir. Slab fırını için tasarlanan ısıtma modelini etkileyen bozucular ölçülebilir ısı kayıpları ve öngörülemeyen ısı kayıpları olarak ikiye ayrılarak öngörülemeyen ısı kayıplarının kestirimi için bir uyarılama mekanizması tasarlanarak modele uyarlanmıştır. Uyarılama mekanizmasının tasarımında ise slab ısıtma fırınlarının modellemelerinde literatürde daha önce kullanılmayan daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımı kullanılmıştır. Modellenen sistemin kontrolünde uyarılmalı doğrusal olmayan model öngörülü kontrol (NMPC) yaklaşımı kullanılmıştır. NMPC metodu 4.Slab fırınının Seviye1 kontrol katmanında kullanılan sıcaklık PID kontrolörleri yerine tasarlanmıştır. 4.Slab fırını Seviye2 kontrol katmanında ele alınan slabların termal ısınma modelleri ve optimum ısınma eğrileri, termal ısı transfer hesaplama yöntemleriyle detaylı bir şekilde oluşturularak fırındaki en önemli parametrelerden olan gaz ve slab ısı emilim katsayıları ve form faktörü fırın kurulumu sırasında test slabı üzerindeki ölçüm doğrulamalarına göre hassas şekilde ayarlandığından istenilen şekilde çalışmaktadırlar. Fakat bu eğrilere göre oluşturulan referans değerlerin kontrolünü sağlayan Seviye 1 kontrol katmanındaki PID kontrolörleri fırındaki gazın kalorifik değerlerinin değişmesi ve öngörülemeyen kayıplar neticesinde hassas bir şekilde sağlanamamakta ve sıcaklık artış ve azalışların bağlı olarak verimli bir yanma elde edilememektedir. 4.Slab fırını için oluşturduğumuz modelde hem gazın kalorifik değerine hem de öngörülemeyen bozuculara detaylı yer verilmiştir. Gazın kalorifik değerindeki değişim öngörülemeyen bozucu kestiriminin uyarılama mekanizmasına yansiyarak buna bağlı sıcaklık değişimlerinin etkisi tasarlanan NMPC kontrolör tarafından giderilmektedir. Bu kontrol yaklaşımı ve öngörülemeyen ısı kayıplarının kestirimi ile daha verimli bir yanma sistemi kontrolü kurgulanması yapılarak modellenen sistemin dinamik kontrolü sayesinde enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmiştir. Raporda sunulan tezde, bilinmeyen parametre ve bozucuların bulunduğu slab ısıtma fırını için bir Uyarılmalı NMPC uygulamasının Seviye1 üzerinde gerçekleştirilmesi ve bundan elde edilen sonuçlar aktarılmıştır. Sonuçlar, detaylı bir şekilde grafikler üzerinde analiz edilerek tezin son bölümünde verilmiştir. Bölgeler arası etkileşime göre oluşturulan detaylı formüller, oluşturulan Matlab Simulink modelleri ve Matlab fonksiyon program blokları ise raporun ekler bölümüne ilave edilmiştir. Ayrıca, önerilen uyarılama mekanizmasını içeren doğrusal olmayan model yapısının doğruluğu, literatürde son 5 yılda uygulaması bulunan sistem tanıma yoluyla elde edilen ARMAX modelleri ile simülasyon ortamında karşılaştırılmış ve sonuçlar son bölümde sunulmuştur. Tezin başarılı bir şekilde bu slab fırınına uygulanması ve yeni kontrol kuramlarının kullanılması, tesislerin geleceğine ve teknolojik gelişimlerine önemli katkılar sağlayacaktır. Ayrıca demir çelik tesislerinin farklı alanlarına da uygulanması konusunda öncü rol oynayarak yeni araştırma olanaklarının da açılmasında cesaretlendirici bir adım olacaktır.



ADAPTIVE NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR ENERGY EFFICIENCY IN SLAB REHEATING FURNACES

SUMMARY

Today, competition in industrial facilities, especially in the iron and steel industry, is increasing more and more. This competition pushes the iron and steel industry companies for efficiency in the production and to reduce production costs year by year. Especially in industries where competition is fierce and the supply of products has a wide range, even the smallest cost advantages are also very important in industrial production. Energy consumption is one of the most important cost items in large industrial plants especially in the iron and steel industry, where this thesis is applied. Even a 1% saving in energy costs per unit ton has a significant cost-reducing effect on iron and steel plants producing large amount production and provides cost advantages compared to other iron and steel plants producing similar products. Integrated Iron and Steel Plants have all production mechanisms from raw materials to the final product to be sold and auxiliary facilities where side inputs needed for production are provided. Integrated iron and steel plants consist of blast furnaces, iron and steel production, continuous castings, hot rolling mills and cold rolling mills as main production facilities. Iron ore, which is melted with coke in blast furnaces, is transformed into slabs in continuous casting plants after the addition of various alloying elements in steel production ladles in order to produce qualities suitable for the order. Slabs are reheated up to rolling temperature in slab heating furnaces and then are rolled to be produced coils. The hot coils are transferred to the customer or to cold rolling mills for cold rolling depending on the orders. Slab reheating furnaces are one of the plants where the most energy is consumed after Blast Furnaces where iron ore is melted with coal in iron and steel plants. Due to the fact that, it is very important to improve the heating quality of the slabs and reduce the energy consumption as much as possible. In slab heating furnaces, natural gas, coke gas or these two gases together can be used as fuel in different parts of the same furnace according to the need. Coke gas is a very dirty waste product obtained as a result of coking coal in the coke plants of iron and steel plants in order to charge the coal to the blast furnace. Due to the fact that the density and calorific value of the coke gas constantly changes according to the type of coal and is dirty, combustion process in the furnace is negatively affected. Therefore, natural gas is preferred in zones that affect the quality and where scale formation is intense on the slab surface. Heating the slabs in the furnace is a very costly process in terms of energy. The efficiency of the combustion process in reheating furnaces depends on the precise control of temperature and smooth operation of the field instruments. Smooth operation of control instruments such as measuring equipments and valves in the field can be ensured by periodic maintenances of them and by replacing the failure parts with spare ones. So, we should focus on the control mechanism of the combustion process.

The slab reheating furnace modelled in the thesis is used in the the hot rolling mills which is producing hot coils in the Turkey's largest iron and steel plant. There are three

main production lines in the hot rolling mills plant: 1st Hot Rolling Mill, 2nd Hot Rolling Mill and Plate Rolling Mill. Of these, the plate rolling mill is Turkey's first and only plate producing facility and plays an important role in the production of defense industry plates. In addition, it also produces plates raw materials as input to various important industries such as wind turbines, ship industry, construction machinery. The slab heating furnace, named the 4th slab furnace, which is modeled in the thesis and where MPC is applied, feeds both the Plate Rolling Mill and the 1st Hot Rolling Mill. After the slabs are charged to the furnace, they are heated up to 1160-1250°C, which temperature is determined by the rolling processes in the hot rolling mill. This temperature is determined by the rolling models based on rolling loads and mechanical strengths according to the type and dimensions of the material to be rolled and the properties of the final product and is transferred to the Slab Heating Furnace Control System as a reference. Slab heating furnaces generally consist of three zones called pre-heating, heating and soaking zones. Except of those heating control zones, there is a recuperative zone at the entrance of the furnace where convective heat transfer is made by contacting the heated air with the slabs. In that recuperative zone, there is no burner and control. The 4th slab furnace is 13 meters wide and 30 meters long. The largest slab sizes that can be charged in the furnace with 220 tons/hour heating capacity are 12 meters long, 1.5 meters wide and 300mm thick. Coke and natural gas are used as fuel in that furnace, which consumes 350Mcal/ton as energy consumption.

Process automation in slab furnaces is handled at two levels called Level 1 and Level 2. Level 1 automation is the control layer where data from field instruments is processed and control equipments such as valves are controlled by PLC with traditional PID methods and monitored via SCADA. Level 2 automation is the control level where the materials in the furnace are monitored, the database is kept, the thermal heating model of the slabs and optimum heating curves are created, the related heat needs (heat demand) are determined, setpoints and parameters are created via fuzzy logic and sent to the Level 1 automation.

The conventional PID control used in the Level 1 automation, where the thesis is implemented, cannot adapt to the dynamic changes and uncertainties of the furnace. Although the fuzzy logic in the Level 2 control layer updates the PID coefficients, the PID controller used for temperature control cannot provide effective control against the dynamic changes of the furnace. Poor and ineffective temperature control will cause the slabs in the slab heating furnace not to be heated sufficiently or the heat distribution is not homogeneous. In addition, a poor temperature control will cause excessive energy consumption while heating the slabs. Heating quality of the slabs will be insufficient. There are many different control approaches developed in the literature on this subject. The most important of these, and the one that is increasingly being used in the industry, is the model predictive control method known as MPC in the literature. The MPC approach is a very effective control method that can easily handle dynamic changes, can include process constraints and is also very effective in non-linear models. Many different variants of the MPC approach have been developed in the literature due to its widespread use in the industry. MPC applications can be performed on Level 1 and Level 2 control layers. The success of the MPC approach depends on accurate modeling of the system to be controlled. Slab furnaces are complex processes with nonlinear dynamic behavior, large time delays and large time constants, uncertain parameters and disturbances which have negative effects on the

system. Therefore, accurate modeling is very important in order to create an effective control mechanism.

In addition to the complex nonlinear dynamic behaviour of furnace and having strong thermal interactions between furnace zones, also furnace heating processes are significantly affected by measurable and unmeasurable heat losses on temperature models, along with the influence of many parameters in the system. In thesis, the 4th slab heating furnace is modeled in detail, including all parameters and disturbances affecting it. The thermal interactions between zones have been mathematically detailed and included in the model.

The heating model designed for the slab furnace categorizes the disturbances affecting it into measurable and unmeasurable heat losses. An adaptation mechanism has been designed and integrated into the model to estimate the unmeasurable heat losses. For the design of the adaptation mechanism, the immersion and invariance (I&I) approach, which has not been previously used in the modeling of slab heating furnaces in the literature, was utilized. Adaptive nonlinear MPC (Model Predictive Control) approach was used in controlling the modeled system. The MPC method was designed to replace the temperature PID controllers used in the Level 1 control layer of the 4th slab furnace. In the Level 2 control layer of the 4th slab furnace, thermal heating models and optimal heating curves for the slabs were calculated in detail using thermal heat transfer calculations. Critical parameters such as gas and slab heat emissivity coefficients and the shape factor were precisely adjusted according to the measurement validations on the test slab during the furnace commissioning, ensuring desired control operation. However, the PID controllers in the Level 1 control layer, which manage the control of temperature setpoints generated by these curves, cannot maintain precisely due to changes in the calorific values of the gas in the furnace and unmeasurable heat losses, resulting in inefficient combustion control. In the model developed for the 4th slab furnace, both the calorific value of the gas and the unmeasurable disturbances as unmeasurable heat losses are detailed. The changes in the calorific value of the gas reflect on the adaptative mechanism of the unmeasurable disturbance estimation, and the effects of these temperature changes of the zones are mitigated by the designed MPC controller. This control approach and the estimation of unmeasurable heat losses aim to achieve dynamic control of the modeled system, ensuring a more efficient combustion system control and thus providing energy savings.

In the thesis presented in the report, the implementation of an Adaptive MPC application on Level 1 control level for a slab heating furnace with unknown parameters and disturbances are described, and the obtained results are conveyed. The results are analyzed in detail with graphs provided in the final section of the thesis. Detailed formulas obtained for the zones heating transfer interactions, Matlab Simulink models, and Matlab function blocks are included in the appendix of the report. Successful application of this thesis to the slab furnaces and the use of new control theories will significantly contribute to the future and technological development of the facilities. Additionally, it will serve as a pioneering step in applying this approach to different areas of iron and steel facilities, encouraging new research opportunities.



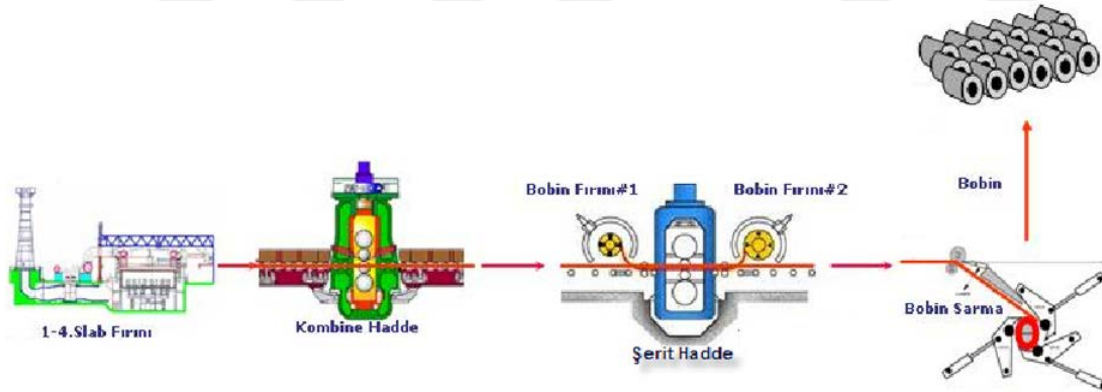
1. GİRİŞ

Günümüzde yeni teknolojik gelişmelerin hızla artması ve endüstriye uygulama metotlarının geliştirilerek yaygınlaştırılması; verimliliği ve ürün çıktılarının kalitelerini artırırken maliyetleri düşürmek isteyen endüstriyel üretim yapan firmalara büyük fırsatlar yaratmaktadır. Yapay zeka, bulut teknolojileri, büyük veri işleme ve makine öğrenmesi tabanlı yazılımların yaygınlaşması firmaların üretim hatlarını takip edebilmelerine imkan sağlamaktadır. Bu dijital dönüşümü yapan tesisler verimsiz çalışan hatlarını daha iyi kontrol edebilmekte ve ekipman hasarlanmadan planlı bakımlarını organize ederek plansız duruşların yaratacağı maliyetlerin önüne geçmektedir. Bu takip sisteminin başarılı olabilmesi içinde tesisleri ve içindeki ekipmanları yöneten ve süren kontrol sistemlerinin ekipmana ve kontrol ettiği sisteme uygun dizayn edilmesi ve yeni kontrol sistemlerinin mevcut sisteme uyarlanarak en iyi kontrol yaklaşımını dizayn etmek gerekmektedir. Yapay sinir ağları, bulanık mantık, model öngörülü kontrol yaklaşımları bu alanda en yaygın olarak kullanılan metotlardır. Bu ileri gelişmiş kontrol metotları klasik PID kontrolörler yerine kullanılabildiği gibi, bu metotları kullanarak prosesin veya proses ekipmanlarının PID katsayılarını belirlenmesi ve saha şartlarına göre güncellemesini de yapılabilmektedir.

Son dönemde endüstrilerde model öngörülü kontrol uygulamaları da giderek yaygınlaşmaktadır. Model öngörülü kontrol uygulamasının başarısı prosesin veya ekipmanın modelinin doğru bir şekilde elde edilmesine veya oluşturulmasına bağlıdır. Eğer kontrol edeceğimiz prosesin matematik modelini biliyorsak veya doğru modeli elde edebiliyorsak bu ileri kontrol tekniklerinden model öngörülü kontrol metodu sahaya uygulama açısından endüstriye en uygun metot olacaktır. Model öngörülü kontrol teknikleri de bilimsel açıdan araştırmalarla ele alınmakta ve birbirine karşı değişik avantaj veya dezavantajları olan yeni teknikler geliştirilmektedir. Bizim tezde kullandığımız uyarlamalı model öngörülü kontrol yaklaşımında da prosesi etkileyen parametre veya bozucuların kestiriminin yapılarak prosesin daha doğru bir şekilde kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Çok çeşitli kestirim teknikleri bulunmakla beraber

bu tezde daha önce bu alana uygulanmamış bir metot olan daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımı kullanılmıştır.

Tezin saha uygulamasında kullanılan 4. Slab Fırını Türkiye'nin en büyük demir çelik fabrikasının sıcak rulo üretiminin yapıldığı Şekil 1.1'de genel gösterimi verilen 1.Sıcak Haddehanenin ihtiyacı olan slabları ısıtmak için kullanılmaktadır. Isıtılan slablar kombine ve şerit haddede haddelendikten sonra bobin sarma da sarılarak sıcak rulo haline getirildikten sonra sipariş durumuna göre soğuk haddelemeye veya direkt müşteriye gönderilmektedir (Şekil 1.2). 1.Sıcak Haddehanenin haricinde zorunlu durumlarda Levha Haddehanesini de beslemektedir. Levha Haddehanesi Türkiye'nin ilk ve tek levha üreten tesisi olup savunma sanayi saclarının üretimde önemli bir görev üstlenmektedir. Bunun yanısıra rüzgar türbinleri, gemi sanayi, iş makineleri gibi çeşitli önemli endüstrilere levha hammaddesini üretmektedir. Slablar fırına şarj olduktan sonra haddehanedeki haddeleme proseslerinin belirlediği 1160-1250 °C sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Bu sıcaklık haddelenecek malzeme cinsi ve ebatlarına ve nihai ürünün özelliklerine göre hadde yükleri ve mekanik dayanımları baz alınarak haddeleme modelleri tarafından belirlenmekte ve Slab Isıtma Fırını Kontrol Sistemine referans olarak aktarılmaktadır.

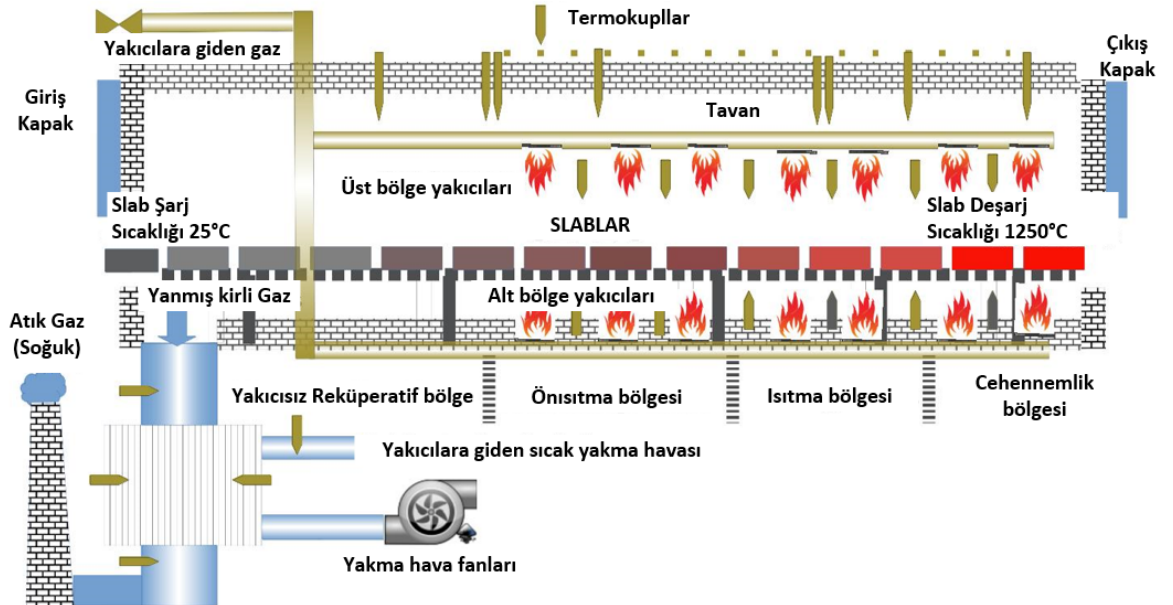


Şekil 1.1 : 1.Sıcak Haddehane genel şeması.



Şekil 1.2 : Sıcak slab ve soğuk rulo.

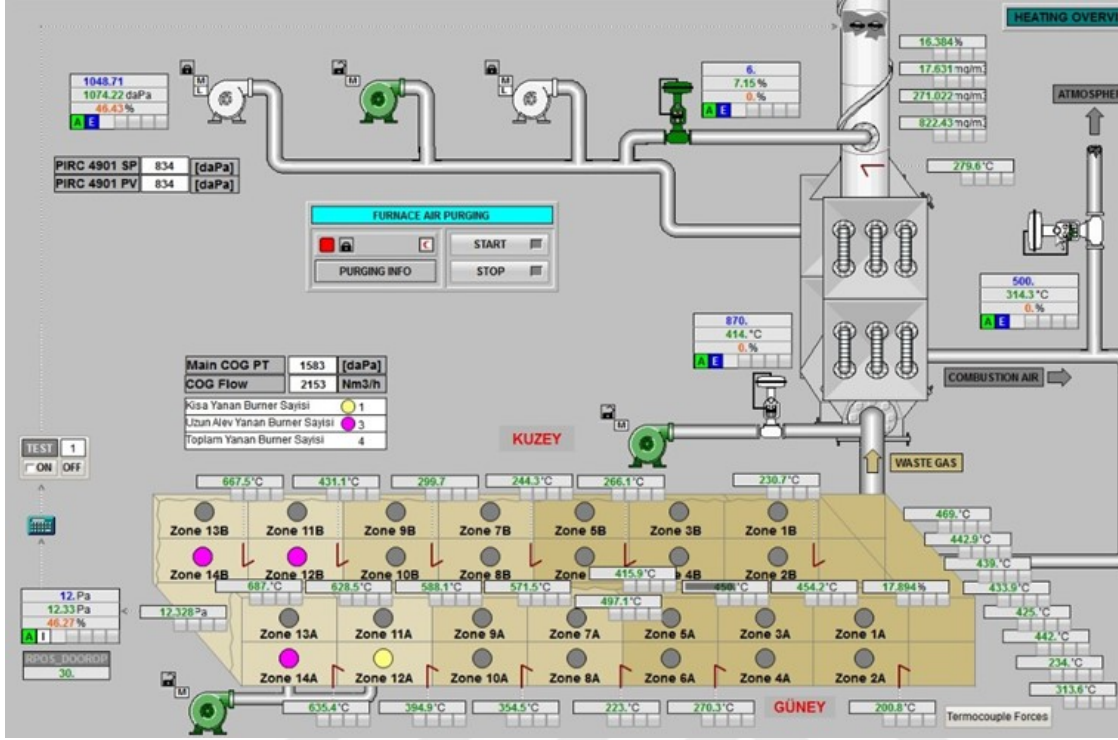
Şekil 1.3’de görüldüğü gibi slab ısıtma fırınları genel olarak önısıtma (preheating), ısıtma (heating) ve cehennemlik (soaking) olarak isimlendirilen üç ana bölgeden oluşmaktadır. Bu ısıtma kontrolünün yapıldığı bölgelerin dışında fırının giriş kısmında ısınan havanın slablarla teması yoluyla konvektif ısı transferi yapılan herhangi bir yakıcı ve kontrolün bulunmadığı reküperatif bölge bulunmaktadır. Reküperatif bölgeden çıkış yapan kirli gaz sıcaklığı 850°C civarındadır. Bu sıcak yanmış kirli gaz baca yolundaki reküperatörler vasıtasıyla fırının yakma havasını 450°C’ye kadar ısıtarak fırına sıcak yakma hava girmesini sağlamaktadır. Fırına soğuk yakma havası girmesi yakıcılar ile fırını ısıtırken aynı zamanda soğuk havadan dolayı fırının bir yandan da soğumasına sebep olacaktır. Bu da ısıtmak için harcanacak enerji miktarını artıracaktır. Slab fırınlarında prosesinde hem fırının reküperatör bölgesinde hem de baca yolundaki reküperatörlerde konveksiyon ve iletim yoluyla ısı transferleri yapılarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. 4.Slab Fırını 13 metre genişliğinde ve 30 metre uzunluğundadır. Fırında reküperatif bölge 13.8, önısıtma 5.38, ısıtma 4.83 ve cehennemlik bölgesi 5.36 metredir. 220 ton/saat slab ısıtma kapasitesi bulunan fırında şarj edilebilen en büyük slab ebatları 12 metre boyunda 1.5 metre genişliğinde ve 300mm kalınlığındadır. Enerji sarfiyatı 350Mcal/ton civarında bulunan 4. Slab Fırınında yakıt olarak kok ve doğalgaz kullanılmaktadır.



Şekil 1.3 : 4.Slab Fırını şeması.

Şekil 1.4’de 4. Slab Fırının genel görünümüne ait bir operatör ekranı gösterilmektedir. Fırın yakıcılarının anlık durumları, bölge sıcaklıkları, fırın basıncı, fırında kullanılan

akışkanların basınç ve akış değerleri ve fırın enstrümanlarının çalışıp çalışmadığı operatörler tarafından bu ekranlardan takip edilmektedir.



Şekil 1.4 : 4.Slab Fırını genel görünüm operatör ekranı.

1.1 Tezin Amacı

Tezin gerçekleşmesi ile endüstride az sayıda uygulaması bulunan fakat akademik çalışmalara bağlı olarak giderek yaygınlaşan ve geniş yer tutan Model Öngörülü Kontrol yöntemlerinin kullanılması ile daha verimli bir endüstriyel sistem kontrolünün sağlanması hedeflenmektedir. Verimliliği esas alan büyük endüstri tesisleri için bu konu büyük önem arz etmektedir. Özellikle rekabetin çok çetin olduğu ve ürünlerin tedarikinin geniş bir yelpazede bulunduğu sanayilerde en küçük maliyet avantajları bile endüstriyel üretimlerde çok önemlidir. Büyük endüstri tesislerinde ve projenin uygulanacağı alan olan demir çelik endüstrisinde en önemli maliyet kalemlerinin başında enerji tüketimleri gelmektedir. Birim ton başına düşen enerji maliyetlerindeki %1 tasarruf bile büyük üretim yapan demir çelik tesislerine çok ciddi maliyet düşürücü etkiler yapmakta ve benzer ürünleri üreten diğer demir çelik tesislerine nazaran maliyet avantajları sağlamaktadır. Demir çelik tesislerinde en fazla enerjinin tüketildiği alanların başında slab ısıtma fırınları gelmektedir. Tezin başarılı bir şekilde bu slab fırınlarına uygulanması ve yeni kontrol kuramlarının kullanılması, tesislerin geleceğine ve teknolojik gelişimlerine önemli katkılar sağlayacaktır. Ayrıca demir

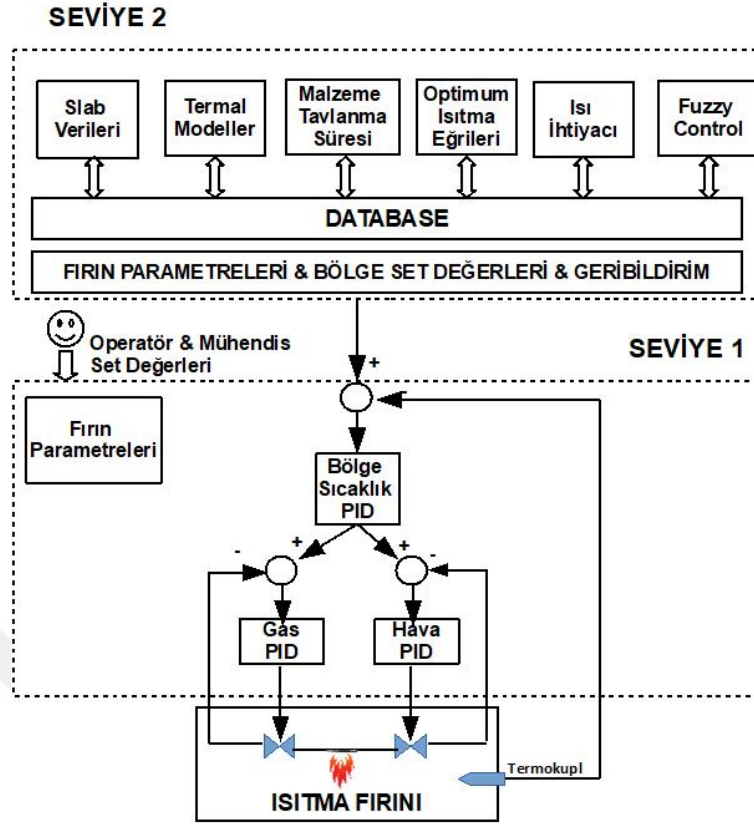
elik tesislerinin farklı alanlarına da uygulanması konusunda nc rol oynayacak ve araştırma çalışmaları için yeni kapıların açılmasında cesaretlendirici bir adım olacaktır.

Bu tez çalışması ile Türkiye'nin en önemli ve en büyük demir elik fabrikasının 1.Sıcak ve Levha Haddehaneleri tesislerini besleyen 4. Slab Fırını olarak adlandırılan slab ısıtma fırınının detaylı bir dinamik modelinin ölçülemeyen bozucularda göz önünde bulundurularak oluşturulması ve ölçülemeyen bozucuların kestiriminde kapsayacak şekilde fırının kontrol sistemine MPC (Model ngrl Kontrol) kuramının getirdiği yeni metod ve yaklaşımlarının uygulanması ile dinamik bir kontrol sağlanarak daha verimli bir yanma sistemi kontrolünün kurgulanmasıyla enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır. Burada elde edilen model slab fırınına özgü parametre değişimleri ve bölge sayıları değiştirilerek diğer slab ısıtma fırınlarına da uygulanabilecektir.

Günümüz slab fırınlarında seviye 1 ve seviye 2 olmak üzere iki kontrol seviyesi bulunmaktadır. Seviye 1 kontrol katmanı, fırının yakıcı (burner) hava, gaz valflerinin, saha enstrümanlarının ve proseste kullanılan akışkanların akış ve basınç kontrolünün yapıldığı ve SCADA üzerinden izlendiği PLC-DCS kontrol katmanıdır (şekil 1.4). 4.Slab Fırınının Seviye 1 kontrol katmanında Siemens PCS7 kontrol sistemi kullanılmaktadır.

Seviye 2 olarak adlandırılan kontrol katmanı ise fırındaki malzemelerin izlendiği, slablara ve fırına ilişkin tüm verilere ait veritabanlarının tutulduğu, slabların termal ısınma modelinin ve optimum ısınma eğrilerinin oluşturulduğu, buna bağlı ısı ihtiyaçlarının (heat demand) belirlenerek bulanık mantık (fuzzy logic) gibi st seviye bir kontrol tekniği kullanılarak referansların ve değişken parametrelerin üretilerek Seviye 1 kontrol katmanına gönderildiği kontrol seviyesidir.

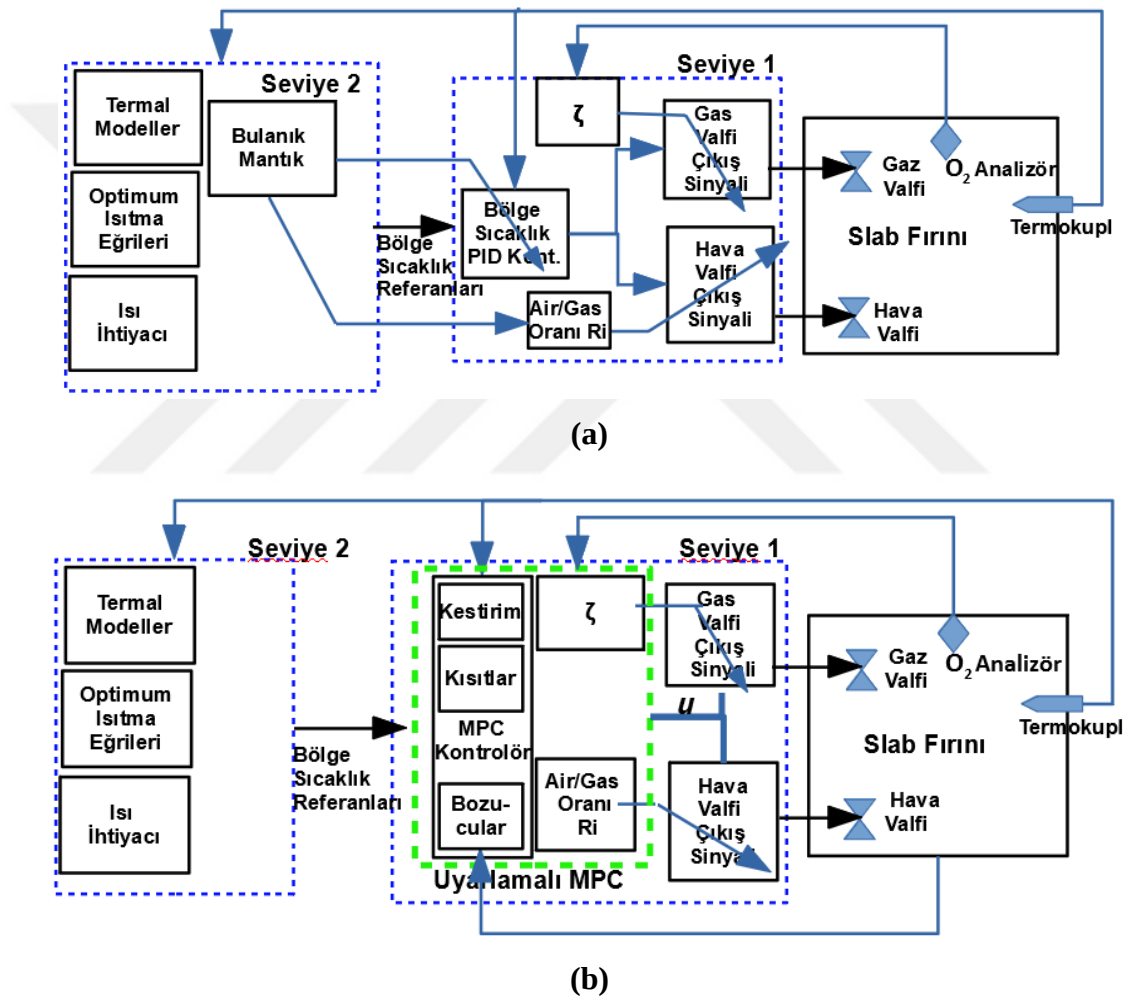
Haddeleme modelinden gelen slab bilgileri ve nihai deşarj sıcaklığı slab ısıtma fırını modeline aktarılarak optimum fırında kalış süresi hesaplanmakta ve her bölgenin referans set değerleri bu ısıtma süresi ve optimum enerji sarfiyatına göre Seviye 2 modeli üzerinden üretilerek Seviye1 (PLC-DCS) kontrol sistemine aktarılmaktadır (şekil 1.5).



Şekil 1.5 : Seviye1 ve Seviye Akış Şeması.

MPC uygulamaları bu iki kontrol seviyesi üzerinde de uygulanabilmektedir (Zhang ve diğ. 2014). Seviye 2 MPC’de matematiksel ısıtım ısı transfer modellerinin ve öngörülen bölgedeki ısı yayılma dengesinin efektif çalışmadığı varsayım ve temeline dayanan bir kontrol mekanizması tasarlanmaktadır. Bunun sebebi olarak ısı dengesindeki fırın kapaklarının açılıp kapanması ve fırın skidlerindeki kayıplar, fazla havanın varlığı, yakılan gazın özelliği ve slabların birbirine ısı transferi gibi steady-state modellerin hesaba katmadığı varsayımlar gösterilmektedir. Seviye 1 MPC’de ise PID kontrolör yerine model öngörülü kontrolör tasarlanmaktadır (Nguyen ve diğ. 2014). Tezin kapsamında, bilinmeyen parametrelerin ve ısıtma prosesin bozan bozucuların bulunduğu 4. Slab Isıtma Fırını için bir Uyarlamalı MPC uygulamasının Seviye1 üzerinde gerçekleşmesi yapılmıştır. Tezde tasarlanan MPC’nin diğer Seviye1’de tasarlanan MPC’lerden en büyük farkı uyarlama mekanizmasına sahip olmasıdır. Mevcut fırında çalışan slabların sıcaklıkları, fırın duvarları ve fırın içindeki kayıpların hesaplandığı termal modellerin parametreleri fırın kurulumunda detaylıca hesaplamalar ve hassas ayarlar ile oluşturulmuştur. Slab sıcaklıklarının hesaplanarak bölge sıcaklık setlerinin oluşturulduğu optimum ısıtma eğrileri de Şekil 2.1’deki gibi slablara bağlanan termokupllar ile ölçülerek hassas şekilde oluşturulmuşlardır ve

uzunca süre kararlı bir şekilde çalışmaktadırlar. Bu yüzden daha kaba bir kontrolöre sahip olan Seviye-1'deki bölge sıcaklık PID'leri ve bunların katsayılarını dinamik olarak değiştiren Seviye-2 Bulanık Mantık yerine uyarlamalı MPC tasarımı yapılmıştır (Şekil 1.6). Burada fırının sıcaklık PID'lerini en çok etkileyen unsur fırındaki bilinmeyen parametreler ve bozucuların varlığıdır. Bunun üstesinden gelmek için bilinmeyen parametrelerin etkisini de içerek şekilde bozucuların kestiriminin yapılarak kontrol mekanizması içine dahil edilmesidir. Uyarlama mekanizmasının tasarımında ise daha önce bu alana uygulanmamış bir metot olan daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımı kullanılmıştır.



Şekil 1.6 : (a) Seviye 1 PID kontrolör ve (b) I&I bozucu kestirimine sahip uyarlamalı MPC şeması.

1.2 Literatür Araştırması

Demir çelik endüstrisinde slab ısıtma fırınlarında ısıtma verimini artırarak enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalar her zaman ilgi gören konular olmuştur. Son

30 yıldır da bu çalışmalar yeni perspektif ve kontrol teknikleri yaklaşımları ile ele alınmaktadır. İlk temel çalışmalar Ning Baolin ve diğ. (1989) tarafından yapılmıştır. 2000’li yılların başlarına kadar da bu alanda herhangi bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Slab fırını kontrolü ve modelleri için temel olacak çalışmalar 2000’li yıllarda başlamıştır. Hans-Joachim Wick ve Friedhelm Köster (1999) fırının sıcaklık kontrolünün belki de en temelde olması gereken slabın fırın içindeki sıcaklığını fırın boyunca öngörebilecek bir filtre tasarlamışlardır. Slabın ısı transfer termodinamik denkleminde yola çıkarak slab sıcaklık transfer modeli oluşturmuşlar ve bu model üzerinden slabın fırın boyunca sıcaklığını kestirecek bir Kalman Filtre tasarlamışlardır. Model Öngörülü Kontrol Sistemlerindeki yeni araştırmaların ve yeni tekniklerin ön plana çıkması ile Hyun Suk Ko ve diğ. (2000) enerji dengelenmesinin temelinde bir dinamik model çıkartarak bölge sıcaklıklarının kontrolü ile slab ve duvarların sıcaklık dağılımları için basit bir matematiksel model elde etmişlerdir. Sistem tanımlama ile doğrusal bir ayrık zaman kontrolör tasarlayarak gerçek verilerle simüle edilmiş bir kontrol sistemi oluşturulmuştur. Zhang ve arkadaşları çalışmalarında yanma bölgeleri için slabı deşarj sıcaklığına ulaştıracak sıcaklık setlerini üreten Otomatik Yanma Kontrol (ACC) modeli oluşturmuşlar ve bu modelle çalışacak fırının dinamik modeli ve gaz-hava akışlarını ACC’den gelen referanslara göre kontrol edecek dağıtık kontrol sistem modeli geliştirmişlerdir. Fırının dinamik modelini de bölge enerji dengesine (zone energy balance) göre oluşturmuşlardır. Bölge sıcaklıklarını kontrol eden PID kontrolörü yerine bir MPC metodu olan dinamik matriks kontrolörü (DMC) tasarlamışlardır. Bu dinamik matriks kontrolörü 6 giriş-6 çıkışlı tasarlandığından en önemli avantajı bölgelerin birbiriyle güçlü bir şekilde korelasyona yani ilişkiye sahip olmasından dolayı bölgelerdeki sıcaklık geçişlerini gözönünde bulunduran bir yapıda olmasıdır (Zhang ve diğ. 2002). Slab fırınları doğrusal olmayan, zamanla değişen, birbiriyle güçlü korelasyona sahip olan bölgeleri ve alt prosesleri olan, değişken parametrelere ve bozuculara sahip endüstriyel proseslerdir (Zhang ve diğ. 2014). Balbis ve diğ. (2008) çalışmasında doğrusal olmayan bir fırın modeli tasarlamış ve ardışıl iki optimizasyon uygulayacak bir sistem geliştirmiştir. Sabit durum operasyon koşulları için statik optimizasyon ile maksimum üretim hedeflerini oluşturmuş ve buna ardışıl minimum yakıt hedefi için quadratik programlama uygulayabileceği doğrusal olmayan modeli yaklaşık doğrusal model haline getirerek hedefe hızlı bir şekilde ulaştıracak gaz akış hedeflerini elde edecek dinamik optimizasyon uygulamıştır. Ditzhuijzen ve diğ. (2002) çalışmalarında slabın

ısıtma eğrileri üzerinde bir çalışma gerçekleştirmiş ve optimum ısıtma eğrisi hedefini yakalayacak bir kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında tek boyutlu diferansiyel denklemlerle slabın dinamik ısı transfer denklemi üzerinden ARX modelini oluşturmuşlar ve simülasyonlarında kullanmak üzere yine ARX modeli baz alan fırın ısınma modeli ile bir kontrol sistemi tasarlayarak gerçek verilerle karşılaştırma yapmışlardır.

Fırın kontrolündeki gelişmelere paralel olarak fırın kontrol sistemleri iki seviyede ele alınmıştır. Seviye-1 olarak adlandırılan kontrol seviyesi, gaz-hava akışları ve sahadaki valf, damper vb. gibi kontrol ekipmanlarının 100 ms'ler civarında hızlı bir şekilde kontrolünün yapıldığı ve ölçme ekipmanlarından verilerin alındığı DCS veya PLC olarak adlandırılan kontrol katmanıdır. Seviye-2 olarak isimlendirilen kontrol seviyesi ise kompleks, doğrusal ve doğrusal olmayan fırın ısıtma ve slab tavlama termodinamik modellerin oluşturulduğu, model ve slab verilerin depolandığı ve model çıktılarının Seviye-1 kontrol katmanına referans olarak gönderildiği kontrol katmanıdır. Sıcak haddehanelerde kullanılan slab ısıtma fırınları için Seviye-1 ve Seviye-2 kontrol katmanları için oluşturulan tüm kontrol modelleri Zhang ve diğ. (2014) çalışmalarında özetlenmiştir. Nguyen ve diğ. (2014) her iki seviyede de MPC kontrolörleri tasarlamışlardır. Bu çalışmalarında, model öngörülü kontrolörde kullanılmak üzere bölgeler arası sıcaklık etkileşiminin de modele dahil edildiği sistem tanılama yoluyla elde ettikleri birinci dereceden transfer fonksiyonlarından oluşturdukları pratik bir model geliştirmişlerdir. Zanolli ve Pepe (2017), yürüyen tabanlı slab fırınları kontrol optimizasyonuna yönelik olarak iki katmanlı doğrusal bir model tasarlamışlardır. Bu çalışmada fırının yapısına ve çalışma şartlarına göre giriş ve çıkışlar belirlenerek sistem tanılama yardımıyla doğrusal dinamik bir model oluşturulmaktadır. Salcoda-Hernandez ve diğ. (2020) ARMAX (extra girişli otoregresif hareketli ortalama) modeli kullanarak sistem tanılama metoduyla ısıtma bölgesi için matematiksel model oluşturmuştur. Bu önerilen modeller slab ısıtma fırınlarının doğrusal olmayan dinamik davranışlarını ve istenmeyen ısı kayıplarını içermemekte, fırın ısıtma prosesinin yüksek zaman gecikmelerini ve bölgeler arasındaki ısı geçişlerini tam yansıtmamaktadırlar. Bununla birlikte yaklaşık bir doğrusal model olarak elde edilen bu fırın modelleri, fırınların doğrusal olmayan davranışlarından dolayı yeteri kadar hassas sıcaklık kontrol performansı gösteremese de hesaplama yoğunluğu ve karmaşıklığından kaçınmak için araştırmacılar tarafından

sıklıkla tercih edilmektedirler. Ayrıca, online ve uyarlamalı sistem tanılama içermemesinden dolayı da sistem dinamiklerinin ve ısı kayıplarının değişmesine karşı modellerin doğrulukları da önemli ölçüde kötüleşmektedir.

Büyük ölçekte slab fırınları için fırın içindeki kütle akış profiline göre oluşturulan doğrusal olmayan bir model Hu ve diğ. (2016) tarafından önerildi. Doğrusal olmayan model öngörü kontrol uygulamaları için, Steinboeck ve diğ. (2013) tarafından fırının operasyon koşullarından dolayı kararlı olmayan durumları öngören doğrusal olmayan bir model tasarlanmıştır. Nguyen ve diğ. (2014) direkt ısı enerji denklemleri kullanarak harcanan ve giren enerjilerin optimizasyonu yaparak entalpi üzerinden dinamik nümerik bir model geliştirmişlerdir. Söz edilen model, sistemi doğrusal olmayan denklem karmaşından kurtararak direkt enerji cinsinden modelin tanımlanmasını sağlamaktadır. Genel olarak, doğrusal olmayan fırın modellerinde en çok kullanılan metot bölgeye giren ve çıkan enerjilerin korunumu prensibine dayalı bölge enerji balans denklemlerinden elde edilen doğrusal olmayan fırın modelidir. Bu bölge enerji dengesine dayalı kullanışlı ve detaylı bir model Zhang ve diğ. (2002) tarafından oluşturulmuştur. Casal ve diğ. (2015) tarafından yürüyen tabanlı fırınlar ve Landfahrer ve diğ. (2019) tarafından da döner tip fırınlar için hesaplamalı ısı akış dinamiği (CFD) hesaplamaları kullanılarak nümerik çözüm tabanlı daha karmaşık ve kompleks doğrusal olmayan modellerde önerilmiştir. Bu modeller yüksek hesaplama yoğunluğu gerektirdiğinden PLC veya DCS'lerin çalıştırıldığı gerçek zamanlı uygulamalar için uygun değildirler. Bu problemin üstesinden gelmek için yürüyen tabanlı fırın için 3D bölge modeli için nümerik yaklaşımın kullanıldığı bir model Svantner ve diğ. (2020) tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde fırın ısıma yoluyla ısı transferini baz alan ışıyım görüntü faktörleri ile tanımlanan izotermal alt bölgelere ayrılmıştır. Bu faktörler her bölge için nümerik integrasyon ile hesaplanmaktadır. Yani ısı bölgeleri çok küçük alt parçalara ayrılarak bu parçaların ısı transferlerinin toplamı cinsinden ifade edilmektedir. Bu varsayım ile CFD tabanlı modellerde hesaplama karmaşıklığı yaratan denklemlerin alt bölgelerdeki daha az sayıda denklem çözümlemelerine indirgenerek hesaplama yoğunluğunun azaltılması hedeflenmiştir. Yukarıdaki bahsedilen doğrusal olmayan modellerin hiçbirisinde sistem tanılama yapılmamıştır. Dolayısıyla endüstride çalışan fırınları yansıtmaktan ziyade teorik çalışmalar olarak kalmaktadırlar. Bunun üstesinden gelmek için Hu ve diğ. (2018) tarafından CFD ve bölge ısı dengesi yaklaşımlarının her ikisinin avantajlarını kullanan

hibrit bir model önerilmiştir. Bu konuda en optimum ve doğru modeli elde etmek için detaylı araştırmalar devam etmektedir.

Model öngörülü kontrol sistemleri, proses kısıtlarını gözönüne alan, çoklu değişkenlere uygulanabilen ve yumuşak ve katı kısıtlar ve bozucular altında kontrol problemlerini optimizasyon problemlerine çevirerek çözebilme yeteneğine sahip olan ileri kontrol metodlarıdır (Scattolini, 2009). Fırın proseslerinde maksimum hava-gaz akış miktarı ve hava-gaz oranları, refrakter duvar ve tavanlarının maksimum sıcaklık dayanımları, sıcaklıktaki maksimum değişim hızı, maksimum slab çıkış sıcaklığı (1250°C) ve kabul edilebilir maksimum slab deşarj sıcaklık hata payı (20°C) gibi bazı kısıtlar bulunmaktadır.

Nguyen ve diğ. (2014) yürüyen tabanlı slab tavlama fırının nümerik modelini baz alan doğrusal olmayan bir model öngörülü kontrol sistemi tasarlamışlardır. Dinamik optimizasyon problemi halinde getirdikleri kontrolör tasarımında slabın homojenliği, tüketilen enerji, slabın optimum eğrisinin doğru bir şekilde takibini ölçüt fonksiyonu olarak formüle ederek, maksimum bölge sıcaklık, hedef çıkış sıcaklık ve homojenitedeki kısıtları içine alan bir kontrol problemi haline getirmişlerdir. Çalışmalarında nümerik bir model inşa ettikleri için Nelder-Mead Simplex gibi nümerik optimizasyon algoritmaları kullanmışlardır. Buradaki kontrol problemi slabın ve fırının dinamik modelinin çıktılarını baz aldığından MPC uygulamasını Seviye-2 kontrol katmanı üzerinde gerçekleştirmişlerdir (Nguyen ve diğ., 2014). Seviye-1 kontrol katmanında kullanılan PID'ler çok uzun zamandır uygulanan ve bilinen en yaygın kullanılan kontrolörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Nguyen ve diğ. (2014) farklı bir çalışmalarında Seviye-1 kontrol katmanında kullanılan PID'lerin yerine tasarladıkları DMPC olarak adlandırdıkları Dağıtık Model Öngörülü Kontrolör koyarak sıcaklık referansının takip performansının artırılması ve böylece enerji tasarrufu elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle fırın bölgelerinin birbirleri ile olan etkileşimlerini de gözönüne alan bir matematiksel bir model oluşturulmuştur.

Seviye-2 kontrol katmanı üzerindeki matematiksel modeller, slab verileri, hat duruşları, slab planlama gibi amaçlar düşünüldüğünde sadece modelleme değil planlama üzerinde de optimizasyon yapılan çalışmalarda bulunmaktadır (Steinboeck ve diğ., 2011 ve Broughton ve diğ., 2007).

Bölgelerin ve fırındaki ısı dengesinin dinamik modellerinin elde edildiği çalışmalara da özellikle Broughton ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmalarda rastlanılmaktadır. İki yüzeyden ışıma yoluyla transfer edilen enerjinin slab tarafından absorbe edilen matematiksel modellerdeki bilinmeyen parametreler sistem tanılama ile elde edilmektedir (Tan ve diğ. 2013, Liao ve diğ. 2009).

Slab fırını içindeki slabların sıcaklığının ısı transfer modelleri kullanılarak optimum ısı eğrisine göre kestirim metodu ile bulunduğu ve fırın boyunca yanma bölgelerine verilecek sıcaklık referanslarını belirlemede kullanılmaktadır. Bu konuda da literatürde optimum eğriye ulaştıracak çalışmalarda bulunmaktadır (Ditzhuijzen ve diğ. 2002 ve Nguyen ve diğ., 2014).

Bulanık mantık ve yapay sinir ağları tabanlı fırın kontrol uygulamalarına da çalışmalarda çok sık rastlanmaktadır. Kontrol edilen prosesin gelecekteki durumlarına ilişkin öngörülen ve istenen çıkışları elde etmek için optimize edilmiş kontrol işaret vektörünü belirlemek için çok kararlı bir method olarak karşımıza çıkmaktadır (Zheng ve diğ., 2011).

Fırın sıcaklığının efektif kontrolü için Parçacık Koloni Optimizasyonu ile beraber Bulanık Mantık-Yapay Sinir ağlarının birlikte kullanıldıkları hibrit metodlarda bulunmaktadır (Liao ve diğ., 2009). Bu metotta ileri beslemeli yapay sinir ağları (FNN) yerine tekrarlayan yapay sinir ağları (RNN) kullanılmıştır. İlk olarak aktüel fırın datalarından bölgelerin sıcaklıklarını kestirmek ve matematiksel modelden slabın sıcaklığını öngörmek için RNN inşa edilmiştir. İkinci olarak efektif bir kontrol işareti elde etmek için hata ve hatadaki değişimi giriş olarak uygulandığı Bulanık mantık ve NN birleştirilerek FNNDK (Fuzzy Neural Network Decoupling Controller) kontrolörü tasarlanmıştır.

Bölge sıcaklıklarını kestirmek için doğrusal olmayan sistemlerde başarılı olan bulanık mantığa benzer şekilde çalışan radial tabanlı fonksiyonlu NN metodunun tekrarlı bir yapıda uygulanması ile RBF-RNN modeli geliştirilmiştir. Bu modelin en büyük sıkıntısı öğrenme sürecinden kaynaklanan hızlı çalışamama problemidir. Bu problemin aşılabilmesi için network parametrelerini büyüyen ve sadeleştirilen genişletilmiş kalman filtresi (GAP-EKF) ile kestirim yapılan ardışık bir öğrenme algoritması oluşturulmuştur. Bu algorithmadaki avantaj öğrenme işlemine gizli olmayan nöronlarla başlanmasıdır. Nöronlar eklendikçe büyüyen ve EKF tarafından

gizli nöronların atılarak sadeleştirildiği bir yapıda inşa edilmiştir. Ardışık öğrenme, batch öğrenmeye göre çok daha hızlıdır, çünkü yeniden öğrenme gerektirmemektedir. Böylece EKF sayesinde geri yayılıma (BP) göre daha hızlı bir şekilde yapay sinir ağlarının öğrenme süreci gerçekleştirilir. Hibrit parçacık koloni optimizasyonu hem hedef fonksiyon ölçütünün minimizasyonu ile kontrolör için referans üretilmesi hemde bulanık mantık-yapay sinir ağları birleşik kontrolörü (FNNDNC) parametreleri ve ağırlıkları hesaplanmaktadır. Bu optimizasyonun hibrit olmasının sebebi immune sistemin kusursuz arama ölçütü ile parçacık koloninin hızlı arama özelliğinin entegre edilmesidir. Bu konudaki detaylı modelleme ve denklemler Liao ve diğ. (2009) yaptığı çalışmalarda görülmektedir.

Genetik algoritma ve hibrit parçacık koloni optimizasyonu tabanlı fırın sıcaklık kontrolüne yönelik diğer çalışmalara da Xihuai ve diğ (2004) ve Xingquan ve Shiyong (2004)'deki referanslarda rastlamaktayız.

Son yıllarda fırın proseslerinde verimli yanma ve referansın dinamik takibine yönelik en önemli çalışmalardan biri Zanolı ve Pepe (2017) tarafından önerilen çift katmanlı doğrusal model öngörülü çalışmalardır. Bu çalışmalarda Zanolı ve Pepe önce proses değişkenlerini tanımlayarak aralarındaki ilişkinin fonksiyonlarını sistem tanılama metodu ile elde etmiştir. Modelin ürettiği bölge sıcaklıkları ve kirli gaz sıcaklığı gibi ana kontrol değişkenlerini, dinamik optimizasyon ve kısıt yumuşatmalı hedef optimizasyonu olarak tasarladığı iki katmanlı kontrolöre giriş olarak uygulamış ve bu kontrolörün ürettiği çıktıları hava ve gaz akışlarını kontrol eden değişkenleri belirlemede kullanmıştır. Bu yapının en belirgin özelliği operatörün modeldeki bazı olumsuzlukları görüp sezinleyerek müdahale ettiği kısımlarda dair bir mental davranışının resmini ortaya koyma yeteneğidir. Buna yönelik olarak kuşkusuz en önemli adım sistemin giriş, çıkış, bozucu ve parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesidir. Bu belirleme adımı her fırın ve uygulamada farklılık göstermektedir. Bunun sağlanabilme yüzdesi tasarlanan sistemin başarı ölçütüdür. Zanolı ve diğ. (2017) ileri kontrol teknikleri çalışması olarak genelleştirdiği ve ısıtma fırınlarında gerçekleyerek olumlu sonuçları elde ettikleri uygulamalarının tasarımına yönelik blok şemalarını çalışmalarında görebiliriz.

Modellerde üretilen optimum sıcaklık setlerinin dinamik kompanzasyonu her bölgede bulunan PID kontrolörler ile yapılmaktadır. Burada farklı bir yaklaşım olarak PID katsayıları bir uzman tarafından fırın çalışma esnasında hassas şekilde ayarlanmakta

veya proje konumuzdaki uygulama alanında çalışan sistemdeki gibi bulanık mantık tarafından üretilmektedir. Buda seçimli yapılarak kontrolörde esneklik sağlanmaktadır.

Isıtmadaki en önemli parametrelerden bir tanesinde kaliteli ve verimli bir yanma sağlayacak olan karışım oranlarını ayarlayan hava/yakıt oranıdır. Bu konuda Zhu Hongxiang ve diğ. (2003) tarafından yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Bu hem yakıt tasarrufu sağladığı gibi hem de slab üzerinden fazla havadan kaynaklanan oksidasyonun sebep olduğu tufal oluşumunu azaltacaktır. Bunu gözlemleyebileceğimiz parametrelerden bir tanesi bacadan ve kirli gazın fırından çıktığı bölgeden alınan oksijen konsantrasyonudur ki online olarak rahatlıkla ölçülebilmektedir. Bu parametre de operatörün yanmayı gözle gözlemlemesi ve oksijen konsantrasyonundaki artışı kontrol etmesi sonucu operatörler tarafından manual olarak değiştirilebildiği gibi gene mevcut fırınıımızdaki gibi bulanık mantık kontrolörü tarafından hesaplanarak Seviye1 kontrol katmanına referans değer olarak gönderilebilmektedir. Operatör bu değere güvenmediği durumları gözle gözlemlemesi neticesinde üzerinde değişiklik yapabilmektedir. Saha tecrübesine ve literatüre göre oksijen miktarı %1-3 aralığında olması istenmektedir.

Fırındaki önemli proses parametrelerinde bir diğeri de fırın basıncıdır. Fırın basıncı arttıkça baca damperi daha fazla açmakta ve içerideki girli gazın çıkış hızı artarak içerideki ısı kaybı artmakta ve bölgeler soğumaktadır. Fırın basıncının az olması durumunda da her ne kadar kapaklar olsada fırında vakum etkisiyle dış atmosferden havanın fırına girerek soğumasına ve slabların oksidasyonuna sebep olmaktadır. Bu parametrenin de belirli değerler arasında olması gerekmektedir. Operatörler genel olarak 8-14 Pascal referans aralığında küçük dokunuşlar yaparak istenilen bir değer aralığını tutturmaya çalışmaktadırlar. Tüm bu kontrollör fırının Seviye-1 katmanında otomatik olarak yapılmaktadır. Operatörler sadece referans değerlerini ayarlamaktadırlar.

1.3 Çalışmanın Katkıları

Bu çalışmada Zhang ve arkadaşları tarafından önerilen 6 bölgeli fırın modeli temel alınarak 12 kontrol bölgesine sahip doğrusal olmayan detaylı bir fırın modeli oluşturulmuştur. Zhang ve arkadaşları tarafından önerilen model anlık değişen ve fırının sıcaklık kontrolünü etkileyen önemli fırın parametrelerinin ve

öngörülemeyen/ölçülemeyen ısı kayıplarının fırının sıcaklık kontrolüne olumsuz etkilerini içermemektedir. Önerdiğimiz modelde sıcaklık kontrolünü etkileyen bozucuları ölçülebilen ve ölçülemeyen bozucular olarak ikiye ayırdık. Ölçülebilen bozucular yürüyen tabandaki dikey ve yatay boruların soğutma kayıpları, refrakter duvarın absorbe ettiği ısı kaybı vb. gibi nümerik olan hesaplanarak modele dahil edilen bozuculardır. Ölçülemeyen bozucular ise refrakter duvar çatlaklarından, slab şarj vedeşarj sırasında fırın kapaklarından, soğutma borularındaki kaçaklar veya fırın basıncının çok fazla değişmesi neticesinde ısıtma kontrolünü olumsuz etkileyen ve fırının dinamiğine etki eden belirsiz ısı kayıpları olarak modele ilave edilen bozuculardır. Bu çalışmada fırının doğrusal olmayan modelindeki dinamik bilinmeyenleri ve ölçülemeyen bozucuları kestirecek daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımı tabanlı bir kestirici önerilmiştir. Türkiye'nin en büyük ve ilk kurulan demir çelik fabrikasında bulunan ve 1. Sıcak ve Levha Haddehane tesislerini besleyen 4.Slab Fırın olarak adlandırılan yürüyen tabanlı tip ısıtma fırınının doğrusal olmayan dinamik modeli oluşturulmuştur. Modellenen slab ısıtma fırını 30 metre uzunluğunda, 13 metre genişliğinde 220 ton/saat ısıtma kapasitesine sahip hem kok gazı hem de doğalgaz yakıtı kullanabilen bir fırındır. Çok çeşitli ebatlarda slabların şarjının yapılabildiği fırına alınabilen en büyük slab boyutu 12000x1500x300 mm'dir. Slab fırında 14 bölgede 28 yakıcı bulunmasına rağmen 12 kontrol bölgesine sahiptir. Bundan dolayı giriş, çıkış ve kontrol işaret vektör değişkenleri 12x1'lik oluşturulmuştur.

Bu çalışma aşağıdaki özgün katkılara sahiptir.

- (1) Gerçek slab fırını dataları kullanılarak 12 kontrol bölge bir model oluşturulmuştur. Bir çok model basitlik açısından 6 temel bölgeye göre elde edilmiştir. Ereğli Demir Çelik Fabrikalarında aktif olarak kullanılan ve en yeni teknolojiye göre yapılan slab fırını için oluşturulan model daha iyi sıcaklık kontrolü ve dağılımı sağlayabilmek için her bir yakıcının aktif kontrol edilebilmesi için 12 kontrol bölgesine sahiptir. Fırındaki bölge sayısının artışına bağlı olarak ölçülemeyen bozucular ve denklemdaki belirsiz dinamiklerin sayısının artması açısından 12 bölge fırının modellenmesinin ve kestiriminin başarısını göstermek oldukça önemlidir. Bununla beraber 6 bölge modellerdeki denklemlerden direkt veya basitlikle elde edilememekte, durum denklemleri ve kirli gaz yayılımı denklemleri oldukça karmaşık bir

yapıda oluşturulmaktadır. Bu denklemler Ekler kısmında Ek-A ve Ek-B’de verilmiştir.

- (2) Bu çalışmada önerilen model, fırının doğrusal olmayan dinamik davranışlarını ve bölgeler arasındaki ısı etkileşimini detaylı bir şekilde içermekte, bunun yanında bilinmeyen dinamikler ve ölçülemeyen bozucular için doğrusal olmayan bir kestirici üzerinden sistem tanılama da içermektedir.
- (3) Bu çalışmada literatürde daha önce bu alanda kullanılmayan, daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımı ile ölçülemeyen bozucuların ve bilinmeyen dinamiklerin kestirimi yapılmış ve gerçek fırın verileriyle doğrulaması sağlanmıştır.

Literatürde oluşturulan bazı doğrusal olmayan fırın modelleri ölçülemeyen bozucuları ve zamanla değişen fırın dinamiklerini içermeyen, yani sistem tanılamaya sahip değildirler. Birçok model ısıtma prosesindeki değişken dinamikleri statik olarak ele alır ve bazı kabuller yaparak modelleri oluşturulmaktadır. Fırının stabil halindeki durumuna göre model oluşturulmaktadır. Slab fırınları yavaş prosesleri oldukları ve parametre değişimleri sık olmadığından bu modellerde fırın dinamiklerini anlamak açısından iş görmektedirler. Örneğin yakıt olarak kullanılan gazın kalorifik değeri bir çok modelde aynı kabul edilmekte ve model içinde yer verilmemektedir. Fakat özellikle gazın kalorifik indeksi gibi değerler model içinde detaylı bir şekilde ele alınmamaktadır. Bu durum hava gaz karışımının yanma verimini etkilemekte ve bölgedeki ısı enerjisiyi değiştirmektedir. Bu çalışmada oluşturduğumuz modelde yakıt olarak kullanılan gazın kalorifik değerinin hesaplanan referans değere oranı olarak oluşturduğumuz bir parametre modele entegre edilmiştir. Bununla beraber sistem tanılama içeren bazı modellerde doğrusal olmayan dinamikleri ve bozucuları gözardı eden doğrusal modeller karşımıza çıkmaktadır. Bu gözardı edilen belirsiz dinamikler ve ölçülemeyen bozucular fırının kapalı çevrim kontrol sistemini önemli ölçüde etkilemekte, ısıtma verimini düşürürerek enerji optimizasyonunda olumsuz rol oynamaktadır. Daha verimli bir enerji optimizasyonu fırının ısıtma kontrol performansının artırılmasına bağlıdır. Bunu sağlamak için daha doğru bir model elde etmenin yanında modelleme hatalarını ve ölçülemeyen bozucuların etkilerini giderecek bir kestirici tasarımı gerekmektedir. Literatürdeki birçok modelde bu kestiriciler bulunmamaktadır. Kestiricilerin eksikliği fırının başarılı bir şekilde modellenmesi

yapılsa bile modelleme esnasındaki parametre ve bozuculara bağılı kalmaktadır. Parametre değişimi veya bozucuların öngörülenden farklı olması durumunda modelde bu duruma adapte olamayacağından başarılı bir şekilde çalışmayacaktır. Bu bağlamda literatürde, ölçülemeyen bozucuları ve bilinmeyen dinamikleri kestiren doğrusal olmayan bir kestirimci içeren doğrusal olmayan modele ait bir çalışma bulunmamaktadır. Bölgeler arası etkileşimler oldukça fazladır. Bazı fırın modelleri bu etkileşimleri içermekle beraber bölge sayısını düşük tutarak etkileşimin oluşturacağı karmaşık denklemlerden kurtulmuş olmaktadır. Bu durum eğer kontrol edilecek bölge sayısı ile modellenen durum vektör sayısı eşit ise kabul edilebilir. Çoğu fırın 6 ana bölge olarak modellendiğinden fırın denklemleri daha basite indirgenmektedir. Bizim oluşturduğumuz modelde her yakıcı ayrı ayrı kontrol edilebildiğinden 12 bölge olarak tasarlanmış ve tüm bölgeler arası etkileşimler detaylı olarak ele alınarak formülize edilmiştir. Literatürde 12 bölge bir fırın modeli bulunmamaktadır. Sistem tanılama için doğrusal olmayan modelin durum uzay denklemleri elde edilmiş ve uyarlamalı model öngörülü kontrolörü dizayn edilmiştir. Slab fırınının sistem tanınması için bu yaklaşımın kullanıldığı ve pratik uygulamasının yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bölgeler arası etkileşimlerinin detaylıca ele alındığı, belirsiz parametrelerin yarattığı fırının dinamiğini etkileyen ve ölçülemeyen bozucuların kestirimini içerecek şekilde oluşturulan bir model literatürde karşılaşılmamıştır. Ayrıca bilinmeyen parametre ve bozucu kestirici mekanizması olarak daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımı daha önce fırın modellerinde kullanılmamıştır. İlk defa oluşturduğumuz modelde bozucu kestiricisi olarak kullanılarak uyarlamalı doğrusal olmayan model öngörülü kontrolörün uyarlama mekanizmasına entegre edilerek çok daha etkin bir kontrol sağlandığı görülmüştür.



2. SLAB FIRINI TERMAL MODELLERİ

Slab fırını ısıtma prosesini, öngörülme-yen ısı kayıpları, fırına fazla verilen yakma havası veya kapakların açılmasından dolayı dış atmosferden emilen hava, kullanılan yakıt gazın kalorifik değeri, gaz/hava oranlarının çok yüksek veya düşük olması, üretim hızının ve fırına şarj edilen slab ebatlarının sürekli değışmesi, fırının içindeki kirli gaz yayılımı, ışı-nım emilim değeri gibi bir çok faktör etkilemektedir. Ayrıca bölgelerin arasındaki güçlü ısı etkileşimi, büyük zaman gecikmesi, aşırı yavaş cevap veren ve doğrusal olmayan özelliklerinden dolayı fırın prosesleri kompleks sistemlerdir. Buna bağılı olarak birçok araştırmacı optimal kontrol için farklı metotlar geliştirmiş ve uygulamışlardır. Bazı temel fizik kurallarını içeren modellerin sisteme entegre edilerek, optimal kontrol için yapay sinir ağıları, bulanık mantık, genetik algoritmalar ve model öngörölü kontrol gibi ileri kontrol teknikleri uygulanmıştır. Bu kontrol tekniklerinin başarı ölçütleri fırının ne kadar doğru modellendiğı ile doğru orantılıdır. Hesaba katılmayan her bir durum ve parametre kontrol tekniğinin başarısını olumsuz etkileyecektir. Slab fırınlarının asıl fonksiyonuna bağılı olarak ısıyı en çok absorbe eden kısım fırına şarj edilen slablardır. Bu slablar sıcak haddelemeye uygun haddehane modellerinin kaliteye göre belirlediğı sıcaklığa kadar ısıtılmaktadırlar. Bunun yanında fırın duvarları, fırının slablarını taşıyan skid sistemlerinin soğutma boruları da ısınmakta ve bunlar slab fırınlarına kayıp olarak geri dönmektedir. Ayrıca fırının kapaklarının sık açılması ve kirli gazı dışarıya atılması sırasında da enerji kayıpları oluşmaktadır. Fırını modellerken aşağıdaki temel teorik yaklaşımlar kullanılmaktadır.

2.1 Slab Termal Modeli

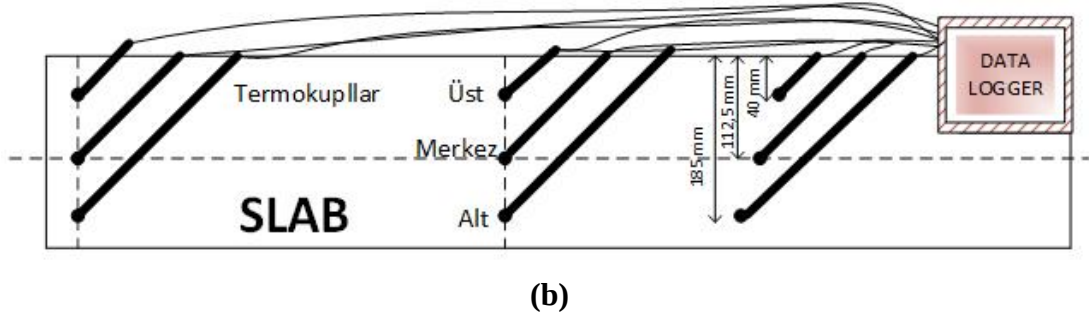
Slabların fırın içindeki sıcaklıklarını ölçmek teknik olarak mümkün değildir. Slabların üstten fırın delinerek konulacak pyrometreler ile doğru bir şekilde ölçülmesi teorik olarak mümkün görünse de fırın içindeki ışımadan ve slab yüzeyindeki tufallenmeden dolayı pratik olarak doğru değildir. Fırın içi ışıma (radiating) yoluyla enerji transferi yapılmakta ve slab üzerindeki ışımaya ek olarak üst duvarlardan ve kirli gazdan

kaynaklanan ısımlar da slab yüzeyinin doğru ölçülmesini engellemektedir. Slab yüzeyindeki tufallerde slabin olduğundan farklı bir şekilde sıcaklık değerine sahip olduğu sonucunu doğurmaktadır. En doğru ölçü ancak slab deşarj olduktan ve üzerindeki tufal atıldıktan sonra pyrometre ölçümü ile elde edilmektedir. Mevcut durumda fırının deşarj sıcaklığına ulaşp ulaşmadığının belirlenmesi de bu ölçüme göre yapılmaktadır. Fakat fırın içindeki ısıtma rejimi bir temel üzerine oturtulmalı ve bu temelin doğruluğu veya hassas parametrelerin ayarlarının yapılması bu sıcaklık ölçümlerine bağlıdır. Ayrıca fırın firmaları belirli aralıklarla Şekil 2.1’de görüldüğü gibi test slabları hazırlayarak fırının ısıtma verimini incelemektedirler. Test slablarının üst, alt ve merkezine termokupl dediğimiz fırın bölgelerinin de sıcaklıklarını ölçen ölçüm aletleri yerleştirilmektedir. Bu ölçümler data logger olarak adlandırılan veri kayıt cihazı içine kayıtlı edilip test slabı deşarj edildikten sonra bilgisayara aktararak her noktada fırının ısıtma performansı incelenmektedir. Termokupllar ölçülecek fırının maksimum sıcaklığına, ölçüm hassasiyetlerine ve malzemelerindeki alaşımlara göre çok çeşitli olmakla beraber, genellikle slab fırınlarında hassasiyetlerinden ve güvenilirliklerinden dolayı S tipi termokupllar kullanılmaktadır. Bu termokuplların belirli aralıklarla veya ölçüm değerlerinde sapmadan şüphelenildiğinde kalibrasyonlarının doğrulamaları gerçekleştirilebilmekte ve fırın bakımlarında düzenli değişimleri yapılmaktadır.



(a)

Şekil 2.1 : Online slab ölçümü (a) Test slabı (b) Termokupl yerleşimi



Şekil 2.1 (devamı): Online slab ölçümü (a) Test slabı (b) Termokupl yerleşimi

Fırın içindeki slabın direkt ölçümü test slabı dışında yapılamadığından doğru bir ısıtma stratejisi oluşturabilmek amacıyla slab sıcaklığı termodinamik modeli elde edilmelidir. Bunun için öncelikle slab içindeki ısı akış dağılımı (HFD) formülize edilmelidir. Slab içindeki ısı iletimi dağılımı, Fourier kanunundan elde edilen Denklem 2.1’de verilen tek boyutlu ısı iletim denkleminde elde edilir. Bu denklem ile slab üst, orta ve alt bölgedeki sıcaklık bilgisi elde edilir. Burada bazı varsayımlar yapılması gerekmektedir.

- ✓ Slab yüzeyi boyunca ve kalınlık boyunca sıcaklık dağılımı doğrusaldır.
- ✓ Fırın sıcaklık dağılımı fırın boyunca doğrusaldır.
- ✓ Slabın faz değişimi (ferritten östenit yapıya) geçişinde değişen parametre değişimi ihmal edilmiştir.

$$\frac{\partial \Phi_S}{\partial S_S} = -\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial x_S} \quad (2.1)$$

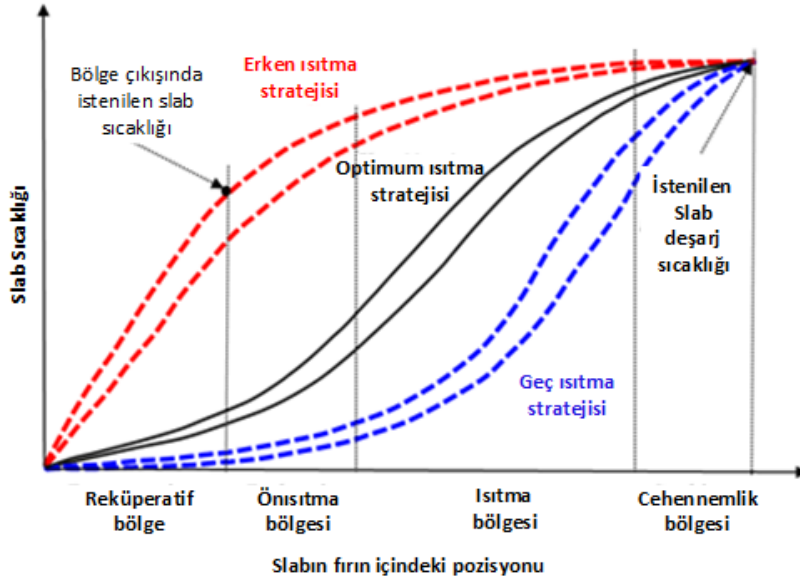
Denklemdeki (-) işareti sıcak noktadan soğuk noktaya ısı akışının olduğunu gösterir. Burada λ_S slabın malzeme iletkenliği [W/(m.K)], Φ_S ısı akı oranı [W/ m²], S_S slabın yüzey alanı [m²], T_S kelvin cinsinden slabın yüzeyindeki sıcaklık ve x_S slabın kalınlık boyuncaki pozisyonu ifade etmektedir.

Fourier kanunundan, katı cisimler içindeki ısı transferini yöneten diferansiyel denklemlerin çözümünden slabların içerisindeki ısı dağılımını veren denklem 2.2 elde edilir. Slabların üst, alt ve merkezdeki sıcaklıkları her slabı test slabı gibi delip ölçemeyeceğimiz için bu denkleme göre oluşturulur.

$$\rho_S \cdot C_S \cdot \frac{\partial T_S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_S} \left(\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial x_S} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial T_S}{\partial t} = \frac{\lambda_S}{\rho_S \cdot C_S} \frac{\partial^2 T_S}{\partial x_S^2} \quad \begin{cases} T_S(x, 0) = T_{S_0}(x) \\ \frac{\partial T_S}{\partial x_S} \Big|_{x_S=D/2} = \frac{\phi_{S_S}}{\lambda_S} \\ \frac{\partial T_S}{\partial x_S} \Big|_{x_S=-D/2} = -\frac{\phi_{S_B}}{\lambda_S} \end{cases}$$

Burada ρ_S slab yoğunluğu [kg/m³], C_S slab kalorifik değeri [J/(kg.K)], λ_S slabın malzeme iletkenliği [W/(m.K)], T_S slabın yüzey sıcaklığı, T_{S_0} slabın şarj edildiği ilk sıcaklık, D slab kalınlığı, ϕ_{S_S} ve ϕ_{S_B} slabın üst (surface) ve alt (bottom) yüzeyindeki net ışımsal ısı akısını ifade etmektedir. Slabın ısınma eğrileri fırında optimum ısı eğrisi oluşturmak için kullanılmadığıdır. Şekil 2.2’de ısıtma stratejisinin eğrileri görülmektedir.



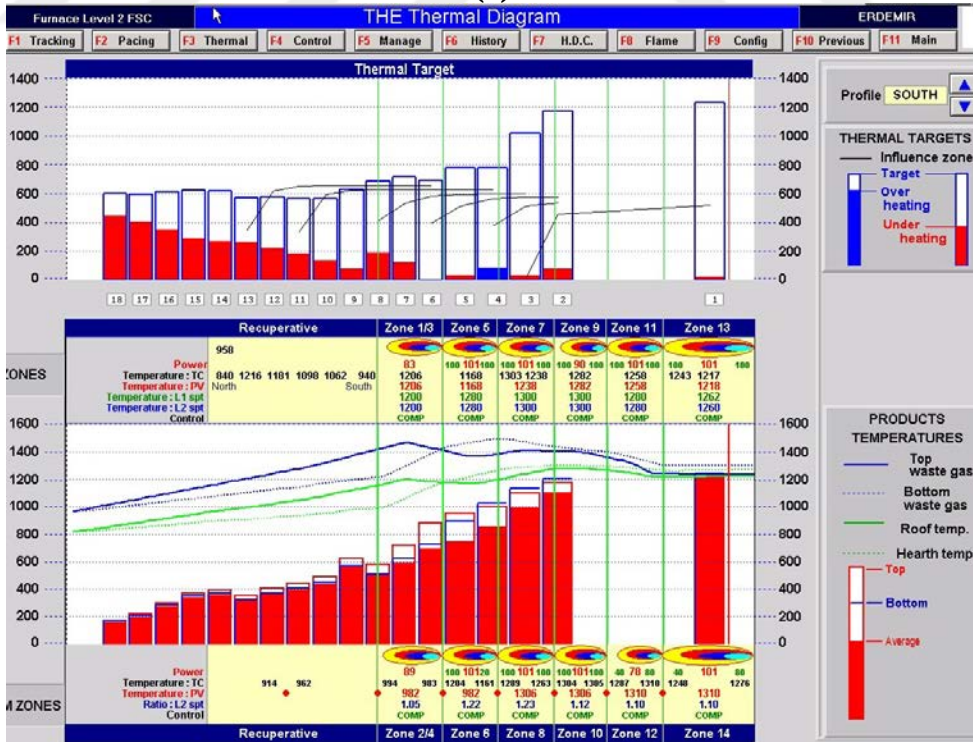
Şekil 2.2 : Optimum ısınma eğrisi ve ısıtma stratejisi (Nguyen, 2014).

Kırmızı renkli olan eğride slablar erken ısıtılmakta ve slab deşarj sıcaklığına erken ulaşılmaktadır. Slab yüzeyi ve merkezi arasındaki farkta en minimumdur. Fakat bu stratejide çok fazla enerji harcanır ve birim ton başına enerji maliyetleri bu eğride çok yükselir. Mavi renkli gösterilen eğride slablar çok geç ısıtılmakta ve slablar çıkış sıcaklığına ulaştığında slabın merkezi ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkları da çok yüksektir. Bu eğride ton başına harcanan enerji maliyeti minimumdur. Fakat slabın merkezi ve yüzeyi arasındaki bu farklar haddeleme de çok büyük arızalara ve ekipman hasarlanmalarına sebep olmakta ve haddeleme yüklerinde aşırı yükselmeler neticesinde malzeme katlanmalarına sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla enerji

optimizasyonunu gözönüne aldığımızda en doğru ısıtma rejimi siyah renkli olan eğri ile yapılması gerekmektedir. Bu eğriler slab fırının Seviye-2 kontrol katmanı tarafından takip edilmekte ve Seviye-1 kontrol katmanına sıcaklık referansları bu eğriye göre gönderilmektedir. Şekil 2.3’de Seviye-2’deki termal modele göre oluşturulan eğrileri ve bölge sıcaklıklarının oluşturduğu termal diyagramları görmektediriz.



(a)



(b)

Şekil 2.3 : Fırın seviye 2 kontrol ekranları (a) Fırın boyunca slab sıcaklık grafiği. (b) Termal diyagram

2.2 Slab Fırını Refrakter Duvarı Termal Modeli

Fırın duvarının sıcaklığı da slab termodinamik sıcaklık hesaplama modeli ile benzer formül fakat farklı soğurma katsayıları üzerinden hesaplanır.

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\lambda_w}{\rho_w \cdot C_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial x_w^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} T_w(x, 0) = T_{w0}(x) \\ \left. \frac{\partial T_w}{\partial x_w} \right|_{x_w=W/2} = \frac{\phi_{win}}{\lambda_w} \\ \left. \frac{\partial T_w}{\partial x_w} \right|_{x_w=-W/2} = -\frac{\phi_{wout}}{\lambda_w} \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Burada ρ_w refrakter duvar yoğunluğu [kg/m^3], C_w duvar kalorifik değeri [$\text{J}/(\text{kg}^\circ\text{K})$], λ_w duvar malzeme iletkenliği [$\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K})$], T_w duvar yüzey sıcaklığı, T_{w0} duvarın ilk sıcaklığı, W duvarın kalınlığı, ϕ_{win} ve ϕ_{wout} duvarın iç ve dış yüzeyindeki net ışımsal ısı akısını ve x_w duvarın kalınlık boyuncaki pozisyonu ifade etmektedir. Normalde bu denklem yerine mevcut Seviye-2 kontrol katmanında refrakter duvarın malzemesine göre bu hesaplamalar fırın firmaları tarafından yapılarak duvarın sıcaklığı termokupl ile ölçülerek yüzey alanı ile orantılı daha basit bir hesaplama yapılmaktadır. Bu değerler fırın modelindeki Çizelge 3.1’de verilen parametre çizelgesindeki $q_{L,wall}$ parametresi ile gösterilmiştir. Buradaki parametre ilgili bölgenin alanı ile çarpılarak o bölgeye ait fırın duvarından kaynaklı kayıp hesaplanabilmektedir.

2.3 Fırının Işıma Yoluyla Isı Transfer Modeli

Termal model her bir malzemenin alt ve üst yüzeylerinin aldığı ısı akışlarını hesaplar. Bu ısı akışı malzemenin yüzeylerinin, fırının iç ve tavan sıcaklıkları ile kirli gaz sıcaklıklarının ışıma yoluyla yaydığı enerji göz önüne alınarak elde edilir. Hesaplamalar fırın tavanı (roof) ve iç (heart) sıcaklıklarının yaydığı enerjiyi ele aldığı gibi kirli gazın yaydığı ve absorbe ettiği enerjiyi de dikkate almaktadır. Yoksa modeller doğru çalışmazlar. Alt bölgelerde ise malzemenin üzerinde yürüdüğü skid plakalarının malzemedan aldığı enerjiyi de dikkate almak gerekir. Bu bölgelerde soğumalar ve çizgi şeklinde gölgeler bulunmaktadır. Işıma yoluyla ısı akısının tüm malzemeler üzerinde dağılımı, geometrik şekil faktörüne göre belirlenir. Slab tarafından alınan net ısı akısı tavan ile kirli gazın ısı yayılımı farkı ile malzemenin kendi ısı yayılımıyla elde edilir. Radiation yani ışıma yoluyla ısı transfer modeli aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\Phi_{S_i} = S \cdot K \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \sigma \cdot (T_W^4 - T_S^4) \quad (2.4)$$

Bu denklemde Φ_{S_i} i.slabın net ısı akısı [W], S slabı yüzey alanı [m^2], K kirli gaz emilim ve yansı faktöre bağlı fırının deneme slabı testler sırasında elde edilen bir faktör, ε malzeme emissivite değeri, F form faktörü (shape factor), σ Stefan-Boltzman katsayısı [$W/(m^2.K)$], T_w duvar sıcaklığı [K] ve T_s slab yüzey sıcaklığını [K] ifade etmektedir.

2.4 Termal Model Hesaplaması

Termal model hesaplaması fırının kuruluğu aşamasında detaylı hesaplamalar ve fırının ilk çalışması sırasında uzun süreli hassas ayarlamalar ile belirlendiğinden bu tez çalışmasında da bu kısma dokunulmamıştır. Slabların yüzey ve iç sıcaklıklarını hesaplayan optimum ısıtma eğrileri (Şekil 2.3a) ve bu eğrilerin takip edilebilmesi için bölge sıcaklık referanslarının oluşturulduğu termal diyagramları elde edildiği termal modeller (Şekil 2.3b) fırının Seviye-2 sisteminde hesaplanmaya devam etmektedir. Bu referanslar ve slab sıcaklık bilgileri tasarladığımız uyarlamalı MPC modeli içine iba veri toplama sistemi ile entegre edilmiştir. Tezin kapsamında tasarlanan MPC modülü Seviye-1'deki sıcaklık setlerine göre gaz ve hava valflerine referans gönderen sıcaklık PID kontrolörü ve bu kontrolörün katsayılarını ayarlayan Seviye-2'deki mevcut Fuzzy modülü yerine tasarlanmıştır. Önceki bölümlerde anlatılan termal modeller Seviye-2 kontrol katmanı tarafından aşağıdaki adımlarla hesaplanır.

Termal model girdileri:

- ◆ T_R : Üst bölgelerdeki tavan sıcaklıkları. (Termokupllar ile ölçülmektedir)
- ◆ T_F : Alt bölgedeki fırın iç sıcaklığı (Termokupllar ile ölçülmektedir)
- ◆ T_g : Kirli gazın fırını terkettiği bölgedeki sıcaklığı. (Termokupllar ile ölçülmektedir)
- ◆ T_o : Slabın şarj sıcaklığı (Pyrometre ile ölçülmektedir).

Termal model için kontrol edilen bölgedeki (zone) alt ve üst sıcaklık değeri, reküperatif bölgedeki alt-üst sıcaklık değeri ve karıştırmadan önceki kirli gaz sıcaklık değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Modelin başarısı bu değerlerin sağlıklı şekilde ölçülmesi ile elde edilmektedir. O yüzden genelde çift ölçüm ekipmanı kullanılmakta, kalibrasyonlarının akredite bir laboratuvarında yapılmaktadır.

Termal model çıktıları:

- ◆ Slabın ortalama sıcaklığı
- ◆ Slabın üst yüzey sıcaklığı
- ◆ Fırının merkez (iç) sıcaklığı
- ◆ Slabın alt yüzey sıcaklığı

Termal Modelin Hesaplama Adımları:

1. Her bir bölgenin kirli gaz sıcaklığı tavan, kirli gaz ve slab arasındaki ısıma yoluyla ısı yayılım dengesine göre hesaplanmaktadır.

$$a_R \cdot T_R^4 + a_S \cdot T_S^4 = a_F \cdot T_F^4 \quad (2.5)$$

a_R , a_S ve a_F sırasıyla kirli gaz emissivite, slab emissivite ve form faktörü değerleridir.

2. Fırının tavan (roof) ve kirli gaz sıcaklıkları ısıma yoluyla ısı transferi ilkesi ile fırın boyunca hesaplanır.
3. Denklem 2.4'den slabın aldığı net ısı akısı, shape faktörü, malzeme ve kirli gaz emissivite katsayıları gözönüne alınarak hesaplanır.
4. Denklem 2.2'den malzemenin kalorifik değeri, yoğunluğu, termal iletkenlik gibi fiziksel özellikleri dikkate alınarak zamanla sıcaklık artışı hesaplanır.

Slabların C_s spesifik ısı, λ_s termal iletkenlik ve ρ_s yoğunluğu gibi fiziksel karakteristikleri sıcaklığı sıcaklığı için gereken parametrelerdir. Bunlar BISRA sınıflandırmasına göre 22 çelik kalitesi grubu için 0-1400°C arasında tanımlanmıştır.

Malzemenin emissivity değeri, her bölge için kirli gazın emissivity değeri ve skidlerden kaynaklı alt bölge soğuklukları için form faktörü katsayıları fırının ilk kurulumunda çalışması esnasında hassas ayarlanması gereken parametrelerdir. Fırın devreye alındıktan sonra uzun süren testler sonucunda elde edilmişlerdir. Fırın modifikasyonları yapılmadığı sürece güvenilirlerdir. Fırın dizaynında yapılacak değişiklikler veya bağlı girişlerde meydana gelecek değişiklik gibi modifikasyonlarda yeniden ayarlanması gerekecektir.

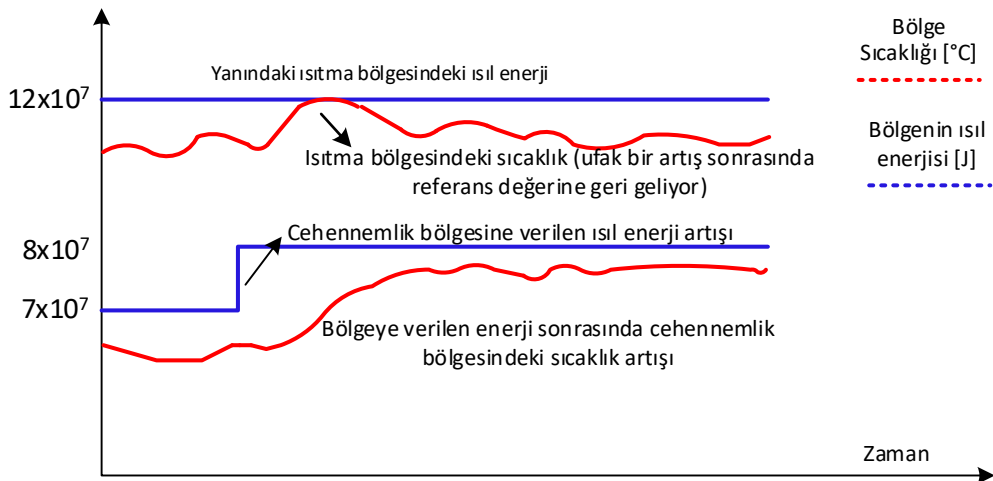
2.5 Isı Transfer Dengesini Baz alan Matematiksel Model

Bazı çalışmalarda fırın modeli olarak bölgedeki üretilen ve harcanan enerjideki enerji dengesini baz alan modeller geliştirilmiştir. Bu model doğru kurgulandığında ve

parametre ve bozucuları doğru kestirildiğinde çok başarılı sonuçlar vermektedir. Temel prensip olarak üretilen ve tüketilen enerji birbirine eşittir. Eğer giren enerji çıkan enerjiden fazla ise fırın ısınır, çıkan enerji giren enerjiden fazla ise fırın soğur. Optimize edilmesi gereken hedef fonksiyonda budur. Bu model 12 bölgeli olarak detaylı bir şekilde raporun 3.bölümünde anlatılmıştır. Tezin temelini de bu model oluşturmaktadır.

2.6 Fırın Transfer Fonksiyon Modeli

Bu modelde bölgeler için aşağıdaki temel model baz alınır ve sisteme impuls ve basamak referanslar verilerek sistemin cevabı üzerinden sisteme ait transfer fonksiyonları elde edilir. Bu temelde sistem tanılamadır (SI). Bu modelde sistem basamak referans cevabı baz alınarak kontrol mekanizması gerçekleştirilir. En temel ve basit bir şekilde elde edilen ve en sık başvurulanan modellerden bir tanesidir. Fırın bölgeleri birbiriyle kuvvetli bir ilişkiye ve korelasyona sahiptir. Bir bölgeye verdiğiniz referans değerindeki artış sadece o bölgedeki sıcaklığı artırmaz aynı zamanda diğer bölgelerde de artışa sebep olur. Bu artış sonucunda o bölgedeki referansı yakalaması için bölge kontrolü tekrar sağlanmaya çalışılır (Şekil 2.4, Nguyen ve diğ., 2012)



Şekil 2.4 : Fırın cehennemlik bölgesi basamak referansına göre ısıtma bölgesinin ısı etkileşimi.

Bu yanma bölgelerindeki etkileşimleri de ifade eden fırın yanma bölgelerine ait modelin transfer fonksiyonu aşağıdaki denklemdeki gibi oluşturulur.

$$y_i = H_{ii}u_i + \sum_j^k H_{ij}y_j \quad (2.6)$$

Denklemden N kontrol edilen bölge sayısı olmak üzere $i=1 \dots N$, j i. bölge ile etkileşime sahip olan bölge veya bölgeler, k j'nin toplam sayısı yani etkileşen bölge sayısı, y_j j. bölgedeki sıcaklık değişimi ve u_i i. bölgeye verilen enerji artış miktarı (power of zone) olarak ifade edilmektedir.

Slab tavlama fırınlarındaki denemeler ve bölge kontrollerinin PID olduğunu düşünersek transfer fonksiyonu H_{ij} birinci dereceden, gecikmeli ve sabit kazançla sahip bir fonksiyondur.

$$H_{ij} = e^{-\tau_{ij}s} \frac{G_{ij}}{1 + \lambda_{ij}s} \quad (2.7)$$

Zaman gecikmesi yaklaşık olarak denklem 2.8'deki gibi hesaplanabilir.

$$e^{-\tau s} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (2.8)$$

Yukarıdaki transfer fonksiyonunun tanınması normal sabit üretim esnasında diğer bölgeler sabit güçte iken sistemin bütün bölgelerine sırasıyla basamak referanslar verilerek Sistem Tanıma metodu ile bulunmaktadır. Sistem tanılama için Matlab identification toolbox kullanılabilir. Sistem çok giriş çok çıkışlı, yani transfer matrisi ile modellenmektedir. Bu modelde bölgeler arası etkileşimlerde kapsamaktadır. Denklemden G_{ij} statik kazancı fırın nominal operasyon durumundayken elde edilir ve model doğrulama esnasında hassas ayarı yapılmaktadır.

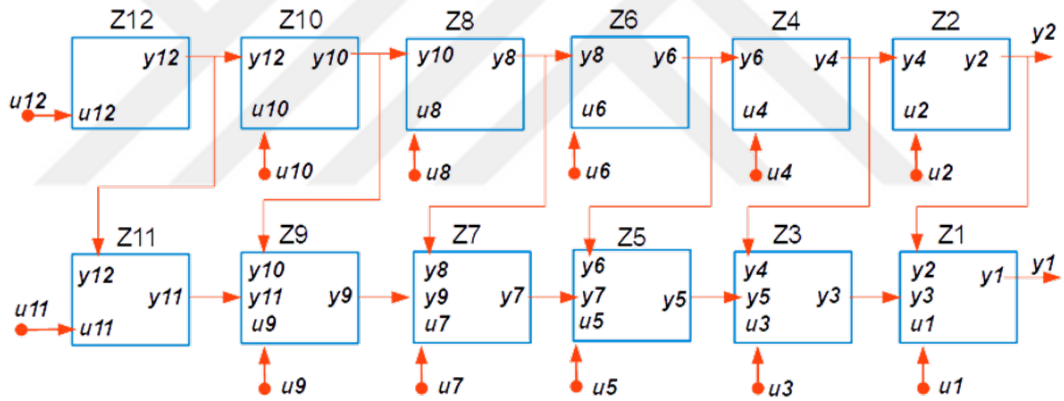
Sistem modelleme ve öngörüleme işlemi için yukarıdaki transfer fonksiyonu ayrık-zamanlı durum-uzayı gösterimine çevrilir. Bu durum uzayı gerçeklemesi aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= A_i x_i(k) + A_i x_i(k) + \sum_{j \neq i} B_{ij} y_j(k) \\ y_i(k) &= C_i x_i(k) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Bu testler sonucunda elde edilen verilere göre fırının zaman gecikmesi 50 saniye civarında olmaktadır. G_{ij} kazanç oranları da oldukça düşüktür ve 0.01 civarlarında

olmaktadır. Fırının step testlerinde referans sıcaklığına oturması da bölgenin büyüklüğüne göre değişmekle beraber yaklaşık 600 saniyeler civarında olmaktadır. Bu da denklemde λ_{ij} ile ifade edilmektedir. Yani tipik bir transfer fonksiyonu $H_{ii} = e^{-50s} \frac{0.01}{1+600s} u_i$ gibi elde edilmektedir. Diğer bölgelerin etkileşimindeki gecikme ve kazancı da farklı olmaktadır. Onun transfer fonksiyonu da kabaca $H_{ij} = e^{-20s} \frac{0.2}{1+500s} y_j$ gibi elde edilmektedir.

Aşağıda transfer fonksiyonları ile oluşturulan Ereğli Demir Çelik Tesisleri 4.Slab fırınına ait bir örnek model oluşturulmuştur. 4.Slab fırınında 12 bölge bulunduğuundan 12 farklı transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. Transfer fonksiyonları arasındaki giriş ve çıkışlar bölgeler arasındaki etkileşimleri ifade etmektedir. 4.slab fırını için şekil 3.3'deki bölgeler arası etkileşimi de hesaba katarak şekil 2.5'deki kontrol blok diyagramı oluşturulmuştur. Bu kontrol diyagram için oluşturulan transfer fonksiyonları da tüm bölgeler için denklem 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.5 : 4.Slab Fırını bölge etkileşimli kontrol blok diyagramı.

$$\begin{aligned}
 y_{12} &= H_{12,12} \cdot u_{12} \\
 y_{10} &= H_{10,10} \cdot u_{10} + H_{10,12} \cdot y_{12} \\
 y_8 &= H_{8,8} \cdot u_8 + H_{8,10} \cdot y_{10} \\
 y_6 &= H_{6,6} \cdot u_6 + H_{6,8} \cdot y_8 \\
 y_4 &= H_{4,4} \cdot u_4 + H_{6,4} \cdot y_6 \\
 y_2 &= H_{2,2} \cdot u_2 + H_{4,2} \cdot y_4 \\
 y_{11} &= H_{11,11} \cdot u_{11} + H_{11,12} \cdot y_{12} \\
 y_9 &= H_{9,9} \cdot u_9 + H_{9,11} \cdot y_{11} + H_{9,10} \cdot y_{10} \\
 y_7 &= H_{7,7} \cdot u_7 + H_{7,9} \cdot y_9 + H_{7,8} \cdot y_8 \\
 y_5 &= H_{5,5} \cdot u_5 + H_{5,7} \cdot y_7 + H_{5,6} \cdot y_6 \\
 y_3 &= H_{3,3} \cdot u_3 + H_{3,5} \cdot y_5 + H_{3,4} \cdot y_4 \\
 y_1 &= H_{1,1} \cdot u_1 + H_{1,3} \cdot y_3 + H_{1,2} \cdot y_2
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Yukarıdaki denklemde $H_{i,i}$ transfer fonksiyonu, i.bölge çıkışının i.bölge kontrol işaretine göre sistem cevabının yanıtının bir fonksiyonudur. $H_{i,j}$ transfer fonksiyonu ise kirli gaz akışına göre yandaki bölgenin sıcaklık artışından dolayı bölgenin sıcaklık artışının fonksiyonudur. Bu etkileşim ne kadar fazla ise transfer fonksiyonu sayısı artmaktadır. Endüstriyel fırın uygulamalarındaki gözlemler sonucunda bu transfer fonksiyonları H_{ij} şeklinde birinci dereceden zaman gecikmeli ve sabit kazançlı bir fonksiyon şeklinde olmaktadır. Bölge sıcaklık kontrollerinde de genellikle PI kontrolör kullanılmaktadır. Çıkış sinyali bölge sıcaklık set ve referansı arasındaki farkı ifade etmektedir. ζ kok gazının kalorifik değerinin referans değerine oranı, G_{ij} sistem kazancı, t_d zaman gecikmesi, T_i aktüel bölge sıcaklığı, P_i bölge enerjisi (gaz akış oranı/bölge yakıcı kapasitesi), $T_{i,nom}$ ve $P_{i,nom}$ nominal bölge sıcaklığı ve bölge güç-enerji değeri olmak üzere sistem değişkenleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} y_i &= T_i - T_{i,nom} \\ u_i &= \zeta(P_i - P_{i,nom}) \\ H_{ij} &= e^{-td_{ijs}} \frac{G_{ij}}{1 + \tau_{ijs} s} \\ e^{-td_{ijs}} &= \frac{1}{1 + td_{ijs} s} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Transfer fonksiyonları, sistemin basamak cevapları veri olarak toplanıp Matlab SI Toolbox yardımıyla elde edilebilir. Sistem tanılama kitaplarından da faydalanılarak transfer fonksiyonunu elde etmek mümkündür.

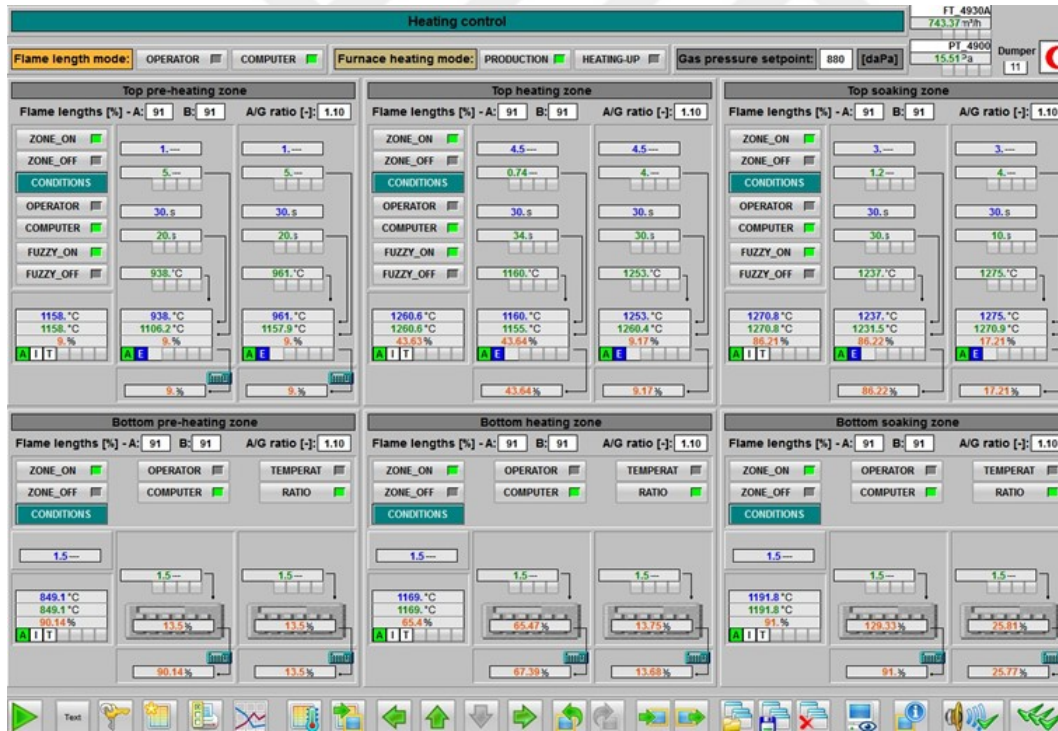
Daha az bölgeli modellerde bu yaklaşım hızlı çözümler getirebilir. Bu modelde fırın kararlı ve istikrarlı durumda olmalı, öngörülme kayıplar yok sayılacak kadar düşük olmalı ve sistem dinamik cevabı zamanla değişmemelidir. Fakat slab ısıtma fırınları doğrusal olmayan modele sahip, zamanla değişen ve birbirleriyle güçlü korelasyona sahip ısıtma bölgeleri olan oldukça kompleks sistemlerdir. Değişken parametreleri ve öngörülme bozucuların olduğu ve sistem çıkışını direkt etkileyecek dinamikleri olan proseslerdir. Transfer fonksiyonlarını elde etmek oldukça güçtür. Bozucuları ve değişen parametreleri tam olarak kapsayamadığından hassas bir model oluşturulamamaktadır. Bu durumda transfer fonksiyonları temelli oluşturulan modellerle istenilen hassasiyet ve kararlılıkta kontrolörler tasarlanamayacaktır. Bu modellere yer verilmesinin sebebi daha az bölgeli küçük ısıtma sistemleri bulunan ve parametrelerin kararlı olduğu ve bozucuların etkisinin sınırlı olduğu sistemler için oldukça kullanışlı ve hızlı tasarlanabilecek bir model olmasıdır.

3. EREĞLİ DEMİR ÇELİK TESİSLERİ 4. SLAB FIRINI DOĞRUSAL OLMAYAN DURUM UZAYI MODELİ

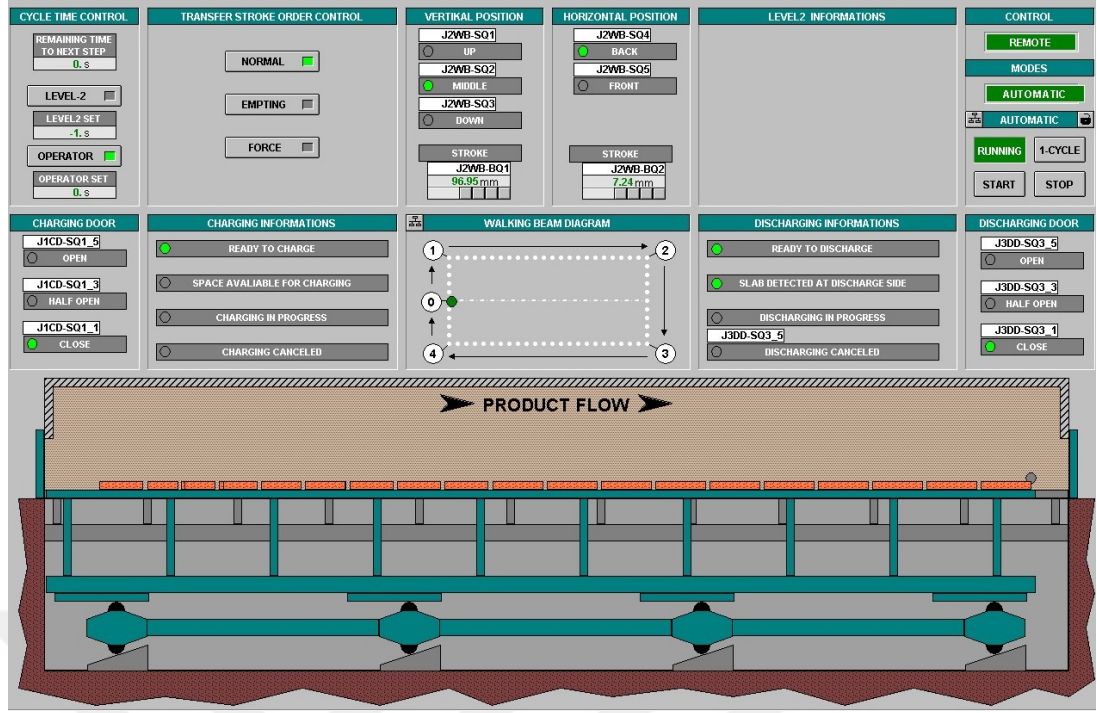
Bu tezde Ereğli Demir Çelik tesislerinde bulunan 1.Sıcak Haddehane üretimi için ihtiyaç duyulan slabların ısıtıldığı 4.Slab Fırınının modellenmesi ve kontrolü amaçlanmıştır. Söz konusu 4. Slab Fırını, önısıtma, ısıtma ve cehennemlik olmak üzere 3 ana bölgeden oluşmaktadır. Bununla birlikte içinde yakıcıların (burner) olmadığı ve slabların kirli gaz sıcaklığı ile konveksiyon yoluyla kontrolsüz ısıtıldığı reküperatif bölge bulunmaktadır. Slab fırınında, önısıtma bölgesinde 3 alt ve 3 üstte olmak üzere 6 adet, ısıtma bölgesinde 2 alt ve 2 üst olmak üzere 4 adet, cehennemlik bölgesinde 2 alt ve 2 üst olmak üzere 4 adet, toplamda 14 adet yakıcı bölgesi bulunmaktadır. Alt ve üst bölgeler ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Her bölgedeki yakıcılar karşılıklı simetrik olduğundan toplamda 28 adet yakıcı bulunmaktadır. Slabların her iki kenarını eşit ısıtmak için bu karşılıklı yakıcılar aynı anda ateşlenmektedir. Bir tanesi arıza yaptığında diğer yakıcı da devre dışı kalmaktadır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bölgelerin operatör ve bilgisayar modu (Seviye-2) kontrolü olmak üzere 2 farklı kontrol modu bulunmaktadır. Bilgisayar modu, termal modeller üzerine kurulu olduğundan ve slabın tüm fırın boyunca sıcaklığını tahminleme modelini çalıştırmamasından dolayı 14 yakıcı bölgesi için 12 kontrol bölgesini ayrı ayrı kontrol edebilmektedir. Önısıtma bölgesinde 6 çift yakıcı olmasına karşılık yakıcıların çok yakın olması ve slabın ilk girdiği bölge olmasından dolayı önısıtmada 4 kontrol bölgesi oluşturulmuştur. Isıtma ve cehennemlik kontrol bölgeleri ise yakıcı bölgeleri ile aynı şekilde 4’er adet kontrol bölgesinden oluşmaktadır. Operatör modunda, bilgisayar modu kadar hassas kontrol edilemeyeceği için alt ve üst ana bölge sayısı kadar 6 kontrol bölgesi bulunmaktadır. Özet olarak bilgisayar modunda toplam 12 kontrol bölgesi, operatör modunda ise 6 kontrol bölgesi bulunmaktadır. Her iki modda bölgelerin kontrolü PID kontrolör ile yapılmaktadır. İki mod arasındaki fark Seviye-2 kontrol katmanı PID katsayılarını bulanık mantık üzerinden güncellerken, operatörde ise daha önceden ayarlanan ve kontrolü operatörde olan PID katsayıları kullanılarak bölge PID’leri kontrol edilmektedir. Bu tezde Seviye-1 kontrol katmanındaki PID

kontrolör ve Seviye-2 kontrol katmanındaki bulanık mantık (Fuzzy Logic) MPC kontrolör ile değiştirilecektir.

Modellenen slab ısıtma fırını yürüyen tabanlı bir slab ısıtma fırınıdır. Yani slablar girişten itilerek değil, fırının tabanında bulunan ve hidrolik silindirler kullanılarak hareket ettirilen hareketli skidler ile taşınarak sabit skidler üzerine bırakılması ile ilerletilmesi metoduna dayanmaktadır. Bu kalite açısından önemlidir. Çünkü itme tipli fırınlarda fırın içindeki tüm slablar fırın şarj kısmından itilerek ilerletilmektedir. Eski fırınlar bu tiptedir. İtme sırasında slabların alt yüzeyleri skidlere sürtündüğünden slabların alt yüzeylerinde kalite problemleri olabilmektedir. Ayrıca itme eylemi için slablar birbirine temas ettiklerinden dolayı birbirine yapışma problemleriyle de karşılaşılabilir. Bu fırınların aksine yeni dizayn edilen fırınlarda yürüyen taban mekanizması kullanılmaktadır. Bu mekanizmada sabit ve hareketli olmak üzere iki tip skid tipi vardır. Bu skidler fırının yüksek sıcaklığından zarar görmemesi için içlerindeki borularda dolaşan su ile soğutulmaktadır.



Şekil 3.1 : 4.Slab Fırını ısıtma kontrol ekranı.



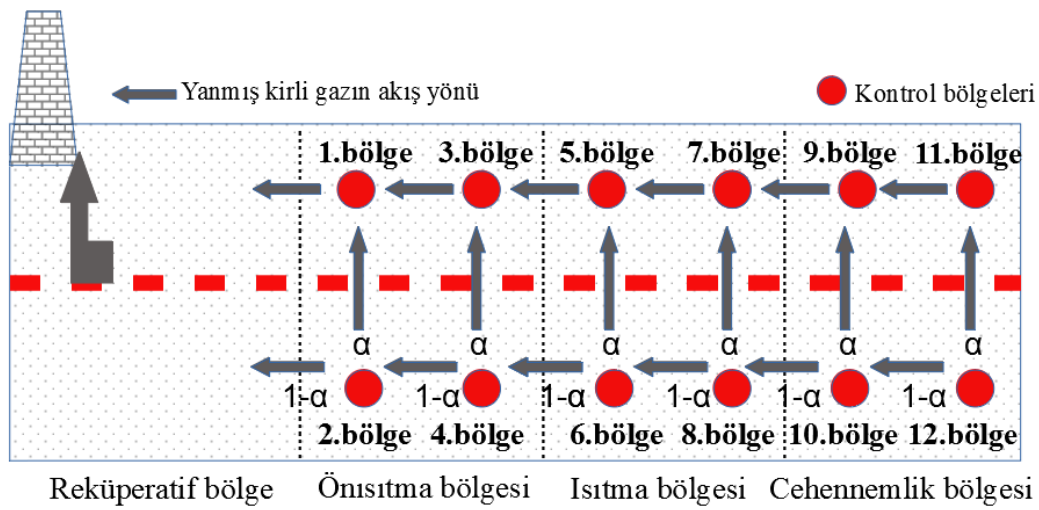
Şekil 3.2 : 4.Slab Fırını yürüyen taban hareketi.

Şekil 3.2’de görüleceği üzere slablar ekranda gri renkle gösterilen sabit skidler üzerine konulmaktadır. Slablar özel bir malzeme olan skidlerin üzerinde durmaktadırlar. Yürüyen tabanda slablar önce hidrolik silindirler ile sabit skidlerin üzerinden yukarı kaldırılarak hareketli skidlerin üzerine alınmakta ve sonra yatay silindirler ile ileriye doğru taşınmaktadırlar. Daha sonra dikey silindirler slabları aşağı doğru yavaşça sabit skidlerin üzerine bırakarak “0” başlama pozisyonuna geri gelmektedir. Bu sabit ve hareketli skidler ve skidleri taşıyan borular suyla soğutulmaktadırlar. Su soğutmalı boruların fırın içinde kalan kısımları refrakter ve kaowool dediğimiz özel seramik fiber battaniye malzemelerle de sarılarak 1200°C civarı olan fırın sıcaklığından korunmaktadırlar.

Slab fırınlarında 3 şekilde ısı transferi yapılmaktadır. Bunlar direkt yakıcıların alevinden radiation olarak tabir edilen ışımayla, kirli gazın sıcaklığıyla slabların yüzeyine konveksiyon yoluyla ve slabların birbiri ile temasıyla birbirine aktardıkları iletim yoluyla ısı transferleridir. Bizim uygulama fırınımız yürüyen tabanlı slab fırını olduğundan slablar birbiri ile temas etmemektedir. Dolayısıyla iletim yoluyla transferi gözardı edebiliriz. Şekil 3.3’de kirli gazın bölgeler arasındaki yayılımını görmekteyiz. Kirli gaz alt bölgelerden üst bölgelere ve yan bölgelere geçiş yaparak konveksiyon yoluyla slabları ısıtmaktadır. Bölgeler arasındaki bu geçiş miktarı α olarak belirlediğimiz 0 ile 1 aralığında değişen bir katsayı oranında olmaktadır. Buna “form

faktöründe” diyebiliriz. Bu faktör normalde fırın parametrelerinin ayarı aşamasında belirlenmektedir.

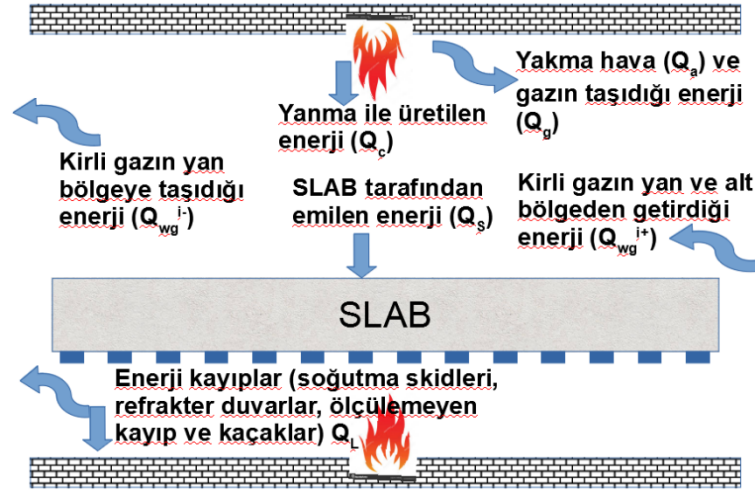
Isıtma fırınlarında enerji tasarrufuna yönelik iyileştirmeler için öncelikle doğru ve güvenilir bir model elde etmek önemlidir. Çünkü fırın prosesinin doğrusal olmaması, büyük ölü zaman gecikmelerine sahip olması, fırın dinamiklerindeki değişimler ve belirsiz faktörlerin çok fazla etkin olduğu bu fırın proseslerinde daima en büyük problemlerden birisi modelleme olmuştur. Bundan dolayı bütün parametrelerin ele alındığı sağlam bir model oluşturulmaya çalışılmıştır. Raporun ilerleyen bölümünde fırın bölgesi enerji dengesini temel alan bir model oluşturulacaktır.



Şekil 3.3 : 4.Slab Fırını bölgeleri kirli gaz akış şeması.

3.1 Fırın Bölgesi Enerji Dengesi

Enerji devinimi yasalarına göre bir sisteme giren enerji ile depolanan ve çıkan enerji birbirine eşittir (Zhang ve diğ., 2002). Fırının tüm bölgeleri için bu yasa uygulanmıştır. Bölgeye giren ve çıkan enerjiler şekil 3.4’de gösterilmiştir. Denkem 3.1’de yukarıda verilen ısı modellerindeki T_w , T_g notasyonu ile değiştirilmiştir, çünkü duvarda oluşan bölge sıcaklığı gaz akışı ile oluşmaktadır ve aşağıdaki modelde de gaz akışına göre formülize edilmiştir. Yani fırındaki bölge sıcaklıkları yan duvarlarda bulunan termokupllar ile ölçülerek kontrol edilmekte ve modele dahil edilmektedir. Şekil 1.3’de bulunan tavan termokuplları ise kirli gaz sıcaklığının ölçümü için kullanılmakta ve Seviye-2 kontrol katmanında slabların ısınma termal modeli hesaplamaları için kullanılmaktadır.



Şekil 3.4 : Bir bölgedeki enerji dengesi.

$$(Q_c + Q_a + Q_g + Q_{wg}^{i+}) - (Q_s + Q_L + Q_{wg}^{i-}) = 0 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'deki terimler aşağıdaki formüller ile elde edilir. Tüm bölgeler için aynı formüller geçerli olduğu için, denklemler i. bölge için oluşturulmuştur.

1. Bölgeye yanma sonucu giren enerji (Q_c),

$$Q_c = F_{fi} \cdot H_f \quad (3.2)$$

formülü ile elde edilir, bu formülde F_{fi} , i. bölgenin gaz akış miktarı [m^3 /saat] ve H_f , kok gazın yanmasından ortaya çıkan ısı enerjisi oranı [W/m^3]’dır.

2. Bölgeye yakma havasının getirdiği enerji (Q_a),

$$Q_a = F_{fi} \cdot R_i \cdot c_{pa} \cdot T_a \quad (3.3)$$

formülü ile elde edilir. Bu formülde, R_i , i. bölgenin hava/gaz oranı c_{pa} , yakma havası spesifik ısı indeksi [$W/(K.m^3)$] ve T_a , yakma hava sıcaklığı [K]’dır.

3. Bölgeye kok gazının getirdiği enerji, Q_g

$$Q_g = F_{fi} \cdot c_{fg} \cdot T_{fg} \quad (3.4)$$

formülü ile elde edilir. Bu formülde c_{fg} , kok gazı spesifik ısı indeksi [$W/(K.m^3)$] ve T_{fg} , kok gazı sıcaklığı [K]’dır.

4. Slablar tarafından absorbe edilen enerji, (Q_s)

$$Q_S = \sum_{k=1}^N \frac{A_k}{2} \cdot q_k \quad (3.5)$$

formülü ile elde edilir. Bu formülde N , bölgedeki slab sayısı ve A_k bölgedeki k . slabin yüzey alanı [m^2] ve q_k , slab yüzeyinin ışınlımsal ısı akısı [W/m^2]’dır.

5. Bölgeye kirli gaz tarafından getirilen ve çıkan kirli gazın götürdüğü net enerji, ($Q_{wg,i}$) ,

$$Q_{wg,i} = Q_{wg}^{i+} - Q_{wg}^{i-} \quad (3.6)$$

formülü ile elde edilir. Bu formülde, Q_{wg}^{i+} , i . bölgeye yan bölgelerden kirli gaz tarafından gelen enerji ve Q_{wg}^{i-} , i . bölgeden yan bölgelere kirli gaz tarafından çıkarılan enerjidir.

Denklem 3.6’yı, tüm bölgeler için genişlettiğimizde denklem 3.7’yi elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} Q_{wg,1} \\ Q_{wg,2} \\ Q_{wg,3} \\ Q_{wg,4} \\ Q_{wg,5} \\ Q_{wg,6} \\ Q_{wg,7} \\ Q_{wg,8} \\ Q_{wg,9} \\ Q_{wg,10} \\ Q_{wg,11} \\ Q_{wg,12} \end{bmatrix} = (1 + R) \begin{bmatrix} Q_{1,3} + Q_{1,2} - Q_{1-} \\ Q_{2,4} - Q_{2-} \\ Q_{3,5} + Q_{3,4} - Q_{3-} \\ Q_{4,6} - Q_{4-} \\ Q_{5,7} + Q_{5,6} - Q_{5-} \\ Q_{6,8} - Q_{6-} \\ Q_{7,9} + Q_{7,8} - Q_{7-} \\ Q_{8,10} - Q_{8-} \\ Q_{9,11} + Q_{9,10} - Q_{9-} \\ Q_{10,12} - Q_{10-} \\ Q_{11,12} - Q_{11-} \\ -Q_{12-} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$i,j=1,2,...,12$ ve olmak üzere $Q_{i,j}$, i ’nin komşu bölgeleri j ’den i bölgesine kirli gaz ile taşınan enerjiyi, Q_{i-} ise i bölgesinden kirli gaz tarafından çıkarılan enerjiyi ifade etmektedir. Denklem 3.7’deki bölgeden çıkan enerjiye karşı düşen Q_{i-} terimlerinin açık ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$Q_{i-} = Q_{wg}^{i-} = c_{pgi} \cdot \Phi_i \cdot T_{gi} \quad (3.8)$$

Bu ifadede, c_{pgi} , kirli gaz spesifik ısı indeksi [$W/(K.m^3)$] ve Φ_i , bölgedeki kirli gaz akışı (bölgenin hacmine göre) [$m^3/saat$]’dır.

Bölgeler arası geçişler $Q_{i,j}$ şekil 3.3'deki kirli gaz akışına göre oluşturulmalıdır. Çift sayılı bölgeler alt bölgeler, tek sayılı bölgeler üst bölgelerdir. Kirli gazın taşıdığı enerji matrisi oluştururken buna dikkat etmek gerekmektedir. Bölgeye kirli gazın taşıdığı enerji,

(1) Üst bölgelere alt ve yan komşu bölgelerden gelen enerji aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

- Komşu alt bölgeden (i+1) üst bölgeye (i. bölge) kirli gazın taşıdığı enerji, α geçiş katsayısı 0 ve 1 aralığında serbest seçilebilir.

$$Q_{wg}^{i+1} = Q_{i,i+1} = c_{pg(i+1)} \cdot \alpha \cdot \Phi_{(i+1)} \cdot T_{g(i+1)} \quad (3.9)$$

- Komşu üst bölgeden (i+2) üst bölgeye (i. bölge) kirli gazın taşıdığı enerji,

$$Q_{wg}^{i+2} = Q_{i,i+2} = c_{pg(i+2)} \cdot \Phi_{(i+2)} \cdot T_{g(i+2)} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki formüller göz önünde bulundurularak, i. üst bölgeye toplam gelen enerji

$$Q_{wg}^{i+} = Q_{wg}^{i+2} + Q_{wg}^{i+1} \quad (3.11)$$

formülü ile hesaplanır.

(2) Alt bölgelere diğer komşu bölgelerden gelen enerji

- Isınan hava direkt yukarı çıktığından üst bölgeden alt bölgeye herhangi bir geçiş olmamaktadır. Dolayısıyla (i+2). komşu üst bölgeden i. alt bölgeye geçiş yoktur.

$$Q_{wg}^{i+1} = 0 \quad (3.12)$$

- Komşu alt bölgeden (i+1) alt bölgeye (i.bölge) kirli gazın taşıdığı enerji

$$Q_{wg}^{i+2} = Q_{i,i+2} c_{pg(i+2)} \cdot (1 - \alpha) \cdot \Phi_{(i+2)} \cdot T_{g(i+2)} \quad (3.13)$$

Toplamda i. alt bölgeye toplam gelen enerji aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{wg}^{i+} = Q_{wg}^{i+2} \quad (3.14)$$

Bölgeden çıkan enerjileri de kattığımızda üst bölgeye kirli gazın bıraktığı net enerji,

$$Q_{wg}^i = Q_{wg}^{i+2} + Q_{wg}^{i+1} - Q_{wg}^{i-} \quad (3.15)$$

formülü ile elde edilir. Alt bölgeye ise kirli gazın bıraktığı net enerji,

$$Q_{wg}^i = Q_{wg}^{i+2} - Q_{wg}^{i-} \quad (3.16)$$

formülü ile elde edilir.

Her bölgedeki kirli gaz akış oranlarını (Φ_i), tüm bölgeler için şekil 3.3'e göre ardışıl bir şekilde oluşturduğumuzda aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\begin{aligned} \Phi_{12} &= F_{f12} \\ \Phi_{11} &= F_{f11} + \alpha F_{f12} \\ \Phi_{10} &= F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12} \\ \Phi_9 &= F_{f9} + (F_{f11} + \alpha F_{f12}) + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\ \Phi_8 &= F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.17)$$

Bu denklemi yukarıda bölgedeki kirli gaz enerji dengesine göre oluşturduğumuz denklem 3.8 ve denklem 3.16 arasındaki formüller ile birleştirdiğimizde 12.bölgeden başlayarak tüm diğer bölgeler için elde ederiz. Elde edilen $Q_{i,j}$, Q_{i-} kirli gaz formülleri detaylı şekilde Ek A'da verilmiştir.

6. i.bölgeden çıkan enerji kayıpları, $Q_{L,i}$

$$Q_{L,i} = Q_{mloss,i} + Q_{d,i} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'de, $Q_{d,i}$ ölçülemeyen kayıpları ifade etmektedir. $Q_{mloss,i}$ ise bölgedeki refrakter duvar, yürüyen tabanın yatay ve dikey skidlerinin soğutulması kaynaklı ölçülebilen kayıpları göstermektedir. Bu kayıpları,

$$Q_{mloss,i} = Q_{L,wall,i} + Q_{L,tube,i} + Q_{L,beam,i} \quad (3.19)$$

formülü ile oluşturulabilir.

(1) Refrakter duvar tarafında absorbe edilen enerji kaybı,

$$Q_{L,wall,i} = A_{wall,i} \cdot q_{L,wall,i} \quad (3.20)$$

$A_{wall,i}$, duvar yüzey alanı, sırasıyla $L_{zone,i}$, $H_{zone,i}$ ve $W_{zone,i}$ i.bölgenin uzunluğu, yüksekliği ve genişliği olmak üzere aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$A_{wall,i} = L_{zone,i} \cdot (2 \cdot H_{zone,i} + W_{zone,i}) \quad (3.21)$$

$q_{L,wall,i}$, yüzey duvar alanı başına [W/m^2] cinsinden referans birim enerji kaybını ifade etmektedir. Refrakter duvar kayıplar alt-üst tüm bölgeler için geçerlidir. Bölgerin yükseklik, genişlik ve boy bilgilerini çizelge 3.1 ve 3.2’de bulabiliriz.

(2) Tube (su tankları) soğutması kayıpları,

$$Q_{L,tube,i} = L_{tube,i} \cdot q_{L,tube,i} \quad (3.22)$$

$L_{tube,i}$, i. bölgedeki tube’lerin toplam uzunluğudur. n_{beam} , n_{post} , ve l_{tube} sırasıyla toplam beam sayısı, post sayısı ve tube uzunluğu olmak üzere aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$L_{tube,i} = n_{beam} \cdot n_{post} \cdot l_{tube} / 2 \quad (3.23)$$

$q_{L,tube,i}$, yüzey tube alanı başına [W/m^2] cinsinden referans birim enerji kaybını ifade etmektedir. Tube kayıpları sadece alt bölgeler için geçerlidir. Çünkü yürüyen taban alt bölgede yer almaktadır. Tube uzunluğunu 2’ye böldük çünkü su tankları sadece hareketli borularda yer almaktadır. Bölgedeki post sayısı $n_{post} = L_{zone}/post_{step}$ formülü ile hesaplanır. Post bilgileri çizelge 3.1’de verilmiştir.

(3) Yatay (beam) ve dikey (post) boruların kayıpları,

$$Q_{L,beam,i} = A_{beam,i} \cdot n_{beam} \cdot q_{L,beam,i} \quad (3.24)$$

$A_{beam,i}$ ve n_{beam} sırasıyla beam yüzey alanı ve bölgedeki beam sayısıdır. Beam yüzey alanı, r_{beam} ve H_{post} sırasıyla beam çapı ve post yüksekliği olmak üzere aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$A_{beam,i} = \pi \cdot r_{beam,i} \cdot n_{beam} \cdot (L_{zone,i} + H_{post} \cdot n_{post}) \quad (3.25)$$

$q_{L,beam,i}$, yüzey beam alanı başına [W/m^2] cinsinden referans birim enerji kaybını ifade etmektedir (Çizelge 3.1).

Tüm bu ölçülebilen kayıplar toplandıktan sonra, $Q_{mloss,i}$ toplam kaybın bölge sıcaklığına göre düzeltilmesi gerekmektedir. Çünkü yüzey alanı başına hesaplanan birim enerji kayıpları $T_{ref} = 1000^\circ C$ 'ye göre hesaplanmıştır.

$$Q_{mloss,i} = Q_{mloss,i} \cdot \left(\frac{T_{set,gi} - KC}{T_{ref}} \right)^2 \quad (3.26)$$

$T_{set,gi}$, bölgelerin set referans değerleridir. Model çıktıları ve enerji denklemleri Kelvin cinsinden hesaplanmaktadır. Enerji kayıpları referans değeri Celcius cinsinden ölçüldüğünden, enerji kayıplarını denklemlerde kullanabilmek için $KC = 273.15$ dönüşümü yapılmıştır.

Yukarıdaki kayıplara ilaveten, ölçülemeyen kayıpları enerji denklemine dahil edebilmek için $i = 1, \dots, 12$ olmak üzere denklem 3.18'deki $Q_{d,i}$ terimi tanımlanmıştır. Fırındaki ölçülemeyen kayıplar kapakların açılmasından, fırın içinde biriken tufallerden, soğutma borularındaki kaçaklardan, refrakter duvar dökülmelerine bağlı duvar kayıplarının artması olabileceği gibi, fırın basıncındaki ve dinamik davranışlardaki değişimlerin getirdiği kayıplar da bu terimin içinde bulunmaktadır. Bu ölçülemeyen bozucular bölgedeki enerji dengesini direkt etkileyeceğinden, bir kestirici tarafından kestirilerek enerji denklemine ilave edilmelidir.

Bölgeye giren çıkan enerjinin farkının pozitif veya negatif oluşuna göre bölge sıcaklığı artmakta veya azalmaktadır. Buna göre $i = 1, \dots, 12$; c_{pgi} kirli gaz spesifik ısı indeksi, V_i [m^3] bölgenin iç hacmi ve T_{gi} bölgenin Kelvin cinsinde sıcaklığı olmak üzere denklem 3.1'i aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$c_{pgi} \cdot V_i \cdot \frac{dT_{gi}}{dt} = Q_c + Q_g + Q_a - Q_s - Q_L + Q_{wg} \quad (3.27)$$

Bu denklemi tüm bölgelere genişlettiğimizde aşağıdaki fırın enerji denklemini elde ederiz. Bu denklemde i bölge indeksi olmak üzere, ζ kok gazının kalorifik düzeltme katsayı indeksi, H_f kok gazı enerji kapasitesi oranı [W/m^3], R hava gaz oranı, T_a yakma hava sıcaklığı [K], c_{pa} yakma hava spesifik ısı indeksi [$W/(K.m^3)$], c_{fg} yakıt gazı spesifik ısı indeksi [$W/(K.m^3)$], T_{fg} yakıt gazı sıcaklığı [K], F_{fi} bölgeye verilen kok gazı miktarı [m^3/sn], N_i bölgedeki slab sayısı, A_{ki} bölgedeki k.slabin yüzey alanı

ve q_{ki} slabın yüzey ısıtım ısı akısıdır. q_{ki} , ε emissivite katsayısı, σ Stefan-Boltzman katsayısı, T_{gi} bölge sıcaklığı, T_{ski} bölgedeki k.slabın yüzey sıcaklığı olmak üzere $q_{k,i} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{gi}^4 - T_{ski}^4)$, $i = 1,2,3 \dots, 12$ denkleminde elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} c_{pg1} \cdot V_1 \cdot \frac{dT_{g,1}}{dt} \\ c_{pg2} \cdot V_2 \cdot \frac{dT_{g,2}}{dt} \\ c_{pg3} \cdot V_3 \cdot \frac{dT_{g,3}}{dt} \\ c_{pg4} \cdot V_4 \cdot \frac{dT_{g,4}}{dt} \\ c_{pg5} \cdot V_5 \cdot \frac{dT_{g,5}}{dt} \\ c_{pg6} \cdot V_6 \cdot \frac{dT_{g,6}}{dt} \\ c_{pg7} \cdot V_7 \cdot \frac{dT_{g,7}}{dt} \\ c_{pg8} \cdot V_8 \cdot \frac{dT_{g,8}}{dt} \\ c_{pg9} \cdot V_9 \cdot \frac{dT_{g,9}}{dt} \\ c_{pg10} \cdot V_{10} \cdot \frac{dT_{g,10}}{dt} \\ c_{pg11} \cdot V_{11} \cdot \frac{dT_{g,11}}{dt} \\ c_{pg12} \cdot V_{12} \cdot \frac{dT_{g,12}}{dt} \end{bmatrix} = \zeta (H_f + c_{pa} \cdot R \cdot T_a + c_{fg} \cdot T_{fg}) \begin{bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \\ F_{f3} \\ F_{f4} \\ F_{f5} \\ F_{f6} \\ F_{f7} \\ F_{f8} \\ F_{f9} \\ F_{f10} \\ F_{f11} \\ F_{f12} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$- \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{N_1} A_{k1} \cdot q_{k,1} \\ \sum_{k=1}^{N_2} A_{k2} \cdot q_{k,2} \\ \sum_{k=1}^{N_3} A_{k3} \cdot q_{k,3} \\ \sum_{k=1}^{N_4} A_{k4} \cdot q_{k,4} \\ \sum_{k=1}^{N_5} A_{k5} \cdot q_{k,5} \\ \sum_{k=1}^{N_6} A_{k6} \cdot q_{k,6} \\ \sum_{k=1}^{N_7} A_{k7} \cdot q_{k,7} \\ \sum_{k=1}^{N_8} A_{k8} \cdot q_{k,8} \\ \sum_{k=1}^{N_9} A_{k9} \cdot q_{k,9} \\ \sum_{k=1}^{N_{10}} A_{k10} \cdot q_{k,10} \\ \sum_{k=1}^{N_{11}} A_{k11} \cdot q_{k,11} \\ \sum_{k=1}^{N_{12}} A_{k12} \cdot q_{k,12} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{L,1} \\ Q_{L,2} \\ Q_{L,3} \\ Q_{L,4} \\ Q_{L,5} \\ Q_{L,6} \\ Q_{L,7} \\ Q_{L,8} \\ Q_{L,9} \\ Q_{L,10} \\ Q_{L,11} \\ Q_{L,12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{wg,1} \\ Q_{wg,2} \\ Q_{wg,3} \\ Q_{wg,4} \\ Q_{wg,5} \\ Q_{wg,6} \\ Q_{wg,7} \\ Q_{wg,8} \\ Q_{wg,9} \\ Q_{wg,10} \\ Q_{wg,11} \\ Q_{wg,12} \end{bmatrix}$$

3.2 Fırın Dinamik Modeli Durum Uzak Denklemleri

Bölüm 3.1’de modellediğimiz ve denklem 3.28’da verilen doğrusal olmayan sistem modelinin $\dot{x} = f_c(x) + g_c(x)u$ ve $y = h(x)$ şeklinde durum uzak denklemlerini oluşturalım. x durum vektörü ve y çıkış sinyali aşağıdaki gibi tanımlayalım.

$$\begin{aligned} x_i &= c_{pgi} \cdot V_i \cdot T_{gi} \\ y_i &= T_{gi} = \frac{x_i}{c_{pgi} V_i} \\ i &= 1, 2, 3 \dots, 12 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Denklemden c_{pgi}, V_i, T_{gi} , değişkenleri sırasıyla yakıt gazı spesifik indeksi, fırının bölge hacmi ve fırının bölgesinin aktüel sıcaklığını ifade etmektedir.

Denklem 3.28’da gaz akış miktarını kontrol işareti olarak ele alırsak, $u_i = F_{fi}$, dönüşümü yaptığımızda $g_c(x)$ matrisi aşağıdaki formda olacaktır.

$$\begin{aligned} g_c(x) &= \zeta(g_1 \cdot I_{12} + g_2(x)) \\ g_1 &= H_f + c_{pa} \cdot R \cdot T_a + c_{fg} \cdot T_{fg} \\ g_2(x) &= (1 + R) \cdot [g_{2_1}(x); g_{2_2}(x); \dots; g_{2_{12}}(x)]^T \end{aligned} \quad (3.30)$$

Burada g_1 matrisi x durum vektöründen bağımsız sabit bir değişken olduğundan, $g_c(x)$ matrisine ekleyebilmemiz için 12x12 diagonal birim matris ile çarpmamız gerekmektedir. Kontrol işareti ve x durum vektörleri 12x1 vektör boyutunda olduğundan, $g_c(x)$ matrisi 12x12 boyutunda oluşturulmak zorundadır. Bu boyut 12 bölgenin birbiriyle etkileşimi düşünüldüğünde anlamlı olacaktır.

$g_2(x)$, matrisini elde edebilmek için, Ek A.’da kirli gazın bölgeler arasındaki etkileşiminden elde ettiğimiz ve detaylı verdiğimiz denklem içindeki F_{fi} yerine u_i ve T_{gi} yerine x_i/k_{yi} dönüşümlerini yaparak denklem 3.28’de yerine koymamız gerekmektedir. Bu işlemden sonra kontrol işaretlerini ayrıştırma işlemi yaparak x durum vektörlerini ve u kontrol işaretini bir yerde toplama işlemleri yapacağız. Tasarladığımız modelde 12 bölge olduğundan bu ayrıştırma işlemleri çok karmaşık olmakta ve oldukça uzun vakit almaktadır. Bu ayrıştırma işleminden sonra Ek-B’de detaylı olarak verdiğimiz $g_2(x)$ matrisini elde ederiz. Ek-B’de verilen formülü tek

yatay sayfaya sığdırmak için β_α değerlerini aşağıdaki gibi oluşturduk. Bu dönüşümleri uygulama için, m-dosyalarında çok uzun formüller olmaması ve debug kolaylığı için MATLAB’da da kullandık.

$$\begin{aligned}
k_i &= V_i \\
\beta_{\alpha 1} &= \alpha + (\alpha(1 - \alpha)) = \alpha(2 - \alpha) \\
\beta_{\alpha 2} &= \alpha(2 - \alpha + (1 - \alpha)^2) \\
\beta_{\alpha 3} &= \alpha(2 - \alpha + (1 - \alpha)^2 + (1 - \alpha)^3) \\
\beta_{\alpha 4} &= \alpha(2 - \alpha + (1 - \alpha)^2 + (1 - \alpha)^3 + (1 - \alpha)^4) \\
\beta_{\alpha 5} &= \alpha(2 - \alpha + (1 - \alpha)^2 + (1 - \alpha)^3 + (1 - \alpha)^4 + (1 - \alpha)^5)
\end{aligned} \tag{3.31}$$

Şimdi de $f_c(x)$ fonksiyonun oluşturalım. Denklem 3.28’de ki slablar tarafından absorbe edilen enerjiyi aşağıdaki gibi açalım.

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^{N_i} A_{i,k} \cdot q_{i,k} &= \varepsilon \cdot \sigma \sum_{k=1}^{N_i} A_{i,k} \cdot T_{gi}^4 - \varepsilon \cdot \sigma \sum_{k=1}^{N_i} A_{i,k} \cdot T_{ski}^4 \\
&= \frac{\varepsilon \cdot \sigma}{k_{yi}^4} \sum_{k=1}^{N_i} A_{i,k} \cdot x_i^4 - \varepsilon \cdot \sigma \sum_{k=1}^{N_i} A_{i,k} \cdot T_{ski}^4 \\
&= \beta_{Ai} \cdot x_i^4 - dm_i
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Formülde $\beta_{Ai} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma}{k_{yi}^4} \sum_{k=1}^{N_i} A_{i,k}$ ve $dm_i = \varepsilon \cdot \sigma \sum_{k=1}^{N_i} A_{i,k} \cdot T_{ski}^4$ dönüşümleri yaparak sistem denklemi formatına daha uygun hale getirdik. Bu denklemlerde $A_{i,k}$ ve T_{ski} sırasıyla bölgedeki k . slabın yüzey alanı ve slab yüzey sıcaklıklarıdır. Slab bilgileri Seviye-2 kontrol katmanı üzerinden elde edilmektedir. Slabların yüzey alanları da Seviye-2 kontrol katmanında hesaplanarak veritabanına atılmaktadır.

Yukarıdaki durum denklemlerine ölçülemeyen bozucuları ifade eden θ_{di} bozucusunu ve ölçülebilen bozucuları ifade eden $dm_{loss,i} = Q_{mloss,i}$ bozucuları eklediğimizde ve oluşturduğumuz $f_c(x)$ ve $g_c(x)$ sistem fonksiyonları ile birleştirdiğimizde aşağıdaki i . bölgeye ilişkin durum denklemini elde ederiz.

$$\dot{x}_i = -\beta_{Ai} x_i^4 + dm_i + \zeta(g_1 I_{12} + g_2(x)) u_i - dm_{loss,i} - \theta_{di} \tag{3.33}$$

Bu denklemi 12 bölge için açtığımızda denklem 3.34’deki matris formundaki durum uzay denklemi oluşur.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \end{bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} \beta_{A1}x_1^4 \\ \beta_{A2}x_2^4 \\ \beta_{A3}x_3^4 \\ \beta_{A4}x_4^4 \\ \beta_{A5}x_5^4 \\ \beta_{A6}x_6^4 \\ \beta_{A7}x_7^4 \\ \beta_{A8}x_8^4 \\ \beta_{A9}x_9^4 \\ \beta_{A10}x_{10}^4 \\ \beta_{A11}x_{11}^4 \\ \beta_{A12}x_{12}^4 \end{bmatrix}}_{f_c(x)} + \zeta \underbrace{\begin{pmatrix} g_{2_1}(x) \\ g_{2_2}(x) \\ g_{2_3}(x) \\ g_{2_4}(x) \\ g_{2_5}(x) \\ g_{2_6}(x) \\ g_{2_7}(x) \\ g_{2_8}(x) \\ g_{2_9}(x) \\ g_{2_{10}}(x) \\ g_{2_{11}}(x) \\ g_{2_{12}}(x) \end{pmatrix}}_{g_c(x)} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \\ u_{10} \\ u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dm_1 \\ dm_2 \\ dm_3 \\ dm_4 \\ dm_5 \\ dm_6 \\ dm_7 \\ dm_8 \\ dm_9 \\ dm_{10} \\ dm_{11} \\ dm_{12} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$- \begin{bmatrix} dm_{loss1} \\ dm_{loss2} \\ dm_{loss3} \\ dm_{loss4} \\ dm_{loss5} \\ dm_{loss6} \\ dm_{loss7} \\ dm_{loss8} \\ dm_{loss9} \\ dm_{loss10} \\ dm_{loss11} \\ dm_{loss12} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_{d1} \\ \theta_{d2} \\ \theta_{d3} \\ \theta_{d4} \\ \theta_{d5} \\ \theta_{d6} \\ \theta_{d7} \\ \theta_{d8} \\ \theta_{d9} \\ \theta_{d10} \\ \theta_{d11} \\ \theta_{d12} \end{bmatrix}$$

Sistem çıkış vektörü de denklem 3.29'daki dönüşüme göre aşağıdaki formda olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_{pg1} \cdot V_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_{pg2} \cdot V_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{c_{pg12} \cdot V_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{12} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Sistem denklemindeki f_c ve g_c fonksiyonları,

$$\begin{aligned} f_c(x) &= -\beta_A x^4 + dm - dm_{loss} \\ g_c(x) &= \zeta(g_1 I_{12} + g_2(x)) \end{aligned} \quad (3.36)$$

şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

T , örnekleme zamanı olmak üzere $\dot{x}_i = (x_i(k+1) - x_i(k))/T$ dönüşümü yapıldığında, $i = 1, 2, 3 \dots, 12$ olmak üzere aşağıdaki ayrık durum uzay denklemini elde edilir.

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + T(-\beta_{Ai} x_i^4(k) + dm_i \\ &\quad + \zeta(g_1 \cdot I_{12} + g_2(x(k))) u_i(k) \\ &\quad - dm_{loss,i} - \theta_{di}) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Fırındaki 12 bölgenin tümü için ayrık durum-uzay denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k) + g(x_k) \cdot u_k + \theta_{dd_k} \\ f(x_k) &= x_k - T \cdot \beta_A \cdot x_k^4 + T \cdot dm_k - T \cdot dm_{loss_k} \\ g(x_k) &= T \cdot \zeta \cdot (g_1 \cdot I_{12} + g_2(x_k)) \\ \theta_{dd_k} &= -T \cdot \theta_{d_k}, \theta_{d_k} = [\theta_{d1_k}, \dots, \theta_{d12_k}] \end{aligned} \quad (3.38)$$

Bu denklemde $x_{k+1} = x(k+1)$, $x_k = x(k)$ ve $u_k = u(k)$ 'dir. Burada unutmamamız gereken bir durum da sistem giriş ve çıkışlarında kısıtların olduğudur. Sistem çıkışının kısıtı yumuşak bir kısıt, kontrol işaretinin kısıtı ise valfi mekanik olarak %0-100 aralığı dışında çalıştırılmayacağı için katı kısıtlar olarak ele alınmalıdır. Fırın sisteminde alınan verilerde kontrol işareti % değer ile ifade edilmektedir. Bu verilerdeki kontrol işareti gaz akış oranları ile oranlanması gerekmektedir. Çünkü yukarıda elde edilen sistem denklemlerinde kullanılan gaz akış miktarları çizelge 3.2'de Nm^3/saat cinsinden sisteme dahil edilmektedir. Bunun için kontrol işareti sisteme dahil edilmeden önce, % u fırın sisteminden alınan gerçek kontrol işareti olmak üzere, $u_i = F_{fi} = \%u \cdot u_{max}$ dönüşümü yapılmalıdır. Ayrık denklemde T örnekleme periyoduna göre giriş işaretleri aşağıdaki şekilde normalize edilmelidir. Kontrol işareti elde edilen basamak testleri sonucunda hesaplanan ölü zaman 50 saniye ile modele girilmelidir.

$$u_i(k) = \frac{u_i}{3600} \cdot T \cdot z^{-50} \quad (3.39)$$

Çizelge 3.1' de verilen parametreler sisteme dahil edilirken ilgili birim dönüşümleri yapılmalıdır. Santigrad derece olarak verilen veriler Kelvin olarak, kalori olarak

verilen parametreler ise Joule olarak dönüştürülmelidir. Çizelge 3.1’de parametreler orjinal birimlerine ve açıklamalarına göre çizelgeye eklenmişlerdir.

Çizelge 3.1 : Önemli fırın parametreleri.

Parametre	Değeri	Birimi	Açıklama
$H_{f,cog}$	17995	kJ/Nm^3	Gazın yanması sonucu salınan enerji oranı
σ	$5.675e^{-8}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$	Sigma
ε	0.80		Epsilon
T_a	450	$^{\circ}\text{C}$	Referans yakma hava sıcaklığı
T_{fg}	20	$^{\circ}\text{C}$	Referans kok gazı sıcaklığı
T_{ref}	1000	$^{\circ}\text{C}$	Isı kayıpları için referans sıcaklık
c_{pa}	1080	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Yakma hava spesifik ısı indeksi
c_{fg}	0.33	$\text{kcal}/(\text{m}^3 \cdot \text{C})$	Yanma gazı spesifik ısı indeksi
ρ_{oa}	0.99	kg/m^3	Yakma hava yoğunluğu
ρ_{cg}	0.484	kg/m^3	Kok gazı yoğunluğu
R_i	4.44-5.10		Hava/gaz oranı
ζ	0.9-1.1		Kok gazı kalorifik değer düzeltme katsayısı
α	0.5		Kirli gaz dağılım oranı
KC	273.15		Kelvin Santigrad derece dönüşümü
$q_{L,wall,i}$	1200	W/m^2	Duvar enerji kaybı referans birim değeri
$q_{L,tube,i}$	10000	W/m^2	Tube enerji kaybı referans birim değeri
$q_{L,beam,i}$	4000	W/m^2	Beam enerji kaybı referans birim değeri
n_{beam}	14		Her bölgedeki beam sayısı
$post_{step}$	2.6	m	
l_{tube}	0.85	m	Skid altındaki su tankının boyu
r_{beam}	0.11	m	Beam çapı
H_{post}	2.4	m	Post yüksekliği

Çizelge 3.2’de ise fırına ait kapasite, boyut gibi bilgilerle birlikte fırındaki bölgelerin hacimleri ve maksimum gaz akış miktar bilgileri verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Fırın bilgileri.

Parametre	Değeri	Birimi	Açıklama
L W H	30.5 13.3 3.74	m	Fırın boyu, genişliği, yüksekliği
H_{top_zones}	1.80	m	Fırın üst bölgelerinin yükseliği
H_{bottom_zones}	1.94	m	Fırın alt bölgelerinin yükseliği
$Zone_{pos_start}$	[13.805; 16.730; 19.180; 21.670; 24.015; 26.490]	m	Bölge başlangıç pozisyonları
$Zone_{pos_end}$	[16.730; 19.180; 21.670; 24.015; 26.490; 30.500]	m	Bölge bitiş pozisyonları
V_i	[70.024; 75.470; 58.653; 63.215; 59.6101; 64.200; 56.140; 60.505; 59.251; 63.859; 95.999; 103.466]	m^3	Fırın bölgelerinin hacmi
u_{max}	[1264; 1348; 896; 959; 843; 875; 569; 706; 400; 464; 400; 580]	m^3/saat	Fırın bölgelerinin maksimum akış kapasiteleri

Bu bölümde oluşturulan ayrık durum uzayı modeli izleyen bölümde ölçülemeyen bozucular için kestirici tasarımında ve sonraki bölümde MPC tasarımında kullanılacaktır. MPC tasarımı için oluşturulan model literatürde oluşturulan çoğu modelden farklı olarak altı bölgeli değil mevcut sahada çalışan şekliyle 12 kontrol bölgeli olarak oluşturulmuştur. Bölgeler arası sıcaklık etkileşimi detaylı bir şekilde formülize edilerek modele girilmiştir. Bu modelde literatürde daha önce bu alanda kullanılmayan, daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımı ile ölçülemeyen bozucuların ve bilinmeyen dinamiklerin kestirimi yapılarak modele uyarlanmıştır. MPC tasarımı için oluşturulan modelin literatüre katkılarının detayları bölüm 1.3'de ele alınmıştır.





4. DALDIRMA ve DEĞİŞMEZLİK (I&I) YAKLAŞIMI

Daldırma ve Değişmezlik (I&I) yaklaşımı doğrusal olmayan sistemlerin uyarlamalı kontrolü ve kararlılığı için sürekli zaman alanında Astolfi ve Ortega tarafından literatüre sunulmuştur (Astolfi ve diğ. 2003). Yalçın ve Astolfi tarafından ayrık zamanlı sistemlerin uyarlamalı kontrolüne uygulanmıştır (Yalçın ve diğ. 2012). Bu bölümde I&I yaklaşımı kullanılarak, ζ parametresinin bilindiği ve bilinmeyen bozucuların kestirildiği durum için kestirici tasarımı yapılarak kestirici performansı incelenecektir.

ζ parametresi genelde belirli aralıkta seyretmektedir. Bu değer sahada anlık değiştiğinde yanma sistemini etkilemekte ve fırına normalden daha az veya fazla gaz girmesine sebep olmaktadır. Operatörler bu durumları yakıcı yanırlarından ve bölge sıcaklıklarından anladıklarında bu parametre değeri ile oynayarak ideal seviyeye doğru getirmeye çalışmaktadırlar. Parametrenin ölçümü için bazı gaz kalorik değer ölçüm cihazları bulunmasına rağmen kok gazının aşırı kirli olmasından dolayı online ölçüm sistemleri doğru çalışmamaktadır.

Slab fırını modelindeki denklem 3.18’de ifade edilen ısı kayıpları sistemde bozucu olarak tanımlanmaktadır. Bu bozucuların bazıları ölçülebilen bozuculardır. Kestirici tasarımı yapılacak bozucular ise fırın kapaklarının açılıp kapanması, refrakter duvar çatlakları, soğutma sistemindeki kaçaklar vb. gibi sebeplerden dolayı oluşan ısı kayıplarına sebep olan ve fırının modelindeki dinamik belirsizlikler sonucu ısıtma sistemini etkileyen ve sistem denklemlerinde θ_{di} notasyonu ile gösterilen ölçülemeyen bozuculardır.

Bu kestiriciler için öncelikle Değişmezlik ve Daldırmazlık yaklaşımına göz atalım.

4.1 Önbilgiler

Bu bölümde Yalçın ve Astolfi tarafından önerilen ayrık zaman daldırma ve değişmezlik parametre kestirici dizaynı temel alınacaktır (Yalçın ve diğ. 2012). Buradaki temel denklemler baz alınarak yukarıda ifade edilen bozucu problemi için kestirici tasarımı yapılacaktır. $x(k)$ durum vektörü, $u(k)$ kontrol vektörü, θ sabit bir

parametre olduğunu varsayarak aşağıdaki doğrusal olmayan sistemin ayrık denklemini ele alalım.

$$x_{k+1} = f_0(x_k) + f_1(x_k)\theta + g(x_k).u_k \quad (4.1)$$

Bu denklemde $x_{k+1} = x(k+1)$, $x_k = x(k)$ ve $u_k = u(k)$ olmak üzere f_0 , f_1 ve g , $f_0(0) = 0$ ve $f_1(0) = 0$ özelliğinde uygun boyutlarda fonksiyonlardır. İzleyen bölümlerde tüm ayrık zamanlı değişkenler için $*_{k\pm i} = *(k \pm i)$ notasyonu kullanılmıştır. Bu sistemin kestirici tasarımı problemi, sistemin durum yörüngelerinin sınırlı kalacağı ve $\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = 0$ özelliğini sağlayacak şekilde denklem (4.2)'de belirtilen α güncelleme kuralı ve u_k kontrol kuralının inşası problemidir.

$$\hat{\theta}_{k+1} = \alpha(x_k, \hat{\theta}_k), \quad u_k = v(x_k, \hat{\theta}_k) \quad (4.2)$$

Bu kontrol problemini çözmek için, kestirim hatası $z_k = \hat{\theta}_k - \theta + \check{\beta}(x_{k-1}, x_k)$ ve $z_k = \theta_{est_k} - \theta$ tanımlamaları yapılmıştır. $\check{\beta}(x_{k-1}, x_k) = \beta(x_{k-1})x_k$ olmak üzere bir sonraki adımdaki kestirim hatası $z_{k+1} = \hat{\theta}_{k+1} - \theta + \beta(x_k)x_{k+1}$ olarak oluşturulur. Böylece iki adım arasındaki kestirim hatalarının farkı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} z_{k+1} - z_k &= \hat{\theta}_{k+1} - \hat{\theta}_k + \beta(x_k)x_{k+1} - \beta(x_{k-1})x_k \\ &= \hat{\theta}_{k+1} - \hat{\theta}_k + \beta(x_k)f_1(x_k)\theta + \beta(x_k)(f_0(x_k) + g(x_k).u_k) \\ &\quad - \beta(x_{k-1})x_k \\ &= \hat{\theta}_{k+1} - \hat{\theta}_k + \beta(x_k)f_1(x_k)[\hat{\theta}_k + \beta(x_{k-1})x_k - z_k] \\ &\quad + \beta(x_k)(f_0(x_k) + g(x_k).u_k) - \beta(x_{k-1})x_k \end{aligned} \quad (4.3)$$

Güncelleme kuralı aşağıdaki denklem 4.4'deki gibi seçildiğinde,

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{k+1} &= \hat{\theta}_k - \beta(x_k)f_1(x_k)[\hat{\theta}_k + \beta(x_{k-1})x_k] \\ &\quad - \beta(x_k)(f_0(x_k) + g(x_k).u_k) + \beta(x_{k-1})x_k \end{aligned} \quad (4.4)$$

parametre kestirim hatasının dinamik denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$z_{k+1} = [I - \beta(x_k)f_1(x_k)]z_k \quad (4.5)$$

Eğer denklem 4.6'daki eşitsizliği sağlayan bir $\beta(x_k)$ fonksiyonu seçilirse kestirim hatası sifıra yakınsayacaktır.

$$\bar{\sigma}[I - \beta(x_k)f_1(x_k)] < 1 \quad (4.6)$$

Sonuç olarak kestirilen parametre denklem 4.4'ü kullanarak denklem 4.6'yı sıfıra götüren $\beta(x_k)$ seçimiyle aşağıdaki gibi elde edilecektir.

$$\theta_{est} = \hat{\theta} + \check{\beta}(x_{k-1}, x_k) \quad (4.7)$$

Fırın modeli üzerinden bu kestirim metodunu daha detaylı ele alalım.

4.2 Ölçülemeyen Bozucuların I&I ile Kestirilmesi

Bu bölümde ölçülemeyen θ_{di} bozucusunun kestirimi ele alınacaktır. Doğrusal olmayan sistemin ayrık uzay denklemi 3.38'ı tekrarlayalım. Burada θ_{dd} , θ_{di} bozucusunun örnekleme zamanı ile çarpılmış ayrık halidir.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f_0(x_k) + g(x_k) \cdot u_k + \theta_{ddk} \\ f_0(x_k) &= x_k - T \cdot \beta_A \cdot x_k^4 + T \cdot dm_k - T \cdot dm_{lossk} \\ g(x_k) &= T \cdot \zeta \cdot (g_1 \cdot I_{12} + g_2(x_k)) \\ \theta_{ddk} &= -T \cdot \theta_{dk}, \theta_{dk} = [\theta_{d1k}, \dots, \theta_{d12k}] \end{aligned}$$

Kestirilecek parametrenin ayrık denklemi, kapalı çevrimin bütün yörüngeleri

$\lim_{k \rightarrow \infty} x(k) = 0$ ile sınırlandırılmış,

$$\hat{\theta}_{ddk+1} = \alpha(x_k, \hat{\theta}_{ddk}), u = v(x_k, \hat{\theta}_{ddk}) \quad (4.8)$$

dönüşümü yapılsın. u kontrol işareti $\hat{\theta}_{ddk}$ ve x_k 'in bir fonksiyonu olsun. Çünkü θ_{dd} 'ye göre u kontrol işareti güncellenmelidir. $\check{\beta}(x_{k-1}, x) = \beta(x_{k-1})x_k$ olmak üzere kestirim hatası $z_k = \hat{\theta}_{ddk} - \theta_{dd} + \check{\beta}(x_{k-1}, x_k)$ ve $z_k = \theta_{dd,estk} - \theta_{dd}$ olarak tanımlansın. Burada, $\theta_{dd} = \theta_{dd,estk} - z_k = \hat{\theta}_{ddk} + \beta(x_{k-1})x_k - z_k$ olmak üzere $z_{k+1} = \hat{\theta}_{ddk+1} - \theta_{dd} + \beta(x_k)x_{k+1}$ olarak elde edildiğini unutmamak gerekir.

Böylece,

$$\begin{aligned} z_{k+1} - z_k &= \hat{\theta}_{ddk+1} - \theta_{dd} + \beta(x_k)x_{k+1} - \hat{\theta}_{ddk} + \theta_{dd} \\ &\quad - \beta(x_{k-1})x_k \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned}
&= \hat{\theta}_{dd_{k+1}} - \hat{\theta}_{dd_k} - \beta(x_{k-1})x_k \\
&\quad + \beta(x_k)(f_0(x_k) + g(x_k)u_k + \theta_{dd}) \\
&= \hat{\theta}_{dd_{k+1}} - \hat{\theta}_{dd_k} + \beta(x_k)(f_0(x_k) + g(x_k)u_k) \\
&\quad + \beta(x_k)\hat{\theta}_{dd_k} + \beta(x_k)\beta(x_{k-1})x_k \\
&\quad - \beta(x_k)z_k - \beta(x_{k-1})x_k \\
&= \hat{\theta}_{dd_{k+1}} - \hat{\theta}_{dd_k} \\
&\quad + \beta(x_k)(f_0(x_k) + g(x_k)u_k + \hat{\theta}_{dd_k} \\
&\quad + \beta(x_{k-1})x_k) - \beta(x_{k-1})x_k - \beta(x_k)z_k
\end{aligned}$$

Güncelleme kuralı, z'li terimler bir yere toplanıp, z'siz terimler sıfıra eşit olacak şekilde aşağıdaki denklemdeki gibi seçilirse,

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}_{dd_{k+1}} &= \hat{\theta}_{dd_k} - \beta(x_k)(\hat{\theta}_{dd_k} + \beta(x_{k-1})x_k + f_0(x_k) + g(x_k)u_k) \\
&\quad + \beta(x_{k-1})x_k
\end{aligned} \tag{4.10}$$

o zaman kestirim hatası dinamik denklemi, $\theta_{dd} = -T.\theta_{di}$, $\theta_{dd,est_k} = \hat{\theta}_{dd_k} + \check{\beta}(x_{k-1}, x_k)$ ve $\check{\beta}(x_{k-1}, x_k) = \beta(x_{k-1})x_k$ olmak üzere

$$z_{k+1} = [I - \beta(x_k)]z_k \tag{4.11}$$

olarak elde edilecektir. Aşağıdaki eşitsizliği sağlayan bir $\beta(x_k)$ seçildiğinde bozucu kestirim hatası sıfıra yakınsayacaktır.

$$\bar{\sigma}[I - \beta(x_k)] < 1 \tag{4.12}$$

Sonuç olarak bozucu kestirimi dinamik denklemi,

$$\theta_{d,est_k} = -\theta_{dd,est_k}/T \tag{4.13}$$

elde edilir. Burada seçilebilecek $\beta(x)$ fonksiyonu skalar olacaktır.

$$\beta(x_k) = \text{diag}(\alpha_1 \dots \alpha_{12}).I_{12} \tag{4.14}$$

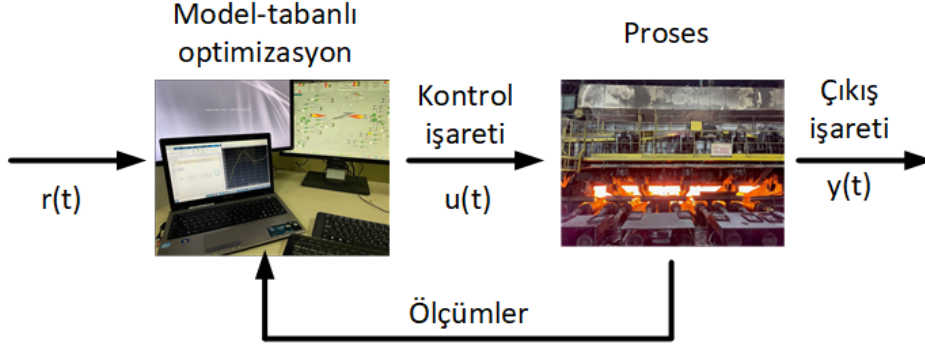
α değeri farklı olabileceği gibi, $\beta(x_k) = \text{diag}(\alpha).I_{12}$ formunda tek bir değerle seçilebilir. Denklem 4.12 eşitsizliğini sağlayacak α_i değerleri, $0 < \alpha_i < 2$ arasında seçilmelidir. Pozitif değer olması ve denklemlerde kolaylık sağlaması açısından α değeri sabit tek değer seçilmiş ve bütün bölgeler için $\alpha_i = 0.5$ olarak alınmıştır.

5. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÖR TASARIMI

5.1 Ön Bilgiler

Model öngörülü kontrol (MPC) fikri Propoi A.I. tarafından 1963 yılında formülize edilmiş ve 70'li yılların sonlarından itibaren endüstride kullanımına başlanarak günümüze kadar geliştirilmiş optimal kontrol algoritmalar altında kategorize edilen ileri kontrol tekniklerindendir. 1980'lerde doğrusal teorileri, 1990'lar da doğrusal olmayan teorileri geliştirilmiştir. Model öngörülü kontrol sistemleri proses kısıtlarını gözönüne alan, çoklu değişkenlere uygulanabilen, yumuşak ve katı kısıtlar ve bozucular altında kontrol problemlerini optimizasyon problemine çevirerek çözebilme yeteneğine sahip olan ileri kontrol metotlarındandır. Bu özelliğinden dolayı son zamanlarda endüstrilerde giderek yaygınlaşmaktadır. Bu metot da amaç proses için belirlenen dinamik modelde sistem çıkışlarını sınırlı zaman ufkunda (horizon) tahminleyerek istenilen ölçüt fonksiyonunu minimize edecek kontrol işaretlerini elde etmektir. Bu kontrol işaretlerini hesaplarken farklı tip kısıt şartları da yerine getirilebilmektedir (Maciejowski, 2002). MPC metodunun başarısı ve tutarlılığı kontrol edilecek sistemin modelinin doğru bir şekilde oluşturulmasına bağlıdır ki oluşturulan ölçüt fonksiyonu için doğru bir optimizasyon yapılabilsin (Grüne ve Pannek, 2017).

Basit bir MPC mantığı şekil 5.1'de gösterilmiştir. MPC stratejisi araba sürme stratejisi gibidir. Sürücü sonlu bir kontrol çizgisi için istenen referans eğrisini, arabanın hangi durumda nasıl davranacağını, ne yaparsa nasıl hızlanacağını veya yavaşlayacağını bilmektedir. Arabanın karakteristiğini mental olarak modellemektedir. Anlık durumda ilk kontrol aksiyonunu uygular ve yaklaşma çizgisine (receding horizon) uygun sonraki kontrolün kararı için prosedürü tekrarlar. Arabayı mantığında ne kadar düzgün modellemişse vereceği referansa göre en optimal kontrol mekanizmasını önceden kafasında tasarlayacaktır (Maciejowski, 2002).



Şekil 5.1 : Basit bir MPC.

MPC'nin avantajları;

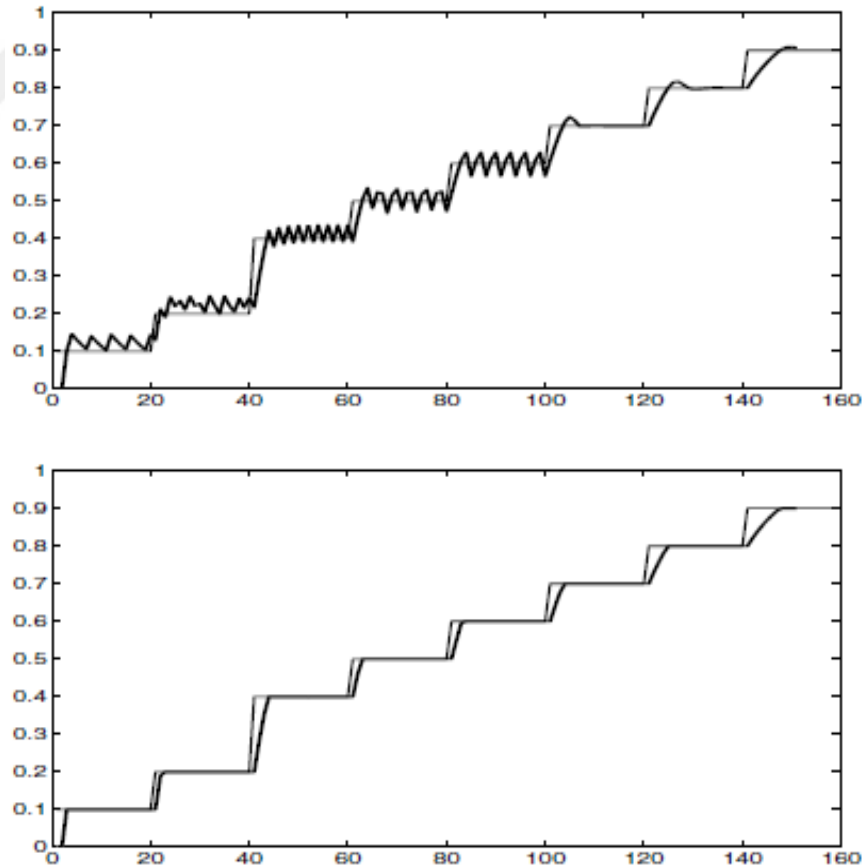
- (1) Çok giriş ve çıkışlı sistemlere rahatlıkla uygulanabilir.
- (2) Model tabanlıdır. Doğru modelde hassas kontrol yapılabilir.
- (3) Doğrusal olmayan sistemlerle çalışabilmektedir.
- (4) Kısıtları kolaylıkla ele alabilmektedir.
- (5) Ölçüm bozucularının kompanze edebilen doğal bir ileri beslemeli kontrol yapısı vardır.
- (6) Gelecek referanslarının bilinmesi birçok uygulamada çok kullanışlı olmasını sağlamaktadır.

MPC'nin dezavantajları (Camacho, 2007);

- (1) Hesaplama yoğunluğu ve karmaşıklığına sahiptir. Klasik PID'lerden daha kompleks bir kontrol işareti elde edilme stratejisi vardır. Dinamiğin çok değişmediği sistemlerde kontrol kuralının elde edilmesi kolaydır fakat dinamiğin değiştiği proseslerde bu kontrol kuralının elde edilmesindeki karmaşıklıkla her örnekleme zamanında karşılaşılacaktır. Fakat günümüzde işlemci hızlarının çok artması ve bu değişiklikleri kestirebilen kestiricilerle birlikte çalıştırılabilmesi bunu mümkün kılmaktadır.
- (2) Doğru modelin elde edilmesi için çok çaba sarfedilmesi gerekmektedir. Elde edilecek model ile gerçek prosesin modeli arasındaki ciddi farklar MPC'den sağlanacak faydaları etkileyecektir.

Literatürde değişik MPC uygulama metotları kullanılmaktadır. Bunlardan başlıcaları Dynamic Matrix Control (DMC), Generalized Predictive Control (GPC), Robust Model Predictive Control, Nonlinear Model Predictive Control. MPC yaklaşımı çok değişkenli yapılabilir. Ayrıca sisteme kontrol ve çıkış kısıtları, katı veya yumuşak kısıtlar olarak da ilave edilebilir. Böylece çıkış istenilen değerlerin altına düşmemesi ve üstüne çıkmaması garanti altına alınır. Kontrol işaretine katı kısıt uygulanarak belirli değerler içinde kontrol işareti üretilmesi garanti edilir (Camacho, 2007).

Endüstriyel sistemler doğrusal olmamasına rağmen çoğu MPC uygulaması doğrusal model üzerine kuruludur. Bunun iki ana sebebi vardır. Proses datalarından doğrusal modeli tanımlamanın daha kolay olması ve normal operasyon bölgeleri yakınında oldukça iyi sonuçlar üretmesidir. Fakat bir çok doğrusal olmayan sistemleri doğrusal kontrolör ile kontrol etmek istenen sonuçları vermeyeceği gibi küçük kontrol işaretlerinde şekil 5.2’de görüldüğü gibi istenmeyen çıkışlar üretecektir. Bundan kaçınmak için doğrusal olmayan modelleri kontrol edecek doğrusal olmayan MPC (NMPC) tasarlamak önemlidir.

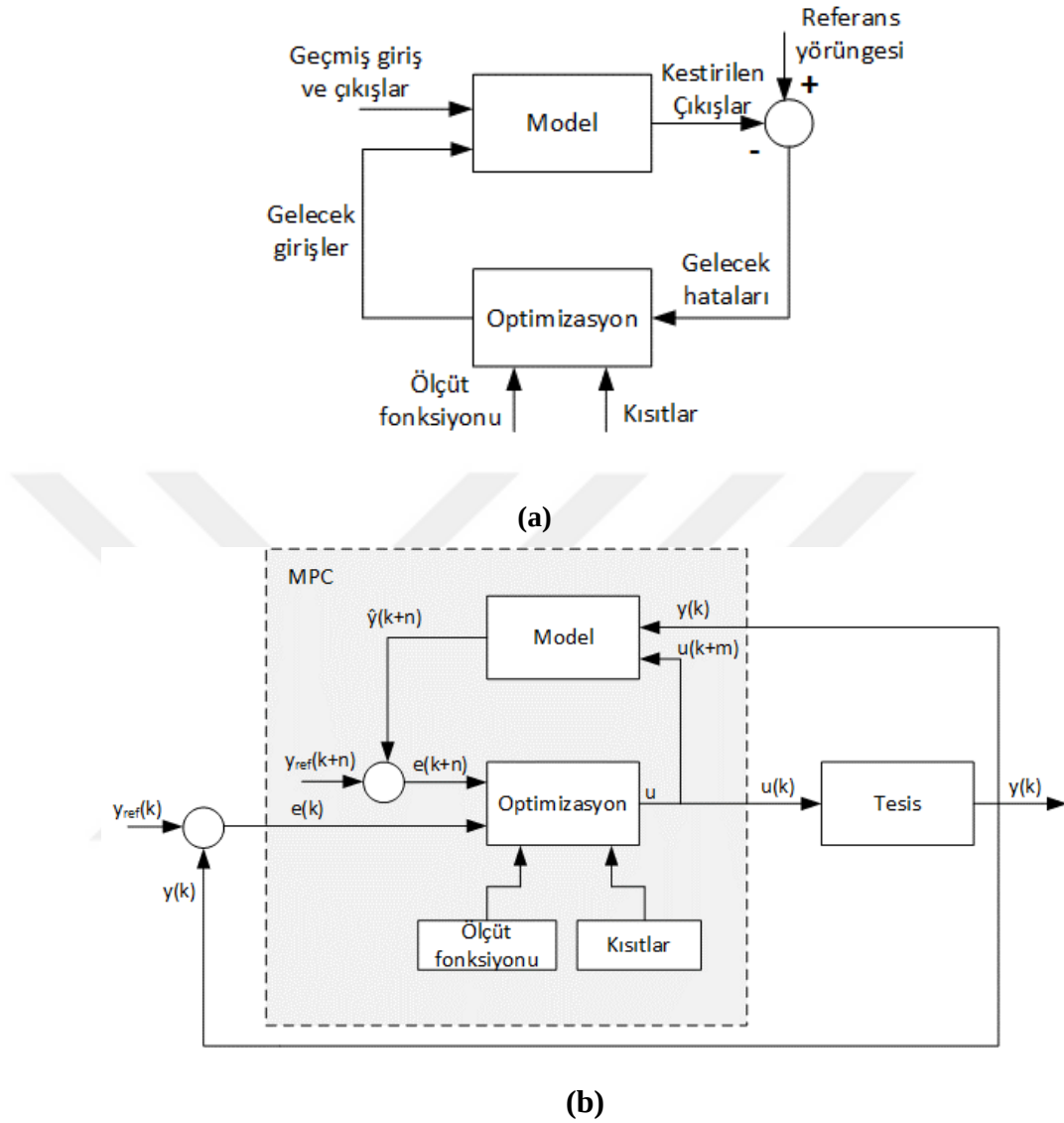


Şekil 5.2 : Doğrusal ve doğrusal olmayan kontrolör (Camacho, 2007).

Bu metodun temel elemanları (Camacho, 2007);

- (1) Model: Prosesteki gelecek çıktıların öngörebilecek modelin oluşturulması gerekmektedir. Bu modeldeki bozucu, parametre, giriş ve çıkışlarının prosesi en doğru ifade edecek şekilde tasarlanması gerekiyor.
- (2) Kısıtlar (Constraints): Giriş, çıkış ve kontrol işareti üzerindeki kısıtların belirlenmesi gerekmektedir. Örneğin bir valf düşünülecek olursa, fiziksel limitlerinden dolayı valfe verilebilecek kontrol işareti minimum ve maksimum değerler arasında olması istenebilir. Ya da fırın kontrolü yapılıyorsa verilebilecek sıcaklık referansının limitleri sisteme çıkış kısıtı olarak tanımlanabilir.
- (3) Ölçüt fonksiyonu (Cost Function): Kontrol amacına yönelik ölçüt fonksiyonunun tanımlanması gerekmektedir. Bu ölçüt fonksiyonu referansın düzgün takibi, enerji tüketiminin minizasyonu, üretilen ürünün kalite, ısının malzeme üzerinde homojen dağılım vb. olabilir. MPC'nin en temel amacı da bu ölçüt fonksiyonunu minimize edecek kontrol işaretlerinin üretilmesidir.
- (4) Kaydırma Stratejisi (Receding Strategy): k anındaki öngörülen gelecekteki durum değişkeni prosesin ilk durumu olarak ele alınsın ($x_0 = \hat{x}_k$). Bu durum değişkenine göre optimizasyon probleminin çözümü olan u_0 kontrol işaret vektörü, N_u kontrol horizon boyunca elde edilir ve sisteme uygulanır. Bir sonraki $k + 1$. adımda, k . adımda elde edilen optimal kontrol işareti uygulandığındaki yeni öngörülen $x_1 = \hat{x}_{k+1}$ durumları hesaplanarak, bu yeni durumlar üzerinden tekrar optimizasyon yapılır ve yeni optimal u_1 kontrol işaret vektörü, gene N_u kontrol horizon kadar güncellenir. Bu şekilde her adımda sürekli N_u kontrol horizon kadar kaydırılır ve yeniden optimizasyon algoritması çalıştırılarak öngörülen durumlar istenilen referans noktasına yaklaştırılır. Bu strateji kaydırma stratejisi olarak adlandırılır. Bu aslında proses için önceden kontrol işaret sinyalleri oluşturmasıdır ki klasik kontrol sistemlerden en büyük farkı da burada yatmaktadır.
- (5) Optimizasyon Algoritması: MPC'nin en önemli adımlarından biri ölçüt fonksiyonunu minimize edecek optimizasyon algoritmasının belirlenmesidir. Bu algoritma gerçek zamanda çalışabilecek kadar hızlı çözüm üretmek zorundadır. Hesaplama kompleksliğinden kaçınılmalıdır.

Model öngörülü kontrolün ana bileşenlerini içeren basit ve ayrıntılı şemalar aşağıda şekil 5.3’de gösterilmiştir.



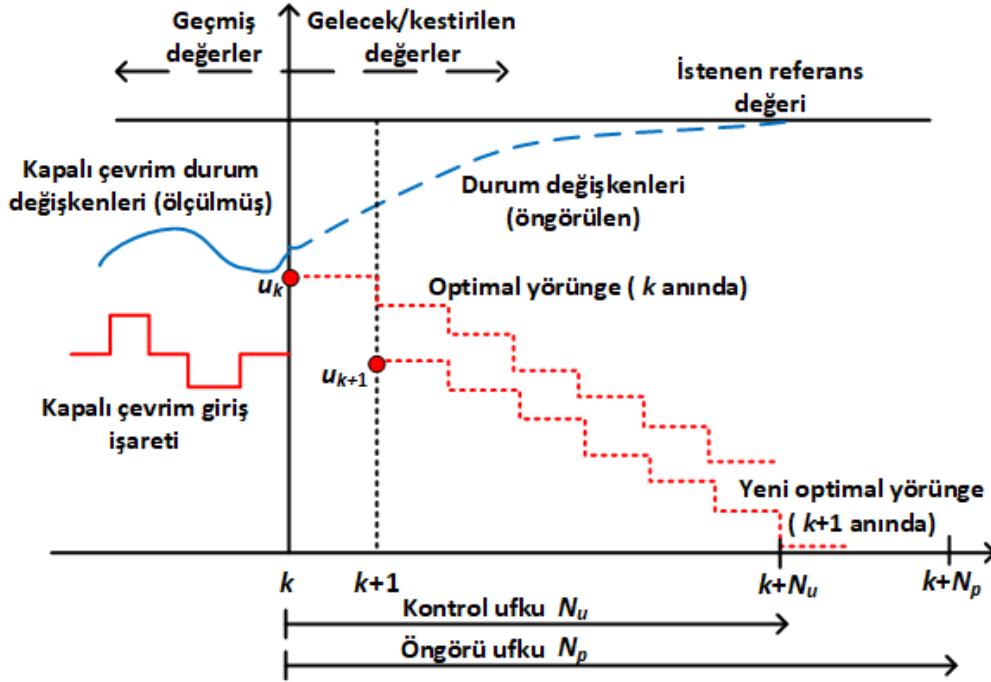
Şekil 5.3 : (a) MPC basit blok şeması (b) MPC detay blok şeması (Farag,2020)

Model öngörülü kontrolün temel prensibi aşağıdaki şekil ile açıklanabilir (Şekil 5.4).

Model öngörülü kontrol kayma stratejisini tekrar aşağıdaki gibi daha ayrıntılı açıklayalım (Camacho, 2007).

- (1) Belirli N_p öngörü ufku boyunca $n = 1, \dots, N_p$ olmak üzere gelecekteki çıkışlar $y(k + n|k)$ öngörüler olarak adlandırılır. $y(k + n|k)$ formülasyonu sistem çıkışının $k + n$ anındaki öngörüsünün k anındaki bilgilerle yapıldığına karşı düşmektedir. Herhangi bir k anında process modeli kullanılarak sistemin geçmiş durumları ve $m = 0 \dots (N_u - 1)$ olmak üzere gelecekteki $u(k + m|k)$

kontrol işaretleri göz önünde bulundurularak modelin çıkışlarının gelecek öngörüsü elde edilir.



Şekil 5.4 : MPC'nin temel prensibini gösteren kaydırma stratejisi (Mahmoud,2012).

- (2) Prosesin, sistemin referans eğrisini $r(k + n)$ yakından takip edebilmesi için belirlenen kriterlere göre optimizasyon uygulanarak $m = 0 \dots (N_u - 1)$ olmak üzere gelecekteki kontrol sinyalleri $u(k + m|k)$ elde edilir. Öngörülen gelecekteki çıkışlar referans ile karşılaştırılarak geleceğe ait hata değerleri hesaplanır. Bu hata değerinin bir fonksiyonu olarak, varsa sistem kısıtları baz alınarak, ölçüt fonksiyonunu minimize edecek şekilde uygulanacak gelecekteki optimal kontrol işaretleri elde edilir. Bu kriter genellikle öngörülen referans eğrisi ve öngörülen çıkış sinyali arasındaki hatanın quadratik fonksiyonu formunda olmaktadır. Eğer kriter quadratik ise, model doğrusal ve herhangi kısıtlar yoksa analitik bir çözüm bulunur. Aksi durumda iteratif optimizasyon metotları kullanılır.
- (3) Optimal kontrol işareti dizisinin ilk elemanı $u(k|k)$, sisteme uygulanır. Kontrol dizisinin diğer elemanları sisteme uygulanmaz. $u(k + 1|k + 1)$, $y(k + 1)$ sistemden ölçülüp, 1. ve 2. adım da bu yeni değere göre tekrarlanarak yeniden oluşturulur. $u(k + 1|k + 1)$ kontrol işareti $u(k + 1|k)$ 'den farklıdır,

çünkü optimizasyona yeni bilgi eklenmiştir. Bu adımlar her yeni örnekleme anında tekrarlanır.

Özetle kaydırma strateji algoritması;

1. k anında sistem modelini kullanarak N_p adım boyunca öngörülen çıkışları belirle.
2. k anında N_p öngörü ufku boyunca optimal kontrol problemini çöz. J ölçüt fonksiyonunu minize edecek N_u kontrol ufku boyunca optimal kontrol işaretini elde et.
3. Optimal kontrol işareti $u(k)$ ' yi uygula.
4. $k + 1$ zamanı için adım 1-3'ü tekrarla.

NMPC'nin genel formülasyonu aşağıda denklem 5.1'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \min_{x,u} J(x_k, u_k) &= \min_{x,u} \left(\sum_{n=1}^{N_p} [y_k(n) - r_k]' \cdot Q \cdot [y_k(n) - r_k] \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=0}^{N_u-1} u_k(m)' \cdot R \cdot u_k(m) \right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Öyle ki

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, u_k) \\ y_k &= g(x_k, u_k) \\ u_{min} &\leq u_{k+m} \leq u_{max} \\ y_{min} &\leq y_{k+n} \leq y_{max} \\ n &= 1, \dots, N_p \\ m &= 0, \dots, N_u - 1 \end{aligned}$$

Bu formülasyonda $x_k = x(k)$, $y_k = y(k)$, $u_k = u(k)$, $r_k = r(k)$, $y_k(n) = y(k+n)$, $u_k(m) = u(k+m)$ 'dır ve $N_u \leq N_p$ olmak üzere, N_p öngörü ufku, N_u kontrol ufku, y_k , k anındaki sistem çıkışı, r_k , k anındaki istenilen referans değeri, u_k , k anındaki kontrol işareti, $f(x_k, u_k)$ ve $g(x_k, u_k)$ sistemin dinamik denklemleri, Q ve R çıkış ve kontrol sinyallerinin ölçüte katkılarını belirleyen ağırlık matrisleridir.

5.2 4.Slab Fırını modelinin doğrusal olmayan model öngörülü kontrolü (NMPC)

Bu bölümde bir önceki bölümde 4.Slab Fırını için oluşturduğumuz doğrusal olmayan model için uyarlamalı doğrusal olmayan model öngörülü kontrol problem formülize edilmiştir.

Slab fırını modeline ait denklem 3.33'ü anımsayalım.

$$\dot{x}_i = -\beta_{Ai}x_i^4 + dm_i - dm_{loss,i} + \zeta(g_1 * I + g_{2i}(x))u_i - \theta_{di}$$

Yukarıdaki denklemde, T örnekleme zamanı olmak üzere $\dot{x}_i = [x_i(k+1) - x_i(k)]/T$ yaklaşıklığı yapıldığında $i = 1,2,3 \dots, 12$ için $f(0)=0, g(0)=0, x_{k+1} = x(k+1)$ olmak üzere tüm bölgeler için k anındaki sistemin ayrık-zamanlı durum denklemleri 3.38'de aşağıdaki gibi oluşturulmuştur. Bu denklemde I&I ile kestirilen θ_{dd,est_k} bilinmeyen bozucular için göz önünde bulundurulursa öngörüler için aşağıdaki sistem denklemleri kullanılabilir.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f_0(x_k) + g(x_k).u_k + \theta_{dd,est_k} \\ f_0(x_k) &= x_k - T.(\beta_A \cdot x_k^4 - dm_k + dm_{loss_k}) \\ g(x_k) &= T.\zeta.(g_1 \cdot I_{12} + g_2(x_k)) \\ \theta_{dd,est_k} &= -T.\theta_{d,est_k} \end{aligned} \tag{5.2}$$

Diğer yandan, ölçüt fonksiyonu hedeflenen referans değerin aktüel sistem çıkışlarının arasındaki farkı minimize ederek sistemin hedeflenen sıcaklığa oturması için aşağıdaki formda denklem 5.3'deki gibi oluşturulmuştur.

Çıkış işareti kısıtımız her bölge için değişmektedir. Fakat tüm bölgeler için genel olarak $0 \leq y(k) \leq 1350$ aralığında yumuşak kısıt olarak uygulanmıştır. Çünkü çıkış sıcaklığı 1350 değerinin az üzerine çıkabilir, bu konuda katı bir kısıt uygulanması prosesin doğal işleyişi açısından mantıksız olacaktır. Kontrol işareti kısıtımız ise tüm bölgeler için $0 \leq \%u(k) \leq 100$ aralığında katı kısıt olarak uygulanmıştır. Çünkü kontrol edilecek ekipman valf olduğundan %100'ü aşması teknik olarak mümkün değildir. Belirlenen kısıtlarla yukarıdaki denklem 5.2 ve denklem 4.10-4.14 arasındaki kestirici denklemleri göz önünde bulundurularak MPC optimal kontrol problemi formülasyonu yine aşağıdaki denklem 5.3'de görüldüğü gibi oluşturulmuştur.

$$\min J(x_k, u_k) = \min \left(\sum_{n=0}^{N_p} [y_k(n) - r_k]' \cdot Q \cdot [y_k(n) - r_k] \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^{N_u} u_k(m)' \cdot R \cdot u_k(m) \right)$$

Öyle ki

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + T(-\beta_A x_k^4 + dm_k - dm_{loss_k} + \zeta(g_1 * I + g_2(x_k))u_k) \\ &\quad + \theta_{dd,est_k} \\ \hat{\theta}_{dd_{k+1}} &= \hat{\theta}_{dd_k} - \beta(x_k)(\hat{\theta}_{dd_k} + \beta(x_{k-1})x_k + f_0(x_k) + g(x_k)u_k) \\ &\quad + \beta(x_{k-1})x_k \\ \check{\beta}(x_{k-1}, x_k) &= \beta(x_{k-1})x_k \\ \beta(x_k) &= diag(\alpha_1 \dots \alpha_{12}) \cdot I_{12} \\ \theta_{dd,est_k} &= \hat{\theta}_{dd_k} + \check{\beta}(x_{k-1}, x_k) \\ y_k &= T_g(k) = \frac{x_k}{c_{pg}V} \\ 0 &\leq \%u_{k+m} \leq 100 \\ 0 &\leq y_{k+n} \leq 1350 \\ n &= 1, \dots, N_p \\ m &= 0, \dots, N_u - 1 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Bu formülasyonda $x_k = x(k)$, $y_k = y(k)$, $u_k = u(k)$, $r_k = r(k)$, $y_k(n) = y(k+n)$, $u_k(m) = u(k+m)$ 'dir. Denklemden $u(k)$, k anındaki bölgelere uygulanan kontrol işareti, $r(k)$, k anındaki bölgeler için istenen referans sıcaklık değeri ve $y(k)$, k anındaki bölgelerin ölçülen sıcaklık değerleridir. N_p ve N_u sırasıyla öngörü ve kontrol ufku yani horizonlarıdır.

Fırın sisteminde alınan verilerde kontrol işareti % değer ile ifade edilmektedir. Bu verilerdeki kontrol işaretini gaz akış oranları ile oranlamamız gerekmektedir. Bunun için kontrol işareti sisteme dahil edilmeden önce, $\%u_{k+m}$ sahadaki valfe uygulanan yüzde kontrol işareti olmak üzere, $u_k = F_f = \%u_{k+m} \cdot u_{max} \cdot \frac{T}{3600}$ dönüşümü yapılmalıdır. NMPC kontrol işareti $Nm^3/saniye$ cinsinden sisteme dahil edilmektedir. Çünkü modelde elde ettiğimiz sistem denklemlerinde kullanılan gaz akış miktarları çizelge 3.2'de $Nm^3/saat$ cinsinden verilmiştir.

Bu optimal kontrol probleminin çözümü için Ardışık Quadratik Programlama (SQP) yöntemi tercih edilmiştir.



6. SAHA ÇALIŞMALARI ve MATLAB UYGULAMALARI

Bu bölümde, yapılan saha test çalışmalarının detayları ve Matlab uygulamaları anlatılmıştır. Matlab Simulink'te oluşturulan modellerin çıktılarının gerçek fırın verileriyle ve literatürdeki diğer modellerle karşılaştırma çalışmalarına yer verilmiştir. Ayrıca tasarımı yapılan kestiricilerin performansları karşılaştırılmıştır.

Bölüm 6.1'de Matlab Simulink ve PLC arasındaki haberleşme testlerine yönelik çalışmalar anlatılmıştır. Haberleşme altyapısı olarak TCP/IP ve OPC protokolleri denenmiştir.

Bölüm 6.2'de fırından alınan gerçek verilerin sisteme aktarılması anlatılmıştır.

Bölüm 6.3'de önceki bölümlerde elde edilen matematiksel fırın modelleri ve 4.Slab fırınından toplanan gerçek verilerin modele aktarılarak model çıktıları ile gerçek fırın sıcaklıklarının karşılaştırmaları için Matlab Simulink modelleri oluşturulmuştur. Bunun yanında bölüm 6.4'de literatürde kullanılan başka bir model olan ARMAX fırın modeliyle de karşılaştırma çalışmaları için oluşturulan Matlab Simulink modeli anlatılmıştır.

6.1 Matlab Simulink ve PLC Haberleşme Testleri

Bu bölümde Matlab ortamında elde edilen modellerin Slab Fırını PLC sistemiyle direkt haberleşerek anlık veri gönderip alabilmesi için gerçekleşen testlere yer verilmiştir. Bu testlerde TCP/IP ve OPC olmak üzere iki ana haberleşme protokolü ele alınmıştır. Mevcut durumda Seviye-1 kontrol katmanında yer alan PLC ile şu an yukarıdaki bölümlerde anlatılan modellerin çalıştığı Seviye-2 kontrol katmanı arasındaki haberleşme TCP/IP protokolü üzerinden çalışmaktadır. Bundan dolayı Matlab Simulink ile ilk testler de TCP/IP protokolü üzerinden denenmiştir.

6.1.1 Matlab Simulink ve PLC TCP/IP testi

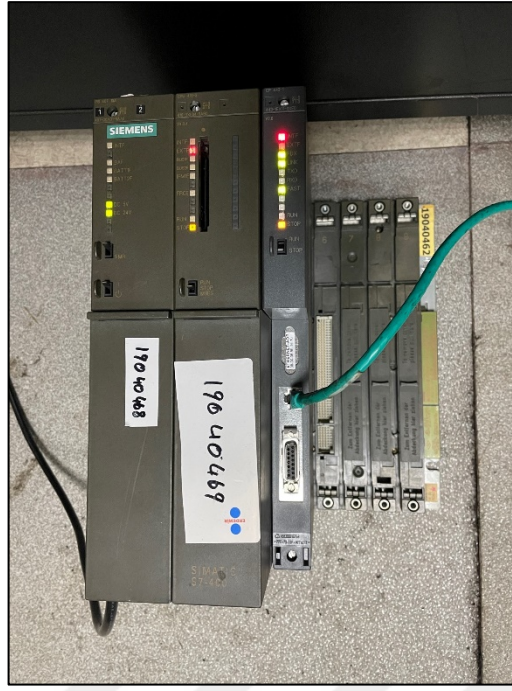
Matlab Simulink ile fırın PLC kontrolörü arasında model giriş ve çıkış verilerini online alıp verebilmek için mevcut Seviye-2 sistemi ile PLC arasındaki haberleşmede de

kullanılan TCP/IP haberleşmesinin en uygun veri haberleşmesi olacağı düşünülmüştür. Bu testler için farklı bir network ağında bulunan daha önceki model çalışmalarının yapıldığı Matlab kurulu mevcut dizüstü bilgisayarının gateway'e takılacağı düşünülmüş Şekil 6.1'deki farklı bir dizüstü bilgisayar üzerine Matlab kurulumu yapılarak fırın sisteminin network ağına dahil edilmiştir. Mevcut fırın sisteminin üretimini etkilememek için önce Şekil 6.2'deki yedek PLC kurulumu yapılarak TCP/IP haberleşme testlerine başlanmıştır.

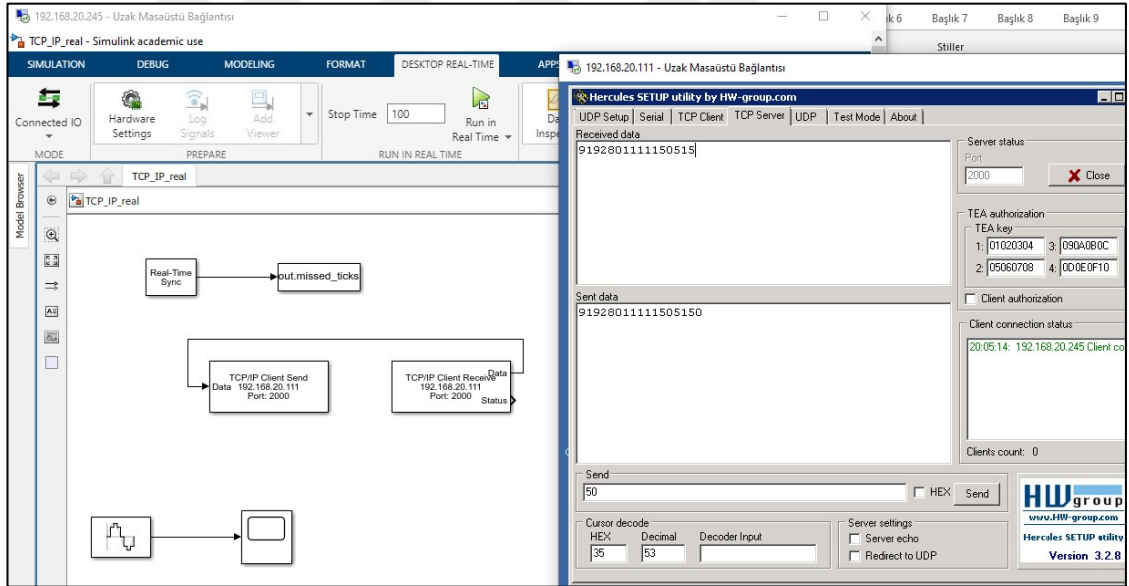


Şekil 6.1 : Matlab Simulink notebook ve PLC haberleşme testleri.

Bu testler için Matlab Türkiye dağıtıcısı olan Figes firmasından da destek istenmiş fakat TCP/IP haberleşme testlerinde istenilen başarı elde edilememiştir. Bu sorunun PC'deki bazı port veya gateway ayarlarından kaynaklanacağı düşünülmüş IT grubunda da destek istenmiştir. PLC programlamanın da yapıldığı fırının mühendislik bilgisayarına Hercules haberleşme paketi yüklenerek fırınla aynı ağa bağladığımız ve Matlab kurduğumuz dizüstü bilgisayarında Matlab Simulinkte TCP/IP modeli oluşturularak şekil 6.3'de gösterildiği şekilde iki PC arasında haberleşme testi yapılmıştır. Bu haberleşme başarılı olunca söz konusu başarısızlığın Siemens PLC kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.



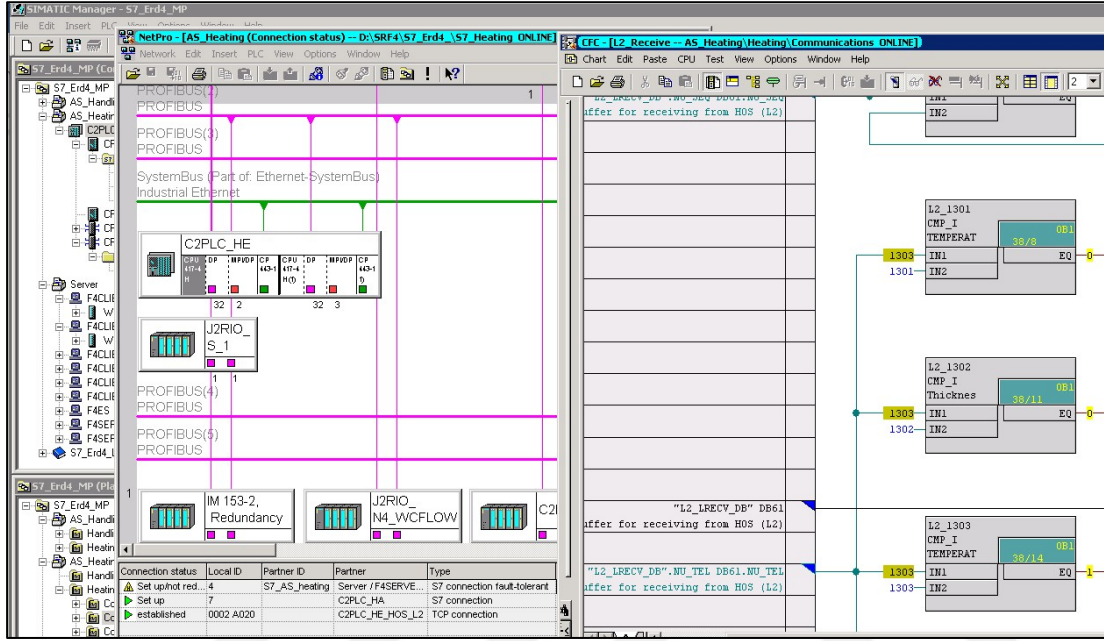
Şekil 6.2 : 4.Slab Fırını ısıtma kontrolü yedek PLC.



Şekil 6.3 : Matlab simulink ve mühendislik bilgisayarı arasında TCP/IP testi.

Siemens PLC’lerde farklı bir ayar yapılması gerekebileceği düşünülerek fırın duruşunda mevcut PLC ile hali hazırda çalışan ve PLC’ye referans değerlerini gönderen Seviye-2 bilgisayarının haberleştirilmesine karar verilmiştir. Şekil 6.5’de gösterilen ve redundant yapıda çalışan fırının ısıtma sistemi PLC ile mevcut Seviye-2 bilgisayarı arasında mevcut haberleşme altyapısı ve portu kullanılarak yeni haberleşme telegramı oluşturulmuştur. Bu verinin PLC tarafından okunabilmesi için de Şekil 6.4 ‘deki gibi yeni telegram oluşturularak PLC’ye yükleme yapılmıştır. Bu denemelerde

de TCP/IP üzerinden başarılı bir şekilde veri haberleşmesi sağlanamamıştır. Siemens PCS7 uzmanından da destek istenmiş, fakat yaklaşık 18 yıl önce kurulan Slab Isıtma Fırının S7 417-4H CPU'sunun çok eski versiyon olmasından ve üretimden kaldırılmasından dolayı istenilen destek sağlanamamıştır. Bunun üzerinde TCP/IP yerine OPC üzerinden haberleşme olanakları için araştırmaya girilmiştir.



Şekil 6.4 : 4.Slab Fırını PLC simatic manager yazılımı.

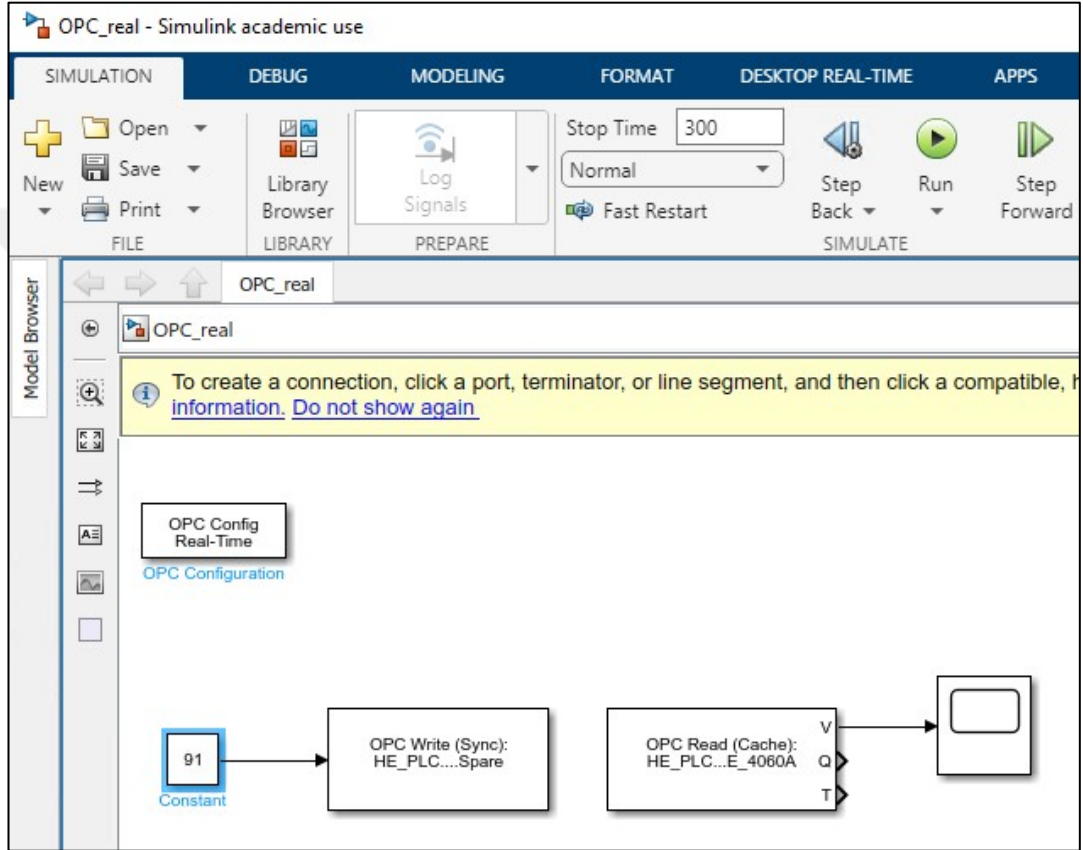


Şekil 6.5 : 4.Slab Fırını redundant ısıtma PLC sistemi.

6.1.2 Matlab simulink ve PLC OPC testi

Matlab Simulink ve PLC arasındaki TCP/IP haberleşme testlerinin tıkanması üzerine farklı haberleşme protokolleri araştırılmış ve endüstride en yaygın kullanımı olan OPC

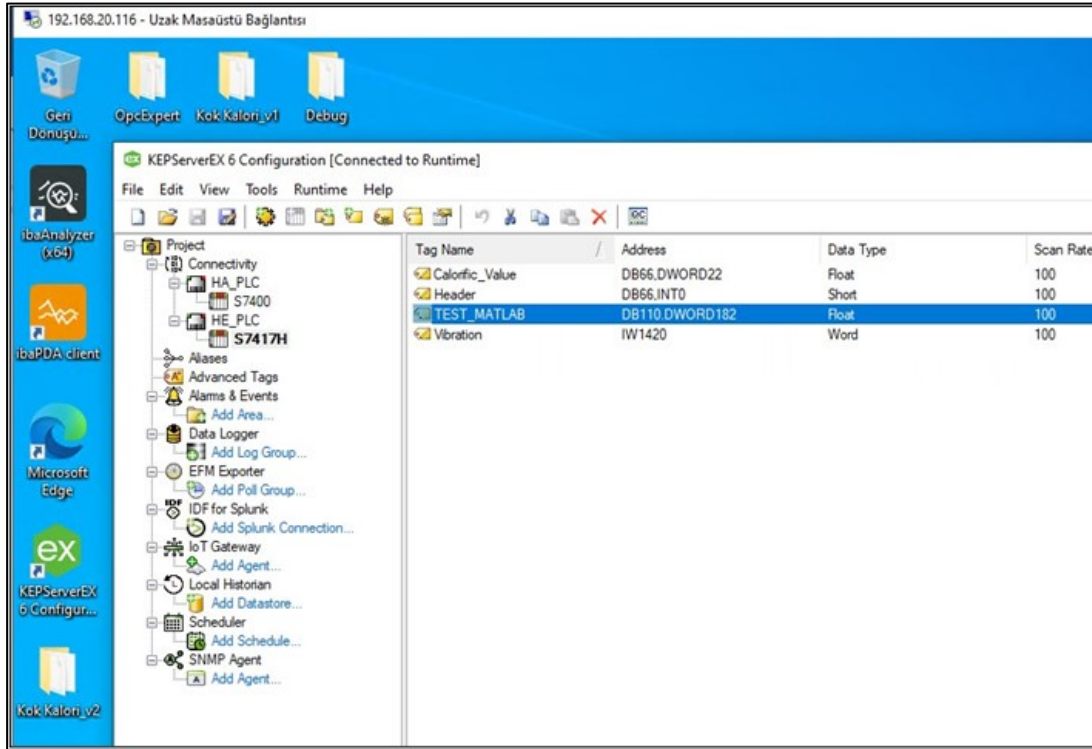
haberleşme protokolünün denenmesine karar verilmiştir. Normalde PLC'lerin farklı sistemler ile haberleşmesinde OPC yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Fakat Matlab programının desteklenip desteklenmediği konusu net olmadığından ilk önce TCP/IP haberleşme protokolü denenmişti. Fıges ile olan görüşmelerde OPC desteği konusunda bilgi sahibi olunduktan sonra bu yönde çalışmalara başlanmıştır. Matlab Simulink ile fırın PLC kontrolörü arasında gerçek zamanlı OPC haberleşmesi yapabilmek için Şekil 6.6'daki simulink modeli oluşturulmuştur.



Şekil 6.6 : Matlab Simulink OPC haberleşme modeli.

Matlab Simulink ile Siemens CPU arasında direkt OPC haberleşme denemeleri yapılmış fakat başarılı olunamamıştır. OPC'nin son derece narin protokol olduğu ve Windows üzerinde ağ politikalarına karşı hassas olduğu öğrenilmiştir. Siemens PLC'den online veri toplayan ve kayıt altına alan bir bilgisayar olan iba PC üzerine Şekil 6.7'deki gibi KEPServerEX programı kurularak OPC testleri denenmiştir. OPC protokolünün ihtiyaç duyduğu DCOM yapılandırma ayarlarının yapılmasına rağmen katı Windows kullanıcı güvenlik ayarlarından dolayı iba dataserver PC ve Matlab Simulink OPC modelini çalıştırdığımız notebook PC arasında OPC üzerinden

haberleşme sağlanamamıştır. Bunun üzerine KEPServerEX programının Matlab OPC simulink modelini çalıştırdığımız notebook PC'ye kurulmasına karar verilmiştir.



Şekil 6.7 : Fırın IBA dataserver PC'ye KEPServerEX6 kurulumu.

Yapılan en son denemede Matlab Simulink'te oluşturulan OPC haberleşme modeli ile aynı PC'de kurduğumuz KEPServerEX üzerinden slab ısıtma fırınının 417-4H CPU'su başarılı bir şekilde OPC üzerinden haberleştirilmiştir. KEPServerEX6'nın konfigürasyonu ve tag'ları daha önceki offline çalışmalarımızda oluşturduğumuz veri setlerine uygun olarak tarama hızı 100ms olacak şekilde şekil 6.8'deki gibi hazırlandı. Siemens 417-4H CPU tarafında da bu verilerin düzgün elde edebilebilmesi için şekil 6.10'da gösterilen, fırındaki gerçek veri setlerindeki data tiplerine uygun olarak yeni bir datablok oluşturulmuş ve fırın CPU'suna yüklemesi gerçekleştirilmiştir. OPC haberleşmesi için Matlab simulinkte şekil 6.9'daki model oluşturulmuş ve bu model üzerinden fırın CPU'suna yüklenen datablok'a veri gönderilerek haberleşme testleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

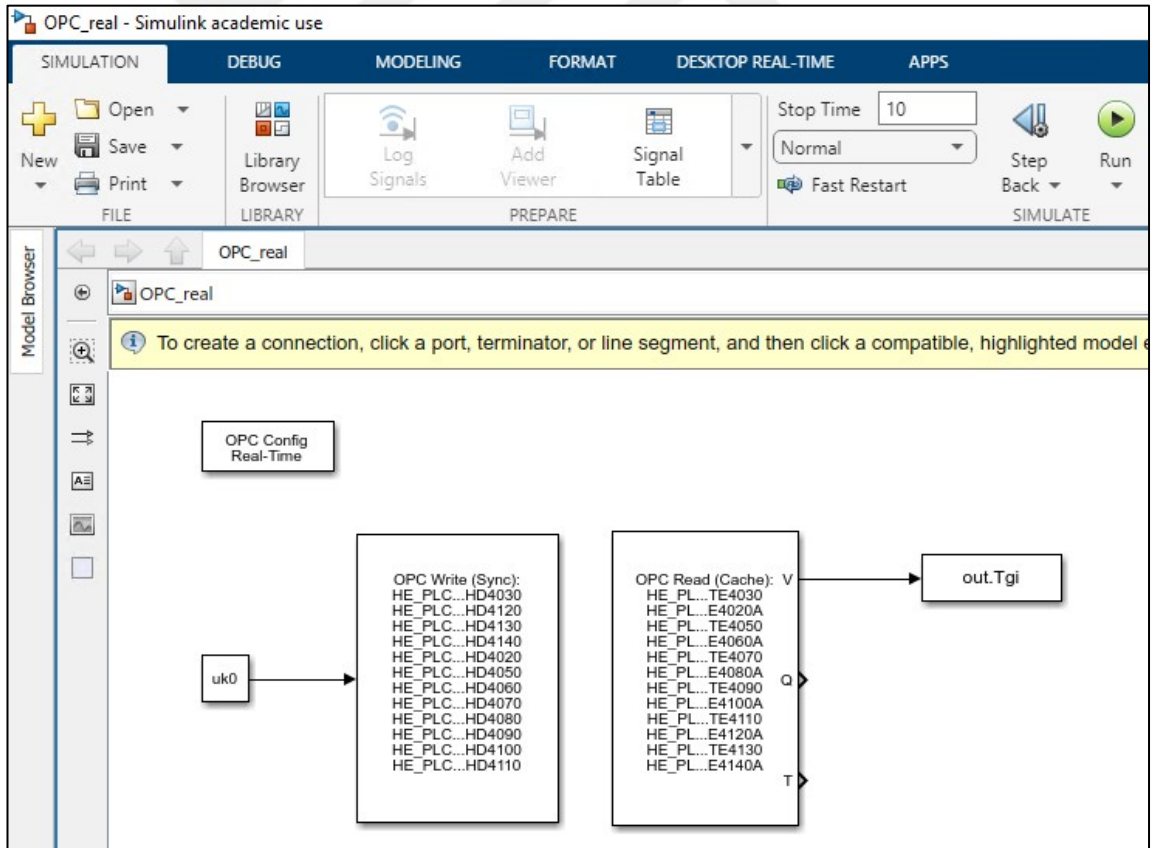
KEPServerEX 6 Configuration [Connected to Runtime | C:\Users\Deniz\Documents\MATLAB\KEPServer_Matlab.opf *]

File Edit View Tools Runtime Help

Project	Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling
Connectivity	u1_HD4030	DB110.DD138	Float	100	None
Data Type Examples	u2_HD4020	DB110.DD114	Float	100	None
HE_PL	u3_HD4050	DB110.DD142	Float	100	None
S7417H	u4_HD4060	DB110.DD118	Float	100	None
MODEL	u5_HD4070	DB110.DD146	Float	100	None
Simulation Examples	u6_HD4080	DB110.DD122	Float	100	None
Aliases	u7_HD4090	DB110.DD150	Float	100	None
Advanced Tags	u8_HD4100	DB110.DD126	Float	100	None
Alarms & Events	u9_HD4110	DB110.DD154	Float	100	None
Add Area...	u10_HD4120	DB110.DD130	Float	100	None
Data Logger	u11_HD4130	DB110.DD158	Float	100	None
Add Log Group...	u12_HD4140	DB110.DD134	Float	100	None
EFM Exporter	y1_TE4030	DB110.DBD50	Float	100	None
Add Poll Group...	y2_TE4020A	DB110.DBD2	Float	100	None
IDF for Splunk	y3_TE4050	DB110.DBD54	Float	100	None
Add Splunk Connection	y4_TE4060A	DB110.DBD10	Float	100	None
IoT Gateway	y5_TE4070	DB110.DBD58	Float	100	None
Add Agent...	y6_TE4080A	DB110.DBD18	Float	100	None
Local Historian	y7_TE4090	DB110.DBD66	Float	100	None
Add Datastore...	y8_TE4100A	DB110.DBD26	Float	100	None
Scheduler	y9_TE4110	DB110.DBD70	Float	100	None
Add Schedule...	y10_TE4120A	DB110.DBD34	Float	100	None
SNMP Agent	y11_TE4130	DB110.DBD74	Float	100	None
Add Agent...	y12_TE4140A	DB110.DBD42	Float	100	None

Date: 9.01.2023 10:08:50 Source: KEPSEVEREX\R... Event: Runtime shutdown complete.
 9.01.2023 10:12:11 KEPSEVEREX\R... Kepware Industrial Connectivity Platform 6.6

Şekil 6.8 : Matlab simulink notebook PC’de KEPSEVEREX6 konfigürasyonu.



Şekil 6.9 : Matlab Simulink modelinin gerçek zamanlı OPC üzerinden haberleşmesi.

Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
0.0	DB_VAR	INT	0	0	Temporary
2.0	TE_4020A	REAL	0.000000e+000	989.8	
6.0	TE_4020B	REAL	0.000000e+000	899.0	
10.0	TE_4060A	REAL	0.000000e+000	1090.0	
14.0	TE_4060B	REAL	0.000000e+000	1197.5	
18.0	TE_4080A	REAL	0.000000e+000	1171.2	
22.0	TE_4080B	REAL	0.000000e+000	1220.8	
26.0	TE_4100A	REAL	0.000000e+000	1238.7	
30.0	TE_4100B	REAL	0.000000e+000	1249.6	
34.0	TE_4120A	REAL	0.000000e+000	1226.1	
38.0	TE_4120B	REAL	0.000000e+000	1256.4	
42.0	TE_4140A	REAL	0.000000e+000	1225.3	
46.0	TE_4140B	REAL	0.000000e+000	1243.0	
50.0	TE_4030	REAL	0.000000e+000	1168.7	
54.0	TE_4050	REAL	0.000000e+000	1202.2	
58.0	TE_4070	REAL	0.000000e+000	1194.5	
62.0	TE_4070B	REAL	0.000000e+000	1282.0	
66.0	TE_4090	REAL	0.000000e+000	1275.0	
70.0	TE_4110	REAL	0.000000e+000	1282.1	
74.0	TE_4130	REAL	0.000000e+000	1230.0	
78.0	TE_4130B	REAL	0.000000e+000	1281.1	
82.0	TE_4000A	REAL	0.000000e+000	895.0	
86.0	TE_4000B	REAL	0.000000e+000	802.5	
90.0	TE_4000C	REAL	0.000000e+000	759.8	
94.0	TE_4000D	REAL	0.000000e+000	819.7	

Şekil 6.10 : Siemens S7400’de model verilerini almak için oluşturulan datablok.

Matlab Simulinkte oluşturulan fırın modelinin gerçek fırın PLC yazılımına entegrasyonu endüstriyel sahadan kaynaklı bir dizi zorluklar nedeniyle kısıtlı sayıda test yapılabilmektedir. Bu zorluklardan en önemlisi mevcut ısıtma fırınının kalite açısından alternatifsiz olarak 1.Sıcak ve Levha Haddehanesi tesislerini beslemesi ve saatlik duruşun onbinlerce dolar gibi yüksek maliyetlere sahip olmasıdır. Entegrasyonda yaşanabilecek problemlerin saatlerce yüksek maliyetli duruşlara sebebiyet vermesi yönetimden izin alınmasında sıkıntı yaratmaktadır. Birkaç kez yapılan denemelerde bu konuda duruş yaşanmasından dolayı fırın çalışırken toplanan gerçek verilerle Matlab Simulink model çalışmalarına devam edilmiştir.

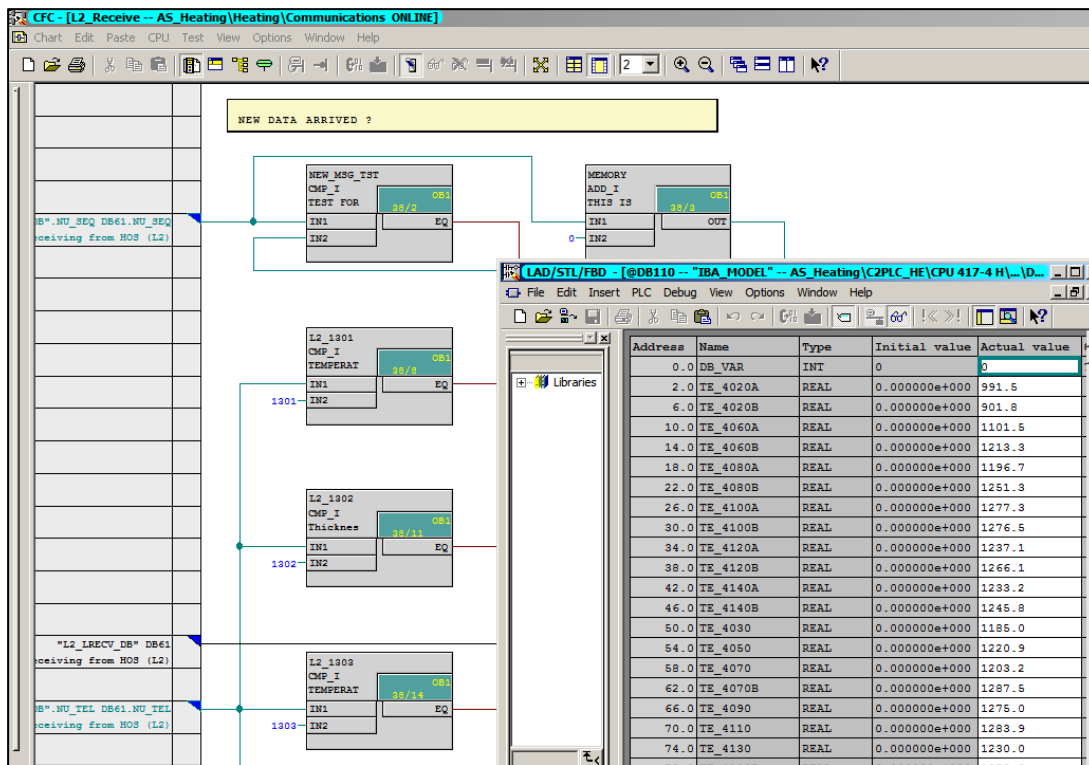
6.2 4.Slab Fırını verilerinin Matlab Simulink ortamına aktarılması

Bu bölümde 4.Slab Fırını normal çalışması esnasında elde edilen verilerin Matlab Simulink ortamına aktarılması ele alınmıştır. 4.Slab Fırını Seviye-1 kontrol katmanı

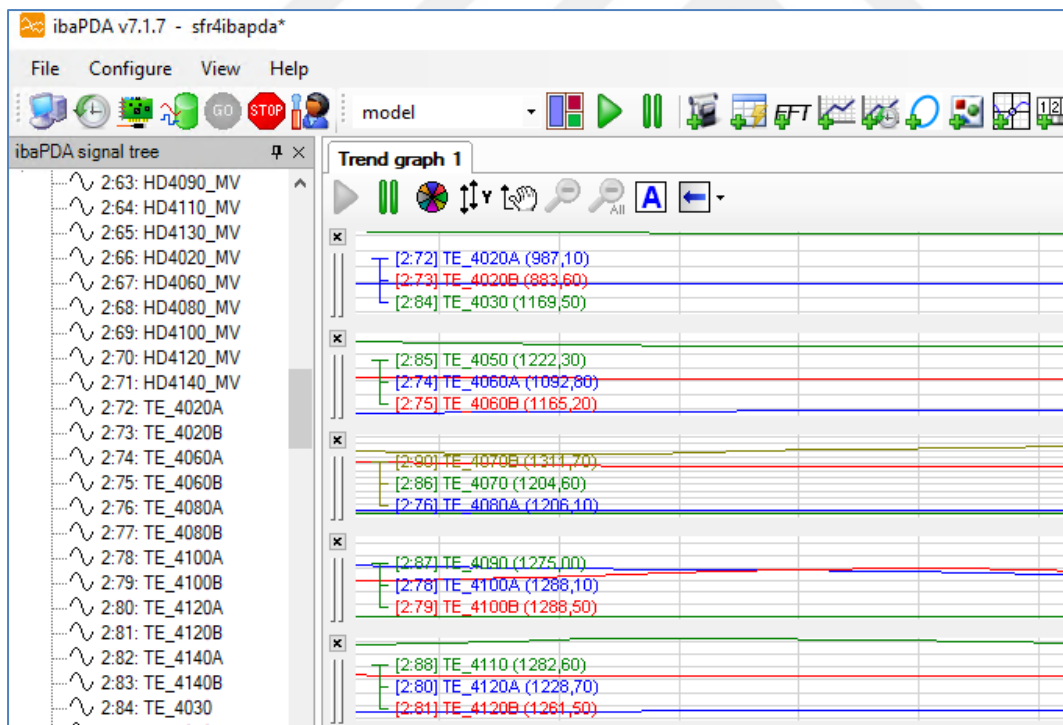
şekil 6.5’de görüldüğü gibi Siemens PCS7 V7.1 DCS sistemine bağlı çalışan S7 417-4H kontrolörler tarafından yönetilmektedir. Sahadaki tüm enstrüman cihazları bu kontrolöre giriş olarak gelmekte ve prosesin belirlediği fonksiyonlar işlendikten sonra bu kontrolör tarafından sahadaki kontrol valflerine ve kontrol cihazlarına çıkış olarak gönderilmektedir.

Slab fırınının bölge sıcaklıkları S-tipi termokupllar vasıtasıyla ölçülerek kontrolöre aktarılmaktadır. S-tipi termokupllar slab fırınlarında hem hassasiyet hem de ölçüm aralığı uygunluğu olarak en çok kullanılan termokupl tipidir. PLC tarafında operator veya Seviye-2 kontrol katmanı tarafından oluşturulan referans değerleri ile bu termokupllar ile ölçülen bölge aktüel sıcaklık değerleri karşılaştırılarak PID çıkışına göre hava ve gaz valflerine kontrol sinyalleri gönderilmektedir. PLC’ye gelen ve giden tüm bu bilgiler aynı zamanda iba trend sistemine aktarılmaktadır. Iba trend sistemi bir PC üzerinde çalışan çok fonksiyonlu ve endüstrideki hemen hemen çoğu CPU’yu destekleyen altyapıya sahip bir veri toplama ve inceleme aracıdır. Iba trend sistemi Siemens PLC’lerden verileri databloklar vasıtasıyla veya direkt giriş-çıkış modülleri üzerinden veri okuyarak alabilmektedir. Fakat giriş ve çıkışlar ölçekleme veya arıza durumuna göre yedeğine otomatik geçme durumlarından dolayı verilerin databloklara işlenerek iba sistemine gönderimi tercih edilmiştir. Şekil 6.10’de Siemens datablok yapısı ve şekil 6.11’de datablok programlama ve iba trend sistemi görülmektedir.

Iba PDA programı ile fırının normal çalışma koşullarında istediğimiz tarihe ait giriş, çıkış ve fırındaki istenilen parametre verileri kayıt edilerek, ibaAnalyzer programı yardımıyla Matlab “.mat” dosyası halinde iba PC’de export yapılarak Matlab Simulink modellerinin çalıştırılacağı PC’ye gönderilmektedir. Matlab programında bu “.mat” dosyası çalıştırıldığında içindeki “.dat” uzantılı veri dosyası workspace dediğimiz Matlab çalışma ortamına aktarılmaktadır. Burada model ile indisleme ve boyut farklılıklarını hatalarını elimine etmek için ekler bölümünde çizelge D.1’de verilen "fileimport.m" program dosyası hazırlanarak “.dat” dosyasındaki tüm veriler Simulink modellerindeki verilere uygun olarak Matlab çalışma ortamına aktarılmıştır. Siemens PLC, iba PDA sistemine verileri 100ms aralıklarla göndermektedir ki çok yavaş bir proses olan fırın ısıtma prosesi için bu hız fazlasıyla yeterlidir. Iba trend sisteminden Matlab Simulink’e ise veriler 1 saniyelik periyotlar halinde gönderilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.11 : (a) Siemens PCS7 datablok programlama (b) iba trend sistemi

6.3 4.Slab Fırını Simulink Modeli ve Kestirici Matlab-Simulink Uygulaması

Bu bölümde 3. ve 4. bölümlerde matematiksel denklemleri verilen 4.Slab Fırını modeli ile daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımı kullanılarak oluşturulan simulink modellerine yer verilmiştir. Ek D’de 4.Slab Fırını modeli için gerekli olan fonksiyonları tanımlayan Matlab program dosyaları detaylıca verilmiştir. Çizelge D.2’de denklem 3.37 ve 3.38 ayrık formu verilen 4.Slab Fırını modeli için Simulink’te oluşturulmuş program dosyası bulunmaktadır. Ayrık formdaki doğrusal olmayan sistem denklemdaki $f(x)$ ve Ek B’de detayları verilen $g(x)$ fonksiyonları bu blok içinde oluşturulmuştur. Çizelge D.3’de ise bu model için sahadaki gerçek fırının parametrelerinin, slab bilgilerinin ve fırın bölge boyutlarının olduğu *furnace_dataparams* fonksiyon program dosyası bulunmaktadır. Fırının ölçülebilen kayıpları ise program dosyası çizelge D.4’de verilen *furnace_losses* fonksiyonu altında hesaplanarak model fonksiyon bloğuna ölçülebilir kayıplar olarak girilmiştir.

Çizelge D.5’de parametrenin bilindiği ve bozucunun bilinmediği durumda ölçülemeyen bozucuların kestiriminin yapıldığı *disturbance_estimation_I_I* fonksiyonu program dosyası oluşturularak şekil C.1’de gösterilen simulink modelinde test edilmiştir.

Ek D’de verilen Matlab program kodları ile oluşturulan fonksiyonların ve Ek C’deki şekillerde verilen Simulink modellerinin çıktıları ve sonuçları bölüm 7.1’de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

6.4 ARMAX Modeli

Bu bölümde, tezin 3.bölümünde oluşturulan 4.Slab Fırını doğrusal olmayan modelinin performansının karşılaştırılması için Salcedo-Hernández (2020)’in tasarladığı ısıtma fırını modeli baz alınarak gerçek fırın verileriyle oluşturulmuş ARMAX modeli ele alınmıştır. ARMAX modeli oluşturulurken 4.Slab Fırını doğrusal olmayan durum ayrık modelinde de kullanılan veri seti kullanılmıştır. Fırından elde edilen veriler Matlab’a aktarıldıktan sonra 12 giriş-1 çıkışlı ARMAX yapısı oluşturularak transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Transfer fonksiyonu elde edilirken ayrık zamanlı ARMAX modeli aşağıdaki polinomlar şeklinde oluşturulmuştur.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t) \quad (6.1)$$

$A(z)$, $B(z)$ ve $C(z)$ polinomlarının dereceleri Salcedo-Hernández'in çalışmasındaki gibi 4 olarak alınmıştır. Giriş işareti gecikmesi, 4.Slab Fırınına sahada uygulanan step testler sonucunda elde edilen ve ayırık modelde de kullanılan 50 saniye olarak uygulanmıştır. Çıkış sinyali olan sıcaklık değerleri bölgeler arasındaki etkileşimden dolayı tüm girişlere bağımlı olduğundan her bir çıkış sinyali için 12 giriş-1 çıkışlı bir ARMAX yapısı tasarlanmıştır (Şekil C.2).

Çizelge D.1'deki Matlab program dosyası ile fırından elde edilen veriler ARMAX modelindeki değişken ve indisleriyle eşleştirme yapılmıştır.

Yukarıda belirlenen parametrelere göre her bir çıkış için transfer fonksiyonları oluşturulmuştur (Çizelge D.6). Transfer fonksiyonlarının kökleri incelenerek sistemi kararsız hale getiren köklerin bulunduğu çıkışlarda polinom dereceleri artırılarak kararsız durumlar elimine edilmiştir. Buna göre dereceler yeniden ayarlanarak nihai polinomlar oluşturularak şekil C.2'deki Matlab Simulink'te kullanılmıştır.

Çizelge D.7'de program kodları verilen ARMAX modeli ve önceki bölümlerde Matlab Simulinkte oluşturulan şekil C.3'de gösterilen 12 bölgeli 4.Slab Fırını modelinin aynı grafiklerde karşılaştırılabilmesi için yazılan Matlab çizim program dosyası görülmektedir. Her iki modelin karşılaştırmasının sonuçları bölüm 7.2'de verilmiştir.

6.5 NMPC Matlab-Simulink Uygulaması

Bu bölümde, daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımıyla tasarlanan bozucu kestiricisiyle birlikte oluşturulan 4.Slab Fırını modelinin uyarlamalı doğrusal olmayan model öngörülü kontrolör (NMPC) ile kontrolünün fonksiyon blokları ele alınmıştır. NMPC kontrolör tasarımının detayları tez raporundaki bölüm 5'de verilmiştir. Şekil C.4'da Matlab Simulink modeli gösterilen NMPC kontrolünün sonuçları bölüm 7.3'de irdelenmiştir. Çizelge D.8-D.11 arasındaki çizelgelerde de NMPC'nin fonksiyon bloklarını oluşturan Matlab program parçacıkları verilmiştir.

Öngörü ufku ve kontrol ufku sırasıyla $H_p = 20$ ve $H_u = 1$ olarak uygulanmıştır. Tüm bölgeler için ölçüt fonksiyonunda $Q = 1$ ve $P = 0.01$ olarak alınmıştır. Örneklem zamanı olarak $T=1$ saniye olarak alınmıştır.

7. SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMALAR

Bu bölümde önceki bölümlerde yapılan çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir. Matlab Simulink'te 4.Slab Fırını modeli oluşturulduktan sonra, kestirici performansları, NMPC sonuçları ile gerçek fırın verileri ve literatürdeki diğer modellerle karşılaştırmalarına yönelik sonuçlar aktarılmıştır.

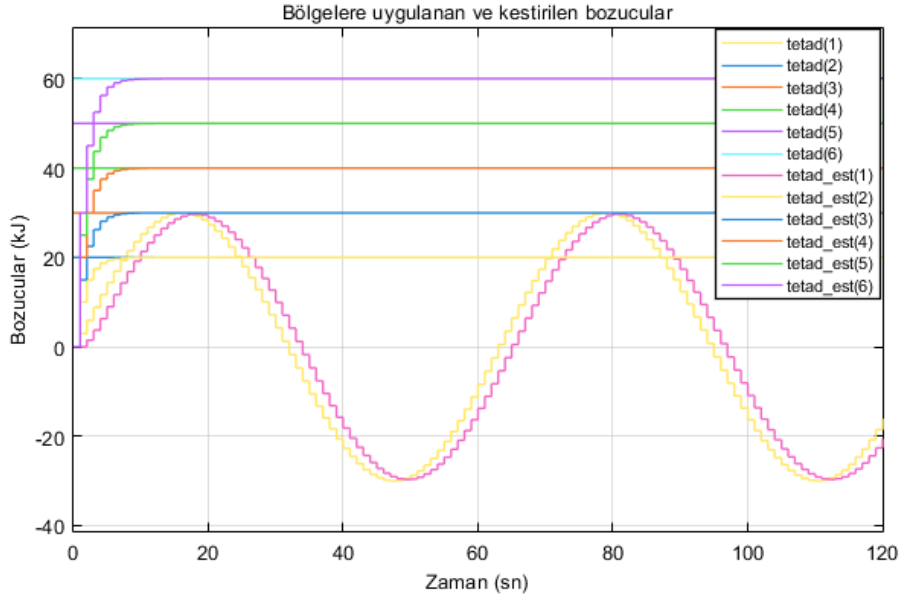
7.1 Kestirici Performanslarının Sonuçları

Bölüm 4'de detayları anlatılan, Ek C ve Ek D'de Matlab Simulink ve fonksiyon blokları program kodları verilen kestirici tasarımının performans ve sonuçları bu bölümde ele alınmıştır.

Aşağıda gösterilen sonuçlarda ilk olarak kestirim metotlarının başarısını test etmek için fırının ilk modellemesi yapılırken 6 bölgeli yapılan testler sırasında elde edilmiştir. Fırının sahada çalıştığı gibi 12 bölgeli olarak modelleme aşamaları çok kompleks ve uzun süreceği için ilk denemeler altı bölgeli yapılarak kestirim metotlarının başarılı kestirdikleri görüldükten sonra 3. Bölümdeki 4.Slab fırını modeli bölümünde ayrıntılı detayları anlatılan ve Ek-D'de fonksiyon bloklarının program kodları verilen ve buna göre tasarlanan simulink modelleri (Ek C) için 12 bölgeli olarak test edilmiştir.

Fırındaki kok gazı kalorifik değeri de laboratuvar koşullarında ölçülebilmesi ve fırının ısıtma sisteminde kontrol performansını etkileyen en büyük etkenin ölçülemeyen bozucular olmasından dolayı NMPC ve literatürdeki model karşılaştırma denemelerinde uyarlama için bozucu kestiricisi kullanılmıştır.

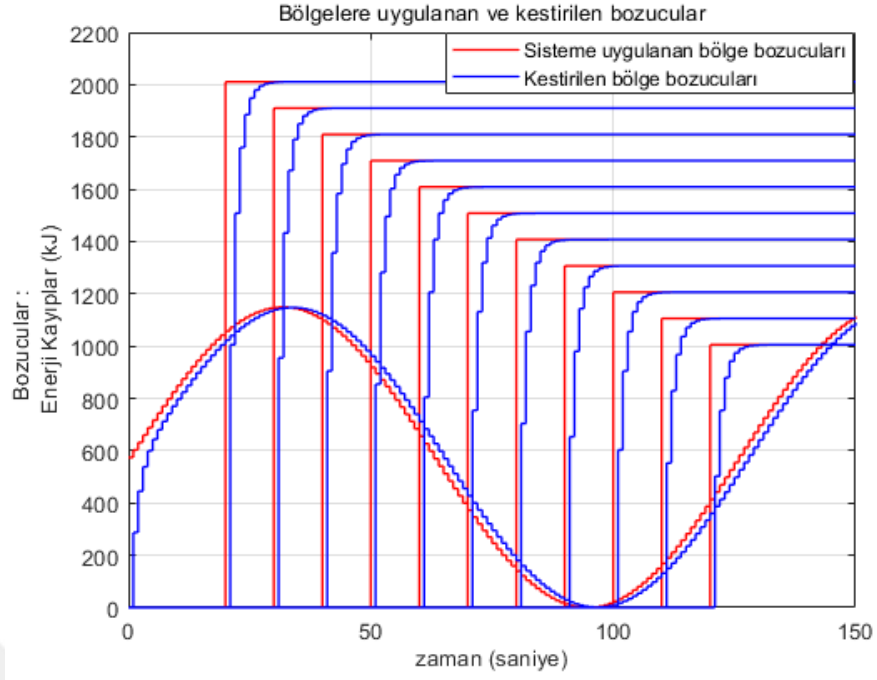
Bozucu kestirimi denemeleri kolaylık olması açısından ilk olarak altı bölgeli fırın modeli oluşturularak test edilmiştir. Sistemin θ_{di} bozucusunun 1.indisine yani fırının 1.bölgesine sinuzodial ve diğer bölgelerine ise değişken oranlarda sabit basamak bozucusu uygulanmış ve detayları 4.2'de anlatılan I&I bozucu kestirim metodunun bozucuları başarıyla kestirdiği görülmüştür (Şekil 7.1). Bu grafikte $i=1,2,3,4,5,6$ olmak üzere $tetad(i)$ ile gösterilen değişkenler bölgelere uygulanan bozuculardır. Kestirilen bozucular ise $tetad_est(i)$ ile ifade edilmiştir.



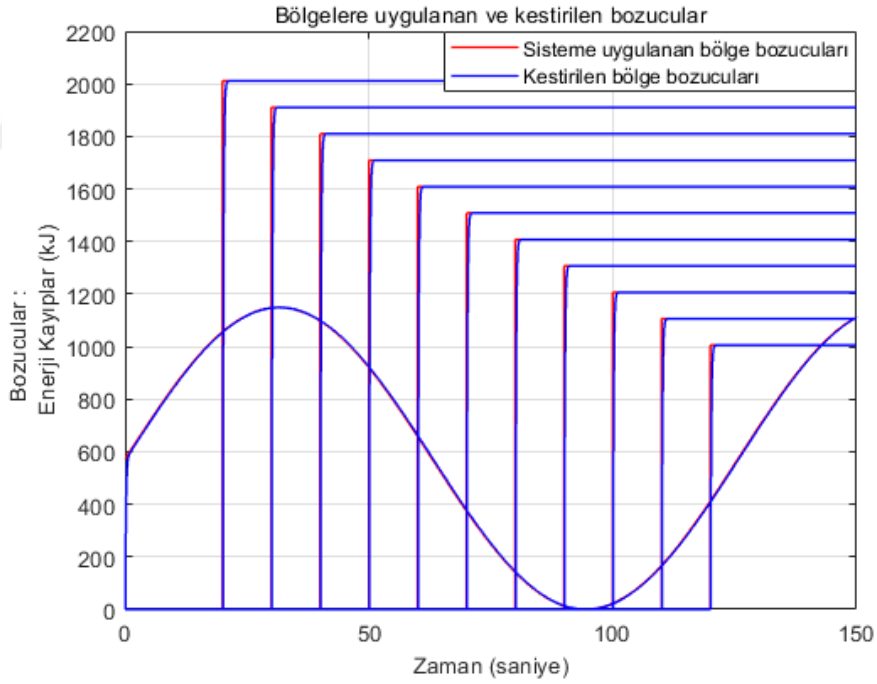
Şekil 7.1 : Altı bölge fırın için θ_{di} bozucusunun kestirimi.

Altı bölge için oluşturulan modelde tasarlanan kestiricinin bozucuları başarılı bir şekilde kestirmesinden sonra 3. bölümde detayları verilen 4.Slab fırınının 12 bölge modeli için 4.2’de anlatılan I&I bozucu kestiricisi 12 bölge fırına uygun olarak yeniden tasarlanmıştır. Şekil 7.2’de tasarlanan 12 bölge model için bozucuların yani ölçülemeyen fırın enerji kayıplarının kestirim sonuçları verilmiştir. Kırmızı renkle gösterilen değişkenler fırındaki bölgelere uygulanan bozucular ve mavi renkle gösterilen değişkenler ise tasarlanan kestiricinin kestirdiği bölge bozucularıdır. Uygulanan bozucu ile kestirimi arasında örneklem zamanı $T=1$ saniye kadar faz farkı vardır (Şekil 7.2 (a)). Şekil 7.2 (b)’de görüldüğü gibi örneklem zamanı $T=0.1$ saniye alındığında faz farkı gözle görülmeyecektir.

Aşağıdaki şekil 7.2’den de görüleceği üzere bozucu kestiricisi sisteme uygulanan bozucuları başarıyla kestirebilmektedir. Bozucular kiloJoule cinsinden bölgelerdeki enerji kayıplarını göstermektedir. Grafiği rahat okuyabilmek için bölgelere uygulanan bozucular farklı zamanlarda ve farklı büyüklüklerde uygulanmıştır. Değişken sayısının fazla olmasından dolayı renk karmaşası olmaması için uygulanan ve kestirilen bozucular için iki renk kullanılmıştır. Toplamda 12 bölge olduğundan 12 bölge bozucusu ve 12 kestirilen bozucu bulunmaktadır.



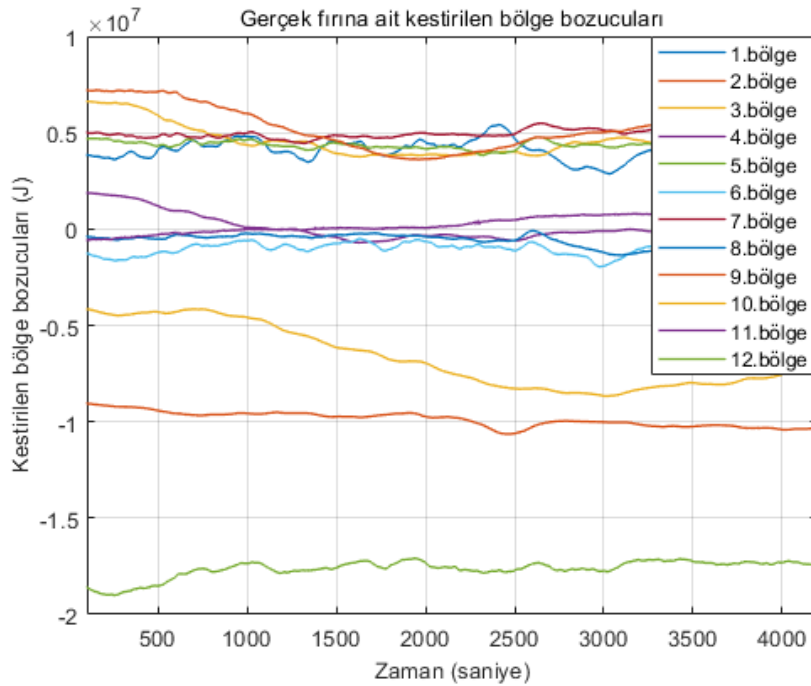
(a)



Şekil 7.2 : θ_{di} bozucusunun kestirimi (a) $T=1sn$ (b) $T=0.1sn$.

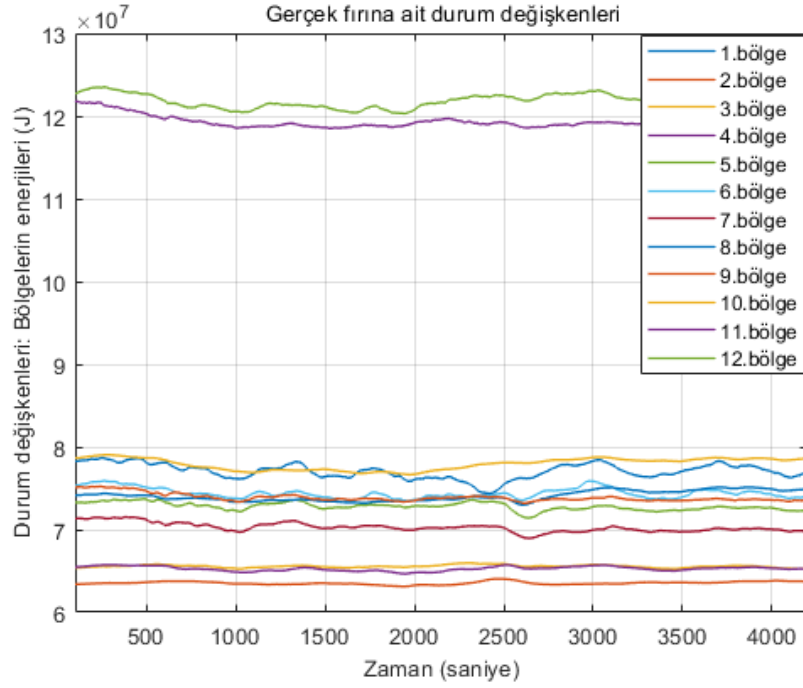
Sisteme uygulanan bozucuların başarılı kestirilmesinden dolayı 4.Slab Fırınındaki gerçek bozucuların kestirimi için Şekil C.3'deki Simulink modeli oluşturulmuştur. Gerçek fırın verilerinin modele girilmesiyle elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Şekil 7.3'de gerçek slab fırınının ölçülemeyen enerji kayıplarını ve fırın

dinamiğindeki belirsizlikleri ifade eden bölge bozucularının detayları bölüm 4.2’de anlatılan daldırma ve değişmezlik bozucu kestiricisi ile kestiriminin sonuçları verilmiştir. Şekil 7.2’de verilen bozucular tasarlanan kestiricinin performansını ölçmek için sisteme dışarıdan uygulanan bozuculardır. Şekil 7.3’de ise fırın sisteminden alınan gerçek sıcaklık, kontrol işareti, yakma hava ve kok gazı sıcaklıkları ile operatörlerin girdiği kok gazı kalorifik değer ve diğer fırın parametrelerinin gerçek dataları kullanılarak elde edilen bozucuların kestirimi gösterilmiştir. Burada fırındaki kontrol işaretlerinin aynısı oluşturulan modele uygulanmıştır. Kestirici çıkışının kestirdiği bozucular şekil 7.3’de gösterilmiştir. Buradaki bozucular bölgelerin enerji kayıpları ve fırın modelinin dinamiğindeki belirsizlikler olup Joule cinsinden verilmiştir. 4.Slab Fırını 12 bölge olduğundan 12 bölge bozucusu bulunmaktadır.

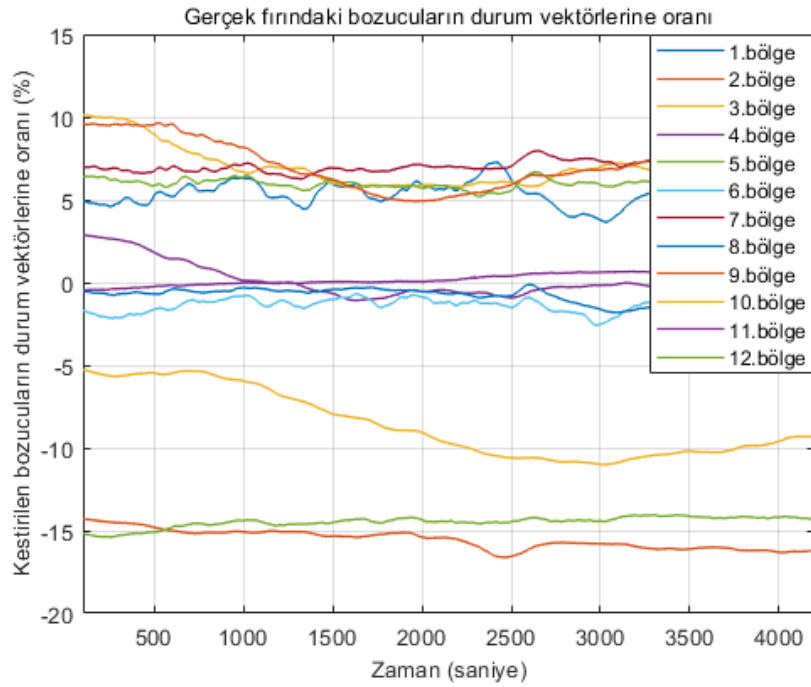


Şekil 7.3 : Gerçek slab fırını verileriyle θ_{di} bozucusunun kestirimi.

Gerçek fırından elde edilen sıcaklıklara göre fırının tüm bölgelerinin enerjilerini gösteren denklem 3.29’da ve ayrık denklemi 3.37’de verilen x_i durum vektörünün grafiği şekil 7.4’de gösterilmiştir. Enerjiler Joule cinsinden ifade edilmiştir. 11. ve 12. bölgeler cehennemlik bölgesinin son yakıcıları olduğundan enerjileri yüksektir. O bölgedeki ısıtma dinamikleri ve enerji kayıpları da çıkış kapağına yakın olduklarında dolayı fazla olmaktadır. Çıkış kapağı her açılıp kapandığından bu bölgeden yoğun enerji çıkışı olmaktadır.



Şekil 7.4 : Gerçek slab fırını x durumlarının grafiği.



Şekil 7.5 : Gerçek slab fırını bozucularının durum vektörlerine oranı.

Şekil 7.5’de kestirilen bozucuların 4.Slab Fırının bölgelerindeki enerjiye oranları verilmiştir. Bu oranlarda her bölge için değişmekle beraber yaklaşık olarak %10-15 arasında değişmektedir. Burada ki veriler fırından alındığından ve bozucular fırının prosesinde doğal olarak ölçülemediğinden dolayı gerçekte ne kadar bozucu olduğu

öngörülemezdir. Fakat bölgelerin enerji kayıplarının ne kadar olabileceğine yönelik olarak saha tecrübelerinden ve geçmiş verilerden çıkarım yapılabilir. %10-15 gibi kayıplar ve dinamikteki değişimler slab fırınları prosesleri için doğaldır. Fırınların yaşına, kullandıkları yakıta ve yapımında kullandıkları refrakter malzemelere ve slab şarjlarına göre bu oranlar değişebilmektedir. Fakat %10-15 gibi kayıplar kabul edilebilir oranların içerisinde.

7.2 ARMAX Modeli ile Önerilen Modelin Karşılaştırılması

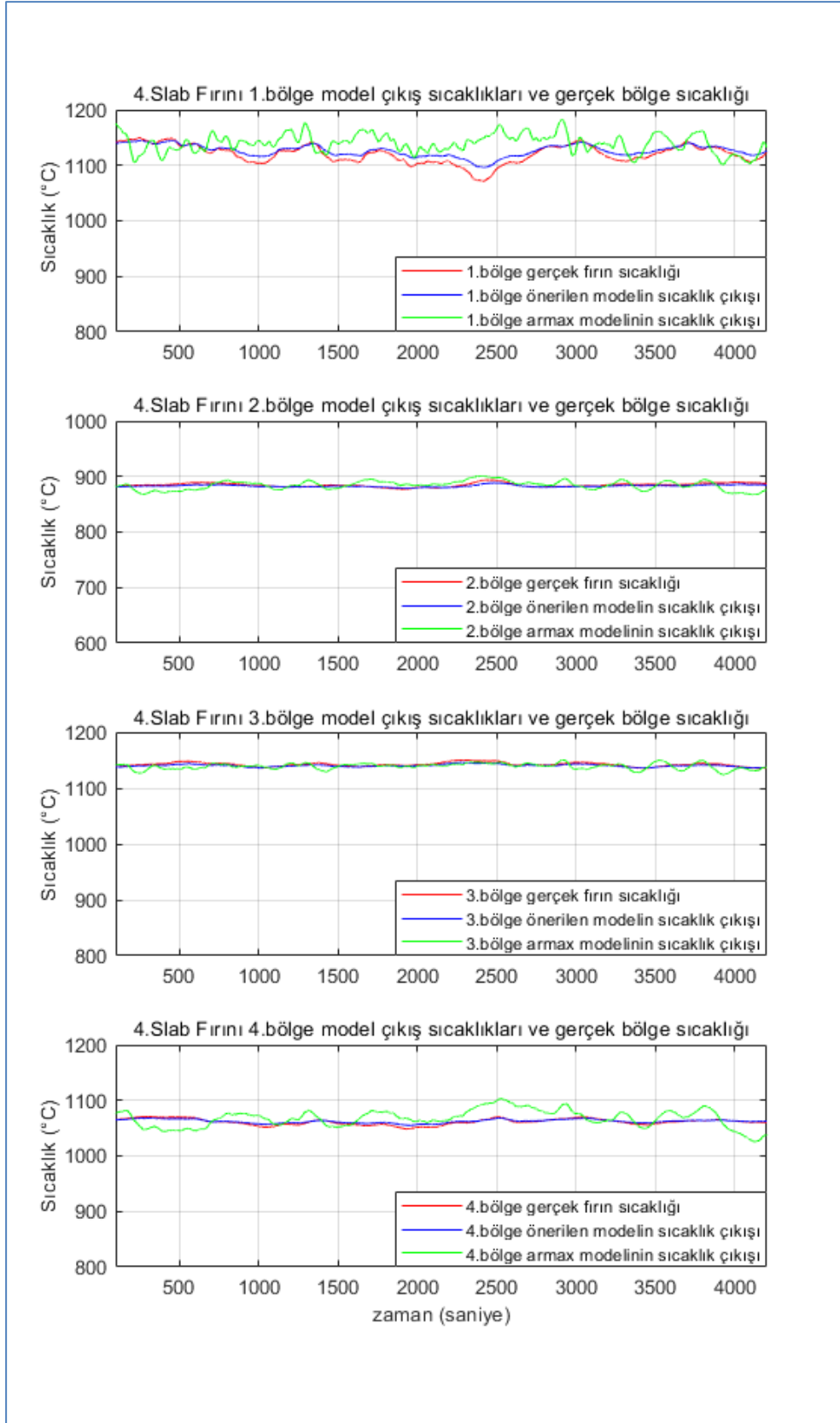
Bu bölümde, bölüm 6.3’de bozucu kestiricisi ile birlikte tasarlanan doğrusal olmayan dinamik fırın modelinin, bölüm 6.4’de detayları verilen ARMAX fırın modeli ile birlikte gerçek fırın sıcaklık verilerinin karşılaştırma sonuçları ele alınmıştır. Ek D’deki fonksiyon bloklarının program kodları ile oluşturulan şekil C.2’de gösterilen ARMAX Simulink modelinden elde edilen bölge çıkış sıcaklıklarının önerilen model ile karşılaştırma sonuçları aşağıda verilmiştir.

Bu bölümde, daha önceki bölümlerde oluşturulan ayrık doğrusal olmayan fırın modelinin ve gerçek fırın verilerine göre oluşturulan ARMAX modelinin, gerçek slab fırını verileriyle Simulink ortamında sistem çıkışları detaylı incelenmiştir. Her iki modelin fırın bölge çıkış sıcaklıkları, birbirleriyle ve fırın gerçek sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmıştır. Model çıktılarının gerçek sıcaklık değerleri ile farkları (hataları) alınarak hata oranları irdelenmiştir. Bu sonuçlara göre önerilen modelin hata oranı maksimum 10°C civarında kalarak fırının gerçek sıcaklıklara göre %1.2 oranıyla iyi bir performans göstermiştir. ARMAX modelinin sıcaklık çıktıları 50°C civarlarına çıktığı görülmüştür. Bu hata oranı ısıtma pratiği açısından kabul edilebilir oranların çok üstündedir. Genel slab fırını ısıtma sistemi pratiğinde bu oranın 20-30°C’yi aşmaması beklenmektedir. Bazı bölgelerde bu oranın ARMAX modelinin çevrimdışı sistem tanılamayı içermesi ve kayıpları iyi modelleyememesinden dolayı 100°C’lere kadar çıktığı görülmektedir.

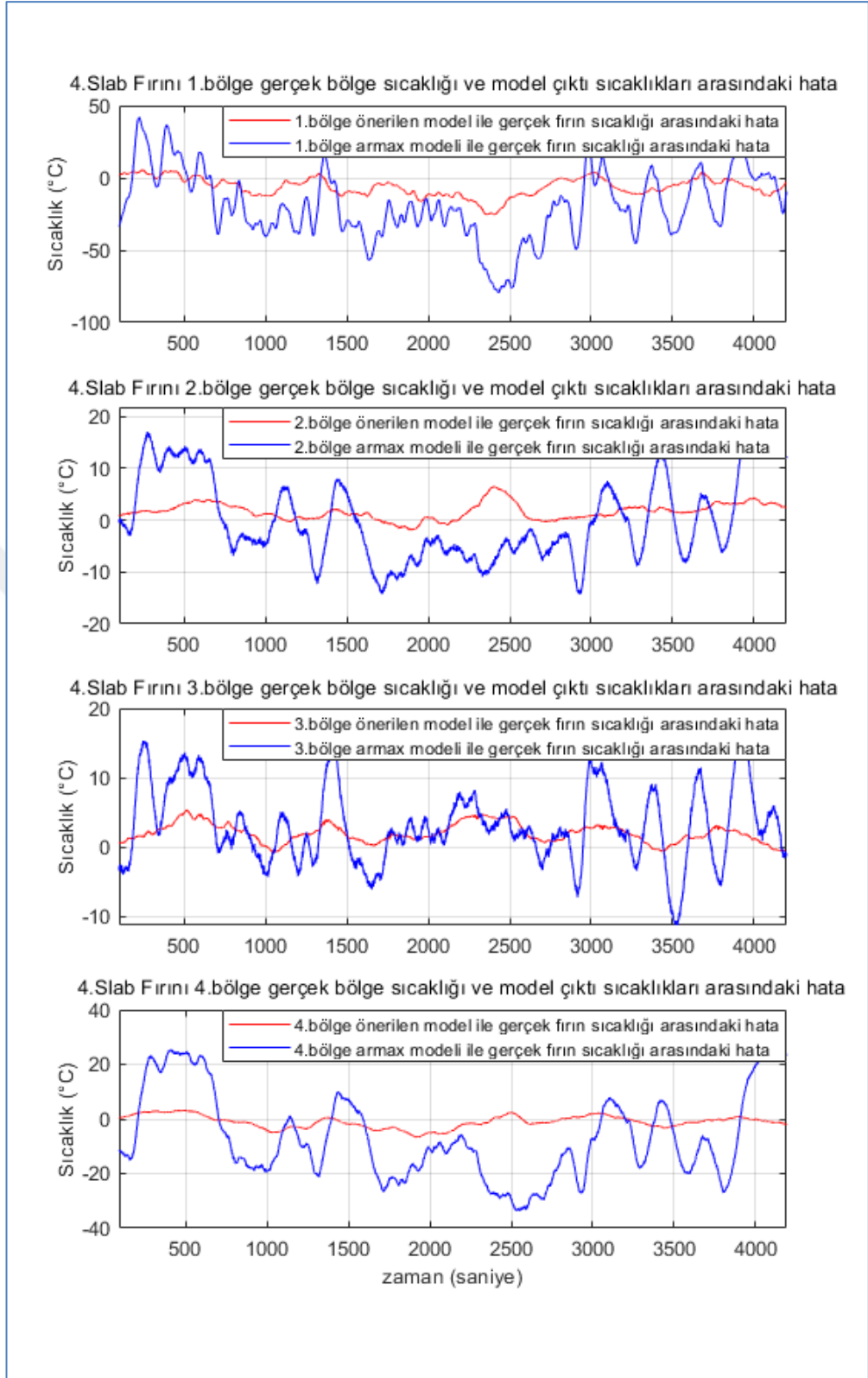
Önerilen yöntemin çevrimiçi bir sistem tanıma olması ve sistem dinamiği ve sıcaklık kayıplarının çevrimiçi bir şekilde modele katılmasından dolayı ARMAX modeline göre çok daha iyi ve hassas bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Aşağıdaki şekillerde her bir bölge için, oluşturulan fırın modelinin sıcaklık çıktıları, gerçek fırın verilerine göre oluşturulan ARMAX modellerinin sıcaklık çıktılarıyla ve

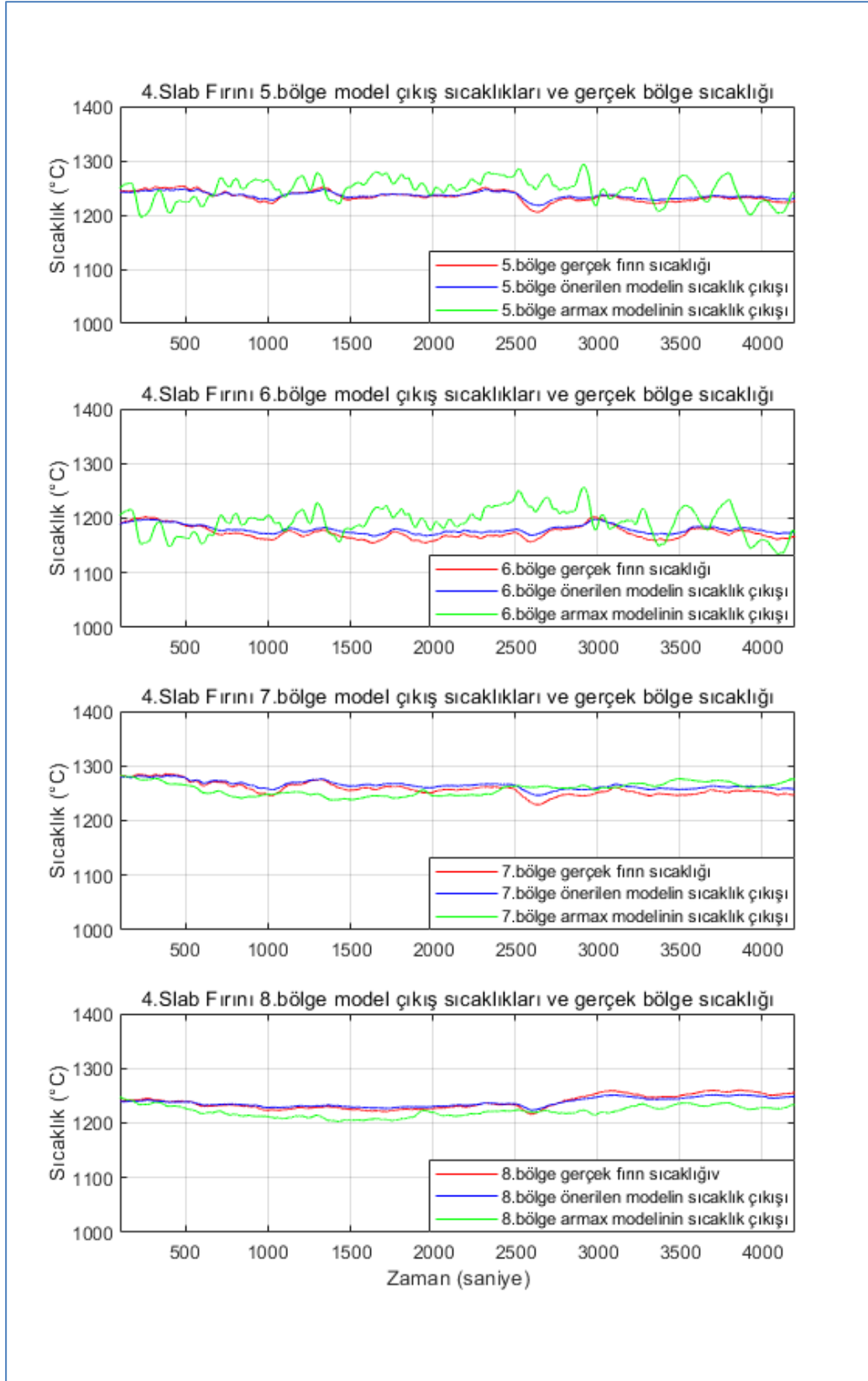
gerçek fırın sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmakta ve hata oranları gösterilmektedir. Şekil 7.6, 7.8 ve 7.10’da sırasıyla fırın önısıtma, ısıtma ve cehennemlik bölgelerinin sıcaklık karşılaştırmaları verilmektedir. Kırmızı renkli grafik gerçek fırın sıcaklığını, mavi renkli grafik oluşturulan fırın modelinin çıkış sıcaklığını ve yeşil renkli olanı ise ARMAX modelinin çıkış sıcaklığını göstermektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi önerilen fırın modelinin sıcaklık değerleri gerçek fırın sıcaklık değerlerine çok yakın seyretmekteyken ARMAX modelinin çıkış sıcaklığı çok fazla sapmaktadır. Sıcaklık sapmaların grafiklerde daha anlaşılır olabilmesi için şekil 7.7, 7.9 ve 7.11’de de her iki modelin sırasıyla önısıtma, ısıtma ve cehennemlik bölgelerindeki gerçek fırın sıcaklıkları arasındaki farklar gösterilmiştir. Bu şekillerde kırmızı renkli grafik önerilen fırın modeli ile gerçek fırın sıcaklıkları arasındaki hataları gösterirken, mavi renkle gösterilen grafik ise ARMAX modeli ile gerçek fırın sıcaklıkları arasındaki hataları vermektedir. Bu sonuçlar kestirici ile birlikte önerilen doğrusal olmayan fırın modelinin doğruluğunu teyit etmekte, literatürde önerilen ve son 5 yıldaki çalışmalarda da referans gösterilen ARMAX modelinden çok daha iyi bir performans göstermektedir.



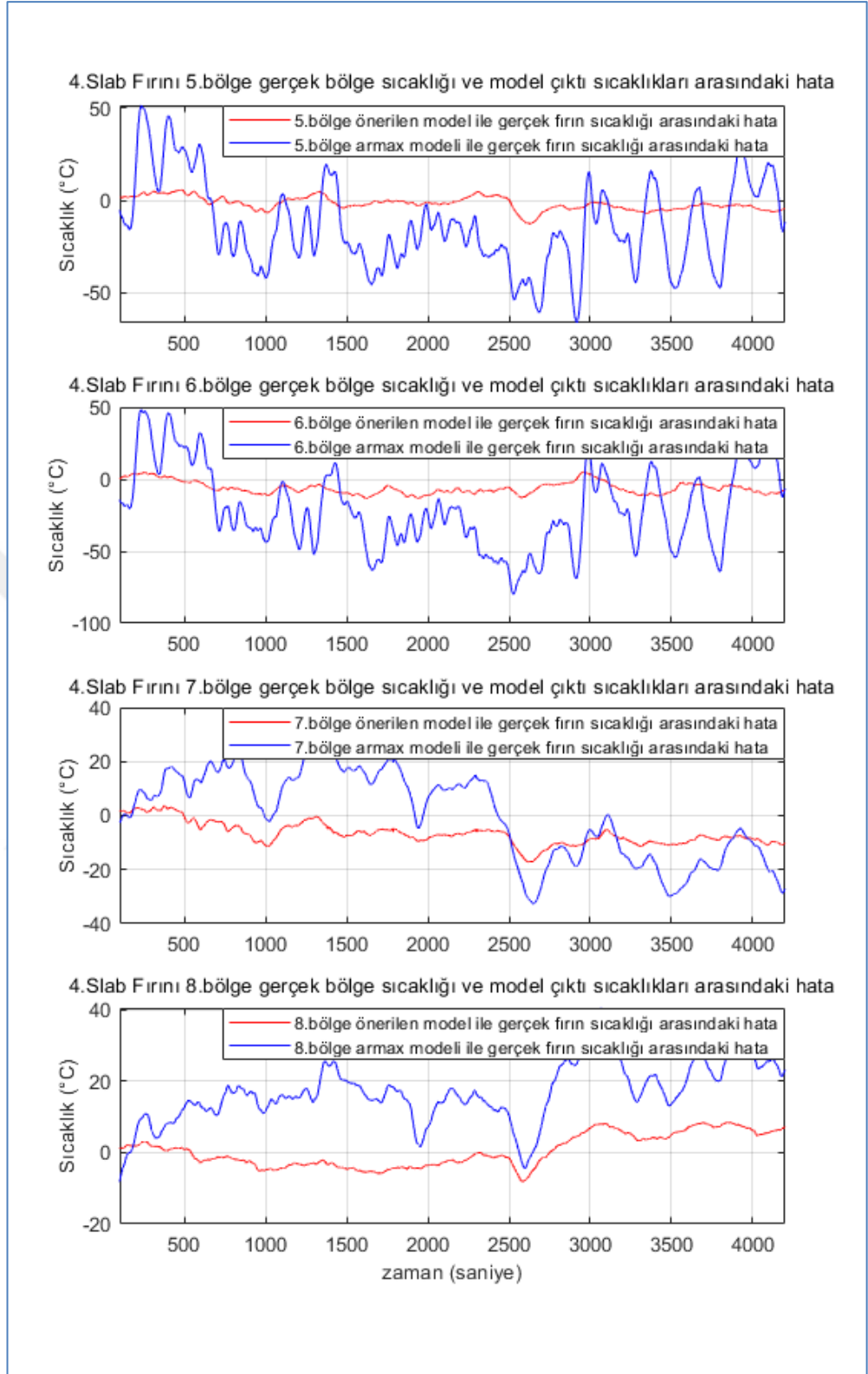
Şekil 7.6 : 4.Slab Fırını önısıtma bölgesi (Bölge 1-4) için önerilen model ile ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının karşılaştırması



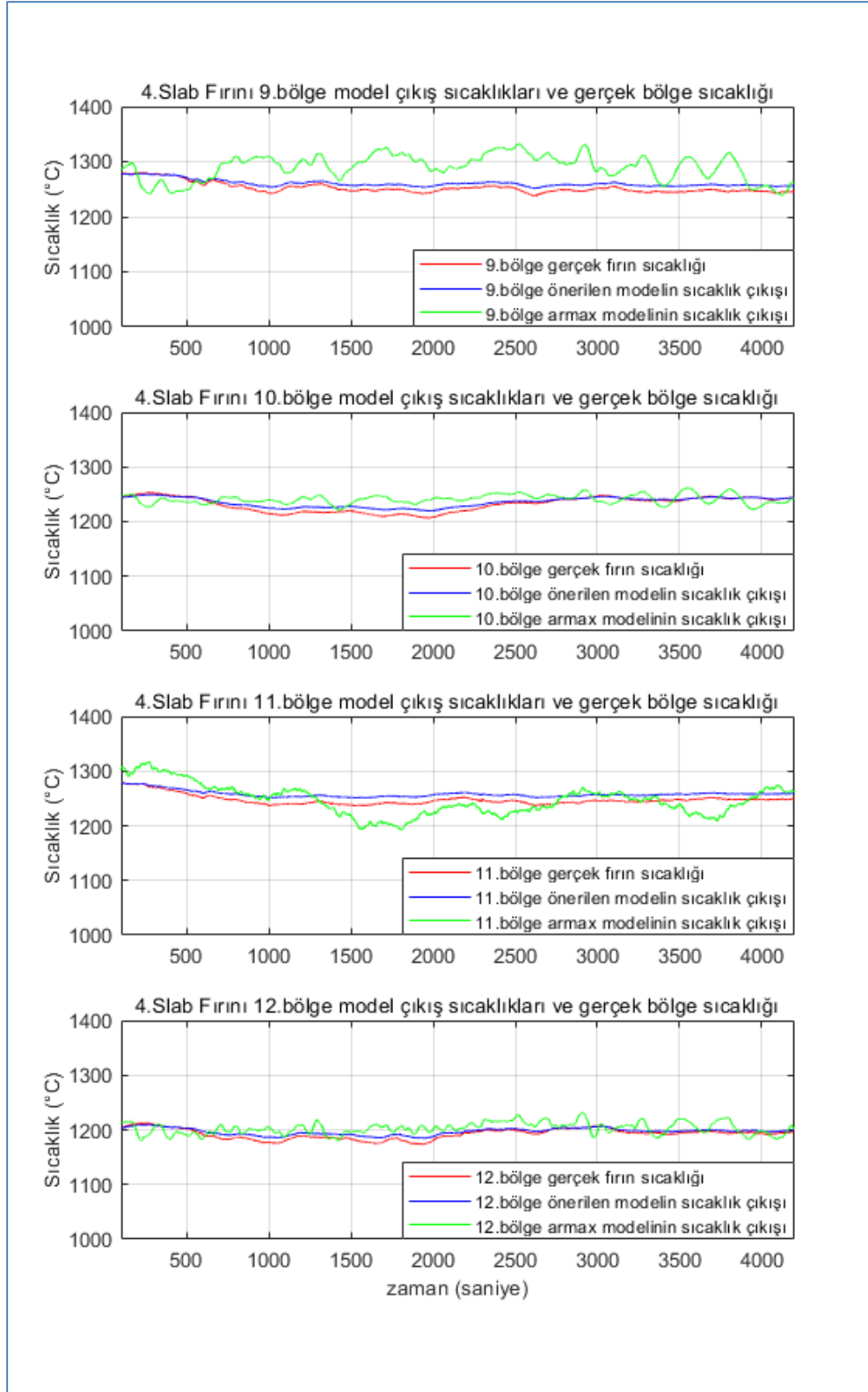
Şekil 7.7 : 4.Slab Fırını ön ısıtma bölgesi için önerilen model ve ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının gerçek fırın sıcaklıkları ile hatalarının karşılaştırması



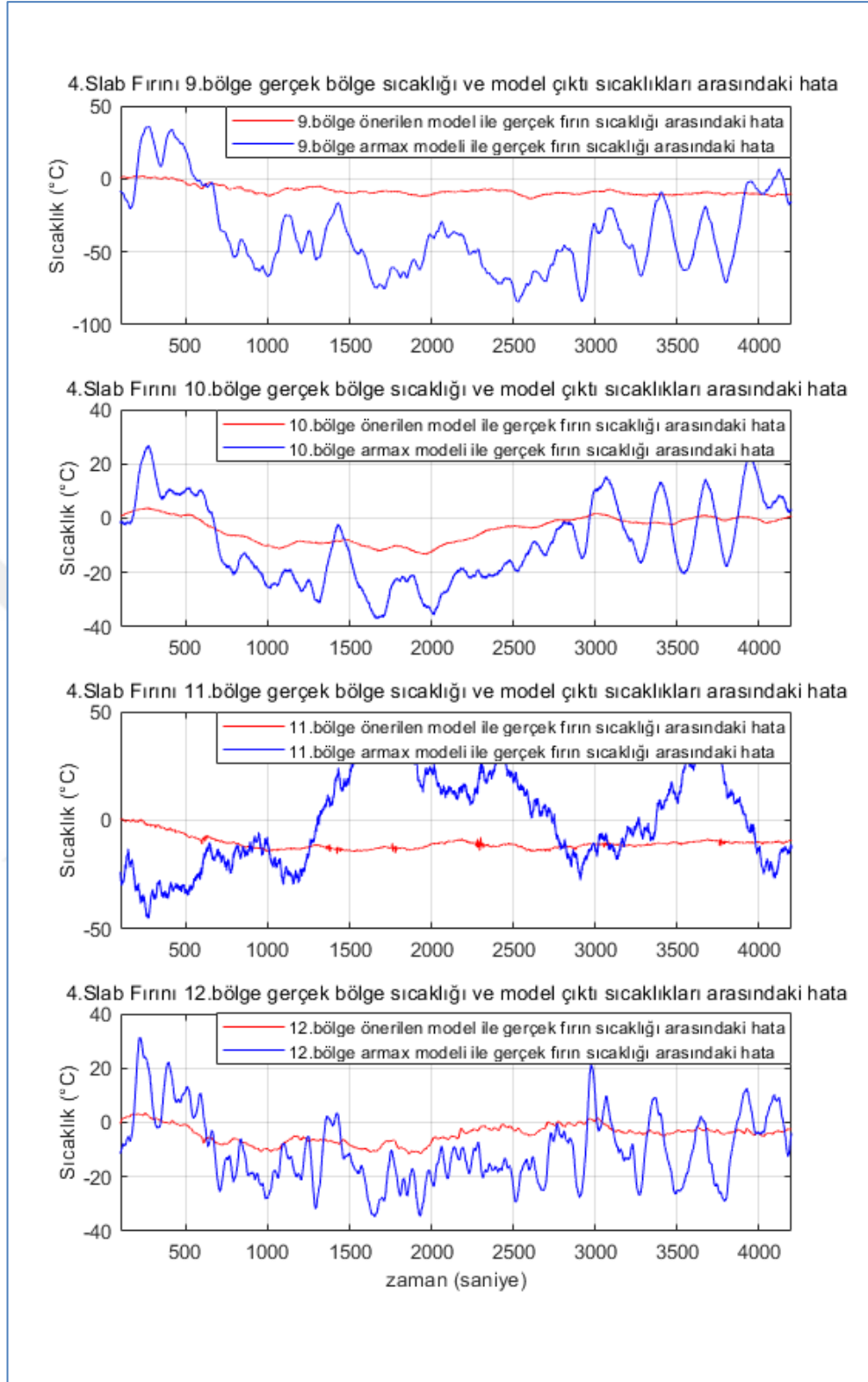
Şekil 7.8 : 4.Slab Fırını ısıtma bölgesi (Bölge 5-8) için önerilen model ile ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının karşılaştırması



Şekil 7.9 : 4.Slab Fırını ısıtma bölgesi için önerilen model ve ARMAX modelinin sıcaklık çıktıların gerçek fırın sıcaklıkları ile hatalarının karşılaştırması



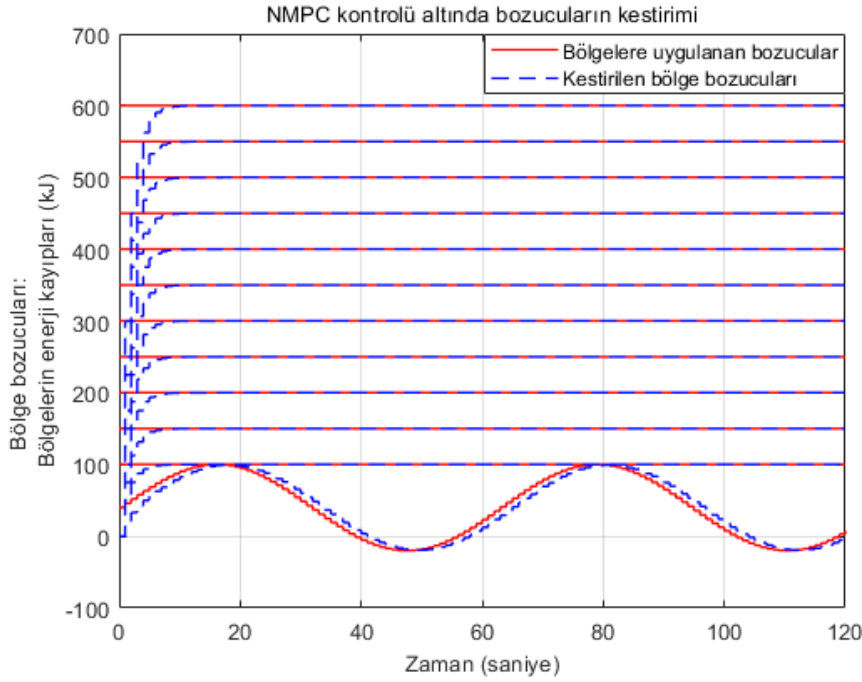
Şekil 7.10 : 4.Slab Fırını cehennemlik bölgesi (Bölge 9-12) için önerilen model ile ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının karşılaştırması



Şekil 7.11 : 4.Slab Fırını cehennemlik bölgesi için önerilen model ve ARMAX modelinin sıcaklık çıktılarının gerçek fırın sıcaklıkları ile hatalarının karşılaştırması

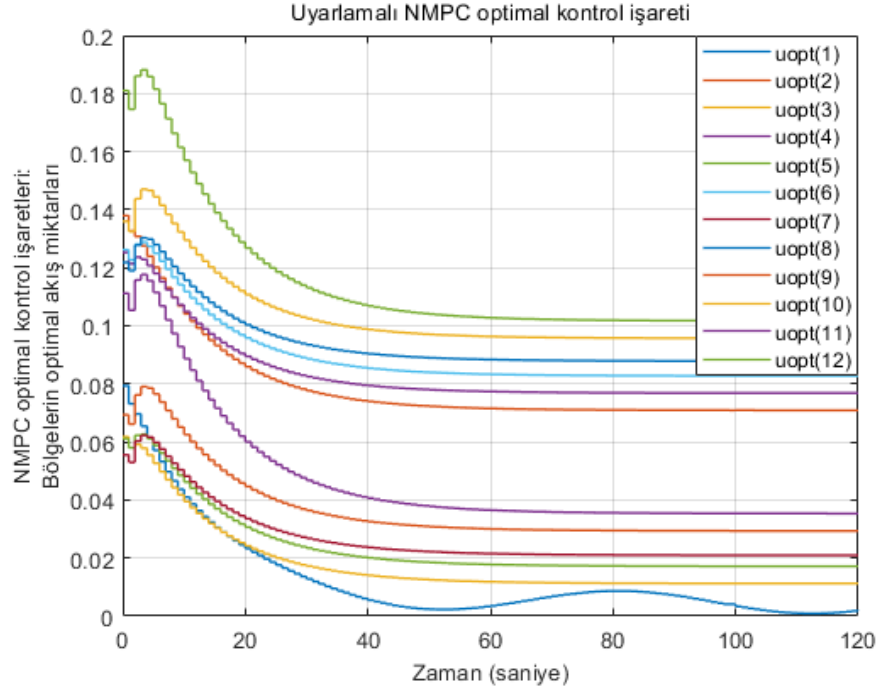
7.3 Slab Fırını Modelinin NMPC ile Kontrolü

Bu bölümde, önerilen slab fırını modelinin uyarlamalı doğrusal olmayan model öngörülü kontrolör ile elde edilen sonuçları irdelenmiştir. Şekil C4'deki Matlab Simulink modeli oluşturularak, Ek D'de Matlab fonksiyon blokları program kodları verilen kontrolör tasarlanarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

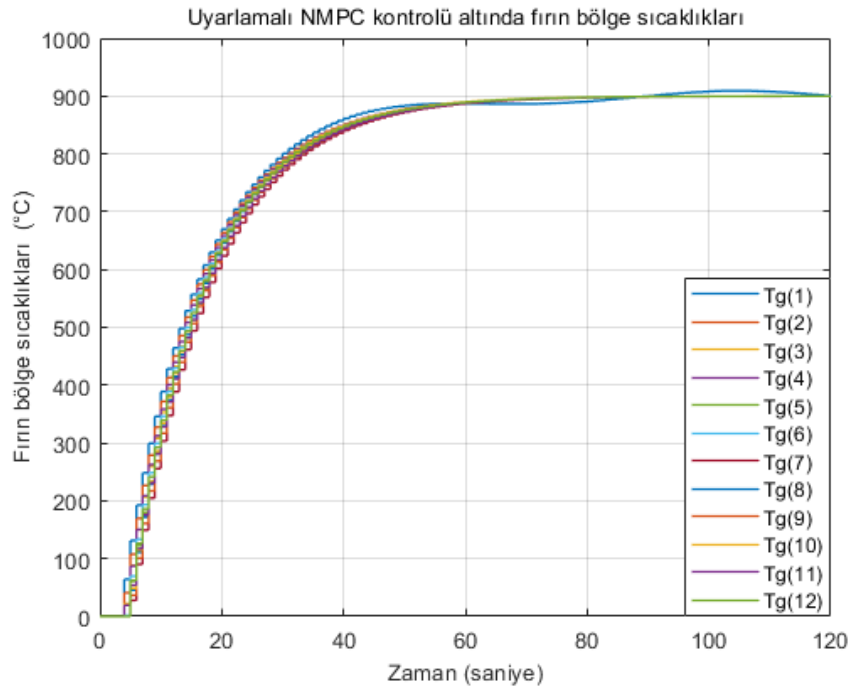


Şekil 7.12 : NMPC kontrolü altında θ_{di} bozucularının kestirimi

Şekil 7.12'de NMPC kontrolü altında fırının 12 bölgesine farklı oranlarda uygulanan bozucuların kestirimi için oluşturulan kestiricinin performansı gösterilmiştir. Kestirici performansını daha iyi anlamak için 1.bölgeye sinüzoidal bir bozucu uygulanmıştır. Grafikten de görüleceği üzere NMPC kontrolü altında önerilen daldırma ve değişmezlik (I&I) yaklaşımlı bozucu kestiricisi sinüzoidal ve değişik oranlarda bozucuları başarılı şekilde kestirebilmektedir. Sinüzoidal grafikteki uygulanan ve kestirilen bozucudaki gecikme örnekleme zamanından kaynaklanmaktadır. Örnekleme zamanı $T=1$ saniye olarak alınmıştır. $T=0.1$ saniye alındığında bu gecikme olmamaktadır. Fırın proseslerinde ölü zamanın 50 saniyeler civarında olduğu düşünürsek 1 saniyelik örnekleme zamanı uygundur. Gerçek fırınlarda bozucular zamanla değişmelerde çok yavaş proses olmalarından dolayı bu kadar sık değişmezler ve ani dinamik değişikliklere sahip değildirler.



Şekil 7.13 : Uyarlamalı NMPC kontrol işareti

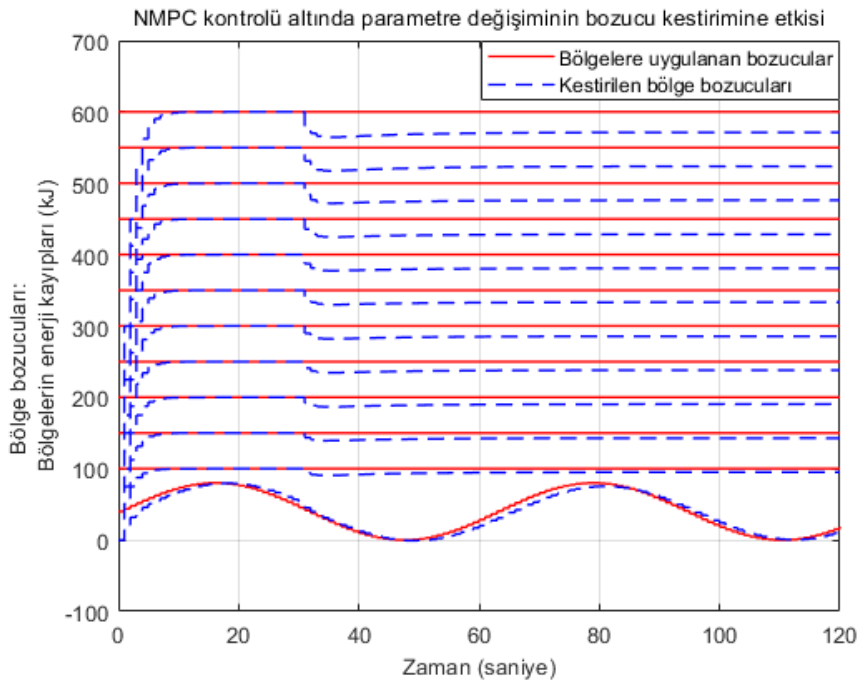


Şekil 7.14 : Uyarlamalı NMPC çıkış sinyali($y=T_{gi}$)

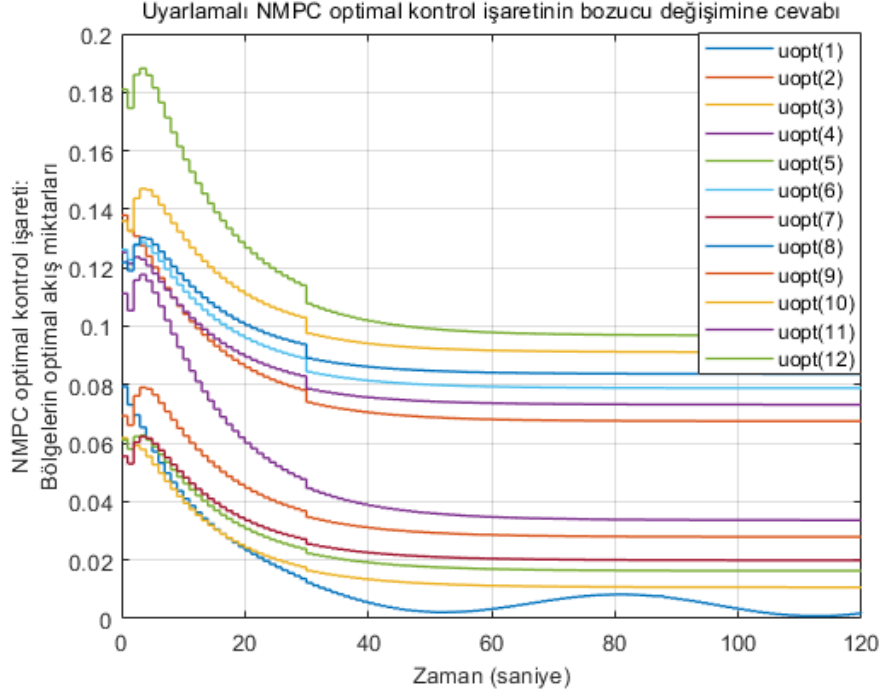
Şekil 7.13 ve 7.14'de uyarlamalı NMPC'nin ürettiği bölgelerin istenen optimal akış miktarlarını $\text{Nm}^3/\text{saniye}$ cinsinden ifade eden optimal kontrol işaretleri ve sıcaklık referansını takip eden fırın bölge sıcaklıkları gösterilmektedir. NMPC'nin performansını ölçmek için tüm bölgelere 900°C sıcaklık referansı uygulanmıştır.

Grafiklerden de görüldüğü gibi NMPC'nin ürettiği kontrol işareti sistemi en optimum şekilde hedef sıcaklığına oturtmaktadır. Sıcaklık hedefine yaklaşıldığında kontrol işaretide sıfıra doğru yaklaşmaktadır. Fırının 1.bölgesindeki sinuzidal bozucudan dolayı 1.bölgeye uygulanan kontrol işareti 60 ile 100 saniye arası aşağı ve yukarı doğru bump hareketleri yaparak sıcaklığı tutturmaya çalışmaktadır. Bu durum uyguladığımız sinuzoidal bozucudan kaynaklanmaktadır. Normalde fırınlarda böyle sık değişen sinuzidal bozucular olmaz. Şekil 7.14'de koyu yeşille görülen dalgalanma, fırının 1.bölgesine uygulanan sinuzoidal bozucuyu kontrol altına almaya çalışan kontrolcünün kontrol kısıtının alt limitine takıldığından kaynaklanmaktadır. 1.bölgedeki kontrol işareti sıcaklığı aşağıya çekmek için eksi bölgeye taşmak istemekte fakat kontrolcünün fırının 1.bölgesi için oluşturduğu kontrol işareti katı kontrol kısıtından dolayı sıfırın altına düşemediğinden hafif bir sıcaklık yükselmesi görmekteyiz ki buda kontrol kısıtımızın doğru bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

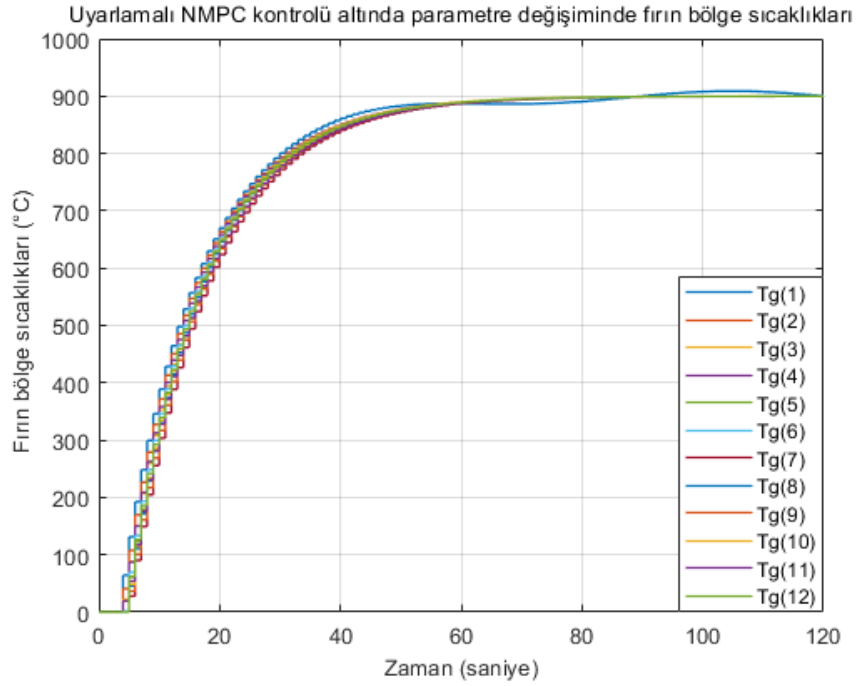
Fırının zeta (ζ) kok gazı kalorifik parametre indeksi değiştirildiğine NMPC kontrolünün davranışı da test edilmiştir. Testin 30. saniyesinde bu parametre %5 artırılmış ve bundan kaynaklı bölge sıcaklıklarının kayıpları 30. saniyede ölçülemeyen bozuculara yansımıştır (Şekil 7.15).



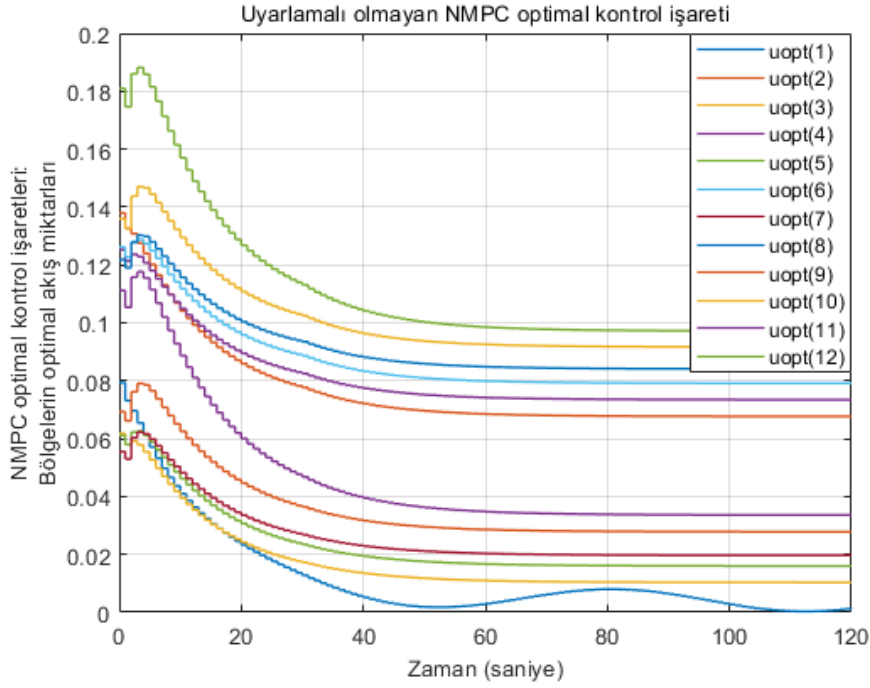
Şekil 7.15 : ζ parametresinin değişiminde bozucu kestirimi



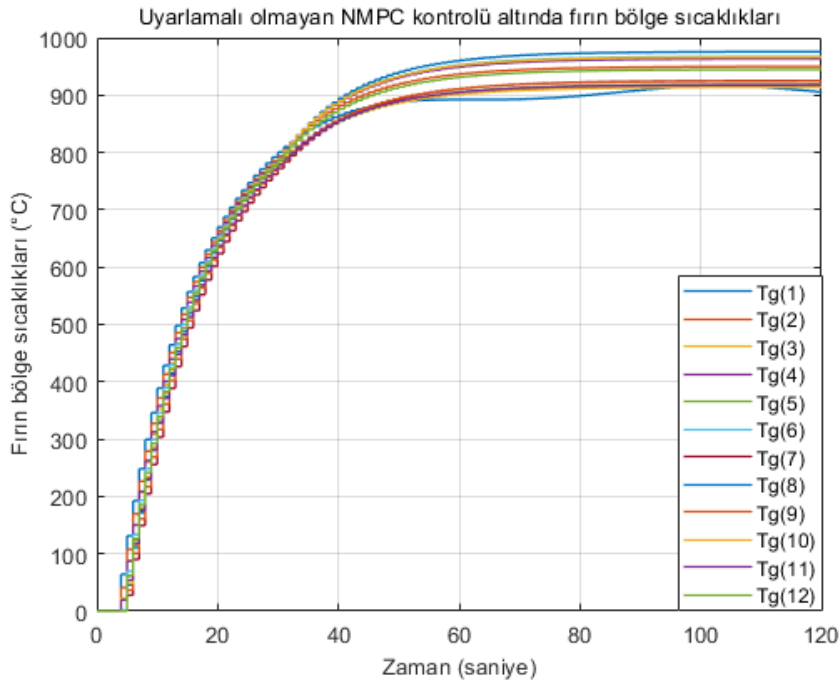
Şekil 7.16 : Uyarlamalı NMPC kontrol işaretinin bozucu değişimine cevabı



Şekil 7.17 : Uyarlamalı NMPC çıkış sinyalinin bozucu değişiminden etkilenmemesi ($T_{ref_i} = 900 \text{ } ^\circ\text{C}$)



Şekil 7.18 : Uyarlamalı olmayan NMPC kontrol işaretinin bozucu değişimine cevabı



Şekil 7.19 : Uyarlamalı olmayan NMPC çıkış sinyalinin bozucu değişiminden etkilenmesi ($T_{refgi} = 900^{\circ}\text{C}$)

Uyarlamalı NMPC şekil 7.16’da görüldüğü gibi 30. saniye de kontrol işaretini güncelleyerek bu durumu düzeltmektedir. Sonuç olarak, bölgelere verilen hedef sıcaklık değerini tutturmaktadır (Şekil 7.17). Çünkü parametre değişiminde, sistem dinamiğine bağlı olarak kestiricinin 30. saniyede kendi çıkışları da etkilendiği için bu

kestirilen bozucuların bilgisini alan NMPC değişimin farkına vararak kontrol işaretlerini hemen güncellemektedir. Bu da NMPC kontrolünün uyarlamalı olduğunu göstermektedir. Eğer kestirici bu bilgiyi sistem dinamiğinden alamaz ise şekil 7.18’deki gibi NMPC kontrol işareti kendini gncellemeyecek ve bölge sıcaklıkları referans sıcaklık değeri hedefine ulaşamayacaktır (şekil 7.19). Çünkü NMPC bu değişim bilgisini kestiriciden alamamış olacaktır.

7.4 Sonuçlar ve Tartışmalar

Bu tezde Ereğli Demir elik Fabrikalarının 1.Sıcak Haddehane tesislerinde bulunan yürüyen tabanlı 4.Slab Fırını için daldırma ve değişmezlik yaklaşımı (I&I) kullanarak tasarlanan bozucu kestiricisi ile birlikte doğrusal olmayan dinamik model oluşturulmuştur. Yüksek oranda doğrusal olmayan prosese sahip, büyük zaman gecikmeleri ve zaman sabitleri olan, dinamiğindeki belirsizliklerin değişken olduğu ve bölgesel ısı etkileşimlerinin fazla olduğu slab fırınları için dinamik model elde etmek oldukça zordur.

llemeyen bozucular ve dinamik belirsizlikler daldırma ve değişmezlik yaklaşımı ile başarılı bir şekilde kestirilmiştir. nce, oluşturulan doğrusal olmayan modele dışarıdan hem sinuzoidal hem de belirli bir zamanda değiştirerek sabit olarak uygulanan bozucuların farklı örnekleme zamanlarında kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 4.Slab Fırınının normal çalışması esnasında bölgelere uygulanan kontrol işaretleriyle beraber, bölge sıcaklık proses değerleri ve modelde kullanılan fırına ait diğer parametrelerin de kayıtları toplanarak, tasarlanan modele ve kestiriciye uygulanmıştır. Kestirici çıkışındaki veriler grafiğe alınıp incelendiğinde fırına ait ölçülemeyen ısı kayıplarını enerji cinsinden ifade eden bozucuların doğru bir şekilde kestirildiği görülmektedir. Elbetteki bu kayıplar ölçülemediğinden gerçekte ne olduğu bilinemez fakat fırın proseslerindeki tecrübeler gözönüne alındığında bu bozucuların fırının bölgelerindeki enerjiyi gösteren durum vektörlerine oranına göre kestirilen bozucuların değerleri slab ısıtma fırınları pratiği açısından tutarlıdır.

4. Slab fırını için oluşturulan doğrusal olmayan dinamik modelin, fırındaki giriş ve çıkışlarla oluşturulan ARMAX modeli ile gerçek fırın sıcaklık verileri kullanılarak yapılan karşılaştırmalarda elde edilen sonuçlara göre %1.2 gibi hata oranlarına sahip olması oluşturulan modelin başarısını ortaya koymaktadır. ARMAX modelinde bölgelerin sıcaklıklarında 40-50°C gibi çok fazla sıcaklık sapmaları olmasına rağmen

oluşturulan dinamik modelde maksimum 10°C sıcaklık sapması olmaktadır. Bu sapmalar, slabların istenilen ısıtma eğrilerini yakalayabilmesi için maksimum 20°C civarında olmalıdır. Bu sonuçlar oluşturulan dinamik modelin doğruluğunu teyit etmektedir. Önerilen yöntemin çevrimiçi bir sistem tanıma olması ve sistem dinamik ve sıcaklık kayıplarının çevrimiçi bir şekilde modele katılmasından dolayı ARMAX modeline göre çok iyi ve hassas bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

4. Slab fırını için oluşturulan doğrusal olmayan dinamik modelin, gerçek fırın sıcaklık verilerine göre gerçekleşen %1.2 gibi hata oranlarının iki ana sebebi bulunmaktadır. Bunlardan ilki sıcaklık ölçümünden kaynaklanan ölçüm hatalarıdır. Slab ısıtma fırınındaki sıcaklıklar termokupllar ile ölçülmektedir. Termokuplların kalibrasyon raporları incelendiğinde ölçüm belirsizlikleri $\pm 2^\circ\text{C}$ ve ölçüm toleransı $\pm 20^\circ\text{C}$ olduğu görülmektedir. Dolayısıyla 10°C sıcaklık sapmaları tolerans içinde kalmaktadır. Diğer sebep ise serbest olarak seçilen α kirli gaz yayılım parametresi ve slabın sıcaklık emilimini belirleyen ε emissivite parametresinden kaynaklanmaktadır. Her ne kadar detaylı model çıkartılmış olsa da modeldeki serbest olarak seçilen α kirli gaz yayılım ve ε emissivite parametreleri fırının çalışması esnasında ayarlanmalı ve kirli gazın bölgelere dağılımının fırının değişken şartlarında da tekrar ince ayarlarının yapılması gerekmektedir. Diğer yandan kestirici tasarımı bilinmeyen bozucuların sabit ya da çok yavaş değişen kabulü ile gerçekleştirilmiştir. Bu da değişken bozucularda örnekleme zamanı büyük seçilerek yapılan uygulamalarda hataya neden olabilmektedir. Örnekleme zamanı küçültülerek hata daha da azaltılabilir.

Son kısımda, oluşturulan model için uyarlamalı doğrusal olmayan model öngörülü kontrolör de tasarlanmıştır. Tasarlanan bozucu kestiricisinin NMPC kontrolörü altında modele uygulanan bozucuları da başarılı bir şekilde kestirdiğini görülmektedir. Uyarlamalı NMPC kontrolcüsü, sistemi fırın bölgelerine uygulanan sıcaklık referansına başarılı bir şekilde götürmektedir. Sistemde en etkili fırın parametrelerinden biri olan gazın kalorifik indeksi belirli bir zamanda değiştirilerek NMPC kontrolü altında tasarlanan kestiricinin başarısı incelenmiştir. Uyarlamalı NMPC kontrolcüsü bozucu ve parametre değişimlerini anında tolere ederek sistem çıkışını hedef referans değerine götürmektedir. Parametredeki değişim ölçülemeyen bozuculara yansıdığından kestiricinin çıkışından bozuculara ait bilgiyi alan NMPC uyarlama mekanizması sayesinde bozuculardaki bu değişimi kontrol işaretini güncelleyerek gidermektedir. Bu bozucuya yansıyan bilgiyi kestiriciden alamadığı

durumda NMPC kontrolörü uyarlama mekanizmasına sahip olamadığından kontrol işaretine yansıtamamakta ve bölgelerin sıcaklık değerleri parametre değişiminin yarattığı bu kayıplardan dolayı istenilen referansa ulaşamamaktadır. Uyarlamalı NMPC kontrolü, daldırma ve değişmezlik (I&I) kestiricisi ile birlikte ölçülemeyen parametre değişimleri ve bozulardan kaynaklanan ısıtma prosesini etkileyen sıcaklık değişimlerini başarılı bir şekilde kontrol altına alabilmektedir.

Gelecekte, önerilen Adaptive NMPC'nin sahada uygulanması, bozucuların sabit değil değişken olduğu göz önünde bulundurularak tasarım ve öğrenme tabanlı MPC konularında çalışmalar yürütülebilir. Uyarlamalı NMPC yerine çok katmanlı MPC ve çoklu öngörü ufku-çoklu model MPC kontrol yaklaşımları ile ölçülemeyen bozucuların belirsiz parametre ile birlikte kestiriminin yöntemleri üzerine çalışmalar da yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Adıgüzel, A. & Yalçın, Y.** (2022). Immersion and invariance disturbance observer-based nonlinear discrete-time control for fully actuated mechanical systems, *International Journal of Systems Science*, 53(2), 388-401, IEEE.
- Astolfi, G., Barboni, L., Cocchioni, F., Pepe, C., & Zanolli, S. M.** (2017). Optimization of a pusher type reheating furnace: an adaptive Model Predictive Control approach, In *2017 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP)*, (pp.19-24). IEEE.
- Astolfi, A., Karagiannis, D. & Ortega, R.** (2008). *Nonlinear and Adaptive Control with Applications*, (Vol. 187). London: Springer.
- Astolfi, A. & Ortega, R.** (2003). Immersion and Invariance: A new tool for stabilization and Adaptive Control of Nonlinear systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48.4, 590-606.
- Assadian, N. & AlandiHallaj, M.** (2019). Multiple-horizon multiple-model predictive control of electromagnetic tethered satellite system, *Acta Astronautica*, 157, 250-262.
- Balbis, L., Balderud, J., & Grimbale, M. J.** (2008). Nonlinear predictive control of steel slab reheating furnace. In *2008 American Control Conference*, (pp.1679-1684). IEEE.
- Baolin, N., Haigeng, C. & Zekuan, Y.** (1989). The mathematical model of controlling reheating furnace, *Energy for Metallurgical Industry*.
- Bemporad, A.** (2009). Model predictive control: Basic concepts, [PowerPoint slides] *Controllo di Processo e Sistemi di Produzione*.
<http://cse.lab.imtlucca.it/~bemporad/teaching/cpsp/slides/2009/1-mpc.pdf>
- Boeckh, P. & Wetzel, T.** (2011). *Heat transfer: basics and practice*, Springer Science & Business Media.
- Broughton, J. S., Mahfouf, M., & Linkens, D. A.** (2007). A paradigm for the scheduling of a continuous walking beam reheat furnace using a modified genetic algorithm, *Materials and Manufacturing Processes*, 22(5), 607-614.
- Camacho, E. F. & Bordons, C.,** (2007). *Model predictive control*, Springer Verlag London Limited.
- Casal, J. M., Porteiro, J., Míguez, J. L. & Vázquez, A.** (2015). New methodology for CFD three-dimensional simulation of a walking beam type reheating furnace in steady state, *Applied Thermal Engineering*, 86, 69-80.

- Ditzhuijzen, G. A. J. M., Staalman, D., & Koorn, A.** (2002). Identification and model predictive control of a slab reheating furnace. In *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, (Vol. 1, pp. 361-366). IEEE.
- Farag, Wael A.** (2020). Model-predictive-control complex-path tracking for self-driving cars. In *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 34(3), 265-277.
- Grüne, L. & Pannek, J.** (2011). *Nonlinear model predictive control theory and algorithms*, London: Springer.
- Grüne, L.** (2016). *Nonlinear MPC Lecture Notes*, Bayreuth Universitat, "https://num.math.uni-bayreuth.de/en/team/lars-gruene/miscellaneous/aices16_slides.pdf"
- Gu, M., Chen, G., Liu, X., Wu, C., & Chu, H.** (2014). Numerical simulation of slab heating process in a regenerative walking beam reheating furnace, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76, 405-410.
- Hu, Y., Tan, C. K., Broughton, J., Roach, P. A., & Varga, L.** (2018). Nonlinear dynamic simulation and control of large-scale reheating furnace operations using a zone method-based model, *Applied Thermal Engineering*, 135, 41-53.
- Hu, Y., Tan, C. K., Broughton, J., Roach, P. A., & Varga, L.** (2017). Model-based multi-objective optimisation of reheating furnace operations using genetic algorithm, *Energy Procedia*, 142, 2143-2151.
- Hu, Y., Tan, C. K., Broughton, J., & Roach, P. A.** (2016). Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces, *Applied Energy*, 173, 555-566.
- Hongxiang, Z., Zhi, W. & Hai, X.** (2003). Application of Optimization Technology for Ratio Feedforward with Feedback in Heating Furnace of Air to Fuel Combining, *Journal of Thermal Science*.
- Ko, H. S., Kim, J. S., Yoon, T. W., Lim, M., Yang, D. R., & Jun, I. S.** (2000). Modeling and predictive control of a reheating furnace. In *Proceedings of the 2000 American Control Conference, ACC* (Vol. 4, pp. 2725-2729). IEEE.
- Landfahrer, M., Schluckner, C., Prieler, R., Gerhardter, H., Zmek, T., Klarner, J., & Hochenauer, C.** (2019). Development and application of a numerically efficient model describing a rotary hearth furnace using CFD, *Energy*, 180, 79-89.
- Liao, Y. X., She, J. H. & Wu, M.** (2009). Integrated hybrid-PSO and fuzzy-NN decoupling control for temperature of reheating furnace, *IEEE transactions on industrial electronics*, 56(7), 2704-2714.
- Ljung, L.** (1999). *System identification: theory for the user*, PTR Prentice Hall.
- Lucia, S., Finkler, T., & Engell, S.** (2013). Multi-stage nonlinear model predictive control applied to a semi-batch polymerization reactor under uncertainty, *Journal of process control*, 23(9), 1306-1319.
- Maciejowski, J.M.** (2000). *Predictive Control with Constraints*, Printice Hall.

- Mahmoud, M. (Ed.),** (2012). *Advances in discrete time systems*, BoD–Books on Demand. Chapter 4: Discrete-Time Model Predictive Control, Open-Access, <https://www.intechopen.com/chapters/37837>
- Matlab, Figs A.Ş.** (2022). Kişisel teknik görüşme. 10 Ağustos 2022, İstanbul
- Nguyen, X. M., Lawayeb, F., Rodriguez-Ayerbe, P., Dumur, D., & Mouchette, A.** (2014). Nonlinear model predictive control of steel slab walking-beam reheating furnace based on a numerical model. In *2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA)* (pp.191-196). IEEE.
- Nguyen, X. M., Lawayeb, F., Rodriguez-Ayerbe, P., Dumur, D., & Mouchette, A.** (2014). Temperature control of reheating furnace based on distributed model predictive control. In *2014 18th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)* (pp.726-731). IEEE.
- Nguyen, X. M., Rodriguez-Ayerbe, P., Dumur, D., Lawayeb, F., & Mouchette, A.** (2012). Distributed model predictive control of steel slab reheating furnace. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(23), 175-180.
- Palaz, C., & Yönel, E.** (2018). Design and Implementation of Predictive Energy Management for Range Extended Electric Vehicles. In *2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)* (pp.1-6). IEEE.
- Rossiter, J. A.** (2017). *Model-based predictive control: a practical approach*, CRC press.
- Salcedo-Hernández, J., Rivas-Perez, R., & Sotomayor-Moriano, J.** (2020). Design of a robust H2 state feedback temperature controller for a steel slab reheating furnace, *Applied Sciences*, 10(5), 1731.
- Scattolini, R.** (2009). Architectures for distributed and hierarchical model predictive control—a review, *Journal of process control*, 19(5), 723-731.
- Sharma, P.** (2015). Analysis of reheating furnaces in steel plant, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(5), 20-27.
- Steinboeck, A., Wild, D., & Kugi, A.** (2013). Nonlinear model predictive control of a continuous slab reheating furnace, *Control Engineering Practice*, 21(4), 495-508.
- Steinboeck, A., Graichen, K. & Kugi, A.** (2011). Dynamic optimization of a slab reheating furnace with consistent approximation of control variables, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(6), 1444-1456.
- Steinboeck, A., Graichen, K., Wild, D., Kiefer, T. & Kugi, A.** (2011). Model-based trajectory planning, optimization, and open-loop control of a continuous slab reheating furnace, *Journal of Process Control*, 21(2), 279-292.
- Švantner, M., Študent, J., & Veselý, Z.** (2020). Continuous walking-beam furnace 3D zonal model and direct thermal-box barrier-based temperature measurement, *Case Studies in Thermal Engineering*, 18, 100608.
- Tan, C. K., Jenkins, J., Ward, J., Broughton, J., & Heeley, A.** (2013). Zone modelling of the thermal performances of a large-scale bloom reheating furnace, *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 1111-1118.

- Thermal Model, (2005).** Stein Heurtey Eğitim Dökümanı.
- Wang, L.** (2009). *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*, Springer Science & Business Media.
- Wick, H. J. & Koster, F.** (1999). Estimation of temperature profiles of slabs in a reheat furnace by using the Kalman filter. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design* (pp.613-617). IEEE.
- Xihuai, W., Shaoyuan, L., & Yugeng, X.** (2004). Research on soft sensor model for slab temperature in reheating furnace, *Acta Automatic Sonica*, 30(6), 928-932.
- Xin, C., Changpeng, L. & Dayong, X.** (2010). Research on furnace pressure control mode of the regenerative heating furnace, *Energy for Metallurgical Industry*, 29(4), 31-33.
- Xingquan, Z. Q. & Shiyong, L.** (2004). Optimal design of radial basis function fuzzy neural network controller based on immune evolutionary algorithm, *Control Theory&Applications (China)*, 21(4), 521–525.
- Yalçın, Y.,** (2020). Model Predictive Control [PowerPoint ders sunumu]. *Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi*
<https://ninova.itu.edu.tr/tr/dersler/fen-bilimleri-enstitusu/20829/kom-518e/>
- Yalçın, Y. & Astolfi, A.** (2012). Immersion and invariance adaptive control for discrete time systems in strict feedback form, *Systems & Control Letters*, 61(12), 1132-1137.
- Zanoli, S. M., Pepe, C., Barboni, L., & Cocchioni, F.** (2017). Advanced process control for energy efficiency increases in a walking beam reheating furnace. In *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, (pp.401-406), IEEE.
- Zanoli, S. M. & Pepe, C.** (2017). Two-layer linear MPC approach aimed at walking beam billets reheating furnace optimization, *Journal of Control Science and Engineering*, 2017.
- Zanoli, S. M., Barboni, L., Cocchioni, F. & Pepe, C.** (2018). Advanced process control aimed at energy efficiency improvement in process industries. In *2018 IEEE international conference on industrial technology (ICIT)*, (pp.57-62), IEEE.
- Zanoli, S. M. & Pepe, C.** (2016). A two-layer model predictive control system with adaptation to variables status values. In *2016 17th international carpathian control conference (ICCC)*, (pp.573-578), IEEE.
- Zanoli, S. M., Barboni, L., Cocchioni, F. & Pepe, C.** (2017). Stoichiometric ratios constraints handling through model predictive control strategy. In *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, (pp.146-151), IEEE.
- Zhang, B., Chen, Z., Xu, L., Wang, J., Zhang, J. & Shao, H.** (2002). The modeling and control of a reheating furnace. In *Proceedings of the 2002 American Control Conference*, (Vol.5, pp.3823-3828), IEEE.

- Zhang, X., Li, Y., & Li, X.** (2014). Review on control model of reheating furnace in hot rolling line. In *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, (pp.2929-2934), IEEE.
- Zheng, X., & Lv, X.** (2011). Based on rough set and wavelet neural network information fusion in the furnace control. In *2011 International Conference on Multimedia Technology*, (pp.2988-2991), IEEE.
- Url-1** <<https://tr.wikipedia.org/wiki/Termokupl>>, Erişim Tarihi 10.05.2019.
- Url-2** <<https://www.mathworks.com/help/ident/ref/armax.html>>, Erişim Tarihi 14.05.2023.
- Url-3** <<https://www.mathworks.com/products/industrial-communication.html> >, Erişim Tarihi 14.10.2022.
- Url-4** <<https://www.mathworks.com/help/instrument/send-and-receive-data-over-a-tcpip-network.html> >, Erişim Tarihi 15.10.2022.
- Url-5** <<https://www.mathworks.com/help/icomm/ug/control-a-plc-using-the-modbus-explorer.html> >, Erişim Tarihi 30.10.2022.
- Url-6** <<https://www.udemy.com/course/kepserver-ex-opc-server-with-advance-topic> >, Erişim Tarihi 05.11.2022.
- Url-7** <<https://www.udemy.com/course/mastering-opc-ole-for-process-control> >, Erişim Tarihi 12.11.2022.
- Url-8** <<https://www.opcturkey.com/kepserverex-2>>, Erişim Tarihi 04.11.2022.
- Url-9** < <http://opchub.com/download/index.asp>>, Erişim Tarihi 06.11.2022.
- Url-10** <<https://www.kepware.com/getattachment/e1943820-ef3c-4932-b055-4ef2a80ab863/kepserverex-manual.pdf> >, Erişim Tarihi 06.11.2022.
- Url-11** <<https://www.youtube.com/watch?v=PNXhHBIXywc> >, Erişim Tarihi 03.12.2022.
- Url-12** <<https://www.youtube.com/watch?v=mYXUWUf7LxU> >, Erişim Tarihi 04.12.2022.



EKLER

EK A: Kirli gazın taşıdığı Q_{i-} ve $Q_{i,j}$ enerji denklemi

EK B: $g_2(x)$ matriks detay formu

EK C: Matlab Simulink Modelleri

EK D. Matlab Fonksiyon Blokları Program Dosyaları



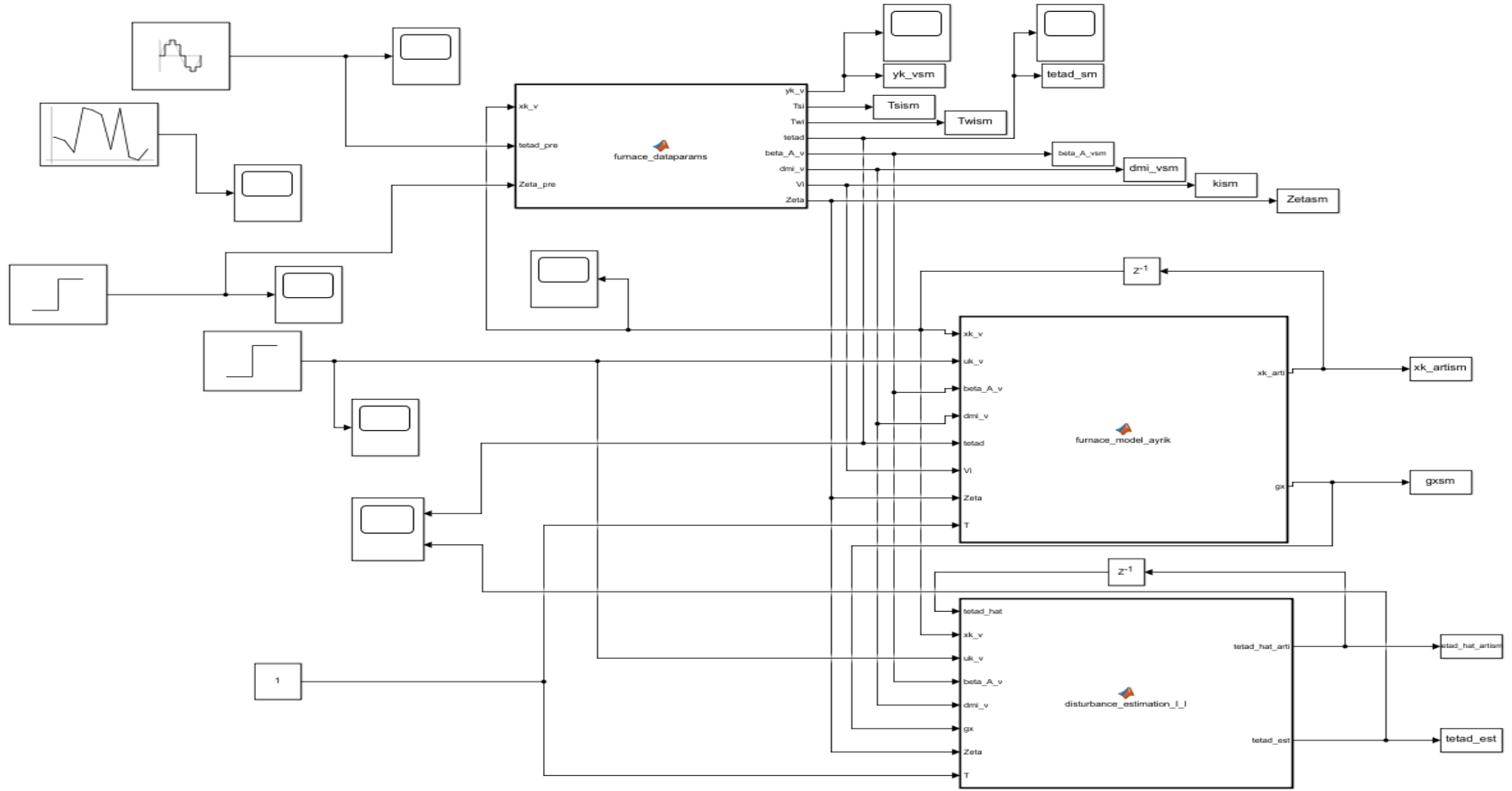
EK A: Kirli gazın taşıdığı Q_{i-} ve $Q_{i,j}$ enerji denklemi

$$\begin{aligned}
Q_{12-} &= c_{pg12} \cdot F_{f12} \cdot T_{g12} \\
Q_{11,12} &= c_{pg12} \alpha F_{f12} T_{g12} \\
Q_{11-} &= c_{pg11} \cdot (F_{f11} + \alpha F_{f12}) T_{g11} \\
Q_{10,12} &= c_{pg12} (1 - \alpha) F_{f12} T_{g12} \\
Q_{10-} &= c_{pg10} \cdot (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) T_{g10} \\
Q_{9,11} &= c_{pg11} (F_{f11} + \alpha F_{f12}) T_{g11} \\
Q_{9,10} &= c_{pg10} (\alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) T_{g10} \\
Q_{9-} &= c_{pg9} \cdot (F_{f9} + (F_{f11} + \alpha F_{f12}) + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) T_{g9} \\
Q_{8,10} &= c_{pg10} (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) T_{g10} \\
Q_{8-} &= c_{pg8} \cdot (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) T_{g8} \\
Q_{7,9} &= c_{pg9} \cdot (F_{f9} + (F_{f11} + \alpha F_{f12}) + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) T_{g9} \\
Q_{7,8} &= c_{pg8} \cdot \alpha (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) T_{g8} \\
Q_{7-} &= c_{pg7} \cdot [F_{f7} + F_{f9} + F_{f11} + \alpha F_{f12} + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\
&\quad + \alpha (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))] T_{g7} \\
Q_{6,8} &= c_{pg8} \cdot (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) T_{g8} \\
Q_{6,-} &= c_{pg6} \cdot [F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))] T_{g6} \\
Q_{5,7} &= c_{pg7} \cdot [F_{f7} + F_{f9} + F_{f11} + \alpha F_{f12} + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\
&\quad + \alpha (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))] T_{g7} \\
Q_{5,6} &= c_{pg6} \cdot \alpha (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))) T_{g6} \\
Q_{5-} &= c_{pg5} \cdot [F_{f5} + F_{f7} + F_{f9} + F_{f11} + \alpha F_{f12} + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\
&\quad + \alpha (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) + \alpha (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))) T_{g5} \\
Q_{4,6} &= c_{pg6} \cdot (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))) T_{g6} \\
Q_{4,-} &= c_{pg4} (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})))) T_{g4} \\
Q_{3,5} &= c_{pg5} \cdot [F_{f5} + F_{f7} + F_{f9} + F_{f11} + \alpha F_{f12} + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\
&\quad + \alpha (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) + \alpha (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))) T_{g5} \\
Q_{3,4} &= c_{pg4} \cdot \alpha (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})))) T_{g4} \\
Q_{3-} &= c_{pg3} \cdot [F_{f3} + F_{f5} + F_{f7} + F_{f9} + F_{f11} + \alpha F_{f12} + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\
&\quad + \alpha (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) + \alpha (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))) \\
&\quad + \alpha (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))))] T_{g3} \\
Q_{2,4} &= c_{pg4} \cdot (1 - \alpha) (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})))) T_{g4} \\
Q_{2,-} &= c_{pg2} [F_{f2} + (1 - \alpha) (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))))] T_{g2} \\
Q_{1,3} &= c_{pg3} \cdot [F_{f3} + F_{f5} + F_{f7} + F_{f9} + F_{f11} + \alpha F_{f12} + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\
&\quad + \alpha (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) + \alpha (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))) \\
&\quad + \alpha (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))))] T_{g3} \\
Q_{1,2} &= c_{pg2} \cdot \alpha (F_{f2} + (1 - \alpha) (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})))) T_{g4} \\
Q_{1-} &= c_{pg1} \cdot [F_{f1} + F_{f3} + F_{f5} + F_{f7} + F_{f9} + F_{f11} + \alpha F_{f12} + \alpha (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}) \\
&\quad + \alpha (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})) + \alpha (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))) \\
&\quad + \alpha (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12})))) \\
&\quad + \alpha (F_{f2} + (1 - \alpha) (F_{f4} + (1 - \alpha) (F_{f6} + (1 - \alpha) (F_{f8} + (1 - \alpha) (F_{f10} + (1 - \alpha) F_{f12}))))] T_{g1}
\end{aligned}$$

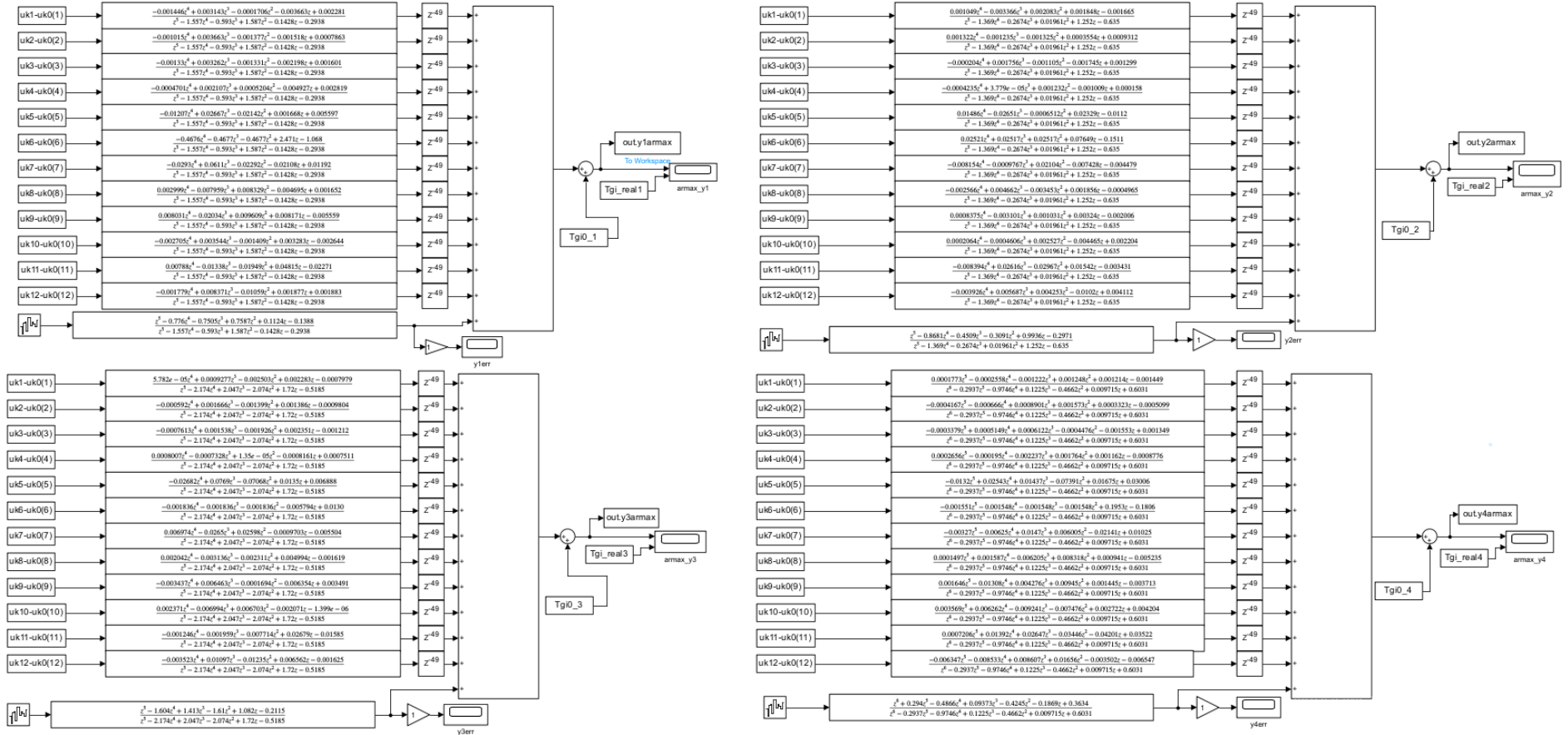
EK B: $g_2(x)$ matriks delay formu

$$\begin{bmatrix} g_{2_1}(x) \\ g_{2_2}(x) \\ g_{2_3}(x) \\ g_{2_4}(x) \\ g_{2_5}(x) \\ g_{2_6}(x) \\ g_{2_7}(x) \\ g_{2_8}(x) \\ g_{2_9}(x) \\ g_{2_{10}}(x) \\ g_{2_{11}}(x) \\ g_{2_{12}}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{x_1}{k_1} & \frac{\alpha x_2}{k_2} - \frac{\alpha x_1}{k_1} & \frac{x_3}{k_3} - \frac{x_1}{k_1} & \frac{\alpha x_3}{k_3} + \frac{\alpha(1-\alpha)}{k_2}x_2 - \frac{\beta_{a1}}{k_1}x_1 & \frac{x_3}{k_3} - \frac{x_1}{k_1} & \frac{\beta_{a1}x_3}{k_3} + \frac{\alpha(1-\alpha)^2x_2}{k_2} - \frac{\beta_{a2}x_1}{k_1} & \frac{x_3}{k_3} - \frac{x_1}{k_1} & \frac{\beta_{a2}x_3}{k_3} + \frac{\alpha(1-\alpha)^3x_2}{k_2} - \frac{\beta_{a3}x_1}{k_1} & \frac{x_3}{k_3} - \frac{x_1}{k_1} & \frac{\beta_{a3}x_3}{k_3} + \frac{\alpha(1-\alpha)^4x_2}{k_2} - \frac{\beta_{a4}x_1}{k_1} & \frac{x_3}{k_3} - \frac{x_1}{k_1} & \frac{\beta_{a4}x_3}{k_3} + \frac{\alpha(1-\alpha)^5x_2}{k_2} - \frac{\beta_{a5}x_1}{k_1} \\ 0 & -\frac{x_2}{k_2} & 0 & \frac{(1-\alpha)}{k_4}x_4 - \frac{(1-\alpha)}{k_2}x_2 & 0 & \frac{(1-\alpha)^2}{k_4}x_4 - \frac{(1-\alpha)^2}{k_2}x_2 & 0 & \frac{(1-\alpha)^3}{k_4}x_4 - \frac{(1-\alpha)^3}{k_2}x_2 & 0 & \frac{(1-\alpha)^4}{k_4}x_4 - \frac{(1-\alpha)^4}{k_2}x_2 & 0 & \frac{(1-\alpha)^5}{k_4}x_4 - \frac{(1-\alpha)^5}{k_2}x_2 \\ 0 & 0 & -\frac{x_3}{k_3} & \frac{\alpha}{k_4}x_4 - \frac{\alpha}{k_3}x_3 & \frac{x_5}{k_5} - \frac{x_3}{k_3} & \frac{\alpha}{k_5}x_5 + \frac{\alpha(1-\alpha)}{k_4}x_4 - \frac{\beta_{a1}x_3}{k_3} & \frac{x_5}{k_5} - \frac{x_3}{k_3} & \frac{\beta_{a1}x_5}{k_5} + \frac{\alpha(1-\alpha)^2x_4}{k_4} - \frac{\beta_{a2}x_3}{k_3} & \frac{x_5}{k_5} - \frac{x_3}{k_3} & \frac{\beta_{a2}x_5}{k_5} + \frac{\alpha(1-\alpha)^3x_4}{k_4} - \frac{\beta_{a3}x_3}{k_3} & \frac{x_5}{k_5} - \frac{x_3}{k_3} & \frac{\beta_{a3}x_5}{k_5} + \frac{\alpha(1-\alpha)^4x_4}{k_4} - \frac{\beta_{a4}x_3}{k_3} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{x_4}{k_4} & 0 & \frac{(1-\alpha)}{k_6}x_6 - \frac{(1-\alpha)}{k_4}x_4 & 0 & \frac{(1-\alpha)^2}{k_6}x_6 - \frac{(1-\alpha)^2}{k_4}x_4 & 0 & \frac{(1-\alpha)^3}{k_6}x_6 - \frac{(1-\alpha)^3}{k_4}x_4 & 0 & \frac{(1-\alpha)^4}{k_6}x_6 - \frac{(1-\alpha)^4}{k_4}x_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_5}{k_5} & \frac{\alpha}{k_6}x_6 - \frac{\alpha}{k_5}x_5 & \frac{x_7}{k_7} - \frac{x_5}{k_5} & \frac{\alpha}{k_7}x_7 + \frac{\alpha(1-\alpha)}{k_6}x_6 - \frac{\beta_{a1}x_5}{k_5} & \frac{x_7}{k_7} - \frac{x_5}{k_5} & \frac{\beta_{a1}x_7}{k_7} + \frac{\alpha(1-\alpha)^2x_6}{k_6} - \frac{\beta_{a2}x_5}{k_5} & \frac{x_7}{k_7} - \frac{x_5}{k_5} & \frac{\beta_{a2}x_7}{k_7} + \frac{\alpha(1-\alpha)^3x_6}{k_6} - \frac{\beta_{a3}x_5}{k_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_6}{k_6} & 0 & \frac{(1-\alpha)}{k_8}x_8 - \frac{(1-\alpha)}{k_6}x_6 & 0 & \frac{(1-\alpha)^2}{k_8}x_8 - \frac{(1-\alpha)^2}{k_6}x_6 & 0 & \frac{(1-\alpha)^3}{k_8}x_8 - \frac{(1-\alpha)^3}{k_6}x_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_7}{k_7} & \frac{\alpha}{k_8}x_8 - \frac{\alpha}{k_7}x_7 & \frac{x_9}{k_9} - \frac{x_7}{k_7} & \frac{\alpha}{k_9}x_9 + \frac{\alpha(1-\alpha)}{k_8}x_8 - \frac{\beta_{a1}x_7}{k_7} & \frac{x_9}{k_9} - \frac{x_7}{k_7} & \frac{\beta_{a1}x_9}{k_9} + \frac{\alpha(1-\alpha)^2x_8}{k_8} - \frac{\beta_{a2}x_7}{k_7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_8}{k_8} & 0 & \frac{(1-\alpha)}{k_{10}}x_{10} - \frac{(1-\alpha)}{k_8}x_8 & 0 & \frac{(1-\alpha)^2}{k_8}x_{10} - \frac{(1-\alpha)^2}{k_6}x_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_9}{k_9} & \frac{\alpha}{k_{10}}x_{10} - \frac{\alpha}{k_9}x_9 & \frac{x_{11}}{k_{11}} - \frac{x_9}{k_9} & \frac{\alpha x_{11}}{k_{11}} + \frac{\alpha(1-\alpha)x_{10}}{k_{10}} - \frac{\beta_{a1}x_9}{k_9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_{10}}{k_{10}} & 0 & \frac{(1-\alpha)}{k_{12}}x_{12} - \frac{(1-\alpha)}{k_{10}}x_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_{11}}{k_{11}} & \frac{\alpha}{k_{12}}x_{12} - \frac{\alpha}{k_{11}}x_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_{12}}{k_{12}} \end{bmatrix}$$

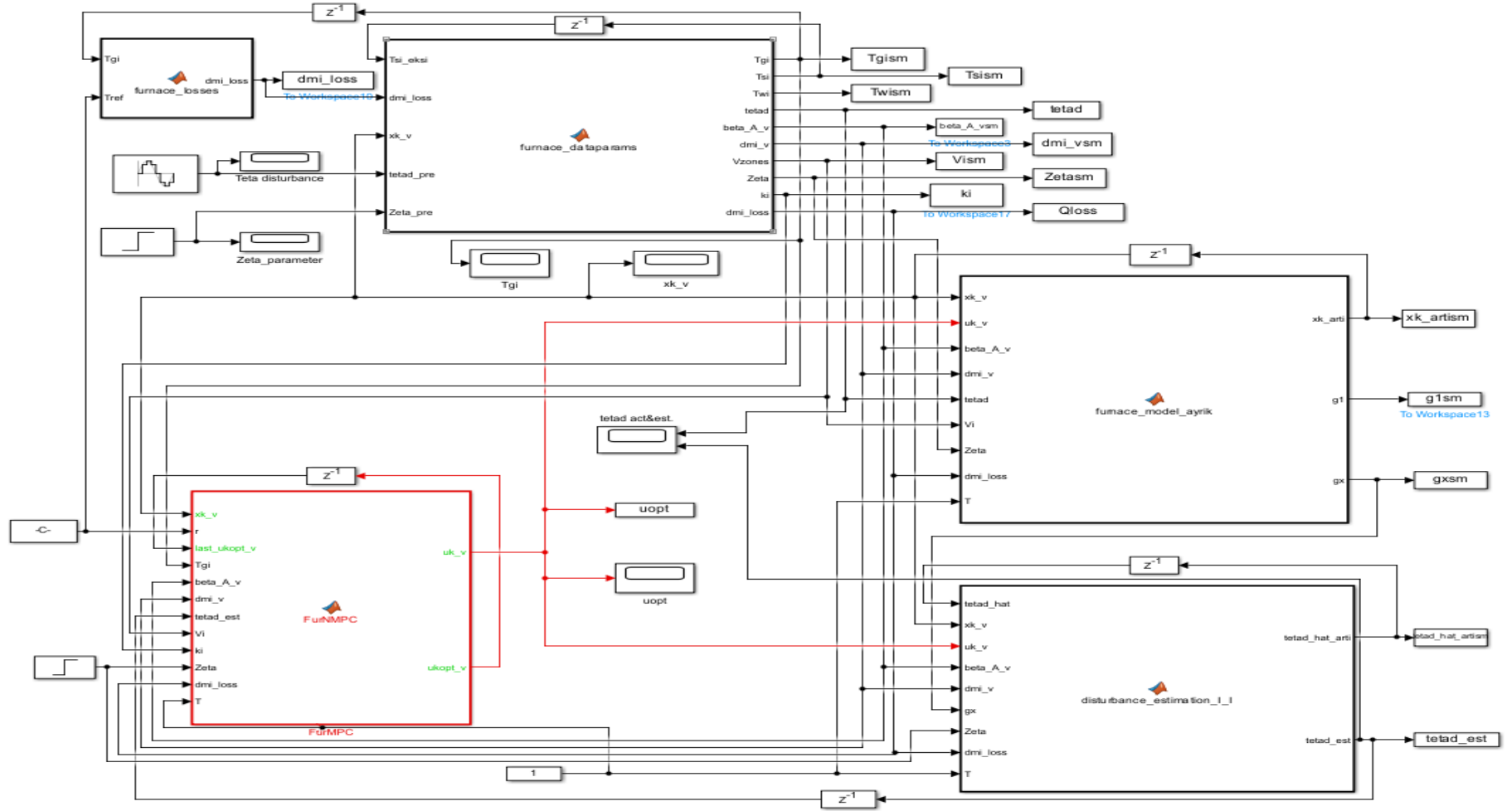
EK C: Matlab Simulink Modelleri



Şekil C.1 : Bozucu kestirimi için hazırlanan Matlab Simulink modeli.



Şekil C.2 : 4.Slab Fırını ARMAX modeli.



Şekil C.4 : NMPC için hazırlanan Matlab Simulink Modeli



Ek D. Matlab Fonksiyon Blokları Program Dosyaları

Çizelge D.1 : Iba PDA verilerinin Matlab workspace eklenmesi (fileimport.m).

```
%%IBA file import function from Real Furnace PLC system
file=pda7471; %file name
%file=pda7501;

T=1; %time period for discrete system
zn=12; %number of zones
Nb=2; %south and north
th2s=3600; %time conversion from hour to second

%Control signals for each zone
u1=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4030_MV.data;
u2=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4020_MV.data;
u3=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4050_MV.data;
u4=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4060_MV.data;
u5=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4070_MV.data;
u6=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4080_MV.data;
u7=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4090_MV.data;
u8=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4100_MV.data;
u9=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4110_MV.data;
u10=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4120_MV.data;
u11=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4130_MV.data;
u12=file.S7_Analyzer_TCPIP.HD4140_MV.data;
%make control signal array
uk=double([u1 u2 u3 u4 u5 u6 u7 u8 u9 u10 u11 u12]);

%Zone temperature output signals for each zone
Tg1=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4030.data;
Tg2=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4020A.data;
Tg3=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4050.data;
Tg4=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4060A.data;
Tg5=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4070.data;
Tg6=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4080A.data;
Tg7=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4090.data;
Tg8=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4100A.data;
Tg9=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4110.data;
Tg10=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4120A.data;
Tg11=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4130.data;
Tg12=file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4140A.data;
%make temperature output signal array
Tgi_k = double([Tg1 Tg2 Tg3 Tg4 Tg5 Tg6 Tg7 Tg8 Tg9 Tg10 Tg11 Tg12]);

%Furnace parameters from Real Furnace System
Zeta_k = double(file.S7_Analyzer_TCPIP.Gas_Calorific.data);
Tcog = 20; % cog gas temp in C
Tair = 450; % comb. air temp in C
Tcogair = double([Tcog Tair]);

%Preparing vectors in workspace for Simulink
[r c]=size(uk);

for i=1:r
    tk(i,1)=i;
end

uk_real=[tk uk];
uk0=uk(1,:);

Tgi_real=[tk Tgi_k];
Tgi_0=Tgi_k(1,:);

Zeta_real=[tk Zeta_k];

Tair = [tk double(file.S7_Analyzer_TCPIP.TE_4904.data)];

ek=wgn(4200,1,0)*0.1;
ek_real=[tk ek];
```

Çizelge D.1 (devamı) : İba PDA verilerini Matlab workspace ekleme (fileimport.m).

```
uk1=[tk uk(:,1)];
uk2=[tk uk(:,2)];
uk3=[tk uk(:,3)];
uk4=[tk uk(:,4)];
uk5=[tk uk(:,5)];
uk6=[tk uk(:,6)];
uk7=[tk uk(:,7)];
uk8=[tk uk(:,8)];
uk9=[tk uk(:,9)];
uk10=[tk uk(:,10)];
uk11=[tk uk(:,11)];
uk12=[tk uk(:,12)];

Tgi0_1= [tk Tgi_0(1).*ones(4200,1)];
Tgi0_2= [tk Tgi_0(2).*ones(4200,1)];
Tgi0_3= [tk Tgi_0(3).*ones(4200,1)];
Tgi0_4= [tk Tgi_0(4).*ones(4200,1)];
Tgi0_5= [tk Tgi_0(5).*ones(4200,1)];
Tgi0_6= [tk Tgi_0(6).*ones(4200,1)];
Tgi0_7= [tk Tgi_0(7).*ones(4200,1)];
Tgi0_8= [tk Tgi_0(8).*ones(4200,1)];
Tgi0_9= [tk Tgi_0(9).*ones(4200,1)];
Tgi0_10= [tk Tgi_0(10).*ones(4200,1)];
Tgi0_11= [tk Tgi_0(11).*ones(4200,1)];
Tgi0_12= [tk Tgi_0(12).*ones(4200,1)];

Tgi_real1=[tk Tgi_real(:,2)];
Tgi_real2=[tk Tgi_real(:,3)];
Tgi_real3=[tk Tgi_real(:,4)];
Tgi_real4=[tk Tgi_real(:,5)];
Tgi_real5=[tk Tgi_real(:,6)];
Tgi_real6=[tk Tgi_real(:,7)];
Tgi_real7=[tk Tgi_real(:,8)];
Tgi_real8=[tk Tgi_real(:,9)];
Tgi_real9=[tk Tgi_real(:,10)];
Tgi_real10=[tk Tgi_real(:,11)];
Tgi_real11=[tk Tgi_real(:,12)];
Tgi_real12=[tk Tgi_real(:,13)];

yarmax=zeros(4200,12);

%Zones ki values
kyi_zones
=[55310.5440178187,54894.3742457228,46334.6479646524,48925.6218111529,48307.6070959
800,51443.8996109729,45900.3518026647,49009.3444869740,48428.4260329556,51803.38495
59339,78488.8012387581,83135.0300982030];

yk_real = Tgi_k + 273.15; %yk_v Tgi calculation results in model as Kelvin

%Model x(k) initial state vector for all zones
for i=1:zn
    xk_0(i,1) = (Tgi_k(1,i)+273.15) * kyi_zones(1,i);
end

%Model x(k) state vectors for all zones
for i=1:zn
    xk_real_t(:,i) = yk_real(:,i) * kyi_zones(i);
    xk_real=[tk xk_real_t];
end
%%%
```

Çizelge D.2 : 4.Slab Fırını modeli (function furnace_model_ayrik).

```
function [xk_arti,g1,gx] = furnace_model_ayrik(xk_v,  
uk_v,beta_A_v,dmi_v,tetad,Vi,Zeta,dmi_loss,T)  
%Furnace model heat entalpy calculations  
%T=0.1; %sample time for discrete system  
% 1Joule = kg.m2/s2 = N.m = W.s 1J=Pa(N/m2).m3 1J=I(current).V(voltage)  
% 1W=1J/s=0.239 cal/s  
zn=12; %Zone number; define vector size  
R=4.44; %air/gas flow ratio. Normally combustion air/cog gas flow = 4.44  
Ta=450+273; %combustion air temperature 450C  
Tfg=20; %cog gas temperature in C  
cpa=1.08; % combustion air specific heat index. (kJ/kg)*K Normally from data table  
of air index with Ta  
cpg=0.44; % cpf=cpg fuel(cog gas) specific heat index (kcal/m3)*C  
rho_a=0.0270; %air density (kg/m^3)at 600dapa and 450C at burner inlet  
cpgj=cpa/0.239;  
cpar=cpa*rho_a;  
Hfcog=17995; %cog gas energy rate (kJ/Nm3)  
Hfmixed=18020; %mixed gas energy rate (kJ/Nm3)  
Hf=Hfmixed;  
%uk_v=uk_v*632; %control input %100 is 632 Nm3/h  
MaxFuel=[632*2;674*2;896;959;843;875;569;706;400;464;400;580]*2/3600; %Nm3/sec  
%for i=1:zn  
% uk_v(i,1)=(uk_v(i,1)/100)* 632*2/3600; %MaxFuel(i,1); %control input %100 is  
Max Burner Capacity Nm3/h  
%end  
%fx=beta_A_v.*xk_v; %matrix multiplier, beta_A(1)*xk(1);...;beta_A(n)*xk(n)  
  
g1=Hf+cpar*R*Ta+cpgj*Tfg;  
%%g2(x) matrisini oluşturalım.  
a=0.5; %alpha waste gas yayılım oranı  
x1=xk_v(1);x2=xk_v(2);x3=xk_v(3);x4=xk_v(4);x5=xk_v(5);x6=xk_v(6);  
x7=xk_v(7);x8=xk_v(8);x9=xk_v(9);x10=xk_v(10);x11=xk_v(11);x12=xk_v(12);  
%k1=ki(1);k2=ki(2);k3=ki(3);k4=ki(4);k5=ki(5);k6=ki(6);  
k1=Vi(1);k2=Vi(2);k3=Vi(3);k4=Vi(4);k5=Vi(5);k6=Vi(6); % ki=Vi  
k7=Vi(7);k8=Vi(8);k9=Vi(9);k10=Vi(10);k11=Vi(11);k12=Vi(12);  
  
Ba0 = (1-a);  
Ba1 = a*(2-a);  
Ba2 = a*(2-a+(1-a)^2);  
Ba3 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3);  
Ba4 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3+(1-a)^4);  
Ba5 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3+(1-a)^4+(1-a)^5);  
  
g2x11=-x1/k1; g2x13=x3/k3-x1/k1; g2x15=x3/k3-x1/k1;  
g2x17=x3/k3-x1/k1; g2x19=x3/k3-x1/k1; g2x111=x3/k3-x1/k1;  
g2x12=a*(x2/k2-x1/k1); g2x14=a*x3/k3+a*(1-a)*x2/k2-Ba1*x1/k1;  
g2x16=Ba1*x3/k3+a*(1-a)^2*x2/k2-Ba2*x1/k1;  
g2x18=Ba2*x3/k3+a*(1-a)^3*x2/k2-Ba3*x1/k1;  
g2x110=Ba3*x3/k3+a*(1-a)^4*x2/k2-Ba4*x1/k1;  
g2x112=Ba4*x3/k3+a*(1-a)^5*x2/k2-Ba5*x1/k1;  
  
g2x22=-x2/k2; g2x24=(1-a)*(x4/k4-x2/k2); g2x26=(1-a)^2*(x4/k4-x2/k2);  
g2x28=(1-a)^3*(x4/k4-x2/k2); g2x210=(1-a)^4*(x4/k4-x2/k2);  
g2x212=(1-a)^5*(x4/k4-x2/k2);  
  
g2x33=-x3/k3; g2x35=x5/k5-x3/k3; g2x37=x5/k5-x3/k3;  
g2x39=x5/k5-x3/k3; g2x311=x5/k5-x3/k3;  
g2x34=a*(x4/k4-x3/k3); g2x36=a*x5/k5+a*(1-a)*x4/k4-Ba1*x3/k3;  
g2x38=Ba1*x5/k5+a*(1-a)^2*x4/k4-Ba2*x3/k3;  
g2x310=Ba2*x5/k5+a*(1-a)^3*x4/k4-Ba3*x3/k3;  
g2x312=Ba3*x5/k5+a*(1-a)^4*x4/k4-Ba4*x3/k3;  
  
g2x44=-x4/k4; g2x46=(1-a)*(x6/k6-x4/k4); g2x48=(1-a)^2*(x6/k6-x4/k4);  
g2x410=(1-a)^3*(x6/k6-x4/k4); g2x412=(1-a)^4*(x6/k6-x4/k4);  
  
g2x55=-x5/k5; g2x57=x7/k7-x5/k5; g2x59=x7/k7-x5/k5; g2x511=x7/k7-x5/k5;  
g2x56=a*(x6/k6-x5/k5); g2x58=a*x7/k7+a*(1-a)*x6/k6-Ba1*x5/k5;  
g2x510=Ba1*x7/k7+a*(1-a)^2*x6/k6-Ba2*x5/k5;  
g2x512=Ba2*x7/k7+a*(1-a)^3*x6/k6-Ba3*x5/k5;  
  
g2x66=-x6/k6; g2x68=(1-a)*(x8/k8-x6/k6);  
g2x610=(1-a)^2*(x8/k8-x6/k6); g2x612=(1-a)^3*(x8/k8-x6/k6);
```

Çizelge D.2 (devamı) : 4.Slab Fırını modeli (function furnace_model_ayrik).

```
g2x77=-x7/k7; g2x79=x9/k9-x7/k7;
g2x711=x9/k9-x7/k7;
g2x78=a*(x8/k8-x7/k7);
g2x710=a*x9/k9+a*(1-a)*x8/k8-Ba1*x7/k7;
g2x712=Ba1*x9/k9+a*(1-a)^2*x8/k8-Ba2*x7/k7;

g2x88=-x8/k8; g2x810=(1-a)*(x10/k10-x8/k8);
g2x812=(1-a)^2*(x10/k10-x8/k8);

g2x99=-x9/k9; g2x911=x11/k11-x9/k9;
g2x910=a*(x10/k10-x9/k9);
g2x912=a*x11/k11+a*(1-a)*x10/k10-Ba1*x9/k9;

g2x1010=-x10/k10;
g2x1012=(1-a)*(x12/k12-x10/k10);

g2x1111=-x11/k11;
g2x1112=a*(x12/k12-x11/k11);
g2x1212=-x12/k12;

g2x1=[g2x11 g2x12 g2x13 g2x14 g2x15 g2x16 g2x17 g2x18 g2x19 g2x110 g2x111
g2x112];
g2x2=[ 0 g2x22 0 g2x24 0 g2x26 0 g2x28 0 g2x210 0
g2x212];
g2x3=[ 0 0 g2x33 g2x34 g2x35 g2x36 g2x37 g2x38 g2x39 g2x310 g2x311
g2x312];
g2x4=[ 0 0 0 g2x44 0 g2x46 0 g2x48 0 g2x410 0
g2x412];
g2x5=[ 0 0 0 0 g2x55 g2x56 g2x57 g2x58 g2x59 g2x510 g2x511
g2x512];
g2x6=[ 0 0 0 0 0 g2x66 0 g2x68 0 g2x610 0
g2x612];
g2x7=[ 0 0 0 0 0 0 g2x77 g2x78 g2x79 g2x710 g2x711
g2x712];
g2x8=[ 0 0 0 0 0 0 0 g2x88 0 g2x810 0
g2x812];
g2x9=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x99 g2x910 g2x911
g2x912];
g2x10=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x1010 0
g2x1012];
g2x11=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x1111
g2x1112];
g2x12=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
g2x1212];

gx=[g2x1;g2x2;g2x3;g2x4;g2x5;g2x6;g2x7;g2x8;g2x9;g2x10;g2x11;g2x12];
gx=g1*eye(zn)+(1+R)*gx;
%gx=g1*eye(zn,zn);

%sürekli sistemin denklemi
%k_arti= -fx+dmi_v+Zeta*gx*uk_v-tetad; %sürekli sistemin denklemi

%sistemin ayrik denklemi
%k_arti= xk_v - T*(beta_A_v.*(xk_v.^4))+T*dmi_v + T*Zeta*gx*uk_v-T*tetad;
tetadd=-T*tetad;
xk_arti=zeros(zn,1);
for i=1:zn
    xk_arti(i,1)=xk_v(i,1)
    +T*((-beta_A_v(i,1)*(xk_v(i,1)^4))+dmi_v(i,1)+Zeta*gx(i,:)*uk_v-dmi_loss(i,1))
    +tetadd(i,1);
end
end
```


Çizelge D.3 : 4.Slab Fırını parametreleri (function furnace_dataparams).

```
function [Tgi,Tsi,Twi,tetad,beta_A_v,dmi_v,Vzones,Zeta,ki, dmi_loss] =  
furnace_dataparams(Tsi_eksi,dmi_loss,xk_v,tetad_pre,Zeta_pre)  
zn=12; %Zone number; define vector size  
KtoC=273.15; %Kelvin-Celcius Conversions K=C+273.15  
th2s=3600; %time hours to seconds  
Zeta_Ref=7.2;  
Zeta=Zeta_pre/Zeta_Ref; % cog gas calorimeter index. Actual/Ref--> REF=7.2  
%Zeta=Zeta_pre;  
  
%Slab and Wall Temperatures  
%from L2 models outputs  
%Tsi: i.th zone, k.th slab surface temperature from slab heat transfer model  
%Twi: ith zone furnace wall temperature from furnace wall temperature model  
%Shadow factor of bottom zone: 0.20 = 20% of heat flow from bottom zone are lost to  
beams  
shadow_factor=0.2;  
%Shape factor between roof and product  
shape_factor=0.5;  
sigma=5.675e-8; %Stefan-Boltzman coefficient (W.m^-2.K^-4)  
e_s=0.65; %steel slab heat emissivity index Product temp<750  
e_sc=0.80; %scale emissivity index Product temp>900  
e_fg= 0.35; % flue gas emissivity  
e_roof=0.85; %furnace roof emissivity index  
e_w=0.85; %furnace wall emissivity index  
  
Wzone=13.30; % width of the furnace  
Hzone=1.8; %height of the furnace zones  
Lzone=2.4; % Each wall length (m) in zone. distance between 2 zones  
n_wall=2; %number of walls (2) due to south&north walls  
  
%%Zones start and end positions in m for both top and bottom  
ZSPos = [13.805;16.730;19.180;21.670;24.015;26.490];  
ZEPos = [16.730;19.180;21.670;24.015;26.490;30.500];  
HTopzones = 1.80;  
HBotzones = 1.94;  
Lzone = ZEPos-ZSPos;  
  
cpgi = [0.2;0.2;0.2;0.2;0.2;0.2;0.2;0.2;0.23;0.23;0.23;0.23]; %each zone waste gas  
(flue gas) specific heat  
  
% All vectors proposed as column vector  
Ns=zeros(zn,1);  
A_wall=zeros(zn,1);  
ki=zeros(zn,1);  
beta_A_w=zeros(zn,1);  
dmwi=zeros(zn,1);  
beta_A_s=zeros(zn,1);  
dmsi=zeros(zn,1);  
Asi=zeros(zn,zn); %maksimum slab number is 6 for each zone.ith row kth slab  
%Tsi=zeros(zn,1);  
Twi=zeros(zn,1);  
Vzones=zeros(zn,1);  
  
for i=1:zn/2  
    A_wall(2*i-1,1) = Lzone(i,1) * (HTopzones*n_wall+Wzone); %Wall area top (for all  
zones), Bottom&Top wall height is same so divided 2.Wall shape is U  
    A_wall(2*i,1) = Lzone(i,1) * (HBotzones*n_wall+Wzone); %Wall area bottom (for  
all zones), Bottom&Top wall height is same so divided 2.Wall shape is U  
    Vzones(2*i-1,1) = Lzone(i,1) * HTopzones*Wzone; %zone top volume  
    Vzones(2*i,1) = Lzone(i,1) * HBotzones*Wzone; %zone bottom volume  
    %Ns(i,1)=2; %2 slabs in every zone, Ns is slab number  
    ki(2*i-1,1) = cpgi(2*i-1,1) * Vzones(2*i-1,1); % top zones ki calculation  
    ki(2*i,1) = cpgi(2*i,1) * Vzones(2*i,1); %zones ki calculation  
end  
  
yk_v=xk_v./ki; %model output x is y(i)*k(i) where k(i)=cpg(i)*V(i)  
Tgi=yk_v-KtoC; %yk_v Tgi calculation results in model as Kelvin  
%Zone Temperature Limits Clamping maxT=1390C, minT=0  
maxTgi=1390;  
minTgi=0;
```

Çizelge D.3 (devamı) : 4.Slab Fırını parametreleri (function furnace_dataparams).

```
for i=1:zn
    if Tgi(i,1)>maxTgi
        Tgi(i,1)=maxTgi;
    elseif Tgi(i,1)<0
        Tgi(i,1)=minTgi;
    else
        Tgi(i,1)=Tgi(i,1);
    end
end

Tsi = [450;550;625;700;800;900;1000;1100;1150;1200;1210;1220]; %from L2 model output

for i=1:zn

    beta_A_w(i,1)=A_wall(i,1)*e_w*sigma/(ki(i,1)^4);
    dmsi(i,1)= A_wall(i,1)*e_w*sigma*(Twi(i,1)^4);

    beta_A_ik=0;
    dmsi_k=0;
    Nsi=Ns(i,1); %ith zone number(quantity) of slab
    %calculate the totalize the slab area in ith zone
    for k=1:Nsi
        Asi(i,k)=12*2.4/2; %slab surface area ith zone kth slab 12mx1.5m
        beta_A_ik = beta_A_ik+Asi(i,k); %i.th zone all k slabs surface area total
        dmsi_k = dmsi_k+Asi(i,k)*Tsi(i,1)^4; %i.th zone all k slabs surface area
    end
    total
    beta_A_s(i,1)=beta_A_ik*e_s*sigma/ki(i,1)^4; %i.th zone beta_A_slab
    dmsi(i,1)= dmsi_k*e_s*sigma; %i.th zone dmsilab
end

%Wall loss calculated as different way
%in the paper q_wi= ε . σ . (T_gi^4-T_wi^4 )
%in our Test Furnace QL_wall=1200-1700 W/m^2
dmwi=zeros(zn,1);
beta_A_w=zeros(zn,1);
qwlos_k= [1700;1800;1700;1800;1700;1800;1700;1800;1700;1800;1700;1800]/1000; % Wall
losses in kW/m^2
QWloss = zeros(zn,1);
for i=1:zn

    QWloss(i,1) = A_wall(i,1) * qwlos_k(i,1); % Wall losses in Watt

end

beta_A_v=beta_A_s+beta_A_w;
dmi_v=dmsi; %+dmwi;%alternative wall lossed can be added into dmi_v;

Qskids = zeros(zn,1);
QWloss = zeros(zn,1);
Qloss=QWloss+Qskids;

dmi_loss=dmi_loss; % Furnace losses calculations from function furnace_losses block

%tetad = 5*ones(6,1);
%tetad(1,1)=tetad_pre;
%tetad=yk_v*0.0; %loss is %10 of given energy
%Tsi=Tsi-KtoC; %Tsi output is C. in model K used
%tetad = zeros(zn,1);
tetad=1*[50;100;150;200;250;300;350;400;450;500;550;600];
tetad(1,1)=tetad_pre;

%Twi&Tsi values will come from L2 model outputs
%%Twi = [850 900 1000 1180 1250 1280]'; %from L2 model output
%%Tsi = [460 650 970 1150 1200 1250]'; %from L2 model output
End
```

Çizelge D.4 : 4.Slab Fırını kayıpları (function furnace_losses).

```
function dmi_loss = furnace_losses(Tgi,Tref)
%%%LOSSES
zn=12; %Zone number; define vector size
KtoC=273.15; %Kelvin-Celcius Conversions K=C+273.15
th2s=3600; %time hours to seconds
pi=3.14;
Wzone=13.30; % width of the furnace
Hzone=1.8; %height of the furnace zones
Lzone=2.4; % Each wall length (m) in zone. distance between 2 zones
Tref_loss=1000; %Reference temperature for losses in C
n_wall=2; %number of walls (2) due to south&north walls
A_wall=Lzone*(Hzone*n_wall+Wzone)*ones(zn,1); %Wall area (for all zones), Bottom&Top
wall height is same so divided 2.Wall shape is U

%Water losses
cp_w=4220; %kJ/kg.K^-1
w_density=1000;%kg/m^3
w_flow=780/th2s; %m3/h to m3/second
dT_w=(34-28)+273; %inlet-outlet water temp.diff.in Kelvin
QL_wtr=cp_w*(w_flow*w_density)*dT_w/1000; %Heat losses from water in kJ
dmi_wtr=QL_wtr*ones(zn,1); %energy (kJ) losses by water notation in furnace model

%Wall losses
ci_wall=1200; %Loss by wall index (w/m2) %1 Watt = 1 Joule per second (1W = 1 J/s)
QL_wall=ci_wall*A_wall/1000.*ones(zn,1); % losses as kW=kJ/second in all zones
dmi_w=QL_wall; %energy (kJ) losses by wall notation in furnace model

%Tube Losses
ci_tube=10000; %Loss index by tube w/m2 for only bottom zones
n_beam=14; %number of beams at each zones
post_step=2.6; %post step size is 2600m
Hpost=2.4; %post height is 2480.4mm
L_of_a_tube=0.85; %0.85m water tank under skids
n_post=Lzone/post_step; %number of posts at each beams is 3
Ltube=n_beam*n_post*L_of_a_tube/2; %/2 because tanks are only at movable skids
QL_tube=zeros(zn,1);

for i=2:2:zn
    QL_tube(i,1)=Ltube*ci_tube/1000; % tube losses as kW=kJ/second in bottom zones
end

dmi_t=QL_tube;

%Beam Losses
ci_beam=4000; %Loss index by beam w/m2 for only bottom zones
dia_beam=0.11; %beam diameter (m)
A_beam=pi*dia_beam*(Lzone+Hpost*n_post)*n_beam;
QL_beam=zeros(zn,1);

for i=2:2:zn
    QL_beam(i,1)=ci_beam*A_beam*n_beam/1000; % beam losses as kW=kJ/second in
    bottom zones
end

dmi_b=QL_beam;
QLoss=QL_wall+QL_beam+QL_tube; %total losses
dmi_loss=dmi_w+dmi_b+dmi_t;

for i=1:zn
    QLoss(i,1)=QLoss(i,1)*(Tgi(i,1)/Tref_loss)^2;
    dmi_loss(i,1)=dmi_loss(i,1)*(Tref(i,1)/Tref_loss)^2;
end
```

Çizelge D.5 : Bozucu kestiricisi (function disturbance_estimation_I_I).

```
function [tetad_hat_arti,tetad_est] =  
disturbance_estimation_I_I(tetad_hat,xk_v,uk_v,beta_A_v,dmi_v,gx,Zeta,dmi_loss,T)  
%T=1; %sample time for discrete system  
%x_v: nx1 state_vector  
%u_v: nx1 control_vector  
%dmi_v: nx1 dmi_vector from model  
%beta_A_v: nx1 beta_A_vector from model  
%gx:nxn g(x) matris from model  
zn=12; %zone number %define n vector size  
%uk_v=uk_v*632; %control input %100 is 632 Nm3/h  
MaxFuel=[632*2;674*2;896;959;843;875;569;706;400;464;400;580]*2/3600;  
%for i=1:zn  
%   uk_v(i,1)=(uk_v(i,1)/100)* 632*2/3600; %MaxFuel(i,1); %control input %100 is  
Max Burner Capacity Nm3/h  
%end  
f0x=zeros(zn,1);  
for i=1:zn  
    f0x(i,1)=xk_v(i,1)-T*(beta_A_v(i,1)*(xk_v(i,1)^4))+T*dmi_v(i,1)-T*dmi_loss(i,1);  
end  
% f0x sütun vektörü olduğundan (i,1) oluşturuldu.  
gx_Z=T*(Zeta*gx);  
%köşegenleri sigma_1 olan beta(x) matris oluşturma  
%tetad nx1 size. Dolayısıyla z nx1 olacağından z+= [I-beta_x]z olduğundan beta_x  
(nxn) olmalıdır.  
%Test'de kolaylık olması için zn=6 alındı.  
sigma_1 = 0.5;  
beta_x=sigma_1*eye(zn,zn);  
beta_x_eksi = beta_x; %beta_x x'e bagimli degil  
  
tetad_hat_arti = tetad_hat-  
beta_x*(tetad_hat+beta_x_eksi*xk_v+f0x+gx_Z*uk_v)+beta_x_eksi*xk_v;  
  
tetad_est = -(tetad_hat+beta_x_eksi*xk_v)/T;  
end
```

Çizelge D.6 : 4.Slab Fırını ARMAX modeli.

```
%ARMAX structure for MISO system (12 input-1 output)  
%in the paper app.sci. 2020 for heating zone (one input-one output)  
% na=4, nb=4 nc=15 nk=1  
na = 4;  
nb = 4*ones(1,12);  
nc = 4;  
nk = 1*ones(1,12);  
%data is imported from furnace 4200 datas every 1 seconds for every output  
datay1=[Tgi_k(:,1) uk];  
y1_armax=arimax(datay1, [na nb nc nk]);  
datay2=[Tgi_k(:,2) uk];  
y2_armax=arimax(datay2, [na nb nc nk]);  
datay3=[Tgi_k(:,3) uk];  
y3_armax=arimax(datay3, [na nb nc nk]);  
datay4=[Tgi_k(:,4) uk];  
y4_armax=arimax(datay4, [na nb nc nk]);  
datay5=[Tgi_k(:,5) uk];  
y5_armax=arimax(datay5, [na nb nc nk]);  
datay6=[Tgi_k(:,6) uk];  
y6_armax=arimax(datay6, [na nb nc nk]);  
datay7=[Tgi_k(:,7) uk];  
y7_armax=arimax(datay7, [na nb nc nk]);  
datay8=[Tgi_k(:,8) uk];  
y8_armax=arimax(datay8, [na nb nc nk]);  
datay9=[Tgi_k(:,9) uk];  
y9_armax=arimax(datay9, [na nb nc nk]);  
datay10=[Tgi_k(:,10) uk];  
y10_armax=arimax(datay10, [na nb nc nk]);  
datay11=[Tgi_k(:,11) uk];  
y11_armax=arimax(datay11, [na nb nc nk]);  
datay12=[Tgi_k(:,12) uk];  
y12_armax=arimax(datay12, [na nb nc nk]);
```

Çizelge D.7 : Model karşılaştırma çizim fonksiyon bloğu.

```
%%Plot function to compare Real and Armax and Proposed Model Output Temperatures
for all zones
figure(1)
for i=1:4
subplot (4,1,i);
plot(Tgi_real(:,1),Tgi_real(:,i+1),'r')
hold on
plot(Tgism.data(:,i),'b')
hold on
plot(yarmax(:,i),'g')
grid on
ylim([800 1200])
xlim([100 4200])
%title1 = ['Furnace Real Temperature vs Model's Outputs Temperature for
',num2str(i),'.zone'];
%title(title1, 'fontsize', [10])
legend1= ['Zone ',num2str(i),' furnace real temperature'];
legend2= ['Zone ',num2str(i),' proposed model output temperature'];
legend3= ['Zone ',num2str(i),' armax model output temperature'];
legend(legend1,legend2,legend3)
ylabel1=[num2str(i),'. zone temperatures'];
ylabel('Temperature (°C)' , 'fontsize' , [10])
end
xlabel('time (second)' , 'fontsize' , [10])

figure(2);
for i=5:8
subplot (4,1,i-4);
plot(Tgi_real(:,1),Tgi_real(:,i+1),'r')
hold on
plot(Tgism.data(:,i),'b')
hold on
plot(yarmax(:,i),'g')
grid on
xlim([100 4200])
ylim([1000 1400])
%title1 = ['Furnace Real Temperature vs Model's Outputs Temperature for
',num2str(i),'.zone'];
%title(title1, 'fontsize' , [10])
legend1= ['Zone ',num2str(i),' furnace real temperature'];
legend2= ['Zone ',num2str(i),' proposed model output temperature'];
legend3= ['Zone ',num2str(i),' armax model output temperature'];
legend(legend1,legend2,legend3)
ylabel1=[num2str(i),'. zone temperatures'];
ylabel('Temperature (°C)' , 'fontsize' , [10])
end
xlabel('time (second)' , 'fontsize' , [10])

figure(3);
for i=9:12
subplot (4,1,i-8);
plot(Tgi_real(:,1),Tgi_real(:,i+1),'r')
hold on
plot(Tgism.data(:,i),'b')
hold on
plot(yarmax(:,i),'g')
grid on
xlim([100 4200])
ylim([1000 1400])
%title1 = ['Furnace Real Temperature vs Model's Outputs Temperature for
',num2str(i),'.zone'];
%title(title1, 'fontsize' , [10])
legend1= ['Zone ',num2str(i),' furnace real temperature'];
legend2= ['Zone ',num2str(i),' proposed model output temperature'];
legend3= ['Zone ',num2str(i),' armax model output temperature'];
legend(legend1,legend2,legend3)
ylabel1=[num2str(i),'. zone temperatures'];
ylabel('Temperature (°C)' , 'fontsize' , [10])
end
xlabel('time (second)' , 'fontsize' , [10])
```

Çizelge D.7 (devamı) : Model karşılaştırma çizim fonksiyon bloğu

```
figure(4);
for i=1:4
    subplot (4,1,i);
    plot(Tgi_real(:,i+1)-Tgism.data(:,i), 'r')
    hold on
    plot(Tgi_real(:,i+1)-yarmax(:,i), 'b')
    grid on
    xlim([100 4200])
    legend1=['Zone ', num2str(i), ' Error bw proposed model output and real furnace temp.'];
    legend2=['Zone ', num2str(i), ' Error bw armax model output and real furnace real temp.'];
    legend(legend1, legend2)
    ylabel('Temperature (°C)' , 'fontsize' , [10])
end
xlabel('time (second)' , 'fontsize' , [10])
figure(5);
for i=5:8
    subplot (4,1,i-4);
    plot(Tgi_real(:,i+1)-Tgism.data(:,i), 'r')
    hold on
    plot(Tgi_real(:,i+1)-yarmax(:,i), 'b')
    grid on
    xlim([100 4200])
    legend1=['Zone ', num2str(i), ' Error bw proposed model output and real furnace temp.'];
    legend2=['Zone ', num2str(i), ' Error bw armax model output and real furnace real temp.'];
    legend(legend1, legend2)
    ylabel('Temperature (°C)' , 'fontsize' , [10])
end
xlabel('time (second)' , 'fontsize' , [10])
figure(6);
for i=9:12
    subplot (4,1,i-8);
    plot(Tgi_real(:,i+1)-Tgism.data(:,i), 'r')
    hold on
    plot(Tgi_real(:,i+1)-yarmax(:,i), 'b')
    grid on
    xlim([100 4200])
    legend1=['Zone ', num2str(i), ' Error bw proposed model output and real furnace temp.'];
    legend2=['Zone ', num2str(i), ' Error bw armax model output and real furnace real temp.'];
    legend(legend1, legend2)
    ylabel('Temperature (°C)' , 'fontsize' , [10])
end
xlabel('time (second)' , 'fontsize' , [10])
```

Çizelge D.8 : NMPC fonksiyon blokları

```
function [uk_v, ukopt_v] =
FurNMPC(xk_v, r, last_ukopt_v, Tgi, beta_A_v, dmi_v, tetad_est, Vi, ki, Zeta, dmi_loss, T)
zn=12; % #of zones define #of states

coder.extrinsic('Fur_EOFmincon')
Hp = 20; % Prediction Horizon
Hu = 1; % Control Horizon

ukopt_v = 0.1*ones(zn, Hu); % must initialize ukopt

ukopt_v =
Fur_EOFmincon(xk_v, Hp, Hu, r, last_ukopt_v, beta_A_v, dmi_v, tetad_est, Vi, ki, Zeta, dmi_loss, T);

% optimal move
uk_v = ukopt_v;
```

Çizelge D.9 : NMPC Fur_EOFmincon fonksiyon bloğu

```
function ukopt_v =
Fur_EOFmincon(xk_v, Hp, Hu, r, u0, beta_A_v, dmi_v, tetad_est, Vi, ki, Zeta, dmi_loss, T)
%% Nonlinear MPC implementation for Furnace Model Energy Optimization

%% Furnace Parameters begin
zn=12;

%%% Furnace boundaries
%Control boundary hard const.
UB = 100*ones(zn,Hu); %Valve output can not exceed 100 percent
LB = zeros(zn,Hu); % valve output can not below than 0

%Zone temp.boundaries is soft constraint defined in CONSFUN
%UB2 = 1390*ones(zn,Hp); %zone ref. temp can not exceed 1390C
%LB2 = 20*ones(zn,Hp); %zone ref. temp can not exceed 20C

ukopt_v = zeros(zn,Hu);
COSTFUN = @(u)
Fur_ObjectiveFCNz12(xk_v, Hp, Hu, r, u, beta_A_v, dmi_v, tetad_est, Vi, ki, Zeta, dmi_loss, T);
%%% cost function

CONSFUN = @(u)
Fur_ConstraintFCNz12(xk_v, Hp, Hu, r, u, beta_A_v, dmi_v, tetad_est, Vi, ki, Zeta, dmi_loss, T)
; %%% constraint function

options = optimoptions('fmincon','Algorithm','sqp','Display','none'); %%%
solver properties
%ukopt_v = fmincon(COSTFUN,u0,[],[],[],[],LB,UB,CONSFUN,options); %%%
optimization process w hard cons.on u(k) and soft cons.on y(k)
ukopt_v = fmincon(COSTFUN,u0,[],[],[],[],LB,UB,[],options); %%%
optimization process with hard constraints on control u(k)
%ukopt_v = fmincon(COSTFUN,u0,[],[],[],[],[],[],[],options); %%%
optimization process without constraints
```

Çizelge D.10 : NMPC Fur_ObjectiveFCNz12 fonksiyon bloğu

```
function cost =
Fur_ObjectiveFCNz12(xk_v, Hp, Hu, r, u, beta_A_v, dmi_v, tetad_est, Vi, ki, Zeta, dmi_loss, T)

%% Nonlinear MPC implementation for Slab Furnace

%% %Furnace model heat entalpy calculations
%T=0.1; %sample time for discrete system
% 1Joule = kg.m2/s2 = N.m = W.s 1J=Pa(N/m2).m3 1J=I(current).V(voltage)
% 1W=1J/s=0.239 cal/s
zn=12; %Zone number; define vector size
R=4.44; %air/gas flow ratio. Normally combustion air/cog gas flow = 4.44
Ta=450+273; %combustion air temperature 450C
Tfg=20; %cog gas temperature in C
cpa=1.08; % combustion air specific heat index. (kJ/kg)*K Normally from data table
of air index with Ta
cpg=0.44; % cpf=cpg fuel(cog gas) specific heat index (kcal/m3)*C
rho_a=0.0270; %air density (kg/m^3)at 600dapa and 450C at burner inlet
cpgj=cpg/0.239;
cpar=cpa*rho_a;
Hfcog=17995; %cog gas energy rate (kJ/Nm3)
Hfmixed=18020; %mixed gas energy rate (kJ/Nm3)
Hf=Hfmixed;
KtoC=273.15; %Kelvin-Celcius Conversions K=C+273.15

%fx=beta_A_v.*xk_v; %matrix multiplier, beta_A(1)*xk(1);...;beta_A(n)*xk(n)

g1=Hf+cpar*R*Ta+cpgj*Tfg;
cost = 0;
Q=1;
P=0.01;
%du = zeros(zn,1);
```


Çizelge D.10 (devamı) : NMPC Fur_ObjectiveFCNz12 fonksiyon bloğu

```
for ct=1:Hp
%%g2(x) matrisini oluşturalım.

a=0.5; %alpha waste gas yayılım oranı
x1=xk_v(1);x2=xk_v(2);x3=xk_v(3);x4=xk_v(4);x5=xk_v(5);x6=xk_v(6);
x7=xk_v(7);x8=xk_v(8);x9=xk_v(9);x10=xk_v(10);x11=xk_v(11);x12=xk_v(12);
%k1=ki(1);k2=ki(2);k3=ki(3);k4=ki(4);k5=ki(5);k6=ki(6);
k1=Vi(1);k2=Vi(2);k3=Vi(3);k4=Vi(4);k5=Vi(5);k6=Vi(6); % ki=Vi
k7=Vi(7);k8=Vi(8);k9=Vi(9);k10=Vi(10);k11=Vi(11);k12=Vi(12);

Ba0 = (1-a);
Ba1 = a*(2-a);
Ba2 = a*(2-a+(1-a)^2);
Ba3 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3);
Ba4 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3+(1-a)^4);
Ba5 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3+(1-a)^4+(1-a)^5);

g2x11=-x1/k1; g2x13=x3/k3-x1/k1; g2x15=x3/k3-x1/k1;
g2x17=x3/k3-x1/k1; g2x19=x3/k3-x1/k1; g2x111=x3/k3-x1/k1;

g2x12=a*(x2/k2-x1/k1); g2x14=a*x3/k3+a*(1-a)*x2/k2-Ba1*x1/k1;
g2x16=Ba1*x3/k3+a*(1-a)^2*x2/k2-Ba2*x1/k1;

g2x18=Ba2*x3/k3+a*(1-a)^3*x2/k2-Ba3*x1/k1;
g2x110=Ba3*x3/k3+a*(1-a)^4*x2/k2-Ba4*x1/k1;
g2x112=Ba4*x3/k3+a*(1-a)^5*x2/k2-Ba5*x1/k1;

g2x22=-x2/k2; g2x24=(1-a)*(x4/k4-x2/k2); g2x26=(1-a)^2*(x4/k4-x2/k2);
g2x28=(1-a)^3*(x4/k4-x2/k2); g2x210=(1-a)^4*(x4/k4-x2/k2);
g2x212=(1-a)^5*(x4/k4-x2/k2);

g2x33=-x3/k3; g2x35=x5/k5-x3/k3; g2x37=x5/k5-x3/k3;
g2x39=x5/k5-x3/k3; g2x311=x5/k5-x3/k3;
g2x34=a*(x4/k4-x3/k3); g2x36=a*x5/k5+a*(1-a)*x4/k4-Ba1*x3/k3;
g2x38=Ba1*x5/k5+a*(1-a)^2*x4/k4-Ba2*x3/k3;
g2x310=Ba2*x5/k5+a*(1-a)^3*x4/k4-Ba3*x3/k3;
g2x312=Ba3*x5/k5+a*(1-a)^4*x4/k4-Ba4*x3/k3;

g2x44=-x4/k4; g2x46=(1-a)*(x6/k6-x4/k4); g2x48=(1-a)^2*(x6/k6-x4/k4);
g2x410=(1-a)^3*(x6/k6-x4/k4); g2x412=(1-a)^4*(x6/k6-x4/k4);

g2x55=-x5/k5; g2x57=x7/k7-x5/k5; g2x59=x7/k7-x5/k5; g2x511=x7/k7-x5/k5;
g2x56=a*(x6/k6-x5/k5); g2x58=a*x7/k7+a*(1-a)*x6/k6-Ba1*x5/k5;
g2x510=Ba1*x7/k7+a*(1-a)^2*x6/k6-Ba2*x5/k5;
g2x512=Ba2*x7/k7+a*(1-a)^3*x6/k6-Ba3*x5/k5;

g2x66=-x6/k6; g2x68=(1-a)*(x8/k8-x6/k6);
g2x610=(1-a)^2*(x8/k8-x6/k6);
g2x612=(1-a)^3*(x8/k8-x6/k6);

g2x77=-x7/k7; g2x79=x9/k9-x7/k7;
g2x711=x9/k9-x7/k7;
g2x78=a*(x8/k8-x7/k7);
g2x710=a*x9/k9+a*(1-a)*x8/k8-Ba1*x7/k7;
g2x712=Ba1*x9/k9+a*(1-a)^2*x8/k8-Ba2*x7/k7;

g2x88=-x8/k8; g2x810=(1-a)*(x10/k10-x8/k8);
g2x812=(1-a)^2*(x10/k10-x8/k8);

g2x99=-x9/k9; g2x911=x11/k11-x9/k9;
g2x910=a*(x10/k10-x9/k9);
g2x912=a*x11/k11+a*(1-a)*x10/k10-Ba1*x9/k9;

g2x1010=-x10/k10;
g2x1012=(1-a)*(x12/k12-x10/k10);

g2x1111=-x11/k11;
g2x1112=a*(x12/k12-x11/k11);
g2x1212=-x12/k12;
```


Cizelge D.10 (devamı) : NMPC Fur_ObjectiveFCNz12 fonksiyon bloğu

```
g2x1= [g2x11 g2x12 g2x13 g2x14 g2x15 g2x16 g2x17 g2x18 g2x19 g2x110 g2x111
g2x112];
g2x2= [ 0 g2x22 0 g2x24 0 g2x26 0 g2x28 0 g2x210 0
g2x212];
g2x3= [ 0 0 g2x33 g2x34 g2x35 g2x36 g2x37 g2x38 g2x39 g2x310 g2x311
g2x312];
g2x4= [ 0 0 0 g2x44 0 g2x46 0 g2x48 0 g2x410 0
g2x412];
g2x5= [ 0 0 0 0 g2x55 g2x56 g2x57 g2x58 g2x59 g2x510 g2x511
g2x512];
g2x6= [ 0 0 0 0 0 g2x66 0 g2x68 0 g2x610 0
g2x612];
g2x7= [ 0 0 0 0 0 0 g2x77 g2x78 g2x79 g2x710 g2x711
g2x712];
g2x8= [ 0 0 0 0 0 0 0 g2x88 0 g2x810 0
g2x812];
g2x9= [ 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x99 g2x910 g2x911
g2x912];
g2x10=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x1010 0
g2x1012];
g2x11=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x1111
g2x1112];
g2x12=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
g2x1212];

g2x=[g2x1;g2x2;g2x3;g2x4;g2x5;g2x6;g2x7;g2x8;g2x9;g2x10;g2x11;g2x12];

gx=g1*eye(zn)+(1+R)*g2x;

% Sürekli sistemin denklemleri
% xk_arti = -fx + dmi_v + Zeta * gx * uk_v - tetad; % Sürekli sistemin denklemleri

% Sistemin ayrık denklemleri
% xk_arti = xk_v - T * (beta_A_v .* (xk_v.^4) + T * dmi_v + T * Zeta * gx * uk_v - T * tetad);
xk_arti=zeros(zn,1);
yk_v=zeros(zn,1);
tetadd_est=-T*tetad_est;

for i=1:zn
    xk_arti(i,1)= xk_v(i,1)
    +T*((-beta_A_v(i,1)*(xk_v(i,1)^4))+dmi_v(i,1)+Zeta*gx(i,:)*u-dmi_loss(i,1))
    +tetadd_est(i,1);

    yk_v(i,1)=xk_arti(i,1)/ki(i,1); %model output x is y(i)*k(i) where k(i)=cpg(i)*V(i)

    yk_v(i,1)=yk_v(i,1)-KtoC; %yk_v Tgi calculation results in model as Kelvin
end
%%

%r is the furnace zone temperature Reference

%cost = cost + ((Tgi - r)' * Q * (Tgi - r)) + (du' * P * du);
cost = cost + ((yk_v - r)' * Q * (yk_v - r)) + (u' * P * u);

if ct<Hp
    xk_v = xk_arti;
    %theta = thetaRef(ct);
end

end

end

end
```

Çizelge D.11 : NMPC Fur_ConstraintFCNz12 fonksiyon bloğu

```
function [c, ceq] =  
Fur_ConstraintFCNz12(xk_v, Hp, Hu, r, u, beta_A_v, dmi_v, tetad_est, Vi, kyi, Zeta, dmi_loss, T)  
%% Constraint function of nonlinear MPC of Furnace  
zn=12; %Zone number; define vector size  
  
% Inputs:  
% u: control signal, from time k to time k+N-1  
% xk_v: current state vector at time k  
% T: controller sample time  
% Hp: Hp prediction horizon  
%  
% Output:  
% c: inequality constraints applied across prediction horizon  
%  
  
%% Nonlinear MPC design parameters  
  
%% %Furnace model heat entalpy calculations  
%T=0.1; %sample time for discrete system  
% 1Joule = kg.m2/s2 = N.m = W.s 1J=Pa(N/m2).m3 1J=I(current).V(voltage)  
% 1W=1J/s=0.239 cal/s  
  
R=4.44; %air/gas flow ratio. Normally combustion air/cog gas flow = 4.44  
Ta=450+273; %combustion air temperature 450C  
Tfg=20; %cog gas temperature in C  
cpa=1.08; % combustion air specific heat index. (kJ/kg)*K Normally from data table  
of air index with Ta  
cpg=0.44; % cpf=cpg fuel(cog gas) specific heat index (kcal/m3)*C  
rho_a=0.0270; %air density (kg/m^3)at 600dapa and 450C at burner inlet  
cpgj=cpg/0.239;  
cpar=cpa*rho_a;  
Hfcog=17995; %cog gas energy rate (kJ/Nm3)  
Hfmixed=18020; %mixed gas energy rate (kJ/Nm3)  
HF=Hfmixed;  
KtoC=273.15; %Kelvin-Celcius Conversions K=C+273.15  
%uk_v=uk_v*632; %control input %100 is 632 Nm3/h  
  
%Zone Temperature Limits Clamping maxT=1390C, minT=20  
TMin = [20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20 ; 20];  
TMax = [1350 ; 1350; 1350 ; 1350 ; 1350 ; 1350 ; 1350 ; 1350 ; 1350 ; 1350 ; 1350 ; 1350 ; 1350];  
  
%fx=beta_A_v.*xk_v; %matrix multiplier, beta_A(1)*xk(1);...;beta_A(n)*xk(n)  
  
g1=HF+cpar*R*Ta+cpgj*Tfg;  
  
%du = zeros(zn,1);  
%theta = thetaAct;  
%% Inequality constraints calculation  
c = zeros(zn, Hp*2); %1.satır min, 2.satır max değerleri  
ceq = [];  
for ct=1:Hp  
  
%%g2(x) matrisini oluşturalım.  
  
a=0.5; %alpha waste gas yayılım oranı  
x1=xk_v(1);x2=xk_v(2);x3=xk_v(3);x4=xk_v(4);x5=xk_v(5);x6=xk_v(6);  
x7=xk_v(7);x8=xk_v(8);x9=xk_v(9);x10=xk_v(10);x11=xk_v(11);x12=xk_v(12);  
%k1=ki(1);k2=ki(2);k3=ki(3);k4=ki(4);k5=ki(5);k6=ki(6);  
k1=Vi(1);k2=Vi(2);k3=Vi(3);k4=Vi(4);k5=Vi(5);k6=Vi(6); % ki=Vi  
k7=Vi(7);k8=Vi(8);k9=Vi(9);k10=Vi(10);k11=Vi(11);k12=Vi(12);  
  
Ba0 = (1-a);  
Ba1 = a*(2-a);  
Ba2 = a*(2-a+(1-a)^2);  
Ba3 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3);  
Ba4 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3+(1-a)^4);  
Ba5 = a*(2-a+(1-a)^2+(1-a)^3+(1-a)^4+(1-a)^5);
```

Çizelge D.11 (devamı) : NMPC Fur_ConstraintFCNz12 fonksiyon bloğu

```

g2x11=-x1/k1; g2x13=x3/k3-x1/k1; g2x15=x3/k3-x1/k1;
g2x17=x3/k3-x1/k1; g2x19=x3/k3-x1/k1; g2x111=x3/k3-x1/k1;

g2x12=a*(x2/k2-x1/k1); g2x14=a*x3/k3+a*(1-a)*x2/k2-Ba1*x1/k1;
g2x16=Ba1*x3/k3+a*(1-a)^2*x2/k2-Ba2*x1/k1;

g2x18=Ba2*x3/k3+a*(1-a)^3*x2/k2-Ba3*x1/k1;
g2x110=Ba3*x3/k3+a*(1-a)^4*x2/k2-Ba4*x1/k1;
g2x112=Ba4*x3/k3+a*(1-a)^5*x2/k2-Ba5*x1/k1;

g2x22=-x2/k2; g2x24=(1-a)*(x4/k4-x2/k2); g2x26=(1-a)^2*(x4/k4-x2/k2);
g2x28=(1-a)^3*(x4/k4-x2/k2); g2x210=(1-a)^4*(x4/k4-x2/k2);
g2x212=(1-a)^5*(x4/k4-x2/k2);

g2x33=-x3/k3; g2x35=x5/k5-x3/k3; g2x37=x5/k5-x3/k3;
g2x39=x5/k5-x3/k3; g2x311=x5/k5-x3/k3;
g2x34=a*(x4/k4-x3/k3); g2x36=a*x5/k5+a*(1-a)*x4/k4-Ba1*x3/k3;
g2x38=Ba1*x5/k5+a*(1-a)^2*x4/k4-Ba2*x3/k3;
g2x310=Ba2*x5/k5+a*(1-a)^3*x4/k4-Ba3*x3/k3;
g2x312=Ba3*x5/k5+a*(1-a)^4*x4/k4-Ba4*x3/k3;

g2x44=-x4/k4; g2x46=(1-a)*(x6/k6-x4/k4); g2x48=(1-a)^2*(x6/k6-x4/k4);
g2x410=(1-a)^3*(x6/k6-x4/k4); g2x412=(1-a)^4*(x6/k6-x4/k4);

g2x55=-x5/k5; g2x57=x7/k7-x5/k5; g2x59=x7/k7-x5/k5; g2x511=x7/k7-x5/k5;
g2x56=a*(x6/k6-x5/k5); g2x58=a*x7/k7+a*(1-a)*x6/k6-Ba1*x5/k5; g2x510=Ba1*x7/k7+a*(1-a)^2*x6/k6-Ba2*x5/k5;
g2x512=Ba2*x7/k7+a*(1-a)^3*x6/k6-Ba3*x5/k5;

g2x66=-x6/k6; g2x68=(1-a)*(x8/k8-x6/k6);
g2x610=(1-a)^2*(x8/k8-x6/k6); g2x612=(1-a)^3*(x8/k8-x6/k6);

g2x77=-x7/k7; g2x79=x9/k9-x7/k7;
g2x711=x9/k9-x7/k7; g2x78=a*(x8/k8-x7/k7);
g2x710=a*x9/k9+a*(1-a)*x8/k8-Ba1*x7/k7;
g2x712=Ba1*x9/k9+a*(1-a)^2*x8/k8-Ba2*x7/k7;

g2x88=-x8/k8; g2x810=(1-a)*(x10/k10-x8/k8);
g2x812=(1-a)^2*(x10/k10-x8/k8);

g2x99=-x9/k9; g2x911=x11/k11-x9/k9; g2x910=a*(x10/k10-x9/k9);
g2x912=a*x11/k11+a*(1-a)*x10/k10-Ba1*x9/k9;

g2x1010=-x10/k10; g2x1012=(1-a)*(x12/k12-x10/k10);

g2x1111=-x11/k11; g2x1112=a*(x12/k12-x11/k11); g2x1212=-x12/k12;

g2x1= [g2x11 g2x12 g2x13 g2x14 g2x15 g2x16 g2x17 g2x18 g2x19 g2x110 g2x111 g2x112];
g2x2= [ 0 g2x22 0 g2x24 0 g2x26 0 g2x28 0 g2x210 0 g2x212];
g2x3= [ 0 0 g2x33 g2x34 g2x35 g2x36 g2x37 g2x38 g2x39 g2x310 g2x311 g2x312];
g2x4= [ 0 0 0 g2x44 0 g2x46 0 g2x48 0 g2x410 0 g2x412];
g2x5= [ 0 0 0 0 g2x55 g2x56 g2x57 g2x58 g2x59 g2x510 g2x511 g2x512];
g2x6= [ 0 0 0 0 0 g2x66 0 g2x68 0 g2x610 0 g2x612];
g2x7= [ 0 0 0 0 0 0 g2x77 g2x78 g2x79 g2x710 g2x711 g2x712];
g2x8= [ 0 0 0 0 0 0 0 g2x88 0 g2x810 0 g2x812];
g2x9= [ 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x99 g2x910 g2x911 g2x912];
g2x10=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x1010 0 g2x1012];
g2x1012];
g2x11=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x1111 g2x1112];
g2x1112];
g2x12=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 g2x1212];
g2x1212];

g2x=[g2x1;g2x2;g2x3;g2x4;g2x5;g2x6;g2x7;g2x8;g2x9;g2x10;g2x11;g2x12];

gx=g1*eye(zn)+(1+R)*g2x;
%gx=g1*eye(zn,zn);

```

Çizelge D.11 (devamı) : NMPC Fur_ConstraintFCNz12 fonksiyon bloğu

```
%sistemin ayrik denklemi
% $x_k$ _arti=  $x_k$ _v - T*(beta_A_v .*( $x_k$ _v.^4)+T*dmi_v + T*Zeta*gx*uk_v-T*tetad);
xk_arti=zeros(zn,1);
yk_v=zeros(zn,1);
tetadd_est=-T*tetad_est;
for i=1:zn

    % Obtain soc level at next prediction step
    %  $x < x_{Min}$ 
    c(i,2*ct-1) = (TMin(i,1)+ KtoC)*kyi(i,1);

    %  $x > x_{Max}$ 
    c(i,2*ct) = (TMax(i,1)+ KtoC)*kyi(i,1);

    xk_arti(i,1) = xk_v(i,1)
    + T*((-beta_A_v(i,1)*(xk_v(i,1)^4))+dmi_v(i,1)+Zeta*gx(i,:)*u-dmi_loss(i,1))
    +tetadd_est(i,1);

    yk_v(i,1) = xk_arti(i,1)/kyi(i,1); %model output x is y(i)*k(i) where
    k(i)=cpg(i)*V(i)
    yk_v(i,1) = yk_v(i,1) - KtoC; %yk_v Tgi calculation results in model as Kelvin

end
%%
    if ct<Hp
        xk_v = xk_arti;
        %theta = thetaRef(ct);
    end
end
end
```

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Deniz KAVAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2002, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2002-2004 yılları arasında Balıkesir Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalıştı.
- 2004-2016 yılları arasında Ereğli Demir Çelik Fabrikaları 1.Sıcak Haddehane Müdürlüğünde Elektronik-Otomasyon Mühendisi olarak çalıştı.
- 2016 yılından itibaren aynı müdürlük bünyesinde Elektronik-Otomasyon Başmühendisi olarak görevine devam etmektedir.
- 1.Sıcak Haddehane Müdürlüğündeki çalışmaları esnasında 4.slab Fırını, Levha Haddehanesi ve Normalize Fırını gibi önemli ve katma değeri yüksek tesislerin kurulumunda görev aldı. Ayrıca 18 MVA Şerit Ana Tahrik Sürücüler, Levha Haddehanesi Seviye-1 ve Seviye-2 otomasyon sistemleri ve 1.Slab Fırını gibi önemli tesis ve ekipmanların modernizasyonlarının Seviye-1 otomasyon kısımlarını yönetti. Bunun yanında tesisler için kalite ve üretim anlamında kritik öneme sahip kalınlık ve genişlik ölçme, markalama, çemberleme gibi ekipmanların ve değişik güçte alçak gerilim sürücülerin modernizasyonlarını da başarıyla yönetmiştir.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kavak, D., Yalçın, Y.** (2023). The modeling and identification of walking beam type slab reheating furnace based on immersion and invariance disturbance estimation. *Control Engineering Practice*, 139, 105611.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kavak, D., Temeltaş, H.** (2009). Comparison of real-time performance of Kalman filter-based slam methods for unmanned ground vehicle (UGV) navigation. *In Unmanned Systems Technology XI*, (Vol.7332, pp.562-573). SPIE.