



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DOKTORA
TEZİ**

**EKSTREMUM ARAMA
ALGORİTMASI İLE
ÇELİK ŞERİT ÜRETİMİNDEKİ
ENDÜSTRİYEL BOYA
KURUTMA FIRINININ
TOPLAM ENERJİ MALİYETİ
OPTİMİZASYONU**

Süleyman YILMAZ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

NİSAN 2023





**EKSTREMUM ARAMA ALGORİTMASI İLE ÇELİK ŞERİT
ÜRETİMİNDEKİ ENDÜSTRİYEL BOYA KURUTMA FIRINININ
TOPLAM ENERJİ MALİYETİ OPTİMİZASYONU**

Süleyman YILMAZ

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2023

Süleyman YILMAZ tarafından hazırlanan “EKSTREMUM ARAMA ALGORİTMASI İLE ÇELİK ŞERİT ÜRETİMİNDEKİ ENDÜSTRİYEL BOYA KURUTMA FIRINININ TOPLAM ENERJİ MALİYETİ OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. İlyas EKER

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Ahmet TEKE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 27 / 04 / 2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Süleyman YILMAZ

27 / 04 / 2023

EKSTREMUM ARAMA ALGORİTMASI İLE ÇELİK ŞERİT ÜRETİMİNDEKİ
ENDÜSTRİYEL BOYA KURUTMA FIRINININ TOPLAM ENERJİ MALİYETİ
OPTİMİZASYONU
(Doktora Tezi)

Süleyman YILMAZ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

ÖZET

Ağır sanayi tesisleri, pazarda rekabet edebilmek için, üretimin en önemli maliyetlerinden biri olan enerji maliyetlerini en aza indirmenin yollarını bulmaya çalışır. Bu çalışmada, çelik şerit üretim hattında kullanılan gerçek bir fırın sistemi üzerinde bir uygulamalı maliyet optimizasyonu yapılmıştır. Fırın sistemleri aynı anda farklı enerji kaynaklarını tüketirler. Bu nedenle, enerji maliyeti optimizasyonu fırın sistemleri için gerekli bir çalışmadır. Bu çalışmada üzerinde çalışılan gerçek fırın sistemi, iki bölge ve her bölge de sekiz bölümden oluşmaktadır. Çelik şeritlerin sürekli ısıtılması için her bölgeye bir doğal gaz brülörü ve 45kW gücünde bir sirkülasyon fanı yerleştirilmiştir. Fırın yapısını ve dahili brülör kontrol kurgusunu değiştirmeden fırın sisteminde fan hızlarını optimize ederek ısıtma işleminin toplam maliyetini en aza indirecek şekilde eğim tabanlı Ekstremum Arama Algoritması (EAA) geliştirilmiştir. Geliştirilmiş EAA, fırın güvenliği, ölçüm cihazı özellikleri ve kararlılık gecikmeleri gibi kısıtlamaları da aşacak şekilde çelik şerit üretiminde uygulanmıştır. EAA uygulanarak ölçülen enerji tüketim değerleri ile fırın üreticisinin tavsiye ettiği ayarlar ile elde edilen enerji tüketim değerleri maliyet bakımından karşılaştırılmıştır. Gerçek bir üretimin sonunda, geliştirilen EAA, fanların farklı çalışma hızlarında aynı ürünün daha az toplam maliyetle üretilebileceğini göstermiştir. Elektrik enerjisi ve doğal gazın toplam maliyeti, makina imalatçısının tavsiye ettiği %70 fan hızı yerine %78 kullanılması durumunda %3,44 oranında azalmıştır. Fırın sisteminin her bir bölgesinin doğal gaz tüketiminin ayrı ayrı ölçümü sağlanması durumunda tasarrufun daha da artırılacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler : Demir çelik endüstrisi, ekstremum arama algoritması, endüstriyel fırınlar, gerçek uygulama, maliyet optimizasyonu.
Sayfa Adedi : 117
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT

TOTAL ENERGY COST OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL PAINT DRYING OVEN
IN STEEL STRIP PRODUCTION WITH EXTREMUM SEEKING CONTROL
(Ph. D. Thesis)

Süleyman YILMAZ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

April 2023

ABSTRACT

Heavy industry facilities try to find ways to minimize energy costs, one of the most important costs of production, in order to compete in the market. In this study, an applied cost optimization was performed on a real furnace system used in a steel strip production line. Furnace systems consume different energy sources at the same time. Therefore, energy cost optimization is a necessary study for furnace systems. The actual kiln system studied in this study consists of two zones and each zone consists of eight parts. For continuous heating of the steel strips, a natural gas burner and a 45kW circulation fan are placed in each zone. A slope-based Extreme Seeking Control (ESC) has been developed to minimize the total cost of the heating process by optimizing the fan speeds in the furnace system without changing the furnace structure and internal burner control setup. Improved ESC has been applied in steel strip production, overcoming constraints such as furnace safety, meter characteristics, and stability delays. The energy consumption values measured by applying ESC and the energy consumption values obtained with the settings recommended by the oven manufacturer were compared in terms of cost. At the end of a real production, the developed ESC showed that the same product can be produced with less total cost at different operating speeds of the fans. The total cost of electrical energy and natural gas was reduced by 3.44% when 78% was used instead of the machine manufacturer's recommended 70% fan speed. It is envisaged that the savings can be further increased if the natural gas consumption of each zone of the furnace system is measured separately.

Key Words : Cost optimization, extremum seeking control, industrial furnace, iron and steel industry, real implementation.
Page Number : 117
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Murat FURAT

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamın ilk gününden son gününe kadar kendisine ne zaman danışsam zaman konu ayırt etmeksizin kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden geleni yapan, sıkıştığım zamanlarda yol gösteren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tezin uygulama kısımlarında her türlü imkanı sağlayan MMK Metalurji yöneticilerine de teşekkür ederim.

Ayrıca kıymetli zamanlarını ayırıp tezimi inceleyip sundukları katkılarından dolayı Prof. Dr. İlyas EKER, Prof Dr. Ahmet TEKE, Prof. Dr. Yakup HAMEŞ ve Doç Dr. Cuma KARAKUŞ'a da ayrıca teşekkür ederim.

Bu uzun yolculukta kendilerine yeteri zamanı ayıramama rağmen her zaman manevi desteğini esirgemeyen, yükümü her zaman hafifleten eşim Rabia Hanım'a ve tüm yorgunluğumu alan, enerji kaynaklarım oğlum M. Salih, kızlarım Nursena ve Betül'e de ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. EKSTREMUM ARAMA ALGORİTMASINA GENEL BAKIŞ.....	6
2.1. Kayma Tabanlı EAA.....	8
2.2. Bozucu Sinyal Tabanlı EAA	11
2.3. Eğim Tabanlı EAA.....	17
2.4. Sayısal Optimizasyon Tabanlı EAA	20
3. ENDÜSTRİYEL FIRINLAR.....	29
4. MATERYAL VE YÖNTEM	32
4.1. Materyal	32
4.1.1. Boyama hattı fırınının mevcut kontrol yapısı.....	37
4.1.2. Doğal gaz yanma kontrolü.....	39
4.1.3. Proses emniyet kontrolü	40
4.1.4. Şerit boya kaplama süreci.....	42
4.2. Yöntem	47
4.2.1. Ektremum arama algoritmasında karşılaşılan zorluklar	47
4.2.2. Doğalgaz tüketiminin önerilen EAA için hesaplanması.....	49
4.2.3. Önerilen değiştirilmiş eğim tabanlı EAA (DEAA)	51
4.2.4. Kararlılık.....	61

	Sayfa
5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR.....	62
5.1. Simulasyon Çalışmaları.....	62
5.2. Fırın Optimizasyonu Çalışması ve Sonuçlar.....	82
6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR.....	99
KAYNAKLAR	101
EKLER	112
EK-1. Isıtma Fırınının Matematiksel Modeli	113
DİZİN.....	117

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Literatür değerlendirmesi.....	25
Çizelge 4.1. Fırında kullanılan brülörlerin teknik bilgileri ve kullanılan bölgeler	40
Çizelge 4.2. Yanma sistemleri kontrolcüsüne ait giriş çıkış sinyal tablosu.....	40
Çizelge 4.3. Saha ekipmanları ve ekipmanların teknik bilgileri	42
Çizelge 4.4. Uygulanan sistemin konfigürasyon tablosu.....	51
Çizelge 4.5. Yerel minimizerin özet tablosu.....	56
Çizelge 5.1. Deneyde kullanılan programların ürün ailesi ve versiyon listesi.....	62
Çizelge 5.2. Bir ekstrem noktası olan fonksiyonun değer tablosu.....	67
Çizelge 5.3. Birden fazla ekstrem noktası olan fonksiyonun değer tablosu	72
Çizelge 5.4. Sirkülasyon fanlarının elektrik tüketimi ve maliyet tablosu.....	93
Çizelge 5.5. Değiştirilmiş eğim tabanlı EAA sonuçlarının detayları.....	96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. EAA üzerine yayınların yıllara göre dağılımı	7
Şekil 2.2. Ekstremum arama kontrolü sınıflandırılması	8
Şekil 2.3. Kayma tabanlı EAA diyagramı	9
Şekil 2.4. Bozucu sinyal tip EA uygulamasında performans ve arama sinyali grafiği...	12
Şekil 2.5. Genel tek giriş tek çıkış bozucu sinyal tabanlı EAA modeli	13
Şekil 2.6. Bozucu sinyal tabanlı EAA	14
Şekil 2.7. Sayısal optimizasyon tabanlı EAA şeması	20
Şekil 3.1. Fırın kayıpları	30
Şekil 3.2. Endüstriyel fırınların sınıflandırılması	31
Şekil 4.1. Sıcak kompleks adımları.....	33
Şekil 4.2. Soğuk kompleks adımları	33
Şekil 4.3. Boya kaplama hattı şematik diyagramı.....	35
Şekil 4.4. Boya hattı fırınlarının şematik diyagramı.....	36
Şekil 4.5. Bir fırın bölgesinin elektrik otomasyon kontrol diyagramı	41
Şekil 4.6. Sirkülasyon fan hızına göre toplam maliyet değişimi	44
Şekil 4.7. SCL yazılım kodu ile doğal gaz tüketim hesaplaması.....	45
Şekil 4.8. Fırın sistemi kontrol blok diyagramı	46
Şekil 4.9. Tasarlanan DEAA'nın akış diyagramı.....	54
Şekil 4.10. Dış bükey giriş sinyaline göre performans fonksiyonu	55
Şekil 4.11. Değiştirilmiş eğim tabanlı EAA'nın blok diyagramı.....	60
Şekil 5.1. SCL kodunda yazılmış program bloğu	63
Şekil 5.2. STL kodunda yazılmış program bloğu	64
Şekil 5.3. LADDER olarak yazılmış program bloğu.....	65
Şekil 5.4. Eş. 5.1 ile verilen tek minimumu olan fonksiyonun grafiği	66

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. Giriş kontrol sinyali başlangıç noktası 5 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonu grafiği.....	69
Şekil 5.6. Giriş kontrol sinyalinin başlangıç noktası 160 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği.....	70
Şekil 5.7. Eş. 5.2 ile verilen birden fazla minimumu olan fonksiyonun grafiği	71
Şekil 5.8. Giriş kontrol sinyalinin başlangıç noktası 115 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği.....	74
Şekil 5.9. Giriş kontrol sinyalinin başlangıç noktası 263 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği.....	75
Şekil 5.10. Giriş kontrol sinyalin başlangıç noktası 315 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği.....	77
Şekil 5.11. Giriş kontrol sinyalin başlangıç noktası 464 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği.....	78
Şekil 5.12. Limit öncesi ve sonrası giriş sinyali artış miktarı grafiği, a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali.....	80
Şekil 5.13. Deneysel çalışma boyunca; a) Hat hızı, b) Şerit kalınlığı	83
Şekil 5.14. Deneysel çalışma boyunca; a) PO çıkışı şeritin sıcaklık set değeri ve ölçülen sıcaklık değeri, b) FO çıkışı şeritin sıcaklık set değeri ve ölçülen sıcaklık değeri.....	86
Şekil 5.15. Deneysel çalışma boyunca; a) PO bölge sıcaklık değerleri, b) FO bölge sıcaklık değerleri, c) Sirkülasyon fanlarının hız set değeri	87
Şekil 5.16. Deneysel çalışma boyunca; a) Doğal gaz darbelerinin geniş zaman aralıklı genel görünüşü, b) Doğalgaz totalizerin geniş zaman aralıklı genel görünüşü	89
Şekil 5.17. Deneysel çalışma boyunca; a) Doğal gaz darbelerinin dar zaman aralıklı genel görünüşü, b) Doğalgaz totalizerin dar zaman aralıklı genel görünüşü .	90
Şekil 5.18. Deneysel çalışma boyunca; a) Doğalgaz hesaplama zaman periyodu (yeşil bar) ve NG_Hesaplama_Bitti (kırmızı) biti, b) EAA aktif olma süresi.....	92
Şekil 5.19. Deneysel çalışma boyunca; a) EAA durum sinyalleri, b) Sirkülasyon fanların hızı set değerleri, c) Sirkülasyon fanları anlık güç değerleri	94
Şekil 5.20. Deneysel çalışma boyunca; a) PO bölümü birinci ve ikinci bölgedeki solvent değerleri, b) PO bölümü birinci ve ikinci bölgedeki sıcaklık değerleri.....	97

Şekil	Sayfa
Şekil 5.21. Deneysel çalışma boyunca; a) FO bölümü birinci ve ikinci bölgedeki solvent değerleri, b) FO bölümü birinci ve ikinci bölgedeki sıcaklık değerler.....	98
Şekil Ek.1. Bu çalışmada kullanılan fırının enerji bakımından giriş ve çıkışları	114



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. MMK Metalurji'de boyama hattı kurutma fırınının gerçek görünümü.....	34
Resim 4.2. EK220 gaz debimetresinin gerçek görünümü.....	39



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABS	Air Braking System (Hava Fren Sistemi)
AHU	Air Handling Unit (Hava Kontrol Ünitesi)
CANON	Completely Autotrophic Nitrogen removal Over Nitrite
COP	Coefficient Of Performance (Performans Katsayısı)
DO	Dissolved Oxygen (Çözünmemiş Oksijen)
EA	Ekstremum Arama
EAA	Ekstremum Arama Algoritması
EAF	Electrical Arc Furnace (Elektrikli Ark Ocağı)
EEV	Electronic Expansion Valve (Elektronik Genleşme Valf)
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Egzos Gaz Sirkülasyonu)
ESC	Extremum Seeking Control (Ekstremum Arama Kontrolü)
HCS	Hill Climbing Search (Tepe Noktası Arama)
HPF	High Pass Filter (Yüksek Geçişli Filtre)
HVAC	Heating Ventilating Air Conditioning
IEA	International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
LPF	Low Pass filter (Düşük Geçişli Filtre)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Maksimum Güç Noktası Takibi)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Maksimum Güç Noktası Takibi)
NG	Natural Gas (Doğal Gaz)
P&O	Perturb and Observe (Boz ve Gözlemle)
PD	Proportional Derivative (Kazanç Türev)
PWM	Pulse Width Modulation, Darbe Genişlik Modülasyonu
SMESC	Sliding Mode Extremum Seeking Control

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ST	Spark Timing (Ateşleme Zamanı)
TC	Twisting Controller
TSC	Thin Slab Casting (İnce Levha Döküm)
VCS	Vapor Compression System (Gaz Sıkıştırma Sistemi)

Simgeler**Açıklamalar**

EJ	ExaJoule
GTEP	Giga Ton Eşdeğer Petrol
BTU	British Thermal Unit (İngiliz Isı Birimi)
dev/dk	Dakikadaki Devir Sayısı
mA	Mili Amper
kWh	KiloWattSaat

1. GİRİŞ

Dünya toplam enerji arzı yaklaşık 600 EJ (14,33 GTEP) civarındadır ve bu değerin 2020'den 2030'a kadar yılda %1,3 büyüyerek 670 EJ'ye ulaşması beklenmektedir [1]. Artan enerji talebinin nedenleri; nüfus artışı, insanların refah seviyesini artırmak ve bu seviyeyi sürdürmek için üretim kapasitelerinin artırılması ana faktörler olarak sıralanabilir. Bunlara ek olarak; ulaşım, iş geliştirme, altyapı iyileştirmeleri, daha fazla gelir ve nihayetinde daha iyi bir küresel ekonomi için geliştirilmiş farklı araç türleri olarak sıralanabilir [2,3].

Geçmiş dönemde olduğu gibi 21. yüzyılda da fosil yakıtlar, küresel enerji ihtiyacının en önemli kaynağı olmaya devam etmektedir. Fosil yakıtlar yenilenebilir enerji kaynağı olmadığından ve oluşumu milyonlarca yıl sürdüğünden sürekli azalan bir eğilim sergilemektedir. Günümüzde küresel birincil enerji talebinin %80'inden fazlasının fosil yakıtlar ile karşılanması, hükümetleri, endüstriyi ve toplumu tedirgin etmektedir. Bundan dolayı tüm yeni teknolojik gelişmeler ve izlenen politikalar, küresel enerji arzının daha sürdürülebilir olmasında önemli etkenlerdir [4].

Diğer taraftan fosil yakıt tüketimi, küresel ısınma ve hava kirliliği sorununu tetiklemektedir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) tarafından yapılan bir çalışmada, sanayileşme yolunda ilerleyen Avusturalya, Avusturya, Beyaz Rusya, Belçika, Bulgaristan ve Kanada ülkelerinin enerji tüketimi ile hava kalitesi göstergelerinin birbiri ile ilişkisi ve iklim değişimine olan etkisi 1990- 2012 verileri baz alınarak araştırılmıştır. İncelenen altı ülke verilerine göre enerji tüketimi ve hava kalitesi göstergeleri ciddi oranda sera gazı emisyonunu artırdığını göstermiştir. Bu çalışmadaki hesaplama yöntemine göre enerji tüketimi %1 artırıldığı zaman sera gazı emisyonunda yaklaşık %0,124 artış görülmüştür [5].

Isıtma sistemleri, endüstriyel üretim tesislerinde en çok enerji tüketen sistemler arasında yer almaktadır. Isıtma sistemleri seramik, kauçuk, gıda, cam, plastik ve demir - çelik ürünlerin imalatının önemli bir parçasıdır. Genel olarak ısıtma sistemleri, enerji kaynakları açısından yakıt bazlı, elektrik bazlı, buhar bazlı ve hibrit ısıtma sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Malzemeye ısı transferi açısından incelendiğinde radyasyon, taşınım, iletim ve bunların bir arada olduğu hibrit yöntemler aracılığıyla ısı transferi gerçekleştirilir [6,7]. Örneğin, çelik üretiminde kullanılan fırın sistemlerinde hem elektrik hem de doğal gaz (Natural Gas, NG) aynı anda tüketilmektedir.

Endüstriyel proseslerde en yaygın olan ısıtma sistemi fırınlardır. Fırınlarda ısıtma, tavlama, kurutma gibi değişik amaçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride, enerji tüketiminin büyük bir kısmı fırınlarda olmaktadır. Fırınlarda, yakıttan elde edilen enerjinin %20-40'ı yüke aktarılır [8]. Enerjinin geri kalanı atık enerjidir. Ayrıca sanayide fırınların enerji tüketim payı dikkate alındığında, küçük oranlı iyileştirmelerle küresel ölçekte önemli tasarrufların sağlanacağı ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, fırınlarda önemli bir enerji tasarrufu potansiyeli bulunmaktadır.

Endüstride, enerji tüketimi kadar tüketilen enerjinin toplam maliyeti de önemli derece ele alınan bir unsurdur. Bu bağlamda fırınlar incelendiğinde, farklı enerji kaynaklarını birlikte kullanan fırınların meydana getirdiği maliyeti etkileyen diğer bir unsur ise kullanılan enerji türlerinin birim fiyatlarıdır. Birim fiyatlardaki değişim, tüketimin yüksek olduğu fırın sistemlerinin toplam maliyetinde doğrudan rol oynar.

Teknolojinin ilerlemesi ve internet gibi etkenlerle teknolojiye ulaşımın kolaylaşması ile hem makina imalatçı sayıları artmış hem de makina imalat maliyetleri düşmüştür. Böylece, şirketlerin makineleri satın alım gücü artmıştır. Aynı üretimi yapan şirket sayısının artmasıyla pazarda rekabet edebilmek ve ayakta kalabilmek için ürün fiyatları düşürülmüştür. Bu da şirketlerde maliyet optimizasyonunun sürekli yapılması zorunluluğunu getirmiştir. Bu bağlamda, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi (EYS) Standardı, özellikle enerji tüketim maliyetinin toplam maliyetin içinde yarıdan fazla yer aldığı sanayi kuruluşlarında, israfa karşı tedbirlerin alınması ve enerjinin daha çevreci oranlarda tüketilerek kaynakların sürdürülebilirliğinin artırılması amacıyla 9 Haziran 2011'de yayınlanmıştır. Bu standardın önemli özellikleri, başta enerji tüketiminin yoğun olduğu ısıtma sistemlerinde olmak üzere üretimin her aşamasında enerji tüketimini azaltacak potansiyelin olduğu noktaların belirlenmesi, gerekli optimizasyon için tüm çevre koşullarının da dahil edildiği planlama yapılması ve gerçekleştirilmesi ile yapılan verimlilik artırıcı çalışmaların takip edilmesi olarak özetlenebilir.

Endüstride sistem optimizasyonu, çevrim içi (online) ya da çevrim dışı (offline) olarak gerçekleştirilir. Çevrim dışı optimizasyonda statik durumdayken sistemin çalışma parametreleri belirlenir. Belirlenen parametreler değişen koşullara göre güncellenmez. Bu parametrelerin her ne kadar doğruluk oranı yüksek olsa da yanılma payı her zaman vardır. Bunun nedeni, çalışma koşullarını etkileyen iç ve dış etmenlerdir. Dış etmenler olarak hava

koşulları, malzemenin sıcaklığı, proses ürününün kimyasal değerleri, ortam nem değerleri sayılabilir. Bunların yanında çalışma koşullarını etkileyen makinanın yaşlanma etkileri gibi iç etmenler de vardır. Dolayısıyla, her ne kadar tecrübeye ve çevrim dışı optimizasyonla belirlenen parametre ayarlarına dayalı parametre değerleri sistemi iyi bir noktada çalıştırsa da ideal koşullar için sistemi etkileyen tüm faktörler hesaba katılmamış olmaktadır. Bu da çevrim içi optimizasyon algoritmalarını veya üretim devam ederken sürekli kendini güncelleyen algoritmaların kullanılmasını daha cazip kılmaktadır. Çevrim içi optimizasyon, değişen iç ve dış etmenlere bağlı olan sistem parametrelerini daha ideal noktayı yakalamak için günceller. Endüstriyel sistemlerde çevrim içi optimizasyon birçok yönden önemli bir uygulamadır. Bunlar arasında en önemlileri maliyet optimizasyonu ve enerji optimizasyonudur. Maliyet optimizasyonu enerji optimizasyonunu beraberinde getirirse de asıl amaç üretim sırasında mevcut koşullar göz önünde bulundurularak en düşük maliyetle üretimi sürdürmektir. Bu nedenle maliyet optimizasyonu endüstride rekabet için çok önemlidir. Özellikle çelik endüstrisindeki üretim sürecinde enerji tüketimi yüksek olduğundan, özellikle enerji fiyatlarında değişimin olduğu zamanlarda, enerji tüketimindeki maliyet optimizasyonu bu sektörde birincil önem sırasına yükselmektedir.

Isıtma sistemlerinin enerji tüketimini kontrol etmek için iki tür yaklaşım vardır. Birinci yaklaşım model tabanlı yaklaşımdır. Matematiksel sistem modeli, fizik ve kimya yasalarına dayalı olarak çıktılar ve girdiler arasındaki ilişkiyi tanımlar. Farklı yük koşulları altında ısıtma sistemlerinin termodinamik karakteristiklerini tahmin etmek için kullanılırlar. Model tabanlı yöntemler, belirsizlikler ve bozucu etmenler dahil edilmeden geniş çapta çalışılmıştır. Modellenmemiş kayıplar ve yaşlanma etkileri göz önünde bulundurulmadığında farklı koşullarda doğru sonuçlar elde etmek zordur. Belirsizlikler ve bozulmalar hakkında varsayımlar yaparak yapılan sistem modelleri, sistemin gerçek davranışıyla birebir örtüşmeme ihtimali vardır. Bundan dolayı model tabanlı olmayan yaklaşımlar, çalışma anında optimum çalışma noktasını bulmak için daha sonuç verebilmektedir [9]. Endüstriyel ölçekte ısıtma sistemleri; egzoz gazı kaybı, duvar ısı enerjisi kaybı, işletme kaybı ve konveyör kaybı gibi kesin ölçülemeyen kayıplara sahiptir. Isıtma işlemi sırasında yükün istenen sıcaklık değeri veya mevcut sıcaklığı değişirse kayıp oranı da değişir. Yukarıda verilen durumlar göz önüne alındığında, endüstriyel ısıtma sistemleri için model tabanlı olmayan yöntemler daha uygun görünmektedir.

Ekstremum Arama Algoritması (EAA), bir sistem için belirlenen bir performans fonksiyonunun minimum veya maksimum noktasını (ekstrem nokta) arayan bir kontrol algoritmasıdır. Kontrol edilecek sistem doğrusal, doğrusal olmayan, zamana bağlı veya zamandan bağımsız olabilir. Hem sistemin matematiksel modeli hem de bu modele dayalı performans fonksiyonunun bilinmesine gerek yoktur. Performans fonksiyonu, sistemin giriş ve çıkışlarından alınan ölçümlerle oluşturulan bir değer olarak ortaya konur ve bunun en yüksek veya en düşük değeri hedef olarak belirlenerek algoritma da ona göre ekstrem değeri ayarlamaya çalışır. Bu nedenle “model tabanlı olmayan optimizasyon algoritması” olarak da sınıflandırılır. Performans fonksiyonunun ekstrem noktası, sistemin dinamikleri nedeniyle gerçek zamanlı olarak değişebilir. EAA çevrim içi bir optimizasyon algoritması olduğundan, kontrolcü ekstrem noktayı yakaladığında, sistem dinamiklerinden kaynaklı ekstrem nokta değişse dahi çıkışı gerçek zamanlı olarak ekstrem noktada tutmayı sürdürür [9–12]. Bundan dolayı, EAA optimum çalışma koşullarını elde etmek ve sürdürmek için gerçek zamanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu tez çalışmasında, öncelikle EAA tarihçesi ve yaygın tipleri hakkında genel bilgiler ve bu tipler üzerine yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Aynı zamanda EAA ile yapılan çalışmaların simülasyon veya deneysel çalışmalar olarak bir tabloda toplanmıştır.

Üçüncü ve dördüncü bölümlerde endüstriyel fırınlar hakkında genel bilgiler verildikten sonra demir çelik sektöründe çelik şerit üretim prosesi adımları hakkında bilgi verilmiştir. Burada şerit bobinin ilk üretim aşaması olan sıcak hadde kompleksi prosesi hakkında bilgiler verilmiştir. Sıcak hadde kompleksinden çıkan şeritin ikincil prosesi olan soğuk hadde kompleksi prosesi hakkında da genel bilgiler verilmiştir. Daha sonra çalışmanın yapıldığı boya kaplama prosesi ve boya kaplama hattındaki fırın sisteminin mevcut kontrol yapısı hakkında detaylı bilgiye yer verilmiştir. Üzerinde çalışma yapılan fırının yapısal kısıtlamalarından ve bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için üretilen çözümlerden bahsedilmiştir. Fırın sistemi için tasarlanan ekstremum arama algoritmasının adımlarından ve yapısından bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde, fırın için geliştirilen EAA algoritmasının PLC ortamında yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Burada yapılan simülasyonda ilk etapta tek ekstrem noktası olan bir parabolün ekstrem noktası aranmıştır. Hazırlanan yazılımla parabolün sağından ve solundan alınan herhangi iki değerde de sistemin ekstrem noktayı bulduğu görülmüştür. İkinci etapta ise birden fazla ekstrem noktası olan bir parabolde dört ayrı

noktadan alınan değerlerde herbirinde ayrı ayrı kendine en yakın ekstrem noktaya gittiği görölmüştür.

Altıncı bölümde ise geliştirilen algoritma MMK Metalurjide boya kaplama hattı fırınında, performans fonksiyonu olarak fırının doğalgaz tüketim maliyeti ile sirkülasyon fanlarının elektrik enerjisi tüketim maliyeti toplamı, kontrol sinyali olarak da sirkülasyon fanlarının hızı alınarak uygulanmıştır. Çalışma sonucu üretim parametreleri aynı kalmak koşuluyla fırının toplam enerji maliyetinde %3,44 oranında bir tasarruf sağlanmıştır. Değerlendirme kısmında ise enerji tasarruf miktarını artırmak için fırın sistemine yapılabilecek yatırım tavsiyeleri vurgulanmıştır.



2. EKSTREMUM ARAMA ALGORİTMASINA GENEL BAKIŞ

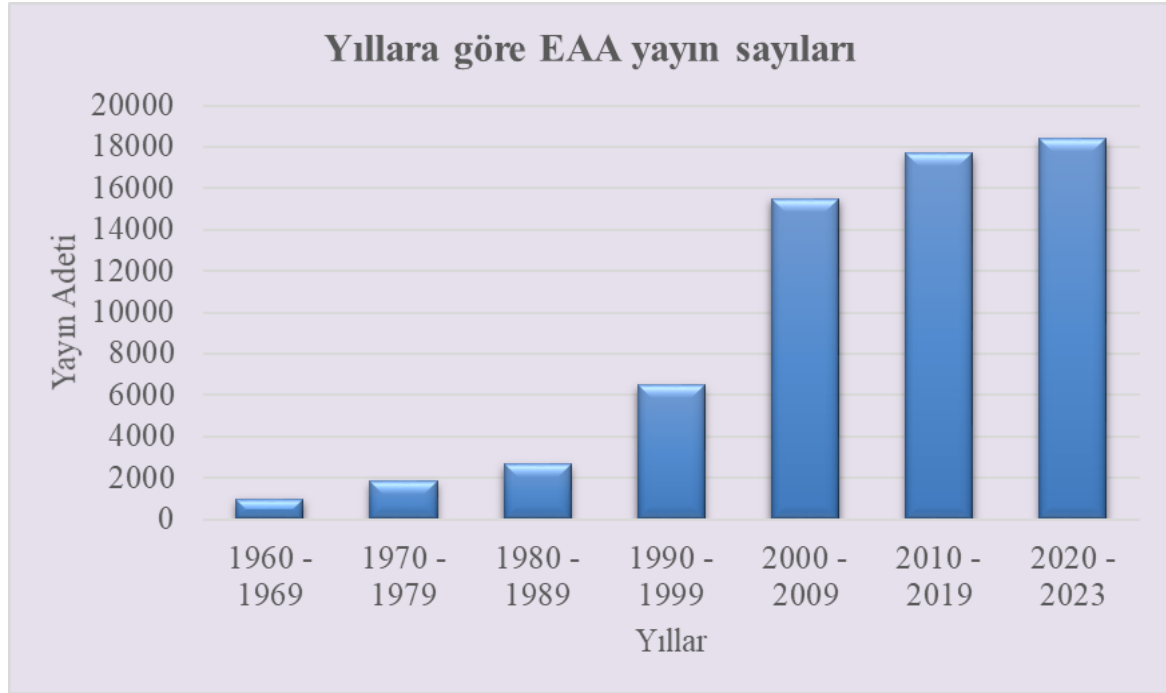
EAA, bir sistemin performans fonksiyonunun minimum veya maksimum noktasını arayan bir kontrol algoritmasıdır. Kontrol edilen sistem, doğrusal, doğrusal olmayan, zamana bağlı veya zamandan bağımsız olabilir. Burada sistemin referans noktası veya referans yörüngesi bilinmemesine rağmen algoritma kendini ekstrem noktaya taşır ve ekstrem noktada tutabilmektedir [9].

EAA'nın geçmişi 1922'lere kadar dayanmaktadır. İlk kez Leblanc 1922 tarihli yayınında havai hattaki elektriğin tramvaya aktarılması konulu makalesinde bahsetmektedir. İkinci Dünya Savaşı döneminde Rusya'da ekstremum arama üzerine ciddi araştırmalar yapılmıştır. Fakat Rusya'da yapılan bu çalışmalar farklı dillere çevrilmediğinden o dönemde uluslararası literatürde yayılmamıştır. EAA ile ilgili batıdaki ilk kayıtlı yayın 1951 yılında Draper ve Li tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışmalarında EAA'nın bozucu sinyal tabanlı metodunu uçakların yanma motorunda değişken koşullarda uçuş esnasında güç üretimini maksimuma çıkarması ve maksimumda tutması için uygulamışlardır. Bu yayın sonrasında, 1950'li 1960'lı yıllarında ekstremum arama metoduna önemli derecede ilgi artmıştır, EAA'nın yeni yöntemleri üzerine de çalışmalar yapılmıştır. EAA'nın ilk çıkışından itibaren makalelerde EAA, “*extremum seeking regulator*”, “*optimizing control system*” ve “*hill-climbing systems*”, “*extremum control*” veya “*self optimizing control*” gibi farklı isimlerle de anılmıştır [13,14].

1950-1960 yılları arasında EAA ile ilgili algoritma tanımlama, eldeki özel problem veya uygulamalar üzerine EAA'nın performansını araştırma üzerine yoğunlaşma olmuştur. Fakat EAA'nın net tanımlaması, analizi ve sistematik tasarım yönleri geçmiş dönemde sürekli eksik kalmıştır. EAA her ne kadar devam etse de sonraki yıllarda bir süre adaptif kontrolde farklı arayışlara yönelinmiş ve EAA bir dönem durağanlık yaşamıştır. 1990'a kadar EAA uygulamalarında genelde kararlı durum noktasını bulmak için periyodik uyarım algoritması kullanılmaktaydı. 1990'lı yıllarda deterministikten ziyade stokastik uyarım daha popüler olmaya başlayınca EAA'ya ilgi tekrar artmış ve EAA tekrar en önde gelen adaptif kontrol grubuna girmiştir [13,14].

Fakat EAA statik sistemlerin optimizasyonunda uygulanmaktaydı ve dinamik sistemlerde uygulama denenmemiştir. İlk kez Krstic ve Wang 2000'li yıllarda yaptıkları çalışmalarda

lineer olmayan dinamik sistemlere de uygulanabilirliğini ispatlamışlardır. Böylelikle EAA'nın çok geniş alanlara uygulanabilirliği görülmüştür. Dolayısıyla EAA'nın asıl yükselme dönemi Kristic ve Wang ile başlamıştır [13,14]. Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi EAA ile ilgili yayınlar 2000'den sonra hızlı bir şekilde artmıştır. Son üç yıldaki yayın sayısı bir önceki 10 yıldaki yayın sayısından fazla olması EAA'nın önemini göstermektedir. Şekil 2.1 verileri Google Scholar sitesinden 12.01.2023 tarihinde alınmıştır.

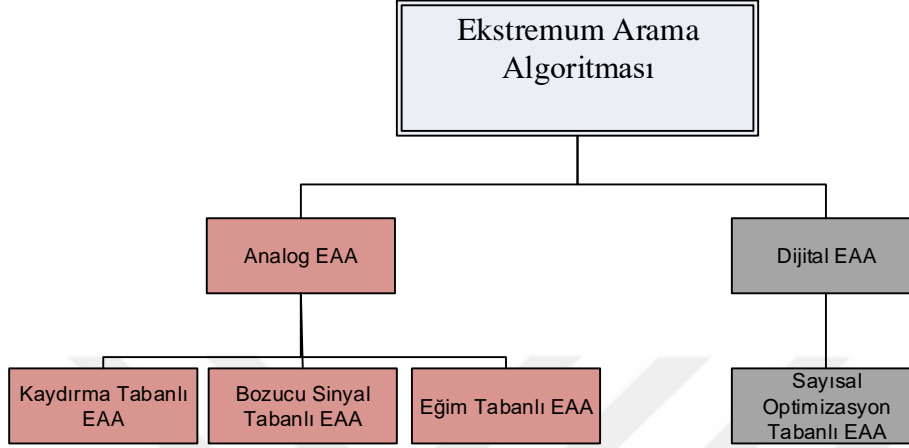


Şekil 2.1. EAA üzerine yayınların yıllara göre dağılımı

EAA'nın günümüze kadar çok farklı alanlarda uygulamaları olmuştur. Bunlar fren sistemi kontrolü, otomatik araçlar, verim optimizasyonu, mobil robot uygulamaları, biyoproseste verim optimizasyonu, elektromekanik vana kontrolleri, içten yanmalı motorlar, akış kontrolü problemleri, plazma kontrolü, fotovoltaik sistemlerin maksimum güç takipleri, rüzgâr türbinleri, aydınlatma sistemleri, proses kontrolü gibi çok farklı alanlarda EAA uygulanmıştır [15–33].

EAA'nın literatürde çok farklı tipleri vardır. Fakat genel olarak gruplandırmak gerekirse ilk önce analog/sürekli ve dijital/kesikli diye ikiye ayrılabilir. Analog EAA ise kendi içinde kayma tabanlı (sliding based), bozucu tabanlı (perturbation-based), eğim tabanlı (gradient-based) olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Dijital tabanlı EAA ise son bölümde

sayısal tip optimizasyon olarak anlatılmıştır. Literatürdeki farklı isimdeki EAA bu ana gruplardan türemiştir. Şekil 2.2’de ekstremum arama kontrolün sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.2. Ekstremum arama kontrolü sınıflandırılması

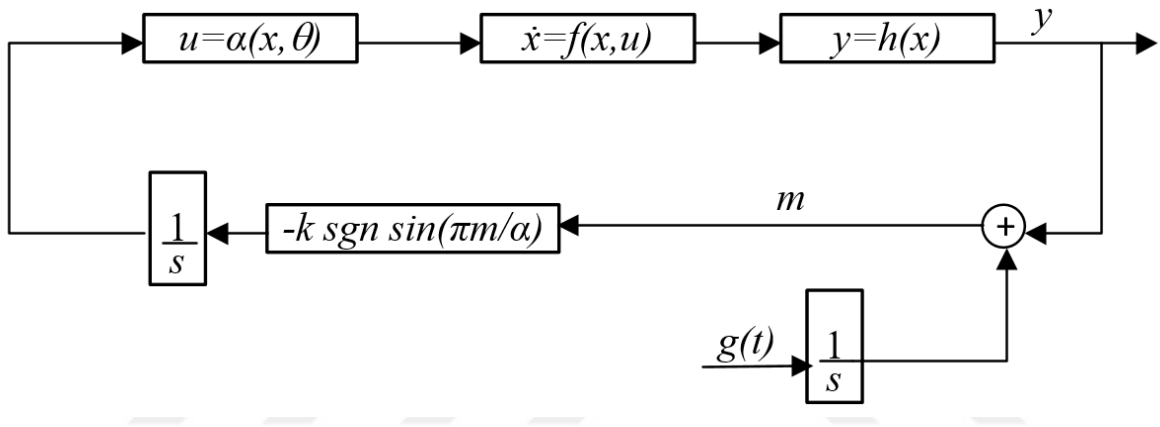
2.1. Kayma Tabanlı EAA

Geleneksel kontrol problemlerinde sistemin takip edeceği referans değeri bilinmektedir. Fakat bazı durumlarda sistemin takip edeceği referans değeri veya yörüngesi bilinmeyebilmektedir. Bu tür durumlarda ekstremum arama algoritması kullanılabilir. EAA uygulamasında performans fonksiyonunun (cost function) optimum değeri bilinmediğinden referans değer de bilinmemektedir. Kayma Tabanlı Ekstremum Arama Algoritmasında, performans fonksiyonunun bilinmediği ancak performans fonksiyonunun çıkışının ölçülebildiği kabul edilmektedir. Bu yöntem 1970’li yıllarda ilk kez Korovin ve Utkin tarafından tasarlanmıştır. Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran özellik, sisteme sürücü bir sinyal gönderilmesidir. Kayma tabanlı EAA fonksiyonundaki sürücü sinyali sistem için referans üretici olarak görev yapar. Sistemin yerel minimum noktası aranıyorsa sürücü sinyali zamanla azalan bir fonksiyon olarak belirlenir. Çoğu kayma tabanlı kontrolcülerde olduğu gibi sinyal takibi sinyal çevresinde yüksek frekansta çatırdama (chattering) oluşturur. Uygulama olarak yakın tarihte en çok araçlardaki havalı fren sisteminde (Air Braking System, ABS) fren kontrol gelişiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu konuda özellikle Yu ve Özgüner’in çalışmaları mevcuttur [34–37].

Şekil 2.3'e göre $\dot{x} = f(x, u)$ lineer olmayan sistemi göstermektedir.

$y = h(x)$ performans fonksiyonu, y ise sistem performans değişkenidir. Uygulamadaki hedef, y değerinin ekstrem noktasını bulmaktır.

$g(t)$ sürücü sinyalidir. $g(t)$ 'nin seçiminde dikkat edilecek en önemli unsurlardan bir tanesi $g(t)$ 'nin değeridir. Bu sinyal, $y(t)$ 'nin değişim oranının mutlak değeri $g(t)$ 'den küçük olmalıdır. $g(t)$ değeri her sistem için ayrı bir değer alır [36].



Şekil 2.3. Kayma tabanlı EAA diyagramı

Karmaşık sistemlerin optimizasyonunda optimum değeri bulmak için oluşturulan performans fonksiyonu sistemin farklı çıkışlarının en iyi olmasının sonucun verecek ölçümlerin kombinasyonundan oluşturulur. Sinüs fonksiyonu ile EAA algoritması rast gele bir yöne doğru sistem parametrelerini değiştirir. Eğer bu yönde yapılan değişiklik performansı düşüren bir sonuç verirse hata değeri (m) artacaktır. Bu artış, sinüs fonksiyonu işaret değiştirene kadar devam edecektir. Sinüs fonksiyonu işaret değiştirdikten sonra referans değeri de yön değiştirecektir. Böylelikle sistem doğru yöne doğru sürülmüş olacaktır [34].

α , sistem tarafından müsaade edilen hata salınım aralığını ayarlamak için kullanılır. Sistem, sürücü sinyalden hızlı veya yavaş ise bu durumda çatırdama oluşur. Çatırdamanın frekansı α 'yı artırarak azaltılır. k değeri, yaklaşım adımını belirlemede önemlidir. u sistem giriş sinyalidir. Değerini değiştirdiğimiz sistem değişkenidir. Bu yöntem genelde tek giriş tek çıkış sistemler için uygundur. Çoklu girişli sistemler için uygun değildir [34].

[38] nolu çalışmada, kayma tabanlı EAA, araçlarda ABS uygulamasında simülasyon olarak test edilmiştir. Burada teker kuvveti - kayma oranı eğrisinin tepe noktasını EAA ile arama sağlanmıştır. Yenilik olarak, tasarlanan algoritmaya teker kuvveti – kayma oranı karakteristik eğrisinde tekerin çalışma alanına eklenti olarak algoritma, araç yanal eksene hareket etmesi durumu da eklenmiştir. Sürücü yanal eksene hareket vereceği zaman (manevra) frene ek olarak, tekerin yanal kuvvetini artırarak tekerin çalışma bölgesi otomatik değişimi sağlanmıştır. Böylelikle aracın yanal hareketteki kararlılığı da artırılmıştır.

[36] nolu çalışmada, bozucu sinyal EAA ile kayma tabanlı EAA'nın simülasyonda değerleri alınıp karşılaştırılması yapılmış ve kayma tabanlı EAA'nın simülasyon sonuçlarına göre avantajları vurgulanmıştır. Bozucu sinyal EAA'nın parametrelere karşı çok hassas olduğu belirtilmiş, kayma tabanlı EAA'da ise parametreleri seçerken dikkat edilmesi gereken hususlara yer verilmiştir.

[34] nolu çalışmada, EAA'nın 5 tipinin robot uygulamalarındaki karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma yapılan EAA tipleri; kayma tabanlı, bozucu sinyal tabanlı, nörol ağ tabanlı, yaklaşım tabanlı (approximation type) ve adaptif tip EAA'dır. Bunların her birinin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Simülasyonda her biri tek girişli ve çok girişli uygulamaları; sistemde gürültü olup olmasına ve sistemin dinamik olup olmamasına göre tepkileri karşılaştırılmıştır. Burada kayma tipli EAA dahil olmak üzere tüm EAA tiplerinin parametre ayarlamaları verilmiş ve kayma tipli EAA'nın çoklu girişli uygulamalar için pek uygun olmadığı belirtilmiştir.

[35] nolu çalışmada, röle tabanlı EAA ile kayma tabanlı EAA simülasyon ortamında karşılaştırılmıştır. Röle tabanlı EAA eğim hesaplama sensörüne ihtiyaç duyarken kayma tabanlı EAA ihtiyaç duymadığı belirtilmiştir.

[37] nolu çalışmada fotovoltaj sistemlerde maksimum güç takibi kontrolünde Boz ve Gözlemle (Perturb and Observe, P&O) ile kayma tabanlı EAA'nın karşılaştırılması simülasyon ortamında yapılmış ve kayma tabanlı EAA'nın maksimum noktayı daha iyi takip ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca EAA'nın parametrelerinin nasıl ayarlanacağı konusunda detaylara yer verilmiştir.

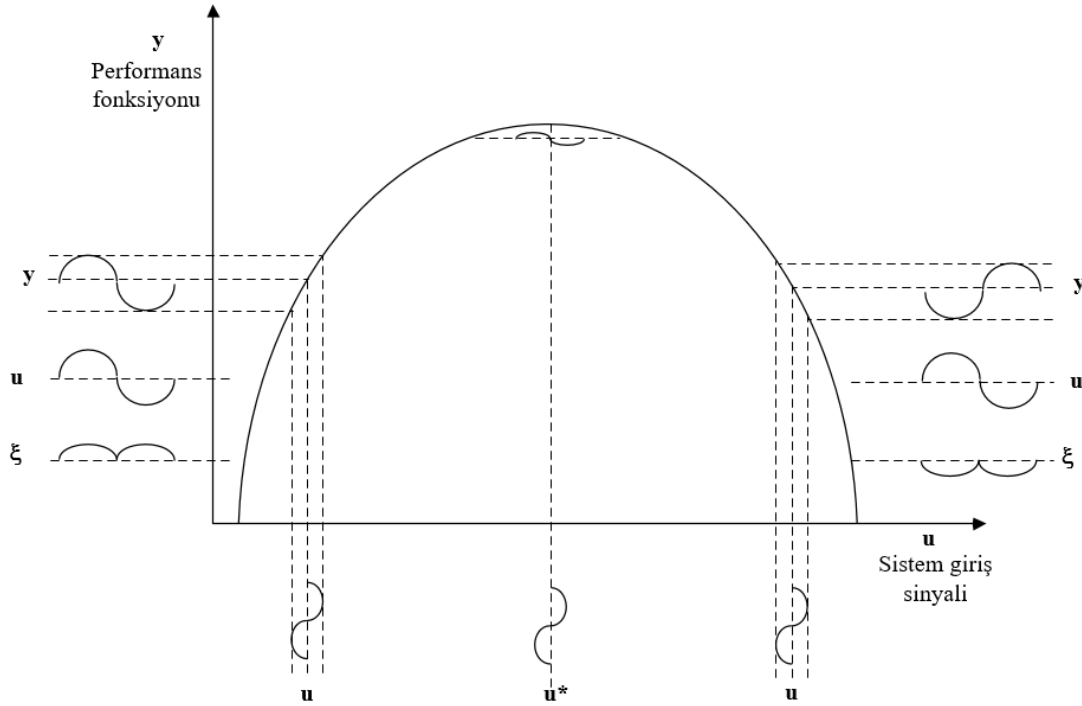
[39] nolu çalışmada rüzgar türbinlerinde Maksimum Güç Noktası Takip (Maximum Power Point Tracking, MPPT) sisteminde hem yüksek verim hem de basit kontrol olduğundan kayma tabanlı EAA (Sliding Mode Extremum Seeking Control, SMESC) uygulanmıştır. Bu çalışmada kararlı haldeki salınımın önüne geçilmiştir. Aynı zamanda çalışmada, geleneksel SMESC'ye binary signum fonksiyonu yerine sürekli sigmoid fonksiyonu eklenerek kararlı durumdaki salınım geleneksel SMESC'ye göre %50 oranında önlenmiştir.

[40] nolu çalışmada, otonom sualtı araçlarda referans yörüngesini daha iyi takip edebilmesi için çalışmada Oransal Türev (Proportional Derivative, PD) ve Bükümlü Kontrol (Twisting Controller, TC) ile genişletilmiş integralli kayma tabanlı EAA karşılaştırılmış ve genişletilmiş integralli kayma tabanlı EAA daha kararlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

[41] nolu çalışmada, kayma tabanlı EAA, rüzgâr güllerinde rüzgar hızı ve türbin parametreleri bilinmese dahi rüzgar gülünün ürettiği enerjinin maksimum noktasını yakalayıp sonra da maksimum güç noktasını takip edebildiği gösterilmiştir. Parametreleri tam ayarlanamamış SMESC kararlı durum salınımına neden olabilmekte ve aynı zamanda maksimum noktaya ulaşma süresi uzun sürmektedir. Bu çalışmada SMESC parametrelerini optimize etmek için bir algoritma tasarlanmıştır. Bu yöntem standart SMESC ile Tepe Noktası Arama (Hill Climbing Search, HCS) algoritmasına göre daha güvenilir çalıştığı görülmüş ve geçişlerde kararlı durumlara daha hızlı cevap verdiği izlenmiştir.

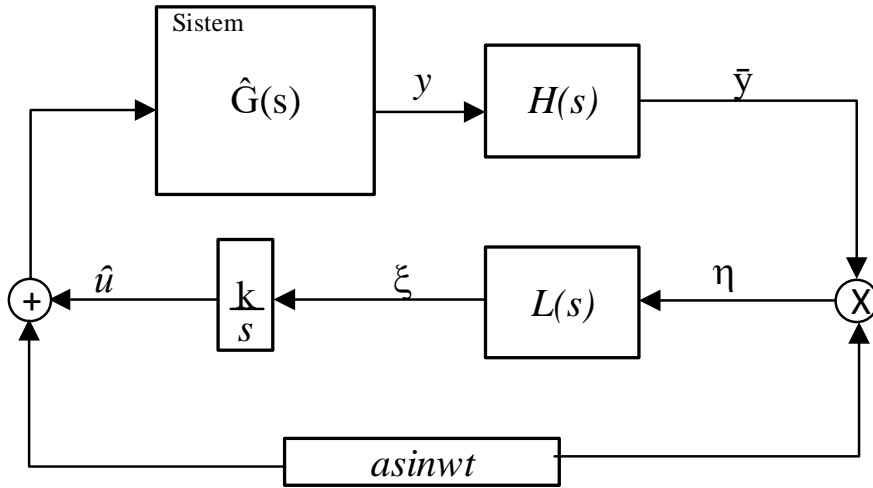
2.2. Bozucu Sinyal Tabanlı EAA

Bu yöntem en yaygın yöntemdir. Aynı zamanda EAA'nın ilk çıkış kurgusu da buna dayandığından tarihi 1922'lere kadar gitmektedir. Bu tip arama yönteminde, arama sinyaline bir bozucu sinyal eklenir. Bu eklenti sonrası sistemin performans fonksiyonunun çıkışı gözlemlenir. Performans fonksiyonunun çıkışı istenen yönde (azalan veya artan) gidiyorsa arama sinyali artırılmaya ekstrem nokta bulunana kadar devam edilir. Ekstrem noktanın eğimi sıfır olduğundan, eğimin sıfır olduğu noktaya ulaşıncaya sistem belirli bir dalga aralığında ekstrem nokta çevresinde salınımına devam eder [11]. Şekil 2.4'te performans fonksiyonu ve arama sinyalinin tepki grafiği verilmiştir. Bu yöntemde hem sistem fonksiyonunun hem de performans fonksiyonunun modelleri bilinmemektedir. Sadece performans fonksiyonunun çıkışı ölçülebilmektedir.



Şekil 2.4. Bozucu sinyal tip EA uygulamasında performans ve arama sinyali grafiği

Burada asıl hedef sistemin giriş sinyallerinden birini (single input) veya birden fazla sinyali (multi input) bozarak performans fonksiyonunun kararlı durumda yerel eğimini sıfır yapmaya çalışılmasıdır. Algoritmanın daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 2.5'teki döngü integral kısmından (\hat{u}) açılır. Eğim hesaplamak için sistemin giriş sinyaline (u) sinüzoidal bozucu sinyal eklenir. Bu değişiklik, sistemin performans fonksiyonunu hem DC (Direct Current) bileşen, mevcut çalışma karakteristiği gereği, hem de sinüzoidal bileşen (bozucu sinyalden kaynaklı) olan yeni bir performans değerine taşır. Performans fonksiyonunun çıkışından eğimi hesap edebilmek için sinyal yüksek geçiren filtreden (High Pass Filter, HPF) geçirilerek DC kısmı atılır. HPF'den geçirilmiş sinyal tekrar demodülasyon için bir sinüs sinyali ile çarpılır. Her iki sinüs sinyalinin çarpımında yine DC kısımlar ve yüksek dereceli harmonikler oluşur. Harmonikler düşük geçiren filtreden (Low Pass Filter, LPF) geçirilerek sönmüldürülür. Kalan kısım ξ yerel eğimle orantılıdır ve bu değer yerel eğimin yaklaşık hesap edilen değeridir. Elde edilen bu değer integral alınır ve bir kazanç ile çarpılarak \hat{u} elde edilir. Bu değere tekrar sinüs sinyali eklenerek sistemin u giriş değerine eklenir. Bu döngü \hat{u} 'nun değeri sıfır olana kadar (yerel eğim sıfır olana kadar) devam eder. \hat{u} değeri sıfır olduktan sonra ki bu nokta ekstrem noktadır, u^* olarak gösterilir. Daha sonra sistem bozucu sinüs dalga boyu kadar salınım yaparak çalışmaya devam eder [42].



Şekil 2.5. Genel tek giriş tek çıkış bozucu sinyal tabanlı EAA modeli

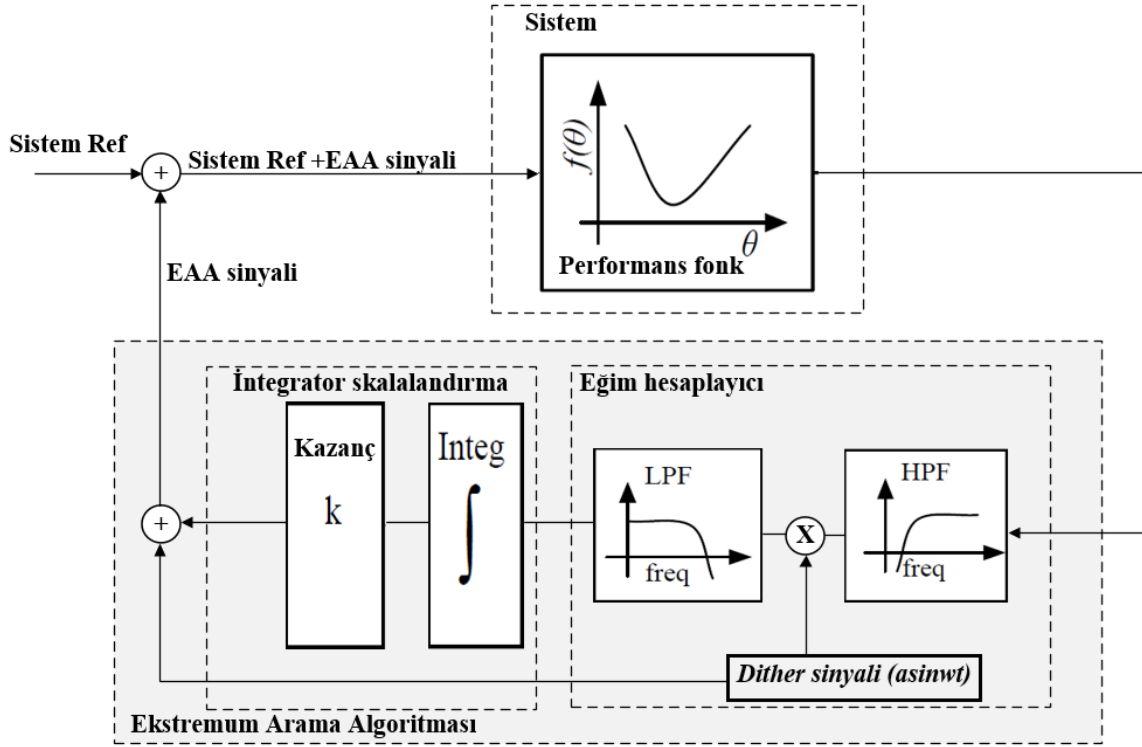
Bu uygulamada bozucu tip EAA Şekil 2.6'da gösterildiği gibi iki kısma ayrılabilir.

1. Eğim hesaplanan bölge
2. İntegrator skalalandırma bölgesi.

Birinci kısım, eğim hesaplamada kullanılır. İkinci kısım ise sistem girişini eğim yönünde sürmek için kullanılır. Sistemin minimum noktasını bulmak için k kazanç parametresi negatif seçilir, maksimum noktayı bulmak için ise pozitif seçilir [9].

Burada ayarlanması gereken sinyaller ve tepkileri aşağıda belirtilmiştir.

- HPF: HPF'nin asıl görevi performans sinyalinin DC kısmını silmektir. ($\omega_{hp} > \omega$) olarak seçilmeli fakat tam ayarlaması da her sistem için ayrı olduğundan zordur.
- LPF: Sistemdeki gürültü ve harmonikleri silmek için kullanılır.
- ω bozucu sinyal frekansı: Bozucu sinyal frekansı ω bilinmeyen sistem dinamiğinden yavaş seçilmelidir. Aksi takdirde sistem kararlılığa geçmeden sürekli artan bir sinyal sistem girişine eklenerek giriş sinyali maksimum değere götürür.
- Dither sinyali genliği: Bu değer, sistemin değerini görünür derecede değiştirecek kadar büyük seçilmeli. Fakat çok da büyük seçilmemelidir. Bu durumda çıkışta büyük salınım olur. Dolayısıyla optimum bir değer sağlanmalıdır.



Şekil 2.6. Bozucu sinyal tabanlı EAA

[10] nolu çalışmada, amonyumca zengin olan atık sudan amonyumu uzaklaştırma prosesi olan CANON prosesinde bozucu sinyal tabanlı EAA uygulanmış, Amonyum gidermede kullanılan klasik yöntemlerle sonuçları karşılaştırılmıştır. Bakteriyel bozulmalar ve diğer çevre etkenlerden dolayı proses süresi iki ile otuz gün arası süren bu proseste EAA'nın daha az maliyetle prosesi tamamladığı görülmüştür.

[43] nolu çalışmada, EAA'da kullanılan bozucu sinyal tiplerinden sinüs dalga, kare dalga ve üçgen dalganın tepkileri karşılaştırılmış ve şartlara göre birbirlerine göre avantajları belirtilmiştir. Özellikle performans fonksiyonu bilindiği takdirde hangi bozucu sinyal tipi (üçgen, kare, sinüs dalga) daha iyi sonuç vereceği ortaya konmuştur.

[44] nolu çalışmada, rüzgar güllerinde maksimum güç noktasını takip etmek için P&O yöntemi ile EAA'nın sonuçları karşılaştırılmış. P&O'nun çalışma kurgusunda kontrol giriş sinyalini bozup sonucu değerlendirdiği, yöntem olarak ayrık zaman yöntemi kullanıldığı ve bu uygulamada adım miktarını ve adım sıklığını iyi belirlemek gerektiği belirtilmiştir. Bununla birlikte çevre şartları hızlı değişiyorsa P&O'nun düzenli çalışması zor olduğu vurgulanmıştır. EAA yöntemi ise ayrık zamanlı kontrolden ziyade sürekli zamanlı kontrol

uygulandığı belirtilmiştir. P&O uygulamasında sabit adım var iken EAA uygulamasında eğim ve integral hesaplamasıyla değişken adımlar olduğundan ekstremum noktaya hem daha hızlı ulaştığı hem de daha kararlı kaldığı belirtilmiş. Bu uygulamada EAA algoritmasının daha hızlı tepki vermesi için iç bir kontrol döngüsü eklenmiştir. İkinci kısımda EAA'nın solar uygulamasına yer verilmiş ve prototip uygulama yapılmıştır.

[45] nolu çalışmada, PID kontrolcülerini endüstride yoğun bir şekilde kullanılmasına rağmen hassas ayarı iyi yapılamaması sonucu etkililiği kısıtlı kalmaktadır. PID parametrelerinin ayarlanması da zaman alıcı bir işler. Bu sıkıntıyı aşmak için pek çok yöntem denenmiştir. Bu çalışmada PID parametrelerini EAA yöntemi ile ayarlama ile klasik PID parametrelerini ayarlama olan Ziegler-Nichols (ZN) ve Internal Model Control (IMC) yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılmış ve EAA, özellikle son 2 yöntemine göre daha başarılı sonuç verdiği gösterilmiştir.

[42] nolu çalışmada, dört kontrol parametresi bulunan bir buhar kompresör sistemi (Vapor Compression System, VCS) üzerinde EAA uygulaması yapılmıştır. Bunlar kondenser, evaporatör, kompresör ve elektronik genişleme valfidir (Electronic Expansion Valve, EEV). Bunların yanında, elektronik genişleme valfi (Additional Electronic Expansion Valve, AEEV) eklenmiştir. AEEV'nin amacı kondenser ile reciever arasında basınç düşümünü artırarak kondenserin alt soğuma alanını artırmaktır. Bunun artması da sistemin aktif yükünü artırdığından dolayı performans katsayısı (Coefficient of Performance, COP) değerini artırır. Uygulamada kondenser, alt soğutma kontrol değişkeni olarak kullanılmıştır. Alt soğutma sıcaklığının optimum noktası, soğutucu tipi, soğutma kapasitesi, ortam sıcaklığı, evaporatör havası giriş sıcaklığı gibi parametrelere göre değişmektedir. Burada AEEV'nin alt soğutma sıcaklığını kontrol sinyali olarak alıp, COP'nin en iyi noktasının bulunması EAA ile yapılmıştır. Sonuç, konvensiyonel yöntemlerle EAA karşılaştırılmış. EAA, optimum teorik değere yakın bir sonuç verdiği görülmüştür ve EAA kontrolü ile %9 verim artışı sağlandığı bildirilmiştir.

[46] nolu çalışmada, P&O ile EAA'nın solar sistemlerdeki MPPT karşılaştırması simülasyon olarak yapılmıştır. Solar panellerde üretilen gücü etkileyen dış etken olarak iki parametre vardır. Bunlar sıcaklık ve aydınlık şiddetidir. Bu uygulamada sıcaklık sabit alınmıştır. Princeton Üniversitesi'ndeki mühendislik binasının çatısına yerleştirilen aydınlık veri kayıt cihazının 20 Haziran 2007'deki iki günlük verileri baz alınmıştır.

Maksimum güç kontrolünde, kontrol uygulaması olarak voltaj kontrolü veya akım kontrolü uygulanmaktadır. Karşılaştırmada aydınlık değişimlerinde P&O ve EAA'nın; voltaj kontrolüne göre değişimi ve tepki süresi, akım kontrolüne göre değişimi ve tepki süresi ve kapasitör büyüklüğüne göre performans karşılaştırması yapılmıştır. Sonuç olarak P&O, uygulamada hem hızda yavaş kaldığı, hem de aydınlığın değişiminde adaptasyonda geç kaldığı görülmüştür. EAA'da ise aynı zamanda integrator olduğundan maksimum güç noktasına daha hızlı yaklaştığı görülmüştür.

[47] nolu çalışmada, Isıtma, Soğutma, İklimlendirme Sistemlerinde (Heating Ventilating Air Conditioning, HVAC) sistemlerde yük ve ortam kararlı olmadığından, sistem dinamikleri çok değişkenlik arz ettiğinden iyi bir modelleme olamadığı, bundan dolayı EAA'ya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmış ve Modelica tabanlı simülasyon programında çok değişkenli EAA uygulamasında evaporatör fan hızı, kondenser fan hızı ve evaporatör superheat set değeri kontrol edilerek toplam tüketilen gücün düşürülmesi hedeflenmiştir. Simülasyon 3 koşul için denenmiştir. Önce sabit yüklü bir simülasyonda, sonra dış ortam sıcaklığı kademeli değişen simülasyonda, son olarak da dinamik bir yük ve Chicago'daki bir günün sıcaklık değişimi sisteme girilerek denenmiştir. Set değerini yakalarken enerji tüketiminde de yaklaşık %7,6 tasarruf sağlandığı kaydedilmiştir.

[48] nolu çalışmada; enerji tasarrufu için kullanılan hava soğutmalı ekonomizerin damperleri bozucu sinyal tabanlı EAA yöntemiyle kontrol edilerek soğutma için kullanılan suyun akış oranı düşürülmüştür. Bu çalışma Modelica tabanlı Dymola simülasyon programında yapılmıştır. EAA'nın avantajları vurgulanırken bir kısım nem, sıcaklık sensörleri gibi saha ölçüm ekipmanlarına gerek kalmadan sistemin kontrol edilebildiği vurgulanmıştır. Sahadaki sensörlerin kalibrasyonlarının yapımı hem maliyetli hem zaman alıcı olduğu, arızalanması durumunda verimsiz çalışmadan dolayı enerji kaybının olduğu, EAA kontrolünde bu tip sensörlerin sayısı az olduğundan bakım maliyeti, daha az maliyetli ekipman ve enerji tasarrufu gibi toplam giderlerin de düşeceği vurgulanmıştır.

[49] nolu çalışmada, soğuk iklimlerde daha verimli olan buhar enjekteli kompresörlü ısıtma sisteminin ara basıncı optimize edilerek, performans fonksiyonunun geri bildirimi olarak da toplam elektrik tüketimini baz alarak bozucu tip EAA uygulanmıştır. Uygulama Modelica tabanlı programda simüle edilmiştir.

[50] nolu çalışmada, hem hava kontrol ünitesi (Air Handling Unit, AHU), hem soğutma kulesi hem de su soğutmalı chiller olan bir soğutma sisteminde kule fanına EAA uygulanmıştır. Performans fonksiyonu geri beslemesi olarak kule fanı ve kompresörün toplam enerji tüketimi alınmıştır. Uygulama simülasyon olup sabit koşullarda, evaporator su giriş sıcaklığı değişken ve dış ortam sıcaklığı değişken olan üç farklı koşula göre sistemin tepkisi ölçülmüştür.

2.3. Eğim Tabanlı EAA

Bu yöntem performans fonksiyonunun eğim hesabı kurgusuna göre çalışır.

$y = J(\theta)$ ekstrem noktası aranan performans fonksiyonu olsun. Burada $\theta \in R$ 'dir.

Eğer $dJ/d\theta$ biliniyorsa θ için optimizasyon kanunu aşağıdaki şekilde seçilebilir.

$$\dot{\theta} = M \frac{dJ}{d\theta}, M > 0 \quad (2.1)$$

θ^* , $J(\theta)$ 'nin yerel ekstrem noktası olarak kabul edilirse, Lyapunov kuralı gereğince

$V = J(\theta^*) - J(\theta)$ seçilir. Bu durumda;

$$\dot{V} = -\frac{dJ}{d\theta} \dot{\theta} = M \left(\frac{dJ}{d\theta}\right)^2 \leq 0 \quad (2.2)$$

Burada θ , \dot{V} nin 0 olduğu değişmeyen değere yaklaşır. $\frac{dJ}{d\theta} = 0$ olduğu kısım sadece

$\theta = \theta^*$ olduğu yerel bölgede gerçekleşir. Böylelikle $J(\theta)$ 'nin ekstrem noktası başarılı bir şekilde elde edilmiş olur. Maksimum ve minimum nokta V veya k'nın işaretini değiştirerek elde edilebilir.

Bir boyutlu durumlarda türevi tahmin etmek zor değildir.

$\theta = k \operatorname{sgn}\left(\frac{dJ}{d\theta}\right)$, $k > 0$ ve signum fonksiyonu:

$$\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Lyapunov kuralı uygulandığında $V = J(\theta^*) - J(\theta)$

$$\dot{V} = -k \frac{dJ}{d\theta} \text{sgn}\left(\frac{dJ}{d\theta}\right) = k \left| \frac{dJ}{d\theta} \right| \leq 0 \quad (2.4)$$

[51] nolu çalışmada, hibrit aydınlatmanın da içinde olduğu kartondan yapılmış ($20 \times 30 \times 20$ cm) ebatındaki bir odanın minimum enerji tüketerek aydınlatmasını sağlamak için modifiye edilmiş EAA tasarlanmıştır. Karton oda içine ışık şiddeti ayarlanabilen 9 adet LED takılmış olup bu LED'ler iki grup olarak çalıştırılmıştır. Odanın aydınlık şiddetini ölçmek için odanın orta noktasına bir ışık sensörü yerleştirilmiş ve ışık şiddeti 100 lüks olarak ayarlanmıştır. Arduino tabanlı kontrolcü ile LED'lerin ışık şiddeti ayarlanarak 100 lükte minimum enerji tüketimini sağlamak için eğim tabanlı EAA ile modifiye edilmiş EAA sonuçları karşılaştırılmış. Kararlılıkta, set edilen değeri yakalama hızında ve minimum enerji tüketiminde modifiye edilmiş EAA daha iyi sonuç vermiştir.

[52] nolu çalışmada, deneme üç katlı kartondan yapılmış bir katının ölçüleri $30 \times 60 \times 40$ cm olan içeriye ışık şiddeti Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation, PWM) ile artırılabilen 11 tane LED konmuştur. Karton yapıda aynı zamanda hibrit aydınlatma olarak da adlandırılan doğal aydınlatma sistemi de vardır. Dış ortam aydınlığı değişkenlik gösterdiğinden içerinin aydınlık şiddetinin de sürekli ayarlanması gerekmektedir. LED'ler üç gruba ayrılıp, içeriye bir tane ışık şiddetini ölçen sensör konmuş, Arduino 2560 test platform ile Simulink üzerinden kontrol edilen bir ortam hazırlanmıştır. Aydınlık şiddetini ayarlamak için ayrı bir PID kontrolü vardır. PWM ile grupların ışık şiddetlerini ayarlayarak enerji tüketiminin minimum noktası dört farklı duruma göre aranmıştır. Bunlardan ilk durumda; lambalar üç grup yapılmış, ışık şiddeti ise sabit 60 lüks ayarlanarak simüle edilmiştir. İkinci durumda lambalar üç grup yapılmış, ışık şiddeti ise sabit 70 lüks ayarlanarak simüle edilmiştir. Üçüncü durumda lambalar iki grup yapılmış, ışık şiddeti sabit 40 lüks olarak simüle edilmiştir. Son durumda ise lambalar üç farklı grup yapılmış, ışık şiddeti önce 70, sonra 60, sonra 80 lüks olarak simüle edilmiştir. Çok giriş tek çıkışlı (multi input single output) yeni dizayn edilen EAA, eğim tabanlı EAA ve Newton tabanlı EAA karşılaştırılmıştır. Çalışmada eğim tabanlı EAA ile Newton tabanlı

EAA'nın enerji tüketim değerleri, set değerini yakalama süreleri ve kararlılıkları karşılaştırılmıştır.

[53] nolu çalışmada, çok değişkenli Newton tabanlı EAA güneş panellerinde uygulanmıştır. Burada Newton tabanlı EAA, tüm sistemin çıkışına bir tane değil, her bir dönüştürücüye ayrı ayrı uygulanmıştır. Dolayısıyla tek bir model güç karakteristiği yoktur. Bunun avantajı da kısmi gölgelenme olduğunda bu uygulamanın verimi daha yüksek olacaktır. Aynı zamanda çalışma şartları ve sistem göz önünde bulundurulduğunda, tüm sisteme göre parametre ayarlaması daha kolay olacaktır ve geçiş noktalarında sistem tek bir parça gibi düşünülmediğinden her modül münferit alındığından daha tutarlı bir geçiş sergileyeceğidir. Makalede eğim tabanlı EAA ile Newton tabanlı EAA'nın karşılaştırılması yapılmış. Özellikle kısmi gölgelenme gibi durumlarda Newton tabanlı EAA daha verimli çıkmıştır.

[54] nolu makalede, değişken süreli uzun giriş-çıkış gecikmelerine maruz kalan skaler eğim tabanlı EAA için Hessian'ın bozucu tabanlı tahminiyle bir tahmin edici kullanılarak yeni bir tasarım yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre aktüatör ve sensör gecikmelerine rağmen çıkış sinyalinin yaklaşımı, sistem çıkışının yakın değerlerine ulaştığı ve bu yakın bölgede kalmayı başardığı görülmüştür.

[55] nolu makalede, sistem çıkışında uzun gecikmeleri olan ve performans fonksiyonu statik ve parabolik olan bir sisteme eğim tabanlı EAA uygulamak için yeni bir geri bildirim tahmin edici dizayn edilmiştir. Makalede önceki teorik ispatlar yapılmış daha sonra da sayısal sonuçlarla teorik ispatlar desteklenmiştir. Tasarlanan algoritmanın Newton versiyonu için de bir hazırlık yapılmış olup geliştirileceği belirtilmiştir.

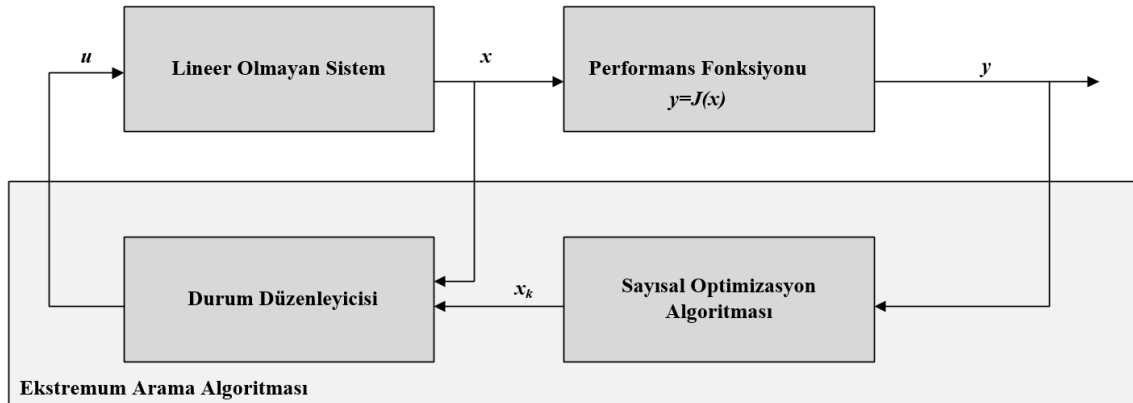
[56] nolu çalışmada, bu tez çalışmasından çıkan yayın olup, eğim tabanlı EAA iki bölmeli sekiz bölgeli gerçek bir fırın üzerinde uygulanmıştır. Performans fonksiyonu olarak fırında yakma amaçlı kullanılan doğalgazın maliyeti ile sirkülasyon fanlarının elektrik enerji maliyetinin toplamı alınmıştır. Kontrol sinyali olarak da sirkülasyon fan devirleri alınmıştır. Karşılaşılan yapısal zorluklar EAA'da yapılan değişikliklerle aşılmıştır. Sonuç olarak makine imalatçısının önerdiği sirkülasyon devir hızı olan %70 yerine EAA'nın hesapladığı %78'de çalıştırıldığından toplam enerji maliyetinde %3,44 düşüş görülmüştür.

[57] nolu çalışmada, Shahshahani eğimine dayalı kısıtlamalar altındaki problemlerin çevrim içi optimizasyonu için yeni bir ekstremum arama algoritması sunulmuş. Önerilen algoritma, potansiyel fonksiyonun matematiksel modelinin bilinmediği veya zaman içinde değiştiği durumlarda dinamik kaynak paylaşım problemlerini çevrim içi olarak optimize etmek için kullanılabilmesi belirtilmiştir. Tasarlanan şemanın bazı potansiyel uygulamaları arasında iletişim ağlarında kaynak tahsisi, su dağıtım kontrolü sayılabileceği belirtilmiştir.

[58] nolu çalışmada, iklimlendirme sistemlerinde elektrik enerjisi tüketen ünitelerin toplam enerji tüketimini performans fonksiyonu olarak alıp, hem evaporatör hem de kondanser fanlara bozucu sinyal çok değişkenli EAA olarak uygulanarak, bir taraftan sistem hedef set değerlerini yakalamayı sürdürürken diğer taraftan toplam enerji tüketimi düşürülmesi hedeflenmiştir. Giriş kısmında çok değişkenli EAA uygulamasının iki yaygın yöntemi olan eğim tabanlı EAA ile Newton tabanlı EAA hakkında detaylı açıklama yapılmıştır. Bu uygulamada toplam enerji tüketimi 625W'tan 325W'a düşürülmüştür. Uygulama hem simülasyonda hem de test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.4. Sayısal Optimizasyon Tabanlı EAA

Yaygın olarak kullanılan diğer EAA tipi ise sayısal optimizasyon tabanlı EAA'dır. Bu algortmada değiştirilecek parametrenin bir sonraki yeni değeri belirlenir. Durum düzenleyici kontrol algoritması ise yeni parametrelere göre sistemi tekrar set edilen kararlı duruma getirir. Şekil 2.7'de sayısal tabanlı EAA'nın akış şeması verilmiştir [59].



Şekil 2.7. Sayısal optimizasyon tabanlı EAA şeması

Sistemin durum bilgileri, performans fonksiyonu değerleri, performans fonksiyon değerinin eğim bilgileri dizayn edilen sayısal optimizasyon algoritmasında işlenerek sürülecek sinyalin (x_k) yeni değeri hesaplanır. Yeni değer durum düzenleyicide tekrar işlenerek performans fonksiyonunun minimum noktası bulunmaya çalışılır. Burada kontrol döngüsü çalışırken adım zamanlarında yalnızca eğim değerine ihtiyaç duyulur. Dolayısıyla diğer yöntemlerden farklı olarak sürekli bir eğim bilgisine ihtiyaç duyulmaz.

Sayısal optimizasyonun ana kurgusu aşağıdaki gibidir:

Durum düzenleyicisinin asıl görevi, sayısal optimizasyon algoritmasının ürettiği set değerini yakalamak ve o bölgede sürekliliği sağlamaya çalışmaktır. Sayısal optimizasyon algoritması yavaş yavaş performans fonksiyonunu minimum bölgeye çektiğinden nihai olarak sistem de performans fonksiyonunun minimum olduğu bölgede sistemin set değerini yakalamış olacaktır. Sayısal optimizasyonda dinamik optimizasyon için mutlaka durum düzenleyicisine ihtiyaç duyar. Bu durum düzenleyicisi, sistemin kendi kontrolcüsü de olabilir. Haricen oluşturulması da gerekebilir. Aynı zamanda durum düzenleyicisi sistemden çok fazla parametreye de ihtiyaç duyabilir. Bu durumda çok parametrelili bir düzenleyici olur. Eğer haricen oluşturulmuş bir düzenleyici ise sistem tepki süresini ve hassasiyetini de artırma imkanı sunabilir. Aşağıda temel sayısal optimizasyon algoritması verilmiştir [59–61].

Adım 0: $t_0=0$ 'da $x_0=x(t_0)$ ve $k=0$ olarak ayarlanır.

Adım 1: Güncel durum $x_k=x(t_k)$ ve performans fonksiyonunun ölçüm değerleri olan $J(x(t_k))$, $\nabla J(x(t_k))$ veya $\nabla^2 J(x(t_k))$ işlemlerinin sonuçlarına dayanan x_{k+1} üreten optimizasyon algoritması kullanılır.

$$x_{k+1}=\text{OPTİMİZASYON}(x(t_k)) \quad (2.5)$$

Adım 2: $t_{k+1}= t_k+\delta_k$ olacak şekilde, sonlu δ_k zamanı içinde $x(t_k)$ durumunu x_{k+1} 'e düzenleyen bir u durum düzenleyicisi tasarlanır.

Adım 3: $k \leftarrow k+1$ olarak ayarla ve Adım1'e geri dön [59–61]

Sayısal optimizasyon problemlerinde iki ana yöntem yaygındır. Bunlar çizgisel takip yöntemi ve güvenli bölge yöntemidir.

a. Çizgisel Takip Yöntemi: Çizgisel takip yönteminin her yenilemesinde bir takip yönü belirlenir. Takip yönü p_k ile gösterilir. $p_k \in R^n$ dir. Daha sonra belirlenen yönde ne kadarlık bir adım atılacağı belirlenir. Bir sonraki atılacak adım büyüklüğü;

$x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k$ olarak belirlenir. Burada α_k skalar bir büyüklük olup adım uzunluğu olarak ifade edilir. Çarpan p_k ise değerin azalması yönünde seçilir. $p_k^T \cdot \nabla J(x_k) < 0$ şartı sağlandığı durumda performans fonksiyonu $J(x)$, bu yön doğrultusunda düşme eğilimlidir denir. En dik düşme yönü $p_k = -\nabla J(x_k)$ durumunda gerçekleşir. Burada α_k değeri çok büyük seçildiğinde performans fonksiyonunda hızlı düşme sağlanır. Fakat ekstrem noktada ideal nokta yakalanamaz. Dolayısıyla optimum α_k değerinin hesaplanması;

$\min_{\alpha > 0} \phi(\alpha) = \min_{\alpha > 0} J(x_k + \alpha p_k)$ hesaplanmasıyla elde edilir.

Adım büyüklüğünü belirlemede iki yöntem uygulanır. Bunlar, tam çizgisel arama yöntemi ve tam olmayan çizgisel arama yöntemidir. Tam çizgisel aramada optimum adım büyüklüğü, hesaplamada $\phi(\alpha)$ 'nın minimum noktasında sağlanır. Fakat bu yöntem çok gerekli olmayabilir. Daha çok tam olmayan çizgisel arama yöntemi uygulanır. Bu yöntemin hesaplaması basittir. Bu yöntemle de performans fonksiyonunda yeterli azalma sağlanabilir. Tam olmayan çizgisel arama yönteminde iki temel şarta bakılır. Bunlar Armijo şartı ve Wolfe şartıdır. Armijo şartı yeterli bir azalma kriteri ile çok uzun adımları önler.

$$J(x_k + \alpha_k p_k) \leq J(x_k) + c_1 \alpha_k p_k^T \nabla J(x_k) \quad (2.6)$$

Wolfe şartı ise eğrilik kriteri ile çok kısa adımları önler.

$$p_k^T \nabla J(x_k + \alpha_k p_k) \geq c_2 p_k^T \nabla J(x_k) \quad (2.7)$$

Burada c_1 ve c_2 değerleri $0 < c_1 < c_2 < 1$ şartını sağlaması beklenir. Eğer $c_2 > c_1$ ise kabul edilebilir bir nokta var demektir [59–61].

b. Güvenli Bölge Yöntemi: Güvenilir bölge yöntemi, doğrusal olmayan sistemlerin çözümlerinde kullanılan en önemli sayısal optimizasyon yöntemlerinden biridir. Kurgunun çalışma prensibi; en iyi çözümün çevresinde bir bölge belirlenir. Bu belirlenen bölge iyi

tanımlanabilen bir fonksiyonla modellenir. Aynı zamanda bu modellenen fonksiyon orijinal performans fonksiyonunun belirli alanını kapsar. Bu yöntemde daha sonra belirlenen modele göre, belirlenen bölge içerisinde bir adım atılır. Çizgisel arama yönteminin aksine güvenilir bölge yönteminde adım büyüklüğü yön tespitinden önce belirlenir. Atılan adım yönünde, değerde yeterli düşüş sağlanırsa, bu durumda orijinal performans fonksiyonuna göre olumlu yönde ilerlendiği kabul edilir. Eğer gelişme çok az ise veya gelişme negatif ise modelin orijinal performans fonksiyonuna uygun olmadığına karar verilir. Yaklaşım, önceki adımlarda elde edilen sonuçlara göre sağlanır [62], [63].

Çoğu durumda güvenli bölge, güvenli bölgenin alt problemini kapsayan Δ_k yarıçaplı küresel alan olarak belirlenir. Güvenli bölge alt problem; orijinal performans fonksiyonuna yaklaşmak için ikinci dereceden bir model kullanılıyorsa, optimizasyon problemi, güvenli bölge alt problemleri dizisinin çözümüne indirgenmiş olur.

$$\min m_k(p) = f_k g_k \quad (2.8)$$

$$\min m_k(p) = f_k g_k^T p + \frac{1}{2} p^T B_k p, \quad (2.9)$$

Burada $\|p_k\| \leq \Delta_k$, Δ_k güvenli bölge yarıçapı, g_k mevcut noktanın eğimi, B_k ise Hessian yaklaşımıdır. B_k pozitif ise güvenli bölge alt problemin çözümü bulunabilir. Güvenli bölge yönteminin en önemli noktası, her tekrarlanan adımdaki güvenli bölge alanının büyüklüğünün belirlenmesidir. Eğer son adım yeterli kısma yaparsa, bir sonraki adımda Δ_k değerini artırarak model genişletilir. En son adımda çok sınırlı bir yaklaşım sağlanırsa güvenli bölge yarıçapı artırılmaz. Ya da modelin geçerliliğini kontrol etmek için güvenli bölgenin kapsamının yarıçapı daraltılır [62], [63].

$$\rho_k = \frac{J(x_k) - J(x_k + p_k)}{\min(x_k) - \min(x_k + p_k)} \quad (2.10)$$

Daha tutarlı adım atmak için orijinal performans fonksiyonunun iki adım arasındaki farkının model fonksiyonunun iki adım arasındaki farkı oranına bağlıdır. Bu değer ρ_k ile gösterilir ve güvenli bölgenin boyutunu belirlemede ışık tutar.

[59] nolu çalışmada; geleneksel otomatik kontroller, bilinen bir referans veya yörünge set değerini yakalamak ve bu noktada kararlılığını sürdürmek için çalışır. Buna regülasyon

veya izleme de denir. Fakat bazı durumlarda sistemin takip edeceği set değeri bilinmeyebilir. Örneğin, araçlarda tekerleğin sürtünme kuvveti katsayısı kaymaya bağlıdır. Sürtünme kuvvetini maksimum uygulamak için optimum kaymayı sürdürecekt miktarda uygun fren torku uygulamak gerekir. Fakat uygun fren torku; hava şartları, yol şartları ve tekerlek durumu gibi parametrelere göre değişkenlik arz eder. Bu çalışmada ekstremum arama metodunun sayısal optimizasyon tabanlı modelindeki çizgisel takip metodu ile güvenli bölge metodu araç fren sistemlerinin modelinde simülasyon ortamında denenmiştir.

[61] nolu çalışmada, sınırlı optimizasyon, sınırsız optimizasyon, lineer olmayan denklemler, eğimsiz optimizasyonlar için güvenli bölge ve düzenleme algoritmaları derlenmiştir. Bu algoritmaların teorik ispatları yapılmıştır. Güvenli bölge algoritmasının son otuz yılda lineer olmayan optimizasyonlarda geliştiği vurgulanmıştır.

[62] nolu çalışmada, ise güvenli bölge yöntemi açıklanmıştır. Konu ile ilgili matematiksel bir fonksiyon üzerinde yaklaşım adımları ve ve her adımın sonuçları sunulmuştur.

[64] nolu çalışmada; yazarlar önceki yayınlarındaki çalışmalarına ek olarak çıkışı izleme yolunu kullanarak durum düzenleyici için yeni bir tasarım yapmışlardır. Önceki çalışmalarından farklı olarak bu tasarım lineer olmayan sistemlere de uygulanabilirliği gösterilmiştir. Uygulama sonuçları simülasyonla grafiklendirilmiştir.

[65] nolu çalışmada, araç motorlarındaki egzoz gaz sirkülasyonu (Exhaust Gas Recirculation, EGR) ve ateşleme zamanı (Spark Timing, ST) grafiğini ayarlamaya çalışan bir kapalı döngü tasarlanmıştır. Geri besleme (feedback) olarak silindir içindeki iyonizasyon sinyalinden elde edilen kararlı yanma ölçümü kullanılmıştır. EAA, maksimum kararlı EGR miktarını elde etmek için ateşleme zamanını ayarlamak için kullanılmıştır.

2.5. Önceki Çalışmaların Özeti

EAA alanında pekçok çalışmalar yapılmış olsa da bu alanda yapılan çalışmaların çoğu simülasyon çalışması veya deneysel çalışmadır. Gerçek bir prosese uygulama sınırlı kalmıştır. Çizelge 2.1’de görüleceği üzere incelenen çalışmalardan otuz iki adet çalışma sadece simülasyon çalışması, üç adet çalışma sadece deneysel çalışma, beş adet çalışma ise

simülasyon ve deneysel çalışma olarak görülmüştür. Deneysel çalışmaların da kurulu gücü yaklaşık 1 kW olup genelde bir deney setinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.1. Literatür değerlendirmesi

Sıra No	Yayın	Simülasyon	Simülasyon ve Deneysel	Deneysel	Teorik Çalışma	Tanımlama
1	Extremum Seeking Control for Energy Optimization of Vapor Compression Systems [9]			X		Air conditioner performans fonksiyonu 700W 'tan 450W'a düşürülmüştür.
2	Extremum seeking control of the CANON process - Existence of multiple stationary solutions [10]	X				
3	Adaptive flow control using slope seeking [11]	X				
4	Extremum seeking control and its application to process and reaction systems: A survey [12]	X				
5	Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems [14]				X	Simülasyon da yok. Sadece formül ve ispat verilmiştir.
6	Greedy Extremum Seeking Control with Applications to Biochemical Processes [66]	X				
7	Self-optimizing control of air-source heat pump with multivariable extremum seeking [47]	X				
8	Efficient operation of air-side economizer using extremum seeking control [48]	X				Anti wind up çözümüne atıf yapılmıştır.
9	Extremum seeking control for efficient operation of an air-source heat pump water heater with internal heat exchanger cycle vapor injection [49]	X				
10	Optimal subcooling in vapor compression systems via extremum seeking control: Theory and experiments [42]		X			Buhar sıkıştırma sistemi 1/2 hp gücünde kompresör maliyet fonksiyonu olarak kullanılmıştır.
11	Extremum-seeking control of ABS braking in road vehicles with lateral force improvement [38]	X				
12	Numerical optimization-based extremum seeking control with application to ABS design [59]	X				
13	Extremum seeking for wind and solar energy applications [44]		X			

Çizelge 2.1. (Devam) Literatür Değerlendirmesi

Sıra No	Yayın	Simulasyon	Simulasyon ve Deneysel	Deneysel	Teorik Çalışma	Tanımlama
14	Power optimization for photovoltaic micro-converters using multivariable Newton-based extremum-seeking [67]	X				
15	Sliding mode extremum seeking control scheme based on PSO for maximum power point tracking in photovoltaic systems [37]		X			
16	MPPT for Wind Energy Conversion System Based on Improved Sliding Mode Extremum Seeking Control [39]	X				
17	Energy-saving control strategy for lighting system based on multivariate extremum seeking with Newton algorithm [52]			X		30×60×40cm boyutlarında olan karton evleri aydınlatmak için 11 adet LED kullanılmıştır.
18	Tracking the Minimum Energy Consumption for the Lighting System though Modified Extremum Seeking Method [51]			X		20×30×20cm boyutlarında olan karton evleri aydınlatmak için 9 adet LED kullanılmıştır.
19	Comparison of extremum seeking control algorithms for robotic applications [34]	X				
20	Control of Thermal Power Plant Combustion Distribution Using Extremum Seeking [68]	X				Sırbistan'daki 350-MW'lık Nikola Tesla Güç Tesisindeki kazan modellenip model simülasyonda denenmiştir.
21	Integrated real-time optimization of boiler and post-combustion system in coal-based power plants via extremum seeking [69]	X				AES Cayuga Unit 1 is a 160MW unit kazan modellenip, model simülasyonda denenmiştir.
22	Extremum Seeking Control for Discrete-Time Systems [70]	X				
23	PID Tuning Using Extremum Seeking: Online, Model-Free Performance Optimization [45]	X				
24	A Proportional Integral Extremum-Seeking Control Approach for Discrete-Time Nonlinear Systems [71]	X				

Çizelge 2.1. (Devam) Literatür Değerlendirmesi

Sıra No	Yayın	Simulasyon	Simulasyon ve Deneysel	Deneysel	Teorik Çalışma	Tanımlama
26	Finite-Horizon LQ Control for Unknown Discrete-Time Linear Systems via Extremum Seeking [73]	X				
27	Formation Control of High-Altitude Balloons Experiencing Real Wind Currents by Discrete-Time Distributed Extremum Seeking Control [74]	X				
28	Discrete-Time Extremum-Seeking for Wiener-Hammerstein Plants [75]		X			Güçten bahsedilmemiştir. Algoritma, motor üzerinde deneysel olarak olduğu kadar simülasyonda da gösterilmiştir.
29	Extremum-Seeking for Nonlinear Discrete-Time Systems with Application to HCCI Engines [76]	X				
30	Power Maximization of Wind Farms using Discrete-time Distributed Extremum Seeking Control [77]	X				
31	Extremum Seeking Control for Discrete-Time with Quantized and Saturated Actuators [78]	X				Anti wind up çözümüne atıf yapılmıştır.
32	A New Discrete-in-Time Extremum Seeking Based Technique for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Systems [79]	X				
33	A Time-Varying Extremum-Seeking Control Approach for Discrete-Time Systems [80]	X				
34	A time-varying extremum-seeking control approach for discrete-time systems with application to model predictive control [81]	X				Model üzerinden simülasyon yapılmıştır.
35	Robust and adaptive design of numerical optimization-based extremum seeking control [61]	X				
36	Discrete-Step, Quasi-Newton Extremum Seeking Control for Multivariable Real-Time Optimization [82]	X				
37	A Shahshahani Gradient based extremum seeking scheme [57]	X				

Çizelge 2.1. (Devam) Literatür Değerlendirmesi

Sıra No	Yayın	Simulasyon	Simulasyon ve Deneysel	Deneysel	Teorik Çalışma	Tanımlama
38	Advanced algorithms for gradient estimation in one- and two-parameter extremum seeking controllers [83]	X				Model üzerine simülasyon yapılmıştır.
39	Fixed-Time Extremum Seeking [84]	X				
40	The design and performance analysis of multivariate fractional-order gradient-based extremum seeking approach [85]		X			Deney düzeeğinde, 60×40×90cm boyutlarında kartondan evi aydınlatmak için 11 LED kullanılmıştır.
41	Gradient Extremum Seeking with Nonconstant Delays [55]	X				

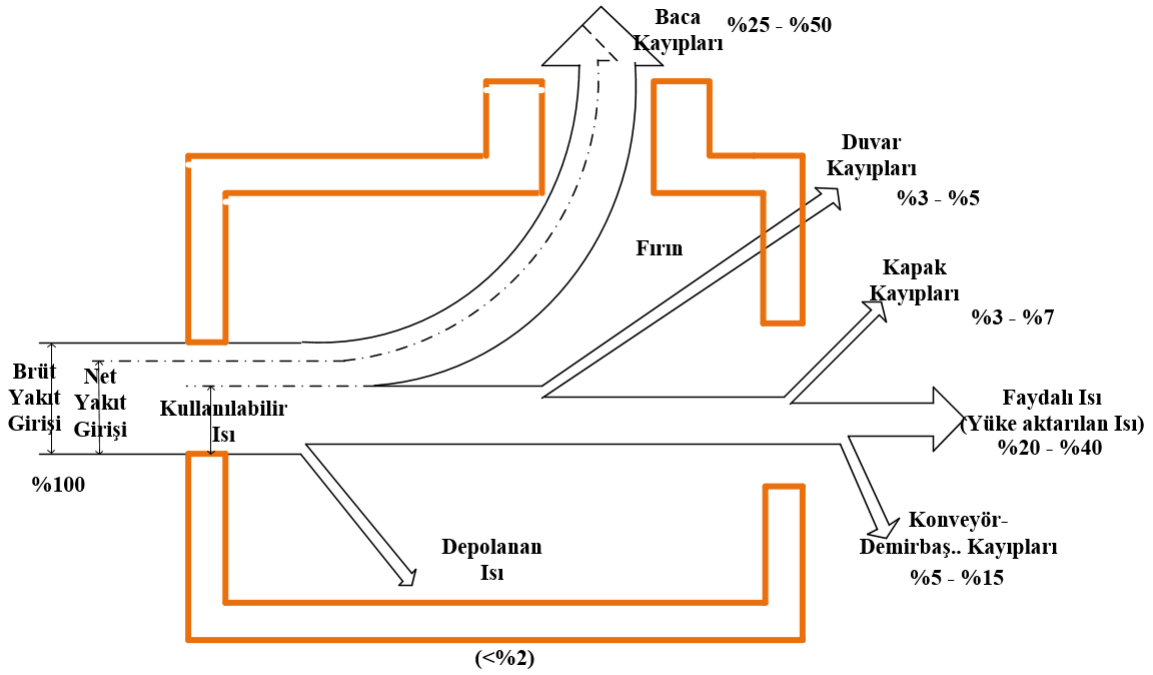
3. ENDÜSTRİYEL FIRINLAR

Fırın; ısıtma, pişirme, tavlama, kütleme, eritme veya işlenmiş bileşenlerin özelliklerini geliştirme (ısıl işlem) amacıyla kullanılan, yoğun ısı yüklenen kapalı bir yapı olarak tanımlanabilir [86]. Günlük hayatta tüketilen gıdaların ve kullanılan malzemelerin çoğunun üretimi aşamasında belirli bir seviyeye kadar ısıtma işlemi uygulanır. Fırın sistemleri yüksek ve düşük sıcaklıklı fırınlar diye ikiye ayrılır. Her ne kadar kesin bir çizgi olmasa da fırın içi sıcaklığı 400-500 °C altına düşük sıcaklıklı fırınlar (oven), bu sıcaklıkların üstündeki fırınlar da yüksek sıcaklıklı fırınlar (furnace) olarak adlandırılır. Yüksek sıcaklıklı fırınlar genellikle çimento, kireç, tuğla, seramik üretiminde, metal işleme prosesinin çoğunda ve cam sanayisinde kullanılır. Kurutma proseslerinde, gıda işleme ve sterilizasyonda, kütlemede ve yağ arıtma tesislerinde ise düşük sıcaklıklı fırınlar kullanılır [8, 87, 88].

Yüksek sıcaklıklı proseslerde yakıt enerjisinin verimli kullanımını sağlamak, düşük sıcaklıklı proseslere göre çok daha zordur. Düşük sıcaklıklı proseslerde verim %80'lere çıkabilirken yüksek sıcaklıklı proseslerde verim %50'leri aşması nadirdir. Şekil 3.1'de görüleceği gibi özellikle ürünün sürekli fırına girip çıktığı (yığın usulü olmayan) proseslerde ürüne aktarılan enerji %20 - %40 seviyelerindedir. Bu değerler fırınlardaki kayıpların büyüklüğünü göstermektedir. En büyük kayıp bacadan atılan atık ısı ile gerçekleşirken bunu duvardaki kayıplar ve ürünün girip çıktığı kapaklardaki ısı kayıpları izlemektedir.

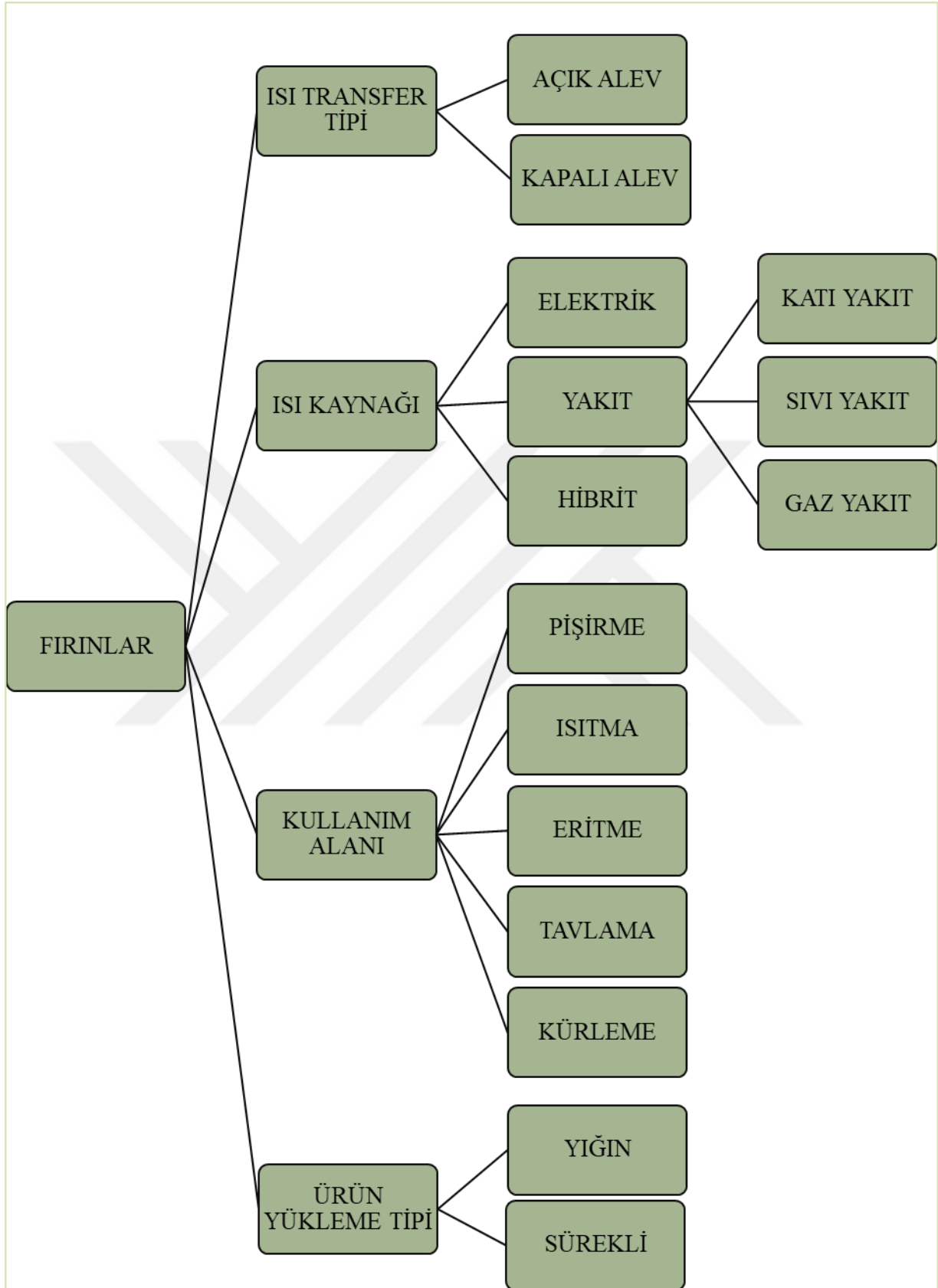
Dünyadaki toplam tüketilen enerjinin %35'i endüstride kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan enerjinin en büyük oranı kazan ve fırınlarda kullanılmaktadır [8]. Dünyada hızla azalan fosil kaynakları daha verimli kullanmak için fırınların verimliliğini artırmak amacıyla pekçok çalışmalar yapılmıştır [89, 90, 91–100].

İklim değişikliği, buzulların erimesinden kaynaklı deniz seviyelerinin yükselmesine ve ekolojik değişimlere yol açan önemli bir çevre sorunudur. İklim değişikliğinin önemli bir nedeni sera gazlarının salınımıdır. Küresel ısınmayı ve iklim değişikliğini tetikleyen sera gazlarının salınımının azaltımı için de fırınlar üzerine pek çok çalışmalar yapılmıştır [101–111].



Şekil 3.1. Fırın kayıpları

Fırınlar; kullanım alanları, ısı kaynakları, yakıt tipleri, üretilen ürün tipleri, kapasite, fırın içi sıcaklık aralıkları, ürünü fırına yükleme tipi, ısı transferi tipi gibi farklı kriterlere göre farklı sınıflandırılabilir. Kullanım alanları olarak ısıtma, pişirme, tavlama, kütleme, eritme olarak sınıflandırılabilir. Isı kaynağı olarak elektrik veya yakma tipli olarak sınıflandırılırken yakma tipini de katı yakıt, sıvı yakıt veya gaz yakıt olarak sınıflandırılabilir. Ürünü fırına yükleme tipi olarak ise yığın (batch) tipi veya sürekli (continuous) tip olarak sınıflandırılabilir. Isı transferi tipi olarak açık alev tipli ve kapalı alev tipli olarak sınıflandırılabilir [86]. Şekil 3.2’de fırınların farklı sınıflandırılmasının grafiği verilmiştir.



Şekil 3.2. Endüstriyel fırınların sınıflandırılması

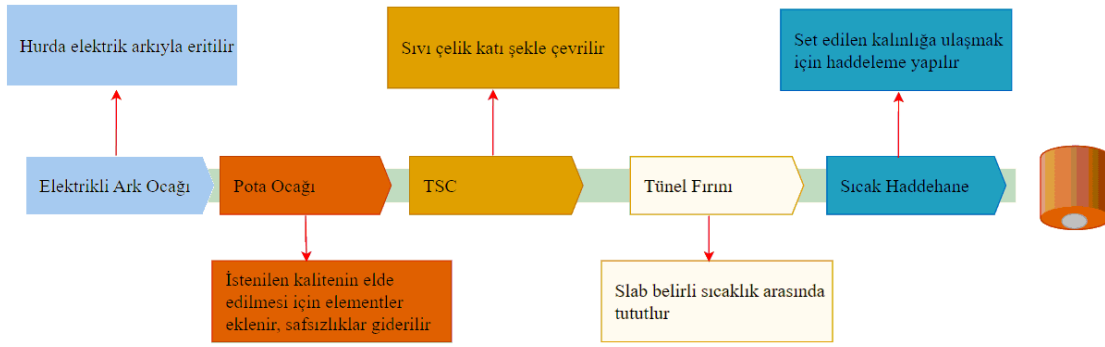
4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

Üzerinde çalışma yapılan fırın; ısı transferi olarak açık alevli tip, ısı kaynağı olarak doğal gaz yakıt tipli, kullanım alanı olarak tavlama (kürleme), ürün yükleme tipi olarak sürekli tip, düşük sıcaklıklı bir fırındır. Fırın, çelik şerit üretim prosesinin önemli bir parçasıdır.

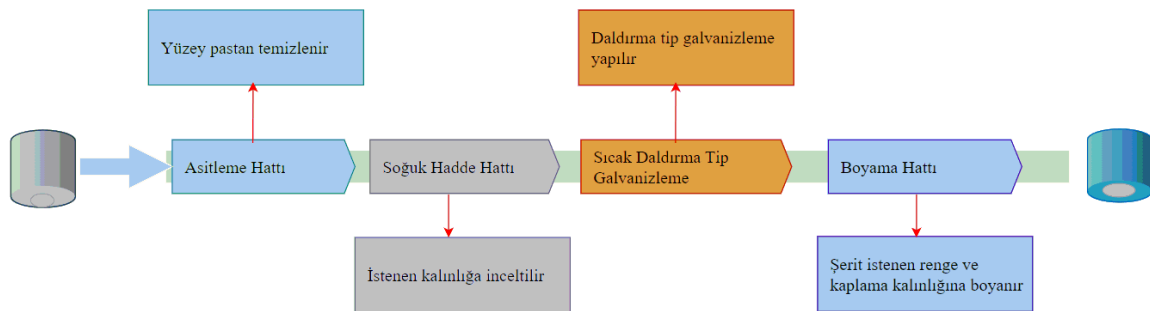
Entegre bir demir çelik fabrikasındaki çelik şerit prosesi iki bölüme ayrılabilir: sıcak kompleks (birincil çelik prosesi) ve soğuk kompleks (son işlem çelik prosesi). Sıcak kompleks tarafında, demir cevheri, hurda gibi hammaddeler eritilir ve tasarıma göre değişen bazı adımlarla sıcak çelik şerit üretilir. Sıcak çelik şeritin üretiminin ardından, müşterinin isteği doğrultusunda farklı işlemlerle nihai bir ürün haline dönüştürülür.

Çalışmanın yapıldığı MMK Metalurji Tesisi, sıcak kompleksi ve soğuk kompleksi olan entegre bir çelik tesisidir. Sıcak kompleks bölümünde, erimiş çelik elde etmek için elektrik ark ocağı (Electrical Arc Furnace, EAF) teknolojisi kullanılır. Hurda genellikle eriyik oluşumu için katkı olarak kullanılan kireç veya dolomit ile birlikte hurda arabalarına yüklenir. Hazırlanan arabalar EAF'e boşaltılır. EAF'in ana işlevi, çelik hurda ve diğer bazı metal içerikler gibi katı metalleri sıvı çeliğe dönüştürmektir. Elektrik enerjisi, elektrottan hurdaya aktarılır ve böylelikle eritme başlaması için arklanma gerçekleşir. Hurda eritildikten sonra eriyik pota ocağına aktarılır. Pota ocağında; erimiş çelik bir potaya yüklenir. Daha sonra erimiş çelikteki safsızlıkları gidermek için oksijen verilir. İstenilen kaliteyi elde etmek için katkıları eklenir. Daha sonra diğer bazı işlem adımlarından sonra ince levha döküm ünitesine (Thin Slab Casting, TSC) aktarılır. Bu ünite sıvı çeliği katı şekillere ve gerekli boyutlara dönüştürür. Daha sonra metali belirli bir sıcaklık aralığında tutmak için tünel fırınına aktarılır. Ardından, gerekli kalınlığa ulaşmak için haddeme ünitesine gönderilir. Haddelendikten sonra soğutulur ve sarılır. Yukarıda açıklanan tüm adımlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sıcak kompleks adımları

Soğuk kompleks tarafında ise; asitleme hattı, sıcak kompleks içinde üretilen çelik şeritin yüzeylerindeki oksidasyonu giderir. Daha sonra soğuk haddeleme prosesinde müşterinin istediği aralığa kadar şerit inceltir. İstenen inceliğe ulaşan şerit, sıcak daldırma galvanizleme hattında tavllanır ve galvanizlenir. Son olarak, müşterinin istediği kriterlere göre boya kaplama hattında boyanır. Şekil 4.2’de soğuk tesis proses adımları gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Soğuk kompleks adımları

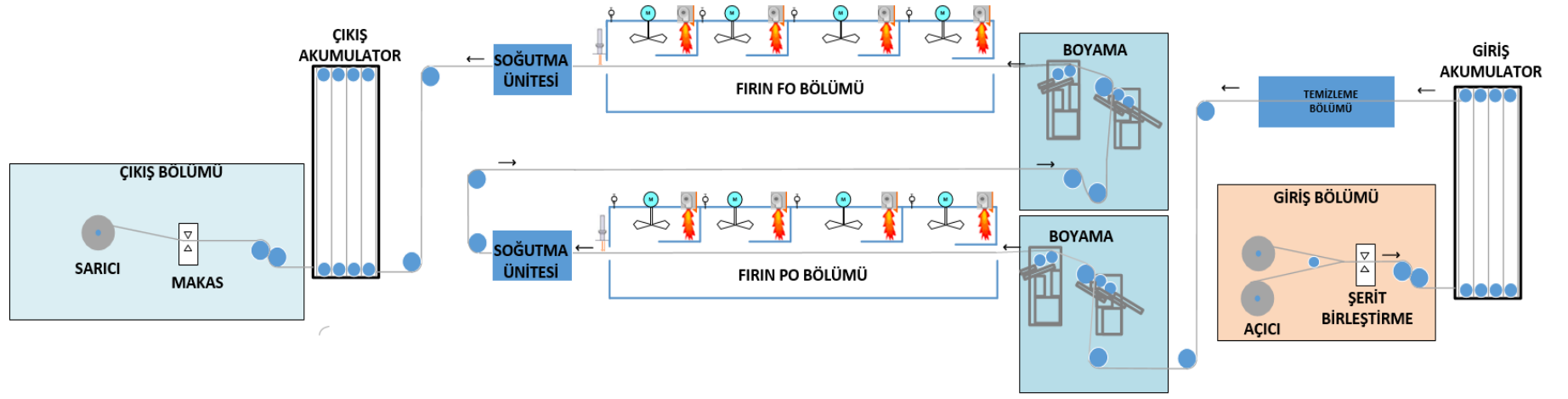
Üzerinde çalışma yapılan boya kaplama hattı üç bölüme ayrılabilir: giriş, proses ve çıkış. Giriş bölümünde galvanizleme hattından aktarılan çelik şeritler açıcı kısmında açılır. Daha sonra, şerit perçinleme bölümünde, biten çelik şeritin kuyruğu, yeni gelen çelik şeritin başı ile birleştirilir. Giriş akümülatörünün işlevi, giriş bölümü kaynak veya diğer ihtiyaçlar için durduğunda proses hızını sabit tutmak içindir. Temizleme bölümünde toz ve diğer yabancı maddeler temizlenir. Boyama bölümünde, şeridin arka ve üst tarafları boyanır. Fırın bölümünde kürlenir ve kurutulur. Her fırından sonra şeridi soğutmak için soğutma üniteleri bulunur. Çıkış bölümünde müşteri isteklerine göre uygun metrajda veya ağırlıkta kesilerek sarıcı kısmında sarılır. Ayrıca, çıkış akümülatörünün işlevi, çıkış bölümü kesme veya diğer

ihtiyaçlar için durduğunda proses hızını sabit tutmaktır. Şekil 4.3'te, boya kaplama hattı gösterilmiştir.

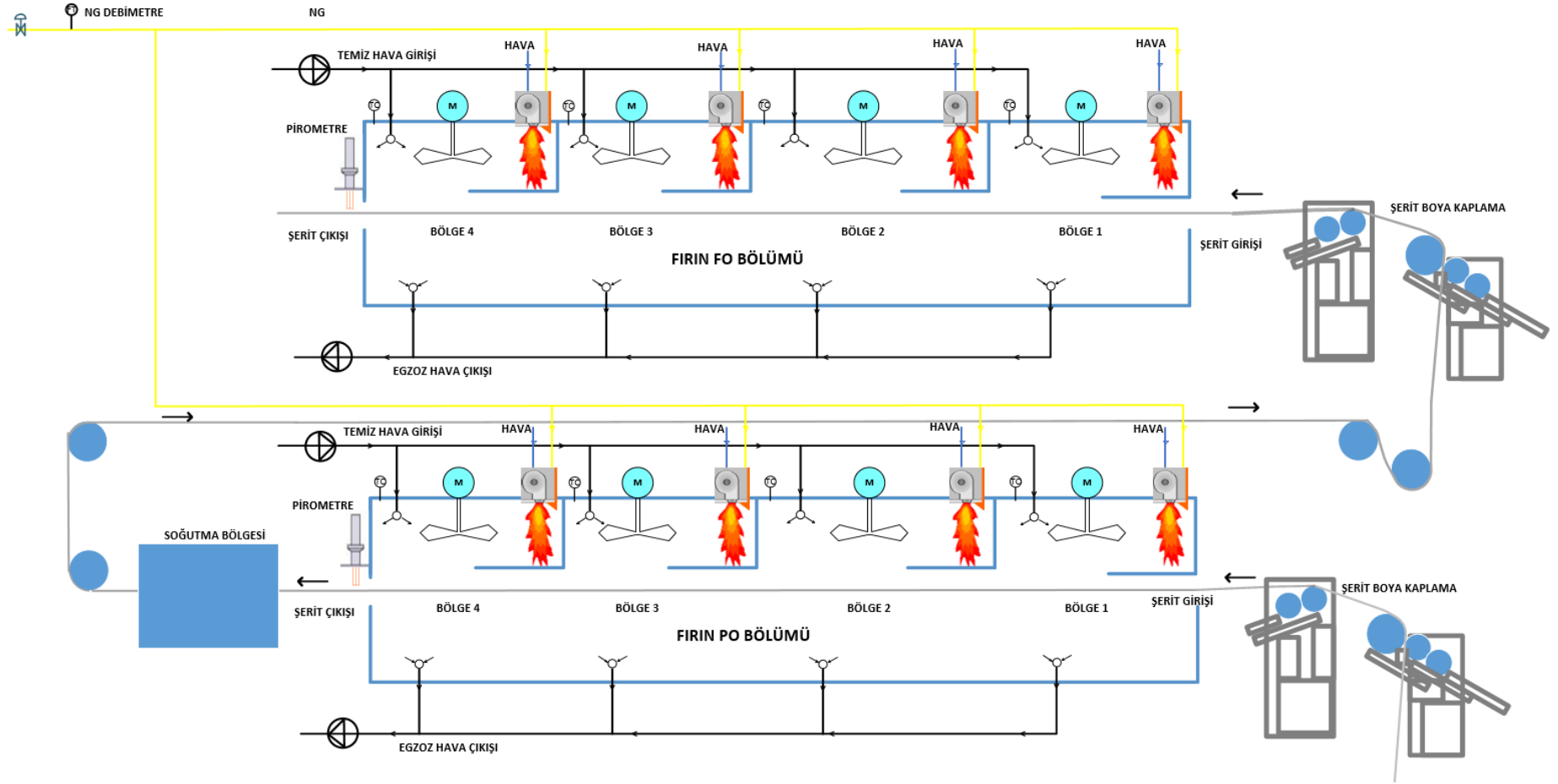
Üzerinde çalışma yapılan fırın, her biri dörder bölgeden olmak üzere fırın birincil grup (Prime Oven, PO) ve fırın ikincil grup (Finish Oven, FO) olarak toplam 8 bölgeden oluşmaktadır. Her bölgenin kendi brülörü, sirkülasyon fanı, temiz hava giriş kanalı ve baca gazını atmak için egzoz kanalı, basınç transmitterleri ve her bölgenin kontrolü için diğer bazı ekipmanları vardır. Fırının hem PO hem de FO bölgesi çıkışında şeritin sıcaklığını ölçmek için birer pirometre vardır. Gaz brülörleri tüm sistemden bağımsızdır ve kendi için gerekli tüm kontrol ekipmanları ve güvenlik ekipmanlarını ayrıca içerir. Her brülörün kendi kontrol kabini vardır. Boya fırını şematik diyagramı Şekil 4.4'te ve fırının gerçek görünümü Resim 4.1'de verilmiştir.



Resim 4.1. MMK Metalurji'de boyama hattı kurutma fırınının gerçek görünümü



Şekil 4.3. Boya kaplama hattı şematik diyagramı



Şekil 4.4. Boya hattı fırınlarının şematik diyagramı

4.1.1. Boyama hattı fırınının mevcut kontrol yapısı

Fırında, Siemens marka 412-2DP serisi Simatic Manager’de programlanmış bir ana kontrolcü vardır. Tüm fırınların kontrolü bu kontrolcü ile sağlanır. Fırın CPU’su kendi PID kontrolcüsünü kullanmaktadır. Şeritin çıkış sıcaklık set değeri malzeme tipine, malzeme kalınlığına ve renk tipine göre değişir. Şeritin sıcaklığını istenen değerde tutmak için her bir bölgenin sıcaklığı manual, otomatik veya reçeteye göre set edilir.

Otomatik Mod: Bu kontrol modunda, operator her bölgenin sıcaklığını set eder. Ana kontrolcüdeki PID kontrolü, sıcaklık set değerine göre bölgenin sıcaklığını o bölgeyi besleyen doğal gaz vanasını kontrol ederek ayarlar.

Reçete Modu: Bu kontrol modunda, materyal tipine, kalınlığına, rengine ve hat hızına göre devreye alma aşamasında veya sonradan oluşturulan değere göre bölge sıcaklığı set değeri belirlenir. Belirlenen set değerine göre PID kontrolü otomatik moddaki kontrol mantığında çalışır.

Manual Mod: Bu kontrol modunda operator set değeri gaz vanasının açıklık oranıdır.

Otomatik ve reçete kontrol modunda her bir bölgede hesaplanan hata değeri (hata değeri = set değeri – mevcut değer) doğal gaz oransal vanasına iletilir. Hattın mevcut çalışmasında fırın sıcaklık kontrolü bakım periyodu haricinde sürekli otomatik modda bırakılır.

Her bir bölgedeki sirkülasyon fanlarının reçete modu ve manuel modu olmak üzere iki kontrol modu vardır. Her ne kadar 8 adet 45kW’lık sirkülasyon fan hızları kontrol modu olarak reçete modu veya manuel mod olarak kontrol edilse de reçete kontrolü gerçekte uygulanmaz. Operator manual kontrolü tercih edilir. Taze hava damperleri bölgelerin iç basınç kontrolü için kullanılır. Taze hava ise boya odalarındaki solvent yoğunluklu havalar emilerek baca ünitesinin çıkışındaki gaz/gaz eşanjöründen geçirilerek fırın içine beslenir. Buradaki asıl amaç dış ortama solvent yoğunluklu havanın verilmemesi ve solventin yakılarak yok edilmesidir. Fırın rejiminde havanın kütle dengesinde büyük değişiklik olmadığından, taze hava damper pozisyonları pek değişmez. Bundan dolayı, taze hava giriş akış oranı sabittir. Aynı zamanda egzoz fan ana kontrol çalışma prensibi akış oranına dayalıdır. Akış ölçüm tekniği olarak Torbar kullanılır. Bu teknolojiye çok portlu kendinden ortalama akış ölçer ve dizaynı pitot tüpüne (akışkanlarda akış ölçümde kullanılır) benzer

bir yapı kullanılır. Marka olarak ABB marka FPD350 torbar debimetre kullanılmıştır. Egzoz hattında bir tane debimetre vardır. Akış set değeri operator tarafından HMI'a set değeri olarak girilir. Egzoz fan çalışma prensibi PID kontrolüne dayalı çalışır. Burada HMI'a girilen set değeri ile FPD350 cihazından okunan anlık değeri kullanarak hata değeri oluşturulur ve PID kontrolü bu hata değerini sıfırda tutmaya çalışır. Egzoz motorunun hızını ayarlamak için Siemens marka Micromaster 440 serisi sürücü kullanılmıştır.

Şerit sıcaklığını ölçmek için IRCON marka MODLINE 3 serisi pirometre kullanılmıştır. Sıcaklık ölçüm aralığı 50-350°C'dir. Aynı zamanda her bölgenin egzoz çıkışında manual ayarlanır damper vardır. Fakat bu damperler devreye alma aşamasında yapılan pozisyon ayarında bırakılmıştır.

Boya kaplama hattında doğal gaz debimetresi yalnızca izleme amaçlı kullanılmaktadır. Proseste herhangi bir enstrumanı kontrol amaçlı kullanılmamıştır. Resim 4.2'de görüldüğü üzere debimetre iki üniteden oluşmaktadır. Birinci ünite her 1m³'ünde bir darbe (pulse) üreten döner gazölçerdir. İkinci ünite ise EK220 hacimsel çevrim cihazı olarak adlandırılır. Görevi döner gazmetreden alınan darbe sayılarını bir kısım parametrelerle değerlendirerek standart metreküpe çevirir. Hesaplamaya dahil edilen ana parametreler gazın basıncı ve sıcaklığıdır. Bundan dolayı doğalgaz hattının basınç ve sıcaklık bilgisi de cihaza giriş sinyali olarak alınır [112].



Resim 4.2. EK220 gaz debimetresinin gerçek görünümü

4.1.2. Doğal gaz yanma kontrolü

Fırın bölgelerinde kullanılan brülörlerden altı tanesi 860kW kapasiteli iki tanesi ise 1750kW kapasitelidir. Çizelge 4.1'de brülörlerin teknik bilgileri verilmiştir. Her bir brülörü kontrol etmek için ayrı bir pano mevcuttur. Fırın ana kontrolcüsü ile özel bir haberleşme protokolü kullanmayıp emniyet amaçlı kumanda sinyali kontrolü ile haberleşmektedir (sistemlerde haberleşme genelde donma, verinin geç gitmesi veya geç gelmesi gibi nedenlerden dolayı emniyet maksatlı kumanda kablolu (hard wire) haberleşme kullanılmaktadır). Kontrolcü olarak Honeywell marka EC7850 serisi kullanılmıştır. Yanma kontrolcüsünün giriş sinyalleri ve çıkış sinyalleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Yanma hava motorunun kontrolü sabit devirli 1,1 kW kapasiteli 2 980 dev/dk indüksiyon motor olup hava giriş miktarı manuel ayarlamalı olduğundan yanma tipi olarak zengin hava yanmalı bir brülör kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Fırında kullanılan brülörlerin teknik bilgileri ve kullanılan bölgeler

İmalatçı	Brülör Modeli	Btu/Saat	Güç (kW)	Yanma Hava Motoru Gücü (kW)	Kullanılan Bölge
COMTHERM LTD	PP43	3 000 000	870	1,1	PO Bölge 1,3,4 ve FO Bölge 1,3,4
	PPD6	6 000 000	1 740	2,2	PO Bölge 2 ve FO Bölge 2

Çizelge 4.2. Yanma sistemleri kontrolcüsüne ait giriş çıkış sinyal tablosu

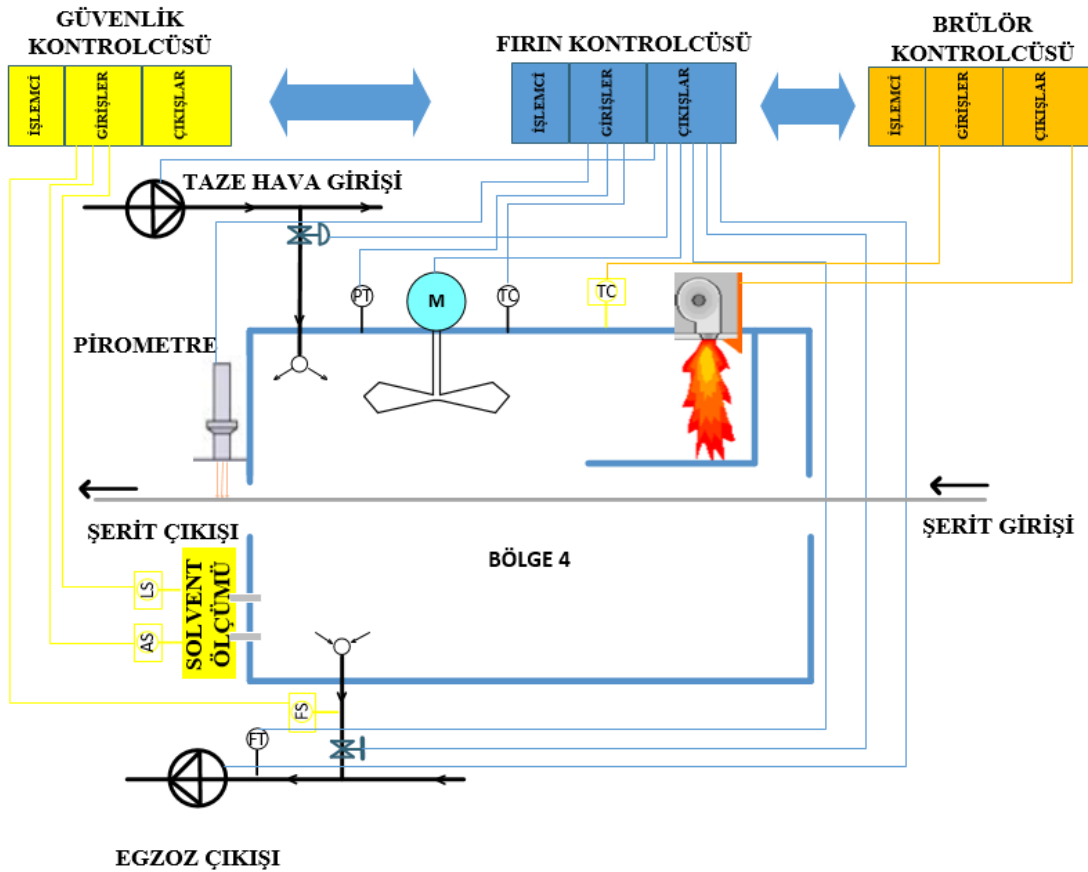
Kodu	Sinyal Güzergahı	Açıklama
PSL X06	Saha<-> kontrol paneli	Düşük basınç anahtarı
SV X07	Saha<-> kontrol paneli	Emniyet shut off vanası
SV X09	Saha<-> kontrol paneli	Emniyet shut off vanası
PSH X10	Saha<-> kontrol paneli	Yüksek basınç anahtarı
LS X11	Saha<-> kontrol paneli	Düşük alev anahtarı
LS X20	Saha<-> kontrol paneli	yüksek alev anahtarı
SC x1	Kontrol paneli<-> ana kontrolcü	Yüksek sıcaklık kontağı
SC x2	Ana kontrolcü<-> kontrol paneli	Yakma panosu reset komutu
SC x3	Ana kontrolcü<-> kontrol paneli	Yakma panosu çalış komutu
SC x4	Ana kontrolcü<-> kontrol paneli	Ana kontrol paneli hazır sinyali
PSL X19	Saha<-> kontrol paneli	Yanma havası basınç yeterli sinyali
M X21	Saha<-> kontrol paneli	Yanma havası motoru
FE X22	Saha<-> kontrol paneli	Alev algılama sensörü
T X23	Saha<-> kontrol paneli	Spark ignitör
T X12	Saha<-> kontrol paneli	Fırın bölge sıcaklığı
SV X16	Saha<-> kontrol paneli	Pilot solenoid vana aç komutu
SV X17	Saha<-> kontrol paneli	Pilot solenoid vana aç komutu

4.1.3. Proses emniyet kontrolü

Brülör kontrol sistemi asıl olarak yanmayı kontrol etmek, sistem güvenliğini sağlamak (gaz kaçağı kontrolü, sıcaklık yükselmesi vb.) ve başlangıç-bitiş adımlarını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Eğer tüm güvenlik şartları tamam ise sistem gaz kaçağı kontrolü yapar daha sonra da yanma havası fanını, doğal gaz pilot ve ana vanayı belirli adımlarda enerjilendirir. Sistemin emniyetini artırmak için ilave olarak WEST 6700 sınır kontrolcüsü yanma sistemine entegre edilmiştir. Her bir bölgeden bir termokupl WEST 6700 cihazına direk bağlanmıştır. Alarm limiti olarak da 400 °C belirlenmiştir. WEST 6700 cihazı sıcaklık değerini 400 °C'nin üstünde ölçerse PILZ marka CPU'ya sinyal gönderir ve

fırınları söndürür. Ardından fırın içini temiz hava ile süpürme adımını başlatır. Bunların yanında brülör kontrolcüsü yanma havası basıncını ve doğal gaz vana açıklık oranını da emniyet amaçlı kontrol eder.

Bunların yanında başka bir emniyet için, PILZ marka kontrolcü kullanılmıştır. Bu kontrolcünün görevi ise prosesin emniyet şartlarına uygun olmayan durum olduğunda tüm fırının söndürülmesi ve temiz hava ile süpürülmesidir. Temel olarak her bir bölgenin egzoz çıkışlarındaki akış sensörleri, WEST 6700 kontrolcüden gelen yüksek sıcaklık sinyali, solvent yoğunluk alarm sinyali, brülör sistemlerinden gelen emniyet sinyalleri, her bölgeden gelen yüksek basınç sinyalleri ve Siemens marka ana kontrolcüden gelen bir kısım sinyaller PILZ marka kontrolcüye gelir. Bu sinyaller yazılım kurgusuna göre işlenir. Fırındaki bir bölgenin elektrik otomasyon kontrol diyagramı Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Çizelge 4.3'te ise saha ekipmanları ve bunların teknik bilgileri verilmiştir.



Şekil 4.5. Bir fırın bölgesinin elektrik otomasyon kontrol diyagramı

Çizelge 4.3. Saha ekipmanları ve ekipmanların teknik bilgileri

Saha Ekipmanları	Kontrol Sinyal Tipi	Çalışma aralığı	Sahadaki Fonksiyonu
Egzoz fan motoru (75kW)	Profibus DP	0 - 1450 dev/dk	Egzoz fanını çevirmek
Sirkülasyon fan motoru (45kW)	Profibus DP	0 - 1423 dev/dk	Sirkülasyon fanını çevirmek
K tipi termokupl	mV	(-200)-(+1260)°C	Her bölgenin sıcaklığının ölçümü
Doğal gaz debimetre	Darbe	Darbe/m ³	Tüm fırın bölgelerinin toplam doğal gaz tüketim ölçümü
Egzoz gaz debimetresi	4-20mA	0-90000m ³	Tüm fırın bölgelerinin toplam egzoz gaz akış ölçümü
Pirometre	mV	50-350°C	Şerit sıcaklığı ölçümü
Basınç anahtarı	On/Off	0-1	Fırının her bir bölgesindeki basınç var/yok bilgisi
Temiz hava fan motoru (22kW)	Profibus DP	0-1480 dev/dk	Temiz hava fanını çevirmek
Basınç transimteri	4-20mA	+/-2.5mBar	Fırının her bir bölgesinin iç basıncının ölçümü

4.1.4. Şerit boya kaplama süreci

Şerit boya kaplama prosesinde fırın şerit çıkış sıcaklığı en kritik parametredir. Eğer şerit sıcaklığı set edilen değerden daha düşük olursa şeritte tam kuruma sağlanamamış olur ve şerit hattın çıkışında sarıcı ünitesinde sarılırken boya yapışması görülür. Bu da kalitesizliğe neden olur. Eğer sıcaklık set edilen değerden daha yüksek olursa bu durumda boya yanar. Laboratuvar bükme testinde negatif sonuç verir. Sonuç olarak boya kaplama prosesinin en can alıcı değişkenlerinden biri fırın çıkışı şerit sıcaklığıdır. Şerit sıcaklığını belirtilen tolerans aralığında tutmak için ayarlanan değişkenler; fırın bölge sıcaklıkları, hat hızı ve sirkülasyon fan hızıdır. Bunların yanında aşağıdaki açıklamalar göz önünde bulundurulur.

Açıklama 1: Sirkülasyon fanın hızı artırıldığında, güç tüketimi fan hızının küpüyle doğru orantılı olarak artar. Bundan dolayı, toplam elektrik tüketimi artar. Ek olarak sirkülasyon fanının hızının artımı ısı taşınım etkisini artırır [113]. Diğer taraftan ısı taşınım etkisinin artırılması zayıf izolasyonlu fırın duvarlarında radyasyon yoluyla oluşacak ısı kaybını artırır. Sonuç olarak da fırının duvarlarındaki zayıf izolasyondan kaynaklı fırında kullanılan doğal gaz tüketimi artar.

Açıklama 2: Sirkülasyon hızının artırılmasının pozitif sonuçları, termal homojenlik ve ısı taşınımı olarak sıralanabilir [113]. Proseste amaç, şerit sıcaklığını set değeri civarında tutmaktır. Şerite ısı transferi oranı artırıldığında şerit sıcaklığı artar. Bu nedenle, fırının çıkışındaki şeridin sıcaklık değeri, bölge sıcaklık set değerleri düşürülerek tekrar eski değerine gelir ve bu da doğalgaz tüketiminde azalma ile sonuçlanır.

Açıklama 3: Enerji verimliliği kontrol stratejisinin arkasındaki fikir; sirkülasyon fan hızı artırıldığında şerit sıcaklığı artar. Bundan dolayı da fırın bölge sıcaklıkları düşürülebilir. Diğer taraftan, sirkülasyon fanlarının hızının artırımı elektrik tüketimini ve fırın duvarlarındaki ısı kaybını da artıracaktır. Ek olarak, fırın bölge sıcaklığı düşürüldüğünde doğal gaz tüketimi azalacaktır. Fakat her durumda da toplam elektrik enerjisi ve doğal gaz tüketimi, boya kaplama hattının toplam maliyeti içerisinde. Toplam minimum maliyet sadece tüketim miktarı ile değil, aynı zamanda elektrik ve doğal gaz birim fiyatlarıyla da ilgilidir.

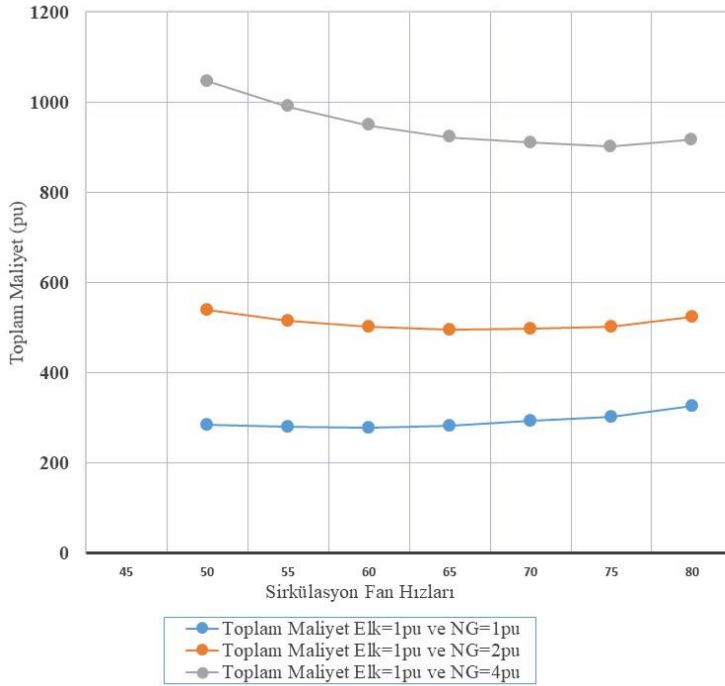
Açıklama 4: Çalışmada fırın sisteminin en büyük kısıtlaması, 8 fırın bölgesinin tamamının doğal gaz tüketimini ölçmek için monte edilmiş tek bir doğal gaz akış ölçere sahip olmasıdır. Bu nedenle bu çalışmada tüm bölgeler tek bölge olarak kabul edilmiştir ve tüm sirkülasyon fanları tek bir fan olarak kabul edilmiştir.

Açıklama 5: Fanların set değerleri aynı değerde olsa bile fan mekanizmalarının aşınması ve yıpranması, sürtünmeler ve mekanik parçalar üzerindeki belirsizlikler nedeniyle yük değişimi olmaktadır. Fanlar aynı olmasına rağmen, yük değişimi nedeniyle her fanın tükettiği enerji miktarında küçük değişiklikler gözlenir.

Açıklama 6: Bu tür fırınlarda doğal gaz ve solvent nedeniyle her zaman patlama riski vardır. Fırınlarda ısıtma, sıcaklığı ve solvent yoğunluğunu güvenli sınırlar içinde tutan güvenlik kontrolleri ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle fırın sistemi üzerinde kurulan güvenlik kontrolleri, kontrolcü performansını kısıtlamaktadır.

Toplam enerji maliyetinin dışbükey olup olmadığını araştırmak için boya kaplama hattında üretim aşamasında bir test yapılmıştır. Test, şerit kalınlığı ve genişliği aynı olduğu gerçek bir sipariş üretimi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hattın hızı sabit tutulmuştur. Sirkülasyon fanları farklı hızlarda çalıştırılırken, bölge sıcaklıkları manipüle edilerek şerit

sıcaklığı kabul edilebilir bir tolerans seviyesinde tutulmuştur. Bu koşullar altında, doğal gaz tüketim ölçümleri ve sirkülasyon fan hızları kaydedilmiştir. Daha sonra tüketim, farklı birim fiyatlar ile çarpılmıştır. Test sonuçları Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Sirkülasyon fan hızına göre maliyet, doğal gaz ve elektrik fiyatlarına göre dışbükey ve dinamiktir. Yani sirkülasyon fan hızı ekstrem noktası, doğal gazın birim fiyatına göre sapmaktadır.

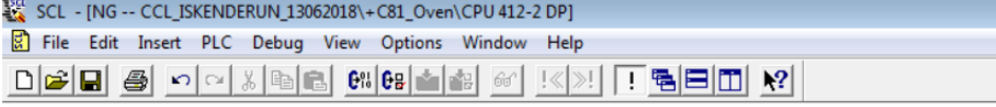


Şekil 4.6. Sirkülasyon fan hızına göre toplam maliyet değişimi

Elektrik birim maliyeti 1 birim ve doğal gaz birim maliyeti 1 birim alındığında minimum toplam enerji maliyeti, sirkülasyon fan hızının maksimum kapasitesinin %60'ı olduğunda elde edilmiştir. Eğer doğal gaz birim maliyeti 4 birime çıkarılırsa minimum toplam enerji maliyeti sirkülasyon fan hızı %75 civarında iken elde edileceği görülmüştür. Bundan dolayı enerji birim maliyet değişimine göre minimum toplam maliyet noktası kaymaktadır.

Geliştirilen EAA için hazırlanan programda harici bir fiziksel işlemci kullanılmamıştır. Mevcut fırın ana kontrolcüsü, Siemens marka CPU 412, kullanılmıştır. EAA program blokları Simatic Manager programında yazılmıştır. Programlama dilleri olarak Ladder, Structured Control Language (SCL), ve Statement List (STL) kullanılmıştır. Doğal gaz hesaplama fonksiyonu için SCL programlama dilinin örnek bir ekran görüntüsü Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Sistem parametrelerinin kayıt altına alınması ve görselleştirilmesi

için iba Analyzer yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışmada, tüm grafiksel sonuçlar iba Analyzer kullanılarak elde edilmiştir.



```

SCL - [NG -- CCL_ISKENDERUN_13062018\+C81_Oven\CPU 412-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help
[Icons]

IF RESET = TRUE THEN //RESET_ACTIV := RESET;

    last_NG := 0.0;
    Time_X := 0.0;
    n := 0;
    // current_NG := 0.0;
    SUM_NG := 0.0;
    NG_m3_h := 0.0;
    Time_Count := false;
END_IF;
IF ENABLE = TRUE THEN

    //First Cycle

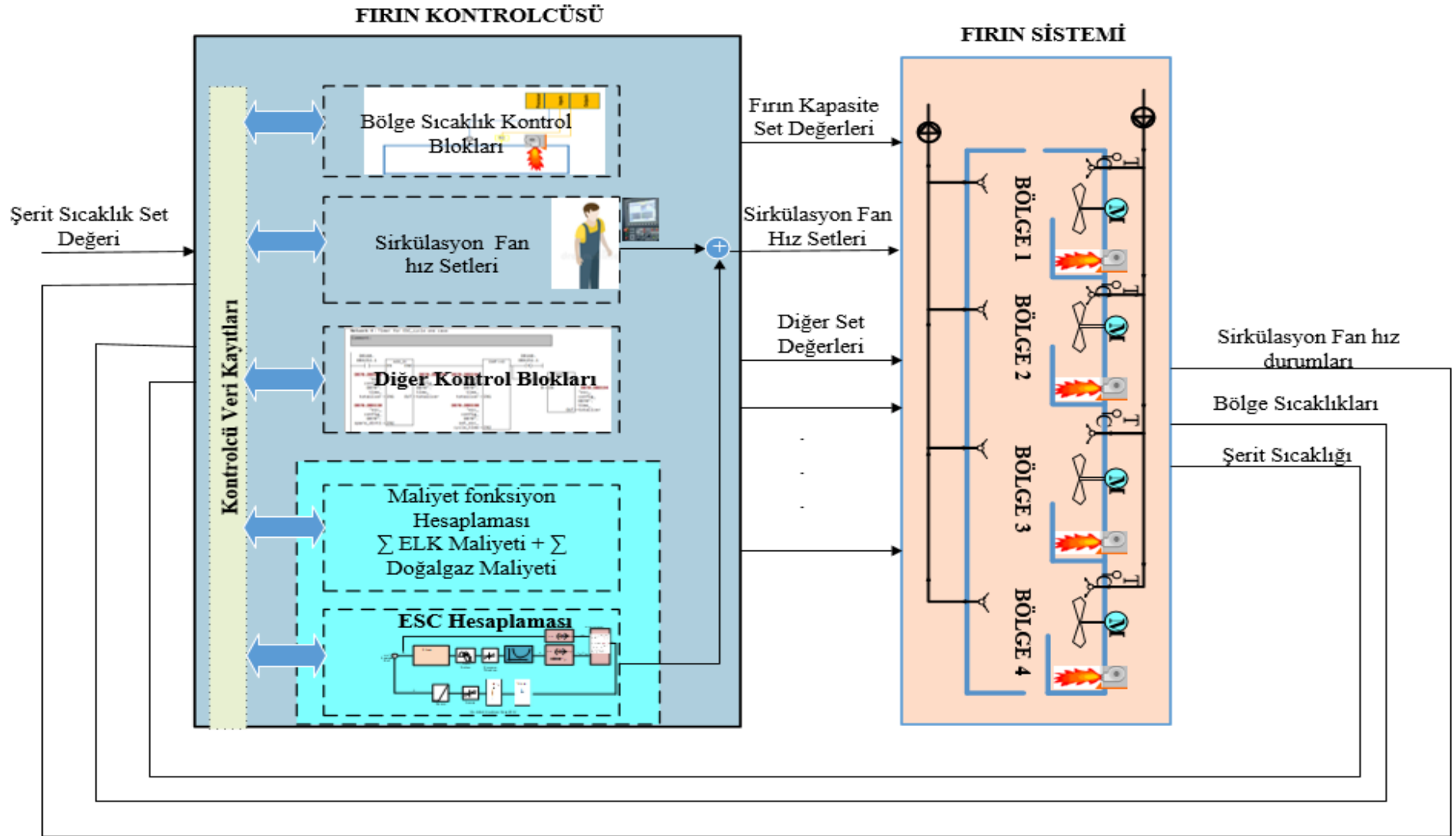
    IF n = 0 THEN
        last_NG := current_NG;
        SUM_NG := 0.0;
        NG_m3_h := 0.0;
        Time_X := 1.0;
        n := 1;
    ELSE
        IF Time_Count = TRUE THEN
            Time_X := Time_X + 1.0;
        END_IF;
        Delta_NG := current_NG - last_NG;
        IF (Delta_NG > 0.0) THEN
            Time_Count := TRUE;
            SUM_NG := SUM_NG + Delta_NG;
            last_NG := current_NG;
            IF (Time_X >= 1200.0) THEN
                NG_m3_h := SUM_NG / Time_X * 3600.0;
                calc_ok_out1 := TRUE;
                Time_Count := false;
                GOTO finish ;
            END_IF;
        END_IF;
    END_IF;
END_IF;

```

Şekil 4.7. SCL yazılım kodu ile doğal gaz tüketim hesaplaması

EAA programı ve fırın programı aynı işlemcide bulunduğu için, veri transferine ve ek işlemciye gerek duyulmamıştır. Böylece yatırım maliyeti de düşürülmüştür. EAA program blokları 1 sn aralıklarla periyodik olarak çağrılmıştır. Sistem kontrol blok diyagramı Şekil 4.8’de verilmiştir.

Yukarıda sayılan özelliklerden dolayı, tez çalışmasında kullanılan fırın birçok farklı parametreye sahiptir. Isıtma bakımından ele alındığında ise, ısı girişi ve çıkışları arasında yaklaşık bir matematiksel modeli Ek-1’de verildiği gibi elde edilebilir.



Şekil 4.8. Fırın sistemi kontrol blok diyagramı

4.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında iki enerji girişi olan ve demir çelik endüstrisinde çelik şerit üretiminde kullanılan fırın sisteminin enerji maliyeti optimizasyonu için literatürde yer alan ekstremum arama algoritması ele alınmıştır. Ancak her gerçek sistemde olduğu gibi ele alınan fırın sisteminin optimizasyonunda dikkate alınması gereken birçok faktör bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu bölümün ilk kısmında ekstremum arama algoritmasının uygulanmasında karşılaşılan zorluklar ve bunların çözümleri sunulmuştur. Ardından önerilen değiştirilmiş eğim tabanlı ekstremum arama algoritmasının detayları verilmiştir.

4.2.1. Ekstremum arama algoritmasında karşılaşılan zorluklar

Eğim tabanlı EAA fırına uygulanırken, bazı zorluklarla karşılaşılmıştır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için eğim tabanlı EAA'da çeşitli değişiklikler yapılmıştır. Karşılaşılan zorluklar ve çözümleri aşağıda sıralanmıştır:

Zorluk 1: Eğim tabanlı EAA'nın integral hesaplamasına göre, eğer hesaplanan adım büyüklüğü çok büyük olursa, sirkülasyon fan hız değişimi büyük olacaktır. Bu durumda da şerit sıcaklık değişimi kabul edilebilir toleransın dışına çıkacaktır. Sonuç olarak da sıcaklık salınımindan dolayı kalite problemi yaşanabilecektir.

Çözüm 1: Yukarıda bahsedilen dar boğazı aşmak için adım artış/azalış değeri, eklenen limit fonksiyonu ile sınırlandırılmıştır. Aynı zamanda sirkülasyon fan hızı değişimi için ek bir rampa fonksiyonu yazılmıştır. Bu fonksiyonla da hem sıcaklık ani yükselmesinin önüne geçilmiş olacak hem de sistemin mekaniğine zarar verme riski kaldırılmış olacaktır.

Zorluk 2: Değişikliklere cevap vermek için tüm sistemlerin bir ataleti vardır. Uygulamada sirkülasyon fan hızlarının değişiminde şerit sıcaklığı değişim sonucu bir müddet sonra gözükür. Bu gecikmenin ana nedenleri; fırın boyu, pirometre konumu, hat hızı ve fan hızı rampa süresidir.

Çözüm 2: Fan hızları manuel olarak farklı hat hızlarında artırılmıştır. Sistemin cevap verme süreleri farklı hızlarda ölçülmüştür. Daha sonra da tüm denemelerde elde edilen cevap verme sürelerini kapsayacak bir gecikme süresi belirlenmiştir.

Zorluk 3: Fırın hattında sadece bir adet doğal gaz debimetresi olduğundan fırının tüm bölgelerinin doğal gaz tüketimlerini ayrı ayrı ölçmek mümkün değildir. Bu yüzden, her bir bölgenin sıcaklığını ve sirkülasyon fan hızını kontrol etmek zordur.

Çözüm 3: Tüm fırın bölmeleri bir sistem gibi düşünülmüştür. Bundan dolayı da tüm sirkülasyon fanları bir fan gibi düşünülmüştür. Böylelikle sirkülasyon fanlarının tamamı aynı devirde çalıştırılacaktır.

Zorluk 4: Doğal gaz debimetresi çevrim içi ölçüm yapmamaktadır. Mevcut debimetre darbe/m³ olarak ölçmektedir. Debimetre her 30 saniyede fırın CPU'suna darbe serisi olarak tüketim miktarını göndermektedir.

Çözüm 4: Doğal gaz tüketimini her 20 dakikada bir ölçmek için kaskat tip iki fonksiyon bloğu yazılmıştır. Kaskat yapının içerdeki fonksiyon bloğu her 30 saniyenin sonunda (T süresinde) üretilen toplam darbe sayısını verir. Fan hızlarının değişmesinden ve fırın sıcaklığı sabitlendikten sonra, dış fonksiyon 20 dakikalık (40T) zaman aralığındaki toplam doğalgaz tüketimini hesaplar. Ortalama hesaplama 20 dakikadan fazla artarsa, daha kesin bir değer elde edilir. Öte yandan, değiştirilmiş EAA'nın adım süresi çok fazla uzar ve optimizasyonda daha fazla gecikmeye neden olur. Bu nedenle, optimum bir değer olarak, 20dk öngörülmüştür. Bu amaçla m³/saat cinsinden toplam gaz tüketimi, NG_h , aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$$NG_h = 3 \times \sum_{T=1}^{40} \sum_{t=1s}^{30s} P(t) \quad (4.1)$$

burada $P(t)$ t anındaki darbeyi gösterir, $P(t) = \{0,1\}$.

Eğim tabanlı EAA yukarıda bahsedilen zorlukların üstesinden gelecek şekilde geliştirilmiştir. Fırının toplam enerji maliyeti hem elektrik hem de doğal gaz için birim olarak sembolik fiyatlarla hesaplanmıştır.

4.2.2. Doğalgaz tüketiminin önerilen EAA için hesaplanması

Aşağıda kısım A ve kısım B’de doğal gaz tüketimini daha hassas hesap etmek için yazılan program bloklarının sözde kodları ve açıklamaları verilmiştir.

Kısım A: Her 30 saniyede tüketilen doğal gaz tüketimi 0,5 saniye aralıklarla darbeler şeklinde gelir. Son 30 saniyedeki doğal gaz darbeleri “Son_Döngü_Darbe_Toplamı” değişkeninde toplanır. Toplama işlemi bittikten sonra “Son_Döngü_Darbe_Toplamı” değişkenindeki değer “Toplam_NG_m3” değişkenine bir döngülük eklenir. Bu değişken doğal gazın ana toplayıcısıdır. Daha sonra gelecek 30 saniyelik darbe sayımı için “Son_Döngü_Darbe_Toplamı” değişkeni resetlenir.

Her 30 saniyedeki doğal gaz debimetresinin darbelerini saymak için yazılan Sözde kodu

```

IF Darbe Aktif ise THEN

    “Son_Döngü_Darbe_Toplamı” değişkenine doğal gaz darbelerini toplama.

IF Doğal gaz darbeleri 2 saniyeden uzun süre durur ise THEN

    “Son_Döngü_Darbe_Toplamı” değişkenindeki değeri “Toplam_NG_m3” değişkenine ekle

    “Son_Döngü_Darbe_Toplamı” değişkenini resetle

END_IF

END_IF

```

Darbe Aktif: Doğal gaz darbeleri başladığında değeri bir olan değişken.

Son_Döngü_Darbe_Toplamı: Son 30 saniyedeki darbelerin toplamı.

Toplam_NG_m3: Metreküp olarak toplam doğal gaz tüketim miktarı.

Kısım B: “Toplam_NG_m3” değişkenindeki değeri kullanarak saatlik doğal gaz tüketimini hesaplar. Programın birinci döngüsünde “Toplam_NG_m3” değişkenindeki değer *Son_NG* değişkenine kaydedilir. “Toplam_NG_m3” değişkenindeki değer yeniden değişince program başlangıç zamanını (Başlama_Zamanı) kaydeder ve *Son_NG* değişkenindeki değer’i “Toplam_NG_m3” değişkenindeki değerden çıkarır ve sonucu “Son_20_dk_NG” değişkenine ekler. Sonrasında tekrar “Toplam_NG_m3” değişkenindeki değer *Son_NG* değişkenine kaydedilir. Bu döngü 20 dakika boyunca devam eder. 20 dakika sonra sistem “Toplam_NG_m3” değişkenindeki değerin değişimini bekler. Bu değer ilk değişiminde

m³/saat hesaplamasındaki zaman aralığını hesap etmek için mevcut zamanı Bitiş_Zamanı değişkenine kaydederek toplam geçen zamanı hesaplar. Aynı zamanda son hesaplanan farkı da “Son_20_dk_NG” değişkenine ekler. Daha sonra bu bilgiler ile saatlik ortalama doğal gaz tüketimini hesaplar.

Saatlik doğal gaz tüketiminin hesaplamasının Sözde kodu

IF Reset aktif ise **THEN**

Başlama_Zamanı, Bitiş_Zamanı, Son_20_dk_NG, M3_Saat değişken değerlerini sıfırla.

END_IF

IF NG değer değişimi algılandı ise ve İlk Döngü ise **THEN**

Başlama_Zamanı, Bitiş_Zamanı, Son_20_dk_NG, M3_Saat değerlerini sıfırla

Toplam_NG_m3 değerini Son_NG değişkenine ata.

END_IF

IF NG değer değişimi algılandı ise ve İlk Döngü değil ise **THEN**

Başlama_Zamanı değişkenine mevcut zamanı ata.

NG tüketimini, Toplam_NG_m3 değişkeninden Son_NG değişken değerini çıkararak sonucu Son_20_dk_NG değişkenine eklemeye başla.

Toplam_NG_m3 değerini Son_NG değişkenine ata.

END_IF

IF Başlama_Zamanı değerinden sonra 20dk dan fazla zaman geçti ve NG değeri değişti ise **THEN**

Bitiş_Zamanı değişkenine mevcut zamanı ata

Son_20_dk_NG değeri ile Toplam geçen zamanı (Bitiş_Zamanı - Başlama_Zamanı) kullanarak NG tüketimini m³/saat cinsinden hesap et ve NG_m3_Saat değişkenine ata. Hesaplama_Tamam bitini aktif et.

END_IF

Başlama_Zamanı: Saatlik doğal gaz tüketimini hesaplamaya başlama zamanı.

Bitiş_Zamanı: Saatlik doğal gaz tüketimini hesaplamayı bitirme zamanı.

Toplam_NG_m3: Kümülatif doğal gaz tüketim değeri.

Son_NG: Her doğal gaz değişimindeki son kümülatif değer.

NG_m3_Saat: Hesaplanan saatlik doğal gaz tüketimi.

Son_20_dk_NG: Son yirmi dakikadaki tüketilen doğal gaz miktarı.

4.2.3. Önerilen değiştirilmiş eğim tabanlı EAA (DEAA)

Bu çalışmada, eğim tabanlı EAA'yı gerçek fırın sistemine adapte etmek için bir kısım değişiklikler yapılmıştır. Geliştirilen DEAA'nın akış şeması Şekil 4.9'da verilmiş ve her bir aşama aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

Adım 1: İlk olarak, bazı konfigürasyon parametreleri ayarlanır. Bu parametreler uygulanacak sisteme göre farklı değerler alır. Uygulanan sistem için bazı önemli konfigürasyon parametre değerleri Çizelge 4.4'te görülmektedir.

Çizelge 4.4. Uygulanan sistemin konfigürasyon tablosu

Parametre No	Değişken İsmi	Veri Tipi	Değeri	Açıklama
Parametre 1	Hata_aralığı	REAL	2,00E+00	Şerit sıcaklığı tolerans aralığı (penceresi)
Parametre 2	Uyartım_adım_artışı	REAL	5,00E+00	EAA ilk aktif edildiğinde sistemin ilk uyartım adımı
Parametre 3	k_p	REAL	1,00E+00	İntegralin kazanç parametresi
Parametre 4	U_artış_maks_adım	REAL	8,00E+00	Sirkülasyon fan maksimum artış adımı
Parametre 5	U_azalış_maks_adım	REAL	- 8,00E+00	Sirkülasyon fan maksimum düşüş adımı
Parametre 6	U_maks_limit	REAL	1,00E+02	Sirkülasyon fanlarının maksimum hız limiti
Parametre 7	U_min_limit	REAL	5,00E+01	Sirkülasyon fanlarının minimum hız limiti
Parametre 8	Değer_uygun_aralıkta_set_süresi	TIME	T#30S	“Şerit sıcaklığı tolerans içerisinde” için gecikme zamanı
Parametre 9	Sürekli_arama_periyodu	TIME	T#2M	Sürekli arama modunda değer değiştirme periyodu
Parametre 10	Sürekli_aramada_hız_değişim_adımı	REAL	4,00E+00	Sürekli arama modu aktif iken periyodik olarak hız değişim adımı
Parametre 11	Atalet_gecikme_süresi	TIME	T#3M	Ataleti yenmek için gerekli gecikme zamanı
Parametre 12	NG_hesaplama_süresi	REAL	T#20M	Doğal gaz ölçümü için bekleme zamanı
Parametre 13	Elk_birim_fiyat	REAL		Elektrik enerjisi birim maliyeti
Parametre 14	NG_birim_fiyat	REAL		Fırınlardan doğal gaz birim maliyeti

Adım 2a: Algoritmanın ilk çevriminde sistemin mevcut performans fonksiyonu hesaplanır ve sirkülasyon fanlarına uyartım adımı artış değeri (Parametre 2) eklenir. Sirkülasyon fan hızını değişmesiyle, şerit sıcaklığı değişir. Şerit sıcaklığını set değerine getirmek için fırının kontrolörü, brülörlerin doğal gaz vanası pozisyonu için yeni kontrol girişi üretir. Bu prosedür, toplam maliyetin büyüklüğünde bir değişikliğe neden olur. Şekil 4.11'deki bir anahtar, performans fonksiyon bloğundan önce tanıtılmıştır. Anahtarın işlevi, sirkülasyon fan hızını değiştirdikten sonra yeni bir kararlı durum koşuluna kadar DEAA'yı durdurmaktadır. Periyot, sistemin ataleti için gereken sürenin (Parametre 11), ardından şerit sıcaklığının kabul edilebilir tolerans aralığı içinde olması için gereken sürenin (Parametre 1) ve son olarak şerit sıcaklığının sabit kaldığından emin olmak için gerekli zamanın (Parametre 8) bitmesiyle bulunur.

Adım 2b_1: Sonraki çevrimlerde y ve u 'nun eğim değerleri hesaplanır. Bu değerleri kullanarak, \mathcal{E}_y , \mathcal{E}_u , \mathcal{E} performans fonksiyonunun eğimi, σ , elde edilir ve ardından σ_i 'yi elde etmek için bir kazanç (Parametre 3) ile çarpılır. σ_i , Eş. 4.6 dikkate alınarak bir aralıkla sınırlandırılır. Daha sonra integral kullanılarak u_0 bulunur.

Adım 2b_2: u_0 ve u_c toplanarak \hat{u} elde edilir. Daha sonra \hat{u} değerinin daha yumuşak değişimi için bir rampa fonksiyonu uygulanır. Rampa fonksiyonu çıkışı u_r olarak adlandırılır. Son olarak ve sirkülasyon fan hızları için yeni bir referans değeri elde etmek üzere u_{ref} ve u_r toplanır ve sistem Adım 2a'da açıklandığı gibi anahtarın kapanmasını bekler.

Adım 3: Anahtar kapandıktan sonra doğal gaz akış hesaplaması için 12 no'lu parametrede belirtilen süre kadar beklenir.

Adım 4a: U değeri limite ulaşmamışsa veya \mathcal{E}_y değeri sıfır değilse program Adım 2'ye geçer.

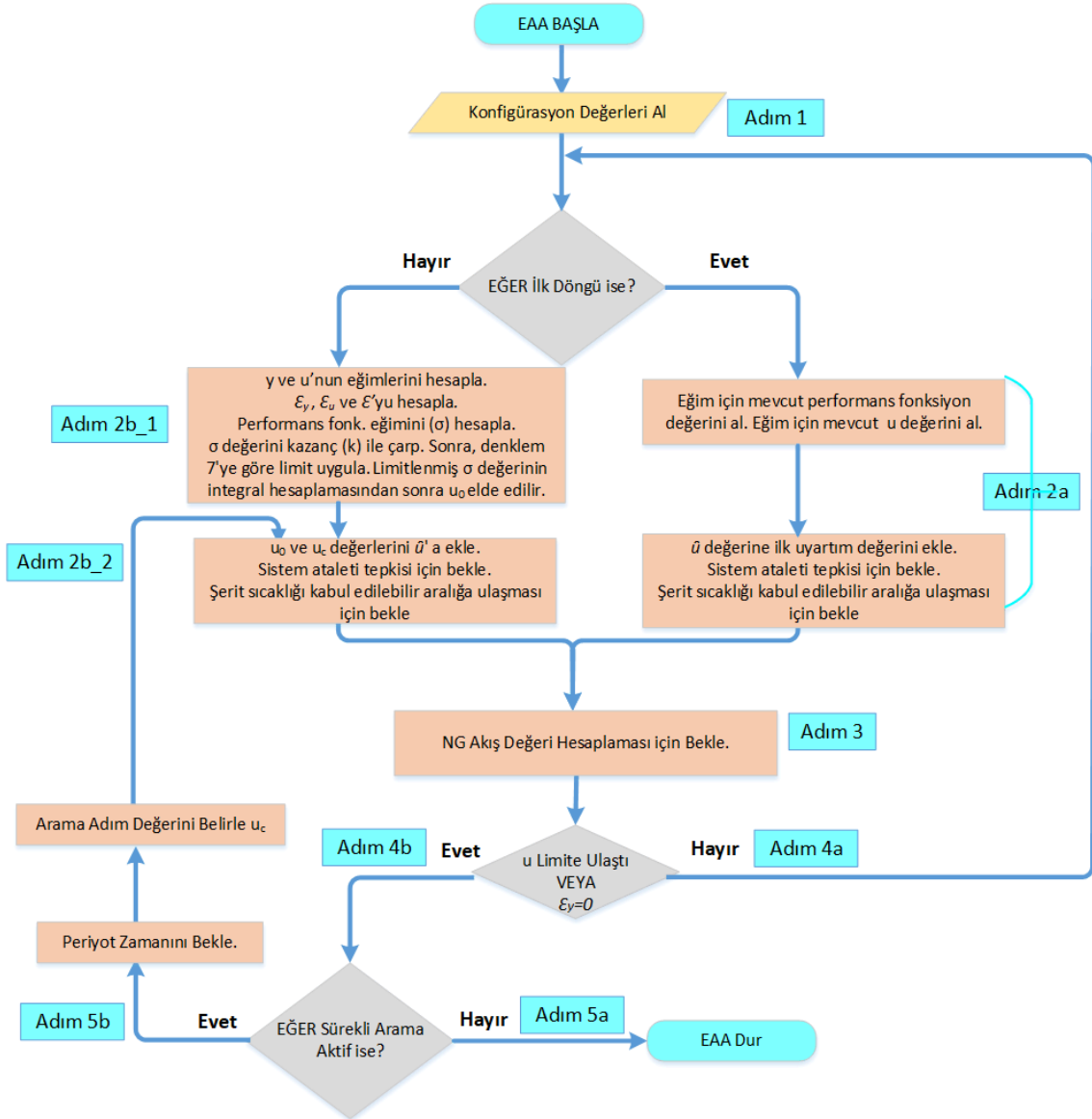
Adım 4b: U değeri limite ulaşmışsa veya \mathcal{E}_y değeri sıfır ise program Adım 5'e geçer.

Adım 5a: Sürekli arama aktif değilse DEAA durur. Bu opsiyonel olarak sunulmuştur. Her ne kadar geleneksel bir EAA'da sistem, ekstrem noktaya yakınsasa bile sürekli olarak

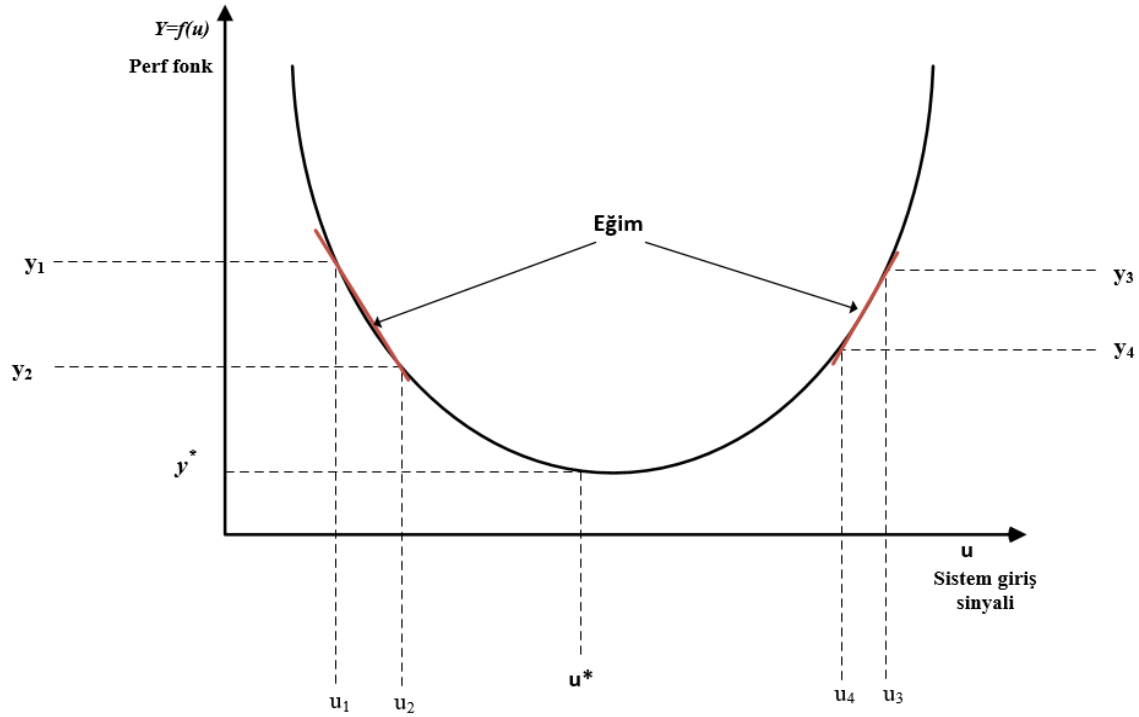
arama yapsa da; bu çalışmada gerçek sistem operatörler tarafından yönetildiği için opsiyonel olarak tanımlanmıştır.

Adım 5b: Eğer sürekli arama aktif ise, parametre 9'da belirtilen periyotlarda u_c , Eş. 4.7'ye göre belirlenir. Sonra da adım 2b_2'ye atlar.

Dışbükey bir performans fonksiyonu ve sistem giriş grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. Eğim ve adım yönü hesaplanırken eğim işaretinin tanımlanması önemlidir. Aksi takdirde, sistem yanlış yöne gider. Algoritma, sirkülasyon fan hızlarına uygulanan optimum kontrol girişini, u^* bulmaya çalışır ve hesaplanan performans fonksiyonu değeri, bilinmeyen optimum değerine sürülür $y^* = f(u^*)$. Her durumda, ana hedef $u^* - y^*$ değerlerine yaklaşımdır.



Şekil 4.9. Tasarlanan DEAA'nın akış diyagramı



Şekil 4.10. Dış bükey giriş sinyaline göre performans fonksiyonu

Performans fonksiyonunun eğiminin yönünü bulmak için, G_y , bir örnekleme zaman aralığında, Δn , signum fonksiyonu kullanılabilir.

$$\varepsilon'_y = \text{sgn}(G_y) \quad (4.2)$$

$$\text{Burada } G_y = \frac{\text{Maliyetteki_değişim}}{\text{Örnekleme_aralığı}} = \frac{y_n - y_{n-\Delta n}}{\Delta n}.$$

Aynı zamanda giriş sinyali u 'nun yönü için Eş. 4.3 takip edilebilir

$$\varepsilon_u = \text{sgn}(G_u) \quad (4.3)$$

$$\text{Burada } G_u = \frac{\text{Kontrol_girişindeki_değişim}}{\text{Örnekleme_aralığı}} = \frac{u_n - u_{n-\Delta n}}{\Delta n}, n: \text{örnek zamanı}$$

Gerçek sistemlerdeki gürültü ve çevresel faktörler nedeniyle, sistem giriş kontrol sinyalindeki küçük değişiklikler her zaman doğru bir performans fonksiyonu hesaplaması vermeyebilir. Ekstremum noktasına yaklaştıkça performans fonksiyonunun eğimi

azalacağından, \hat{u} değerindeki değişim de küçülecektir. Bu sorunu önlemek için performans fonksiyonunun eğimine bir ölü zaman aralığı eklenebilir.

Δ değerini ölü zaman aralığının büyüklüğü olarak kabul edelim. Bu durumda \mathcal{E}_y aşağıdaki kurala göre değer alır:

$$\mathcal{E}_y = \begin{cases} 0 & \text{eğer } |\Delta| > |G_y| \\ \mathcal{E}'_y & \text{eğer } |\Delta| < |G_y| \end{cases} \quad (4.4)$$

Yukarıdaki bilgiyi kullanarak \mathcal{E} aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$\mathcal{E} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \mathcal{E}_u \mathcal{E}_y < 0 \\ 0 & \text{eğer } \mathcal{E}_u \mathcal{E}_y = 0 \\ -1 & \text{eğer } \mathcal{E}_u \mathcal{E}_y > 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Çizelge 4.5'te σ ve \hat{u} 'yu elde etmek için bir özet tablo oluşturulmuştur. \mathcal{E} ve G_y ' yi elde ettikten sonra performans fonksiyonunun eğimi, σ , aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma = \mathcal{E} |G_y| \quad (4.6)$$

Çizelge 4.5. Yerel minimizerin özet tablosu

\mathcal{E}_y	\mathcal{E}_u	$\sigma = \mathcal{E} G_y $	\hat{u}
-	-	-	azalır
-	+	+	artar
+	-	+	artar
+	+	-	azalır
0	*	0	değişmez

İntegratör, performans fonksiyonunun eğimini, σ , sıfıra götürmek için kullanılır. Yaklaşma oranı bir kazanç faktörü (kp) tarafından belirlenir. Kontrolcülerde integral wind-up problemi, uygulamalı entegratörlerde iyi bilinen bir durumdur [114]. kp 'nin küçük değer alması yaklaşma hızını etkilediğinden, kp 'nin büyük seçilmesi gerekir. Fakat gereğinden çok büyük seçilmesi de sistemi olumsuz etkileyebilir. kp 'nin gereğinden yüksek seçildiği zaman σ limit fonksiyonlarıyla da kısıldığından sistemi olumsuz etkilemesi önlenmiştir.

Fakat limit fonksiyonu wind-up problemini doğuracağından bu problemin üstesinden gelmek için, integrali alınmış σ değeri başlangıçta Eş. 4.7'deki şartları sağlayacak şekilde sınırlandırılır.

$$\overline{\sigma_i(n+1)} = \begin{cases} \sigma_i(n) & \text{eğer } u_{\text{inc_max_step}} \geq \sigma_i(n) \geq u_{\text{dec_max_step}} \\ u_{\text{inc_max_step}} & \text{eğer } \sigma_i(n) > u_{\text{inc_max_step}} \text{ (Parametre 4)} \\ u_{\text{dec_max_step}} & \text{eğer } \sigma_i(n) < u_{\text{dec_max_step}} \text{ (Parametre 5)} \\ u_{\text{max_limit}} - u(n) & \text{eğer } (u(n) + \sigma_i(n)) > u_{\text{max_limit}} \text{ (Parametre 6)} \\ u_{\text{min_limit}} - u(n) & \text{eğer } (u(n) + \sigma_i(n)) < u_{\text{min_limit}} \text{ (Parametre 7)} \end{cases} \quad (4.7)$$

Burada;

$\sigma_i(n)$: Eğim σ ile kazanç kp 'nin çarpımının sonucu,

$\overline{\sigma_i(n+1)}$: Sınırlandırılmış σ_i 'nin yeni değeri,

$u_{\text{inc_max_step}}$: Sirkülasyon fanlarının maksimum hız artış adımı (Parametre 4),

$u_{\text{dec_max_step}}$: Sirkülasyon fanlarının maksimum hız azalış adımı (Parametre 5),

$u_{\text{max_limit}}$: Sirkülasyon fanlarının maksimum hız limiti (Parametre 6),

$u_{\text{min_limit}}$: Sirkülasyon fanlarının minimum hız limiti (Parametre 7),

$u(n)$: Sirkülasyon fanlarının hız set değeridir.

Performans fonksiyonunun ekstrem noktası, u 'nun izin verilen çalışma aralığının dışında olabilir. Bu nedenle, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, bu koşullar altında sürekli arama yapmak için ek bir program bloğu yazılmıştır. Sürekli arama bloğu, Eş. 4.4'te belirtilen \mathcal{E}_y 'nin sıfır olduğu zaman veya son kontrol giriş değeri, u , izin verilen çalışma aralığının dışında olduğu zaman aktif olur.

Yeni kontrol girişi u_c 'yi aramaya devam etmek için Eşitlik 4.8'deki dört durum vardır:

$$u_c(n+1) = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} u_c(n) - u_{change} \\ u_{c_dir} = -1 \end{array} \right\} \text{eğer } u(n) \geq u_{max_limit} - \Delta \\ \left. \begin{array}{l} u_c(n) + u_{change} \\ u_{c_dir} = 1 \end{array} \right\} \text{eğer } u(n) \leq u_{max_limit} + \Delta \\ \left. \begin{array}{l} u_c(n) + u_{change} \\ u_{c_dir} = 1 \end{array} \right\} \text{eğer } u(n) < (u_{max_limit} - \Delta) \text{ ve } (u(n) > u_{min_limit} + \Delta) \text{ ve } u_{c_dir} \leq 0 \\ \left. \begin{array}{l} u_c(n) - u_{change} \\ u_{c_dir} = -1 \end{array} \right\} \text{eğer } u(n) < (u_{max_limit} - \Delta) \text{ ve } (u(n) > u_{min_limit} + \Delta) \text{ ve } u_{c_dir} > 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Burada;

$u_c(n)$: Sürekli arama fonksiyonu ile elde edilen değer,

u_{change} : Sürekli arama fonksiyonu aktif olduğu zaman periyodik olarak hız değişim adımı (Parametre 10),

$u_c(n+1)$: u_c 'nin yeni değeri,

u_{c_dir} : Periyodik olarak her iki tarafı da aramak için yön tanımlama,

Δ : Ölü zaman aralığının skaler büyüklüğüdür.

Son olarak u_c ve u_0 'ın toplamı ile \hat{u} elde edilir. Otomasyon yazılımında rampa fonksiyonu bir parametrenin önceki değerinden yeni değerine kademeli değişimini sağlar [114]. Bu sistemde rampa fonksiyonu, belirlenen zaman aralığında \hat{u} 'ın önceki değerinden yeni \hat{u} değerine aşağıdaki kural çerçevesinde bir değer üretir:

$$\Delta \hat{u} = \hat{u} - \hat{u}_{\text{önceki}} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \hat{u}_r &= \hat{u}_{\text{önceki}} + \sum_{t=1}^{t_{ramp}} \frac{\Delta \hat{u}}{t_{rampa}} \\ &= \hat{u}_{\text{önceki}} + \Delta \hat{u} \end{aligned} \quad (4.10)$$

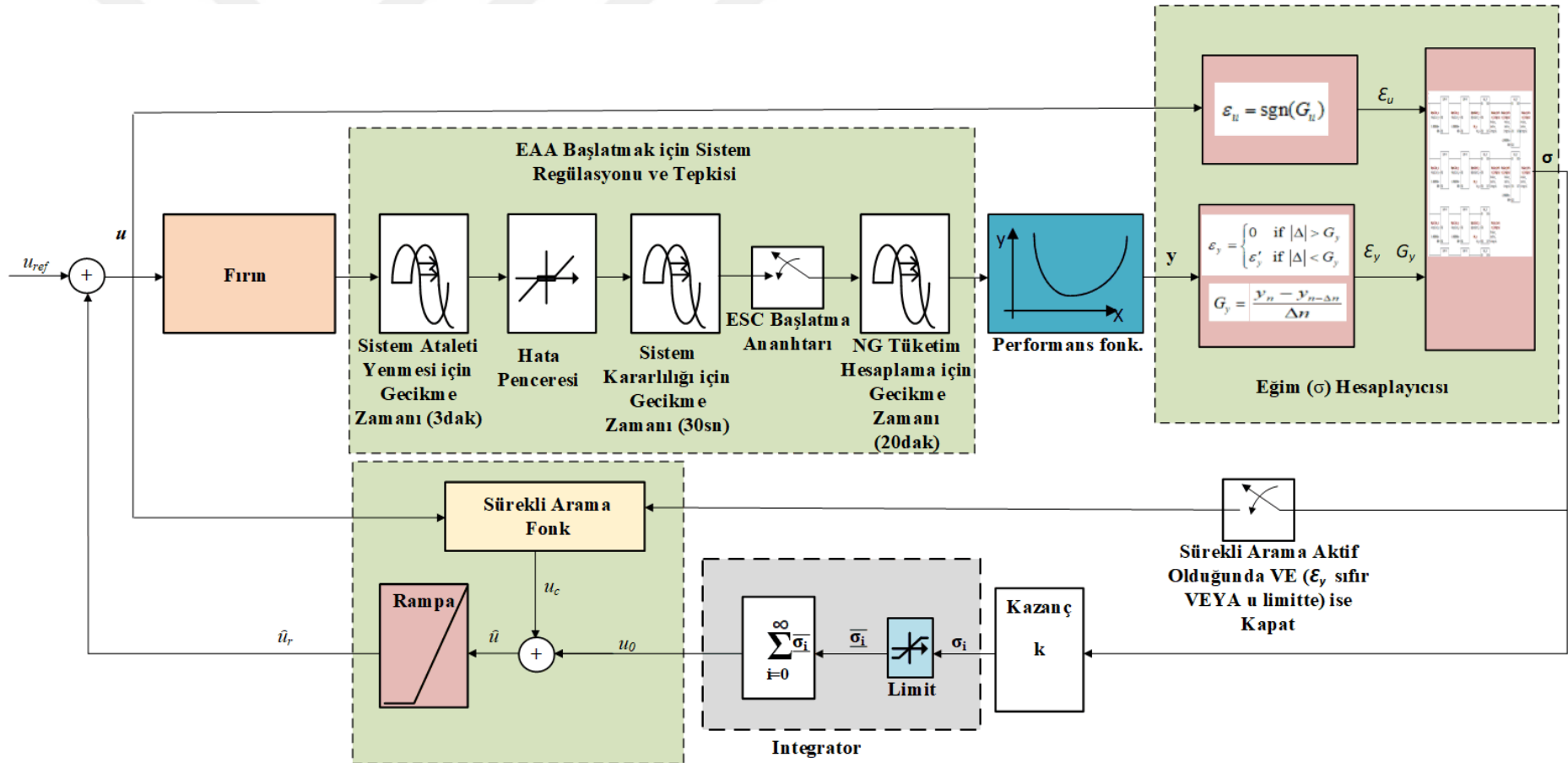
Rampa fonksiyonundan sonra, \hat{u}_r elde edilir. Sistem kontrol girişi u aşağıdaki formüle göre elde edilir:

$$u = u_{ref} + \hat{u}_r \quad (4.11)$$

Sisteme yeni kontrol girişi, u , uygulandıktan sonra sirkülasyon fan hızları değişir. Ardından, durumu düzenlemek ve kararlı bir durum elde etmek için iki tür gecikme tanıtılır. Algoritmanın bu aşamasında, sistemin ataletine sistem cevap verene kadar 3 dakika beklenir. 3 dakika sonra, fırın kontrolcüsü şeridin sıcaklık set değerini sağlar ve ardından stabiliteyi sağlamak için 30 saniye beklenir. Bu durumlar gerçekleştikten sonra, anahtar kapanır. Ardından, doğal gaz tüketimi hesaplaması başlar. Doğal gaz tüketim oranının ortalama $m^3/saat$ olarak hesaplanması için 20 dakika zaman gecikmesi eklenir. Son olarak, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, doğal gaz maliyeti ve sirkülasyon fanı elektrik maliyeti dahil olmak üzere performans fonksiyonunun yeni büyüklüğü hesaplanır.

Literatürde, eğim tabanlı EAA tipleri küçük yapısal farklılıklar gösterir [55, 57, 83–85, 115–118]. Tasarlanan DEAA, üzerinde çalışma yapılan fırının karakteristiğine özgü aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Farklı bir kontrol girişi uygulandıktan sonra fırın sisteminin düzenlenmesi ve kararlılığı, birbirini takip eden üç zaman gecikmesine bağlıdır.
- Eğim hesaplayıcı, sistem kararlı olduktan sonra performans fonksiyonunun eğimini bulur.
- Sistem kontrol sinyali değişimi ölü zaman aralığında ise, tasarlanan algoritmanın ekstrem noktayı sürekli aramasını sağlamak için eğim ve kontrol sinyalinin önceki değerleri de göz önünde bulundurularak Eş. 4.8'deki kontrol giriş sinyali uygulanır.
- Sistem gerçek olduğundan, kontrol girişinin eski değerinden yeni değerine bir rampa fonksiyonu ile gerekli düzgün değişim elde edilir.
- Sistemin kalite olarak problem yaşamaması için artış adımının limitlenmesinden kaynaklı oluşabilecek wind up problemini ortadan kaldırmak için Eş. 4.7'deki kontrol bloğu eklenmiştir.



Şekil 4.11. Değiştirilmiş eğim tabanlı EAA'nın blok diyagramı

4.2.4. Kararlılık

Fırında ısıtma sağlayan sekiz bölgede kullanılan brülörler sınırlı kapasiteye sahip olup altı tanesi 860kW kapasiteli iki tanesi ise 1750kW kapasitelidir ve ayarlanan bölge sıcaklığının korunması fırının mevcut otomasyon sistemi ile sağlanmaktadır. Ayrıca, her bir bölgede bulunan fanlar %50 ile %85 arasında kapasitede çalıştırılmaktadır. Bu çalışma aralığında fırından geçen çelik şeridin her bölgede aldığı ısı enerjisi de sınırlıdır.

Sınırlı girişleri olan fırının çelik şeride aktardığı ısı enerjisi sabit olduğundan, çelik şeridin çıkış sıcaklığı da sınırlıdır. Dolayısıyla, fan hızlarının değişimi ile maliyet minimizasyonu yapan değiştirilmiş eğim tabanlı EAA algoritması sınırlı giriş – sınırlı çıkış kararlılığı özelliği göstermektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

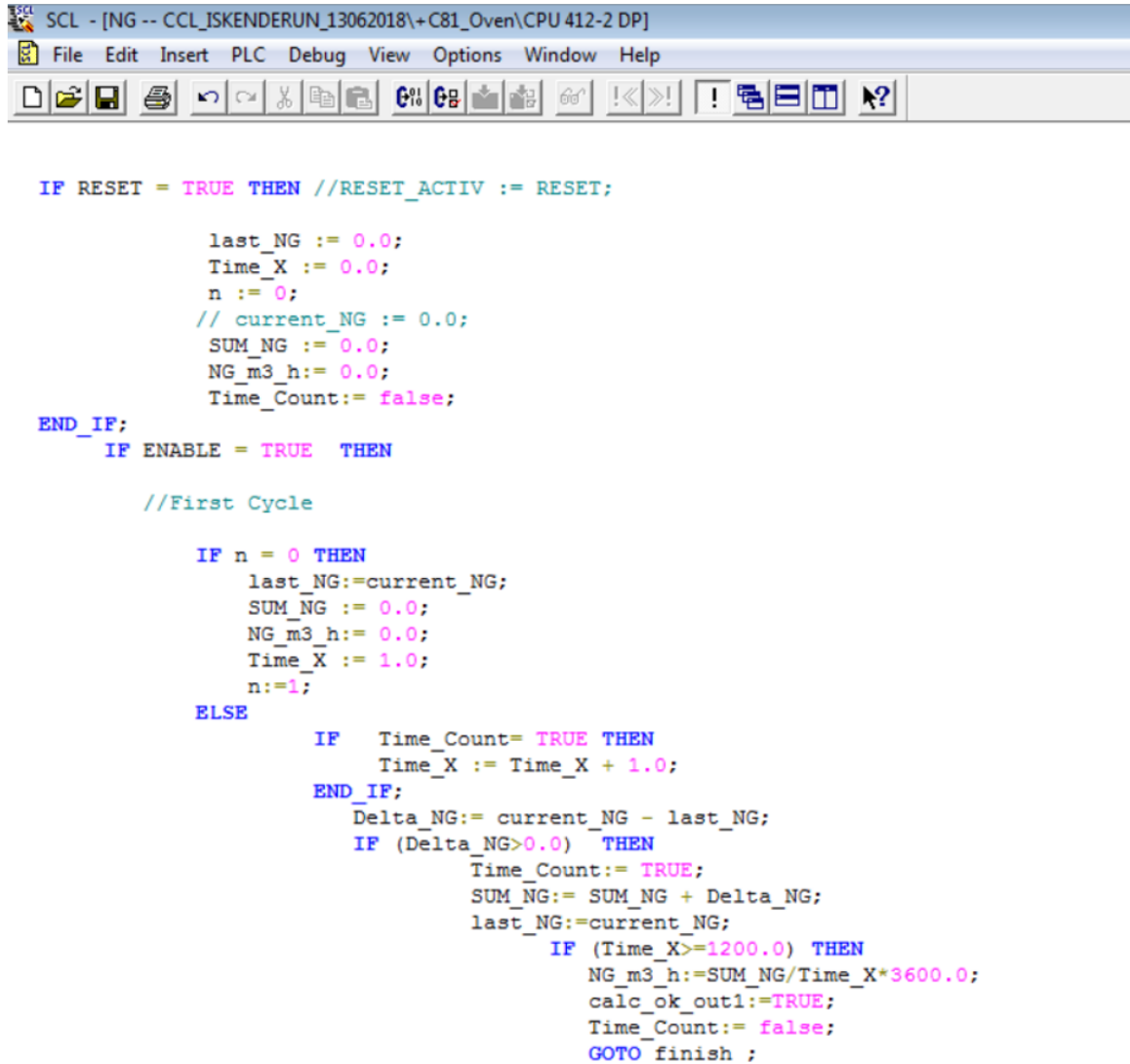
5.1. Simulasyon Çalışmaları

Simülasyon çalışmasında otomasyon kontrol yazılımı olarak Siemens marka Simatic Manager programı kullanılmıştır. Yine kendi içerisinde var olan simülasyon programıyla gerçek bir PLC'ye ihtiyaç duyulmadan program simüle edilmiştir. NetToPLCSim programı sayesinde; PLC simülasyon programı ile IBA analyzer arası haberleşme sağlanmıştır. IBA analyzer programı da simülasyon PLC'sinden 10ms örnekleme yoluyla belirlenen tagların verilerini kaydetmektedir. Çizelge 5.1'de, simülasyon çalışmasında kullanılan programlar, ürün aileleri ve versiyonları verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneyde kullanılan programların ürün ailesi ve versiyon listesi

ÜRÜN AİLESİ	ÜRÜN	VERSİYON
SIMATIC STEP 7	STEP 7 Professional Edition 2010	5.5
SIMATIC STEP 7	SIMATIC S7-SCL	5.3.6.0
SIMATIC STEP 7	S7-PLCSIM	5.4
Net To PLC Sim	Net To PLC Sim	1.2.4
IBA	IBA PDA	6.24.6
IBA	IBA Analyzer	5.18.0

Yazılım programlama dili olarak, Siemens'in Simatic Manager programında programlama dilleri LADDER, SCL (Structured Control Language) ve STL (Statement List) kullanılmıştır. Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'te sırasıyla SCL kodunda yazılmış program bloğu, STL kodunda yazılmış program bloğu ve LADDER kodunda yazılmış program blokları gösterilmiştir.



```

SCL - [NG -- CCL_ISKENDERUN_13062018\+C81_Oven\CPU 412-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

IF RESET = TRUE THEN //RESET_ACTIV := RESET;

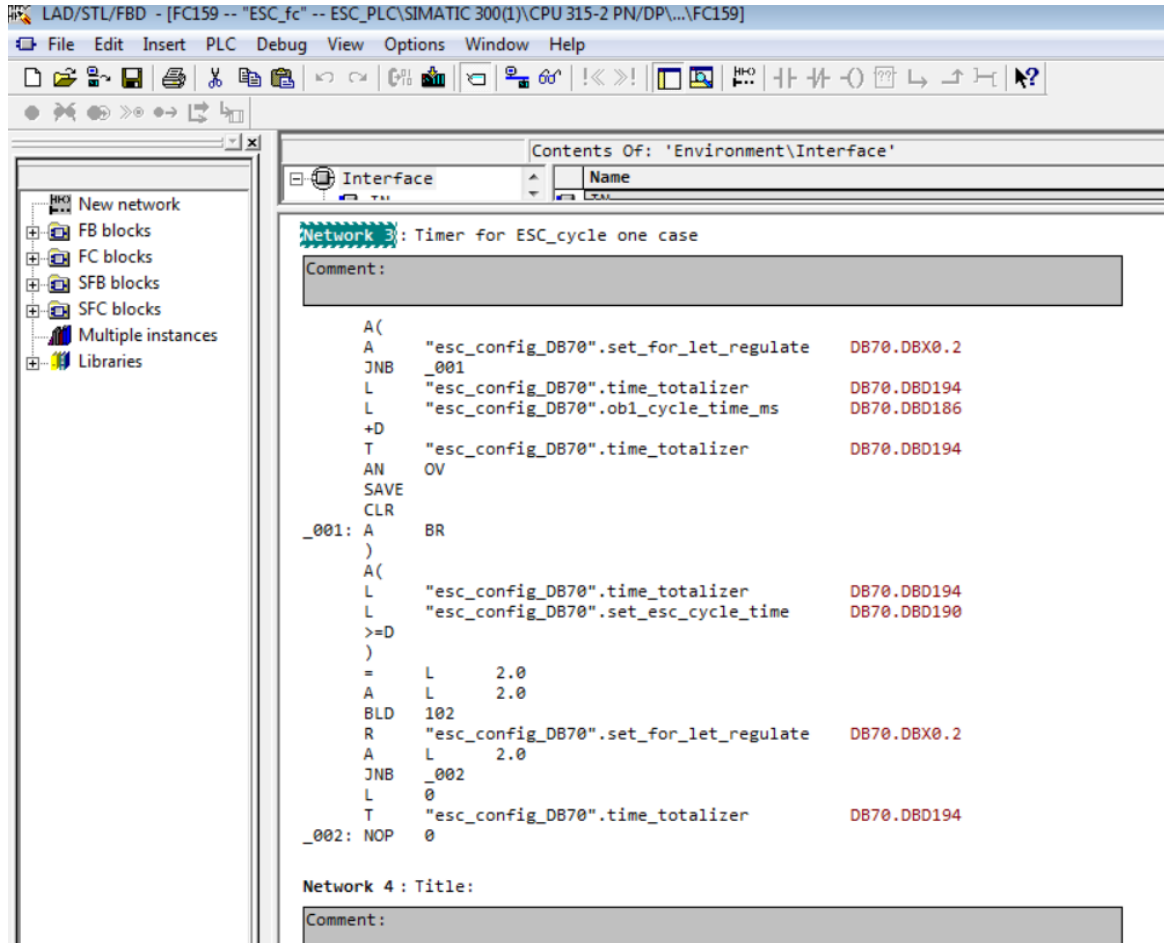
    last_NG := 0.0;
    Time_X := 0.0;
    n := 0;
    // current_NG := 0.0;
    SUM_NG := 0.0;
    NG_m3_h:= 0.0;
    Time_Count:= false;
END_IF;
IF ENABLE = TRUE THEN

    //First Cycle

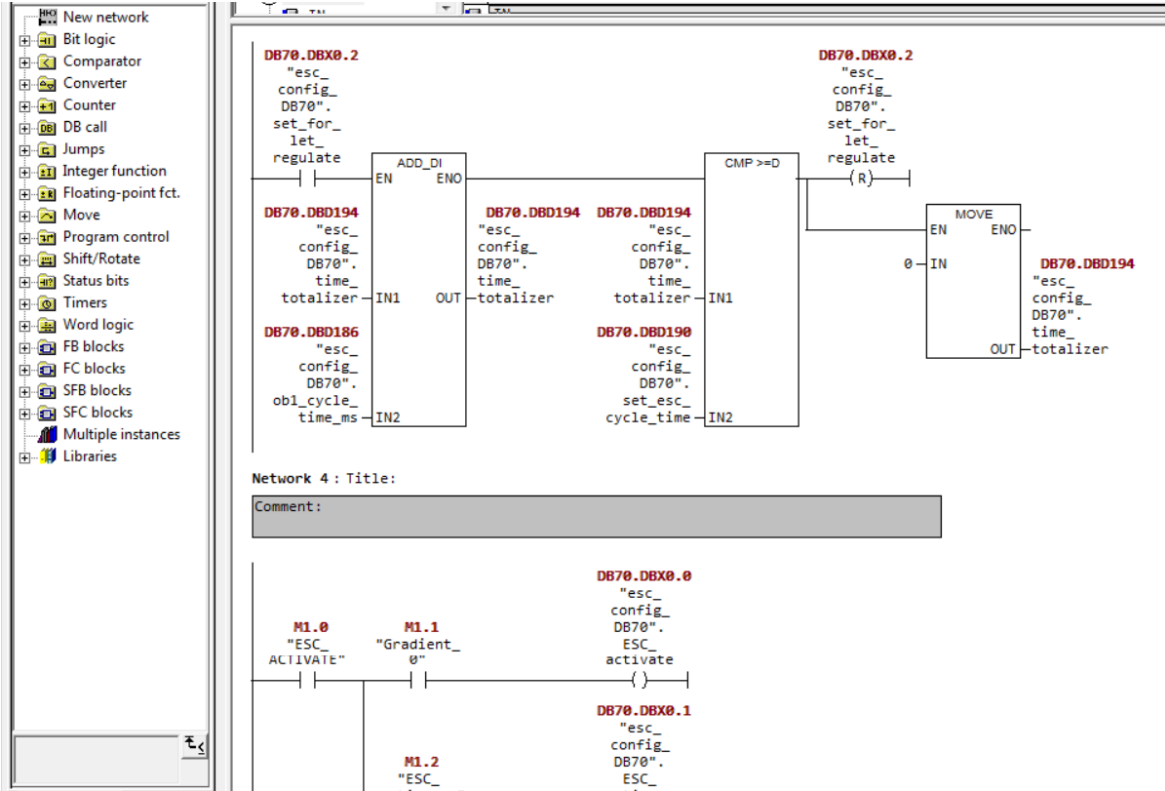
    IF n = 0 THEN
        last_NG:=current_NG;
        SUM_NG := 0.0;
        NG_m3_h:= 0.0;
        Time_X := 1.0;
        n:=1;
    ELSE
        IF Time_Count= TRUE THEN
            Time_X := Time_X + 1.0;
        END_IF;
        Delta_NG:= current_NG - last_NG;
        IF (Delta_NG>0.0) THEN
            Time_Count:= TRUE;
            SUM_NG:= SUM_NG + Delta_NG;
            last_NG:=current_NG;
            IF (Time_X>=1200.0) THEN
                NG_m3_h:=SUM_NG/Time_X*3600.0;
                calc_ok_out1:=TRUE;
                Time_Count:= false;
                GOTO finish ;
            END_IF;
        END_IF;
    END_IF;
END_IF;

```

Şekil 5.1. SCL kodunda yazılmış program bloğu



Şekil 5.2. STL kodunda yazılmış program bloğu



Şekil 5.3. LADDER olarak yazılmış program bloğu

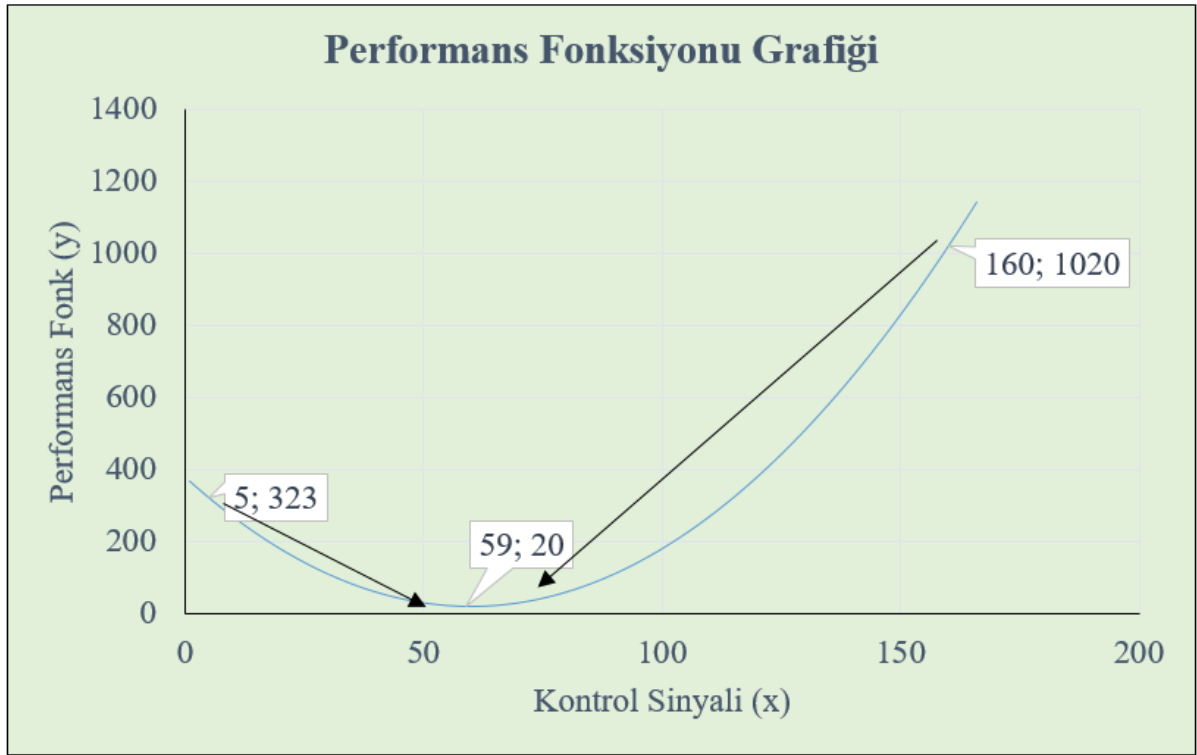
5.1.1 Tek Minimumlu Fonksiyon Optimizasyonu

Simülasyon çalışmasının birinci aşamasında bir tane yerel minimumu olan sistem çıkışını temsil eden aşağıdaki fonksiyon test için kullanılmıştır. Buradaki amaç, performans fonksiyonu Şekil 5.4'teki gibi dış bükey olan bir fonksiyon için başlangıç noktası neresi olursa olsun fonksiyonun minimum noktasını bulup bulmadığını ortaya koymaktır.

Burada yerel minimumu tek olan bir fonksiyon olarak aşağıda verilen fonksiyon seçilmiştir:

$$y = a(x + d)^2 + c \quad (5.1)$$

Burada, y performans fonksiyonu çıktısı, x kontrol sinyali ve a , d , c performans fonksiyonu parametreleri olarak seçilmiştir. Fonksiyonun değerlerinin tablo çıktısı Çizelge 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere fonksiyon bir tane yerel minimum nokta içermektedir. Simülasyon amacıyla belirlenen bu fonksiyonda en düşük değeri bulması amacıyla eğim tabanlı EAA için gerekli yazılım hazırlanmıştır.



Şekil 5.4. Eş. 5.1 ile verilen tek minimumu olan fonksiyonun grafiği

Yukarıda görüldüğü üzere Şekil 5.4'teki grafiğin hem sağ tarafından hem de sol tarafından rastgele alınan her iki değerde de program çalıştırıldığında çıkışı minimum noktaya sürmektedir.

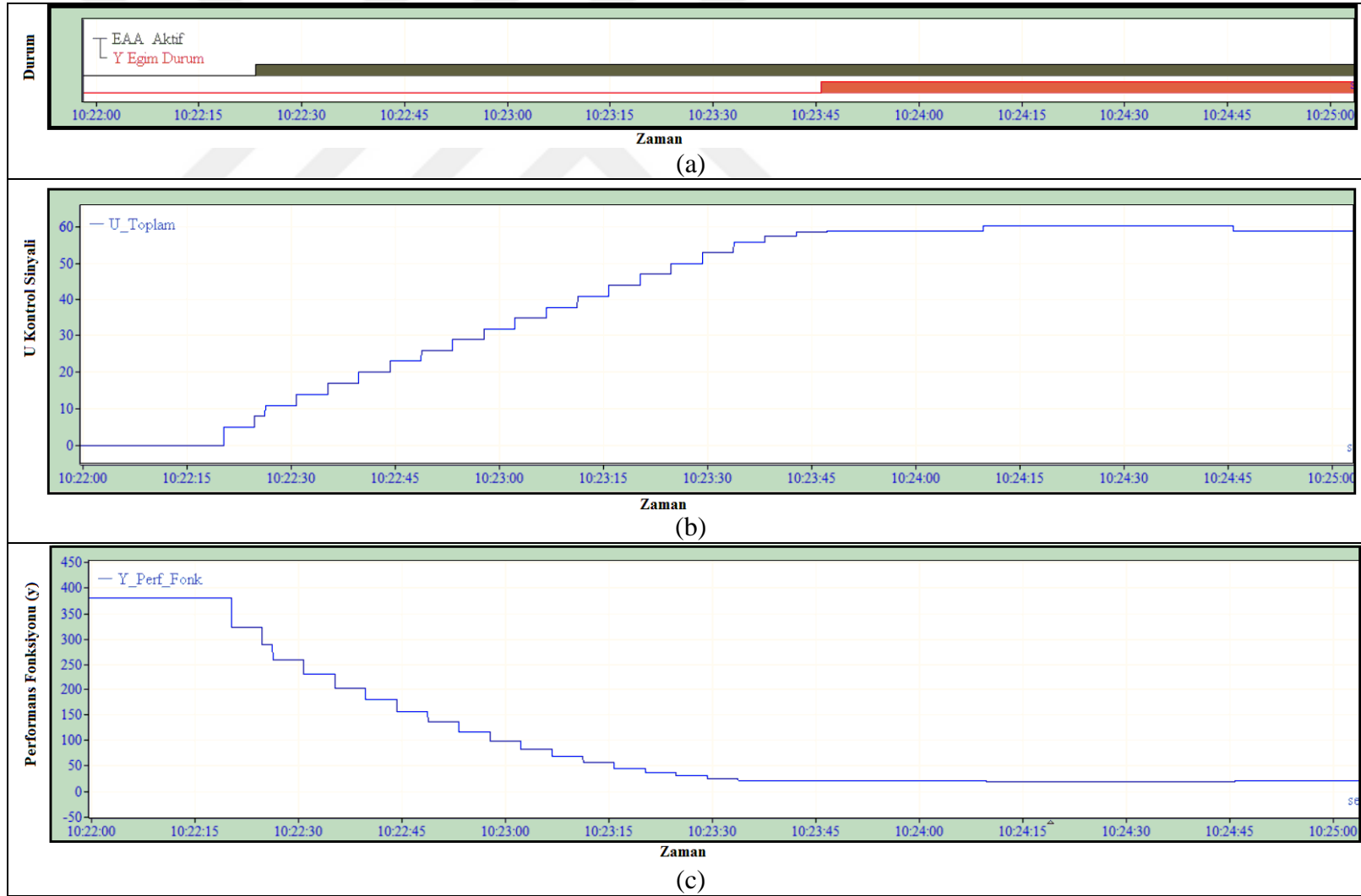
Çizelge 5.2. Bir ekstrem noktası olan fonksiyonun değer tablosu

d	a	b	c								
-60	0,1	0	20	x	y	x	y				
				1	368,1	33	92,9				
				2	356,4	34	87,6				
				3	344,9	35	82,5				
				4	333,6	36	77,6				
				5	322,5	37	72,9				
				6	311,6	38	68,4				
				7	300,9	39	64,1				
				8	290,4	40	60,0				
				9	280,1	41	56,1				
				10	270,0	42	52,4				
				11	260,1	43	48,9				
				12	250,4	44	45,6				
				13	240,9	45	42,5				
				14	231,6	46	39,6				
				15	222,5	47	36,9				
				16	213,6	48	34,4				
				17	204,9	49	32,1				
				18	196,4	50	30,0				
				19	188,1	51	28,1				
				20	180,0	52	26,4				
				21	172,1	53	24,9				
				22	164,4	54	23,6				
				23	156,9	55	22,5				
				24	149,6	56	21,6				
				25	142,5	57	20,9				
				26	135,6	58	20,4				
				27	128,9	59	20,1				
				28	122,4	60	20,0				
				29	116,1	61	20,1				
				30	110,0	62	20,4				
				31	104,1	63	20,9				
				32	98,4	64	21,6				
								65	22,5	97	156,9
								66	23,6	98	164,4
								67	24,9	99	172,1
								68	26,4	100	180,0
								69	28,1	101	188,1
								70	30,0	102	196,4
								71	32,1	103	204,9
								72	34,4	104	213,6
								73	36,9	105	222,5
								74	39,6	106	231,6
								75	42,5	107	240,9
								76	45,6	108	250,4
								77	48,9	109	260,1
								78	52,4	110	270,0
								79	56,1	111	280,1
								80	60,0	112	290,4
								81	64,1	113	300,9
								82	68,4	114	311,6
								83	72,9	115	322,5
								84	77,6	116	333,6
								85	82,5	117	344,9
								86	87,6	118	356,4
								87	92,9	119	368,1
								88	98,4	120	380,0
								89	104,1	121	392,1
								90	110,0	122	404,4
								91	116,1	123	416,9
								92	122,4	124	429,6
								93	128,9	125	442,5
								94	135,6	126	455,6
								95	142,5	127	468,9
								96	149,6	128	482,4

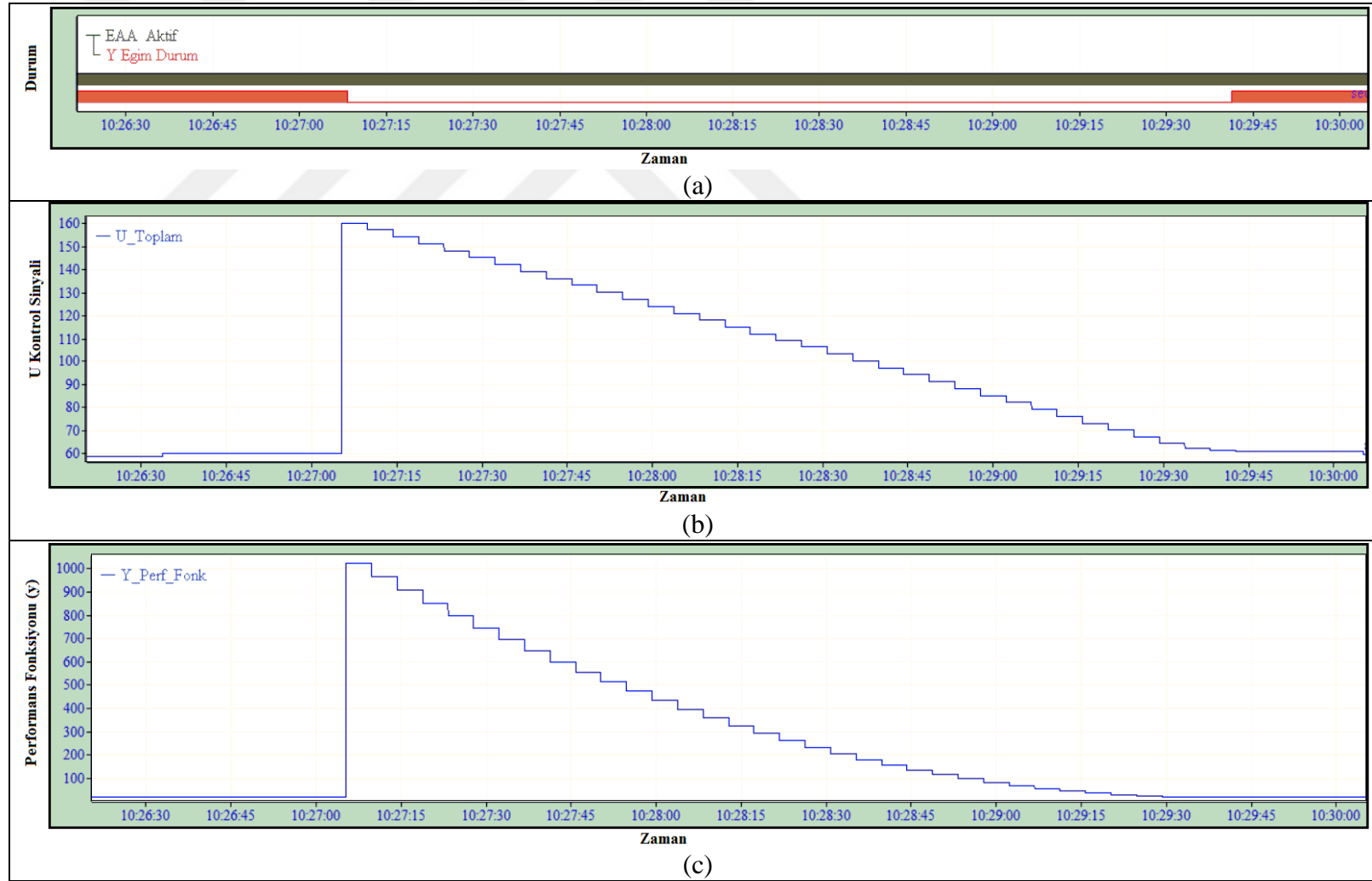
EAA'nın temel çalışma prensibi yerel ekstremum noktayı aradığından ve bu çalışmanın amacı yerel minimum noktayı bulması hedeflendiğinden bir ekstrem noktası olan bir fonksiyonun 2 farklı noktasından EAA başlatılmıştır. İlk olarak Şekil 5.5.b'de görüldüğü

üzere “U_Toplam” değişkenine başlangıç değeri olarak 5 verilmiştir. Bu durumda Eş. 5.1 ile verilen performans fonksiyonun değeri 322,50 (Şekil 5.5.c) olarak hesaplanmıştır. EAA aktif edildikten sonra U_Toplam değeri EAA yazılım kurgusuna göre artmış ve 58,53’e geldiğinde performans fonksiyonu değeri grafiğın yerel en düşük aralığı olan 20,23’e ulaşmıştır. Bu noktada performans fonksiyonunun eğimi sıfıra ulaşmıştır. Şekil 5.5.a’da EAA aktif olduğu süre ve performans fonksiyonunun eğim durum bilgisi verilmiştir.

Benzer şekilde Şekil 5.6.b’de U_Toplam değişkenine başlangıç değeri olarak 160 verilmiştir. Bu değer eğrinin sağ tarafında kalmaktadır. Bu durumda Eş. 5.1 ile verilen performans fonksiyonun değeri 1020 olmuştur. EAA aktif edildikten sonra U_Toplam değeri EAA yazılım kurgusuna göre azalmış ve 58,66’ya geldiğinde Şekil 5.6.c’de görüldüğü üzere performans fonksiyonu değeri grafiğın yerel en düşük aralığı olan yaklaşık 20,18’e ulaşmıştır. Aynı şekilde, Şekil 5.6.a’da da EAA aktif süresi ve performans fonksiyonu eğim bilgisi verilmiştir.



Şekil 5.5. Giriş kontrol sinyali başlangıç noktası 5 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonu grafiği



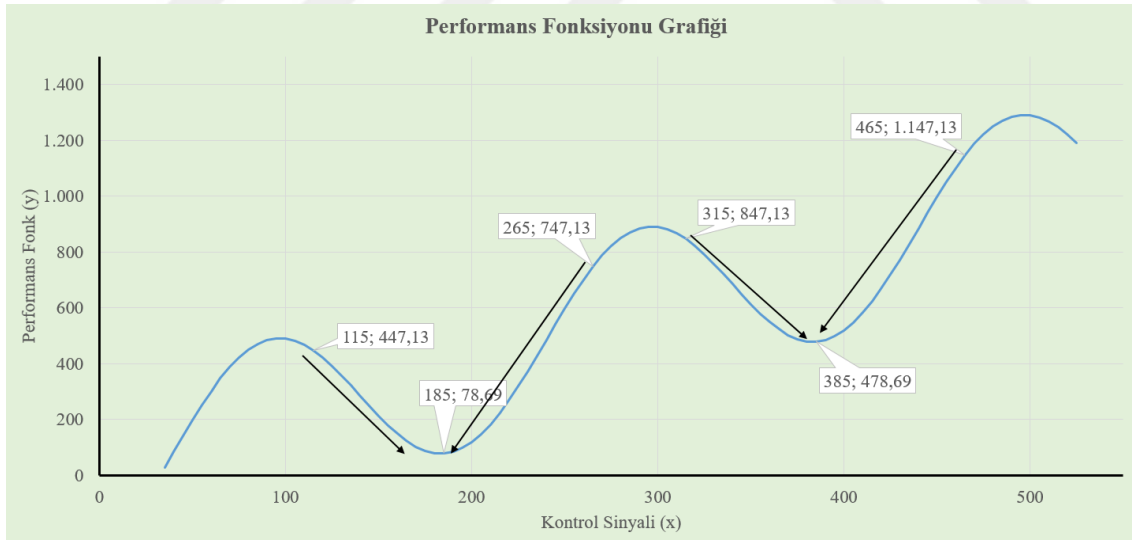
Şekil 5.6. Giriş kontrol sinyalinin başlangıç noktası 160 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği

5.1.2 Çok Minimumlu Fonksiyon Optimizasyonu

Bu ikinci aşamada simülasyon çalışmasında birden fazla yerel minimumu olan sistem çıkışını temsil eden aşağıdaki fonksiyon hazırlanan yazılımın testinde kullanılmıştır. Buradaki amaç performans fonksiyonunu Şekil 5.7’de verilen grafikte başlangıç noktası neresi olursa olsun kendisine en yakın yerel minimumu bulup bulmadığını ortaya koymasdır. Bu simulasyon çalışması için aşağıdaki çok yerel minimumlu foksiyon seçilmiştir:

$$f(x) = y = A \sin(2\pi(x+C)/B) + 2x + 5 \quad (5.2)$$

Burada, y performans fonksiyonu çıktısı, x kontrol sinyali ve A , B , C performans fonksiyonu parametreleri olarak seçilmiştir. Fonksiyonun çıktısı Şekil 5.7’de verilmiştir. Aynı zamanda değerlerin listesi Çizelge 5.3’te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere fonksiyon birden fazla yerel minimum nokta içermektedir. Hazırlanan yazılım şekilde gösterilen performans fonksiyonuna sahip sistem için test edilmiştir.



Şekil 5.7. Eş. 5.2 ile verilen birden fazla minimumu olan fonksiyonun grafiği

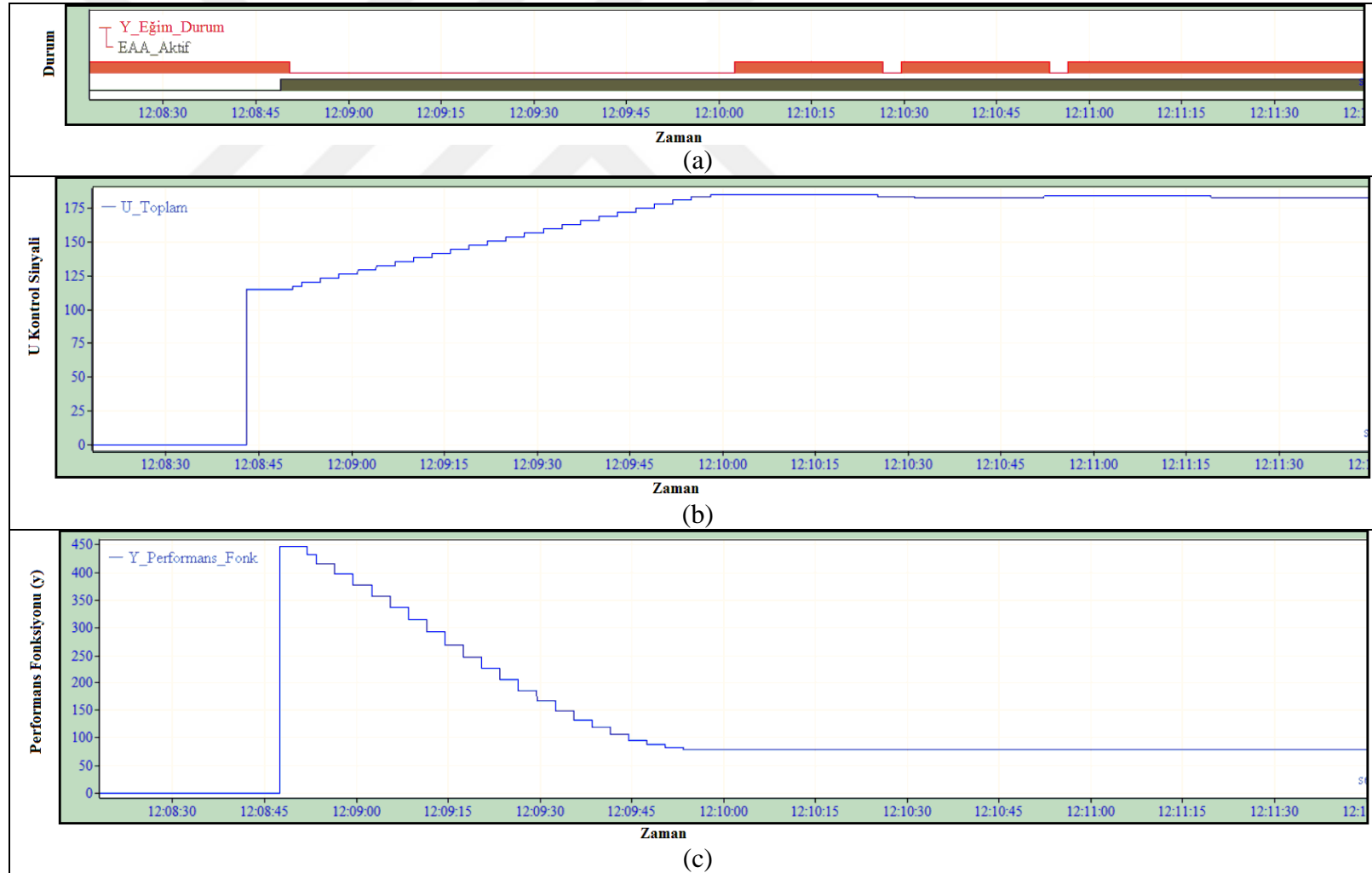
Çizelge 5.3. Birden fazla ekstrem noktası olan fonksiyonun değer tablosu

A	B	C			
300	200	-40			
x	y	x	y	x	y
30	-27,71	195	98,69	360	548,66
35	28,07	200	119,68	365	522,87
40	85,00	205	147,70	370	502,29
45	141,93	210	182,29	375	487,70
50	197,71	215	222,87	380	479,68
55	251,20	220	268,66	385	478,69
60	301,34	225	318,80	390	485,00
65	347,13	230	372,29	395	498,69
70	387,71	235	428,07	400	519,68
75	422,30	240	485,00	405	547,70
80	450,32	245	541,93	410	582,29
85	471,31	250	597,71	415	622,87
90	485,00	255	651,20	420	668,66
95	491,31	260	701,34	425	718,80
100	490,32	265	747,13	430	772,29
105	482,30	270	787,71	435	828,07
110	467,71	275	822,30	440	885,00
115	447,13	280	850,32	445	941,93
120	421,34	285	871,31	450	997,71
125	391,20	290	885,00	455	1 051,20
130	357,71	295	891,31	460	1 101,34
135	321,93	300	890,32	465	1 147,13
140	285,00	305	882,30	470	1 187,71
145	248,07	310	867,71	475	1 222,30
150	212,29	315	847,13	480	1 250,32
155	178,80	320	821,34	485	1 271,31
160	148,66	325	791,20	490	1 285,00
165	122,87	330	757,71	495	1 291,31
170	102,29	335	721,93	500	1 290,32
175	87,70	340	685,00	505	1 282,30
180	79,68	345	648,07	510	1 267,71
185	78,69	350	612,29	515	1 247,13
190	85,00	355	578,80	520	1 221,34

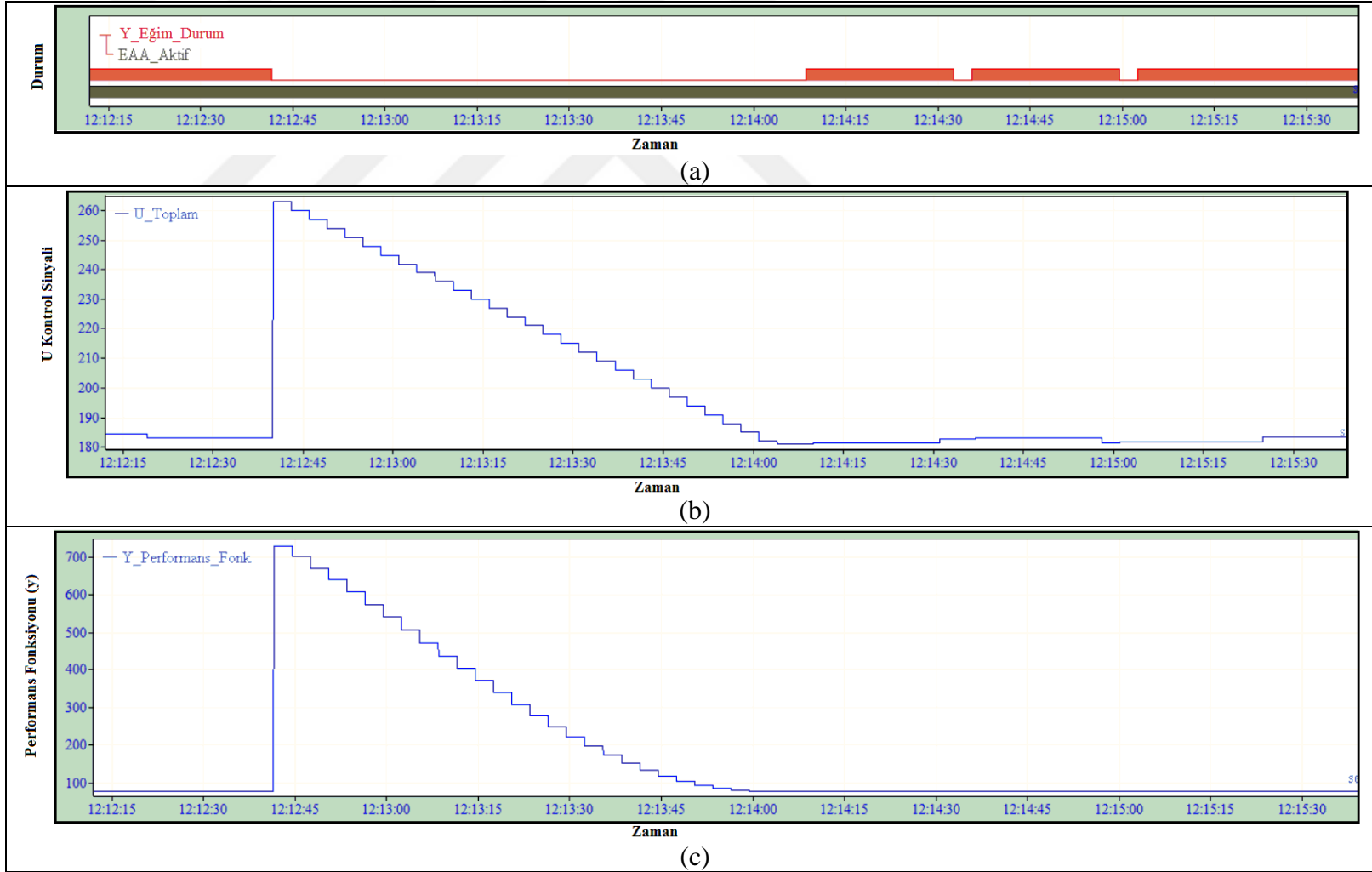
EAA'nın temel çalışma prensibi yerel ekstremum noktayı aradığından ve bu çalışmanın amacı yerel minimum noktayı bulması hedeflendiğinden 4 farklı noktadan EAA başlatılmıştır. İlk olarak Şekil 5.8.b'de görüldüğü üzere "U_Toplam" değişkenine

başlangıç değeri olarak 115 verilmiştir. Bu değer Şekil 5.7’de sol taraftan başlangıçtaki ilk dış bükeyin solunda kalmaktadır. Bu durumda Eş. 5.2 ile verilen performans fonksiyonun değeri değeri 447,13 olarak hesaplanmıştır. EAA aktif edildikten sonra U_Toplam değeri EAA yazılım kurgusuna göre artmış ve 185,22’ye geldiğinde grafiğin yerel en düşük aralığı olan 78,23’e (Şekil 5.8.c) ulaşmıştır. Şekil 5.8.a’da da EAA aktif süresi ve performans fonksiyonu eğim bilgisi verilmiştir.

Aynı şekilde Şekil 5.9.b’de U_Toplam değişkenine başlangıç değeri olarak 263 verilmiştir. Bu değer Şekil 5.7’de sol taraftan başlangıçtaki ilk dış bükeyin sağında kalmaktadır. Eş. 5.1 ile verilen performans fonksiyonun değeri 729,44’tür. EAA aktif edildikten sonra U_Toplam değeri EAA yazılım kurgusuna göre azalmış ve 183,16’e geldiğinde grafiğin yerel en düşük aralığı olan yaklaşık 78,85’e (Şekil 5.9.c) ulaştırmıştır. Aynı şekilde Şekil 5.9.a’da da EAA aktif süresi ve performans fonksiyonu eğim bilgisi verilmiştir.



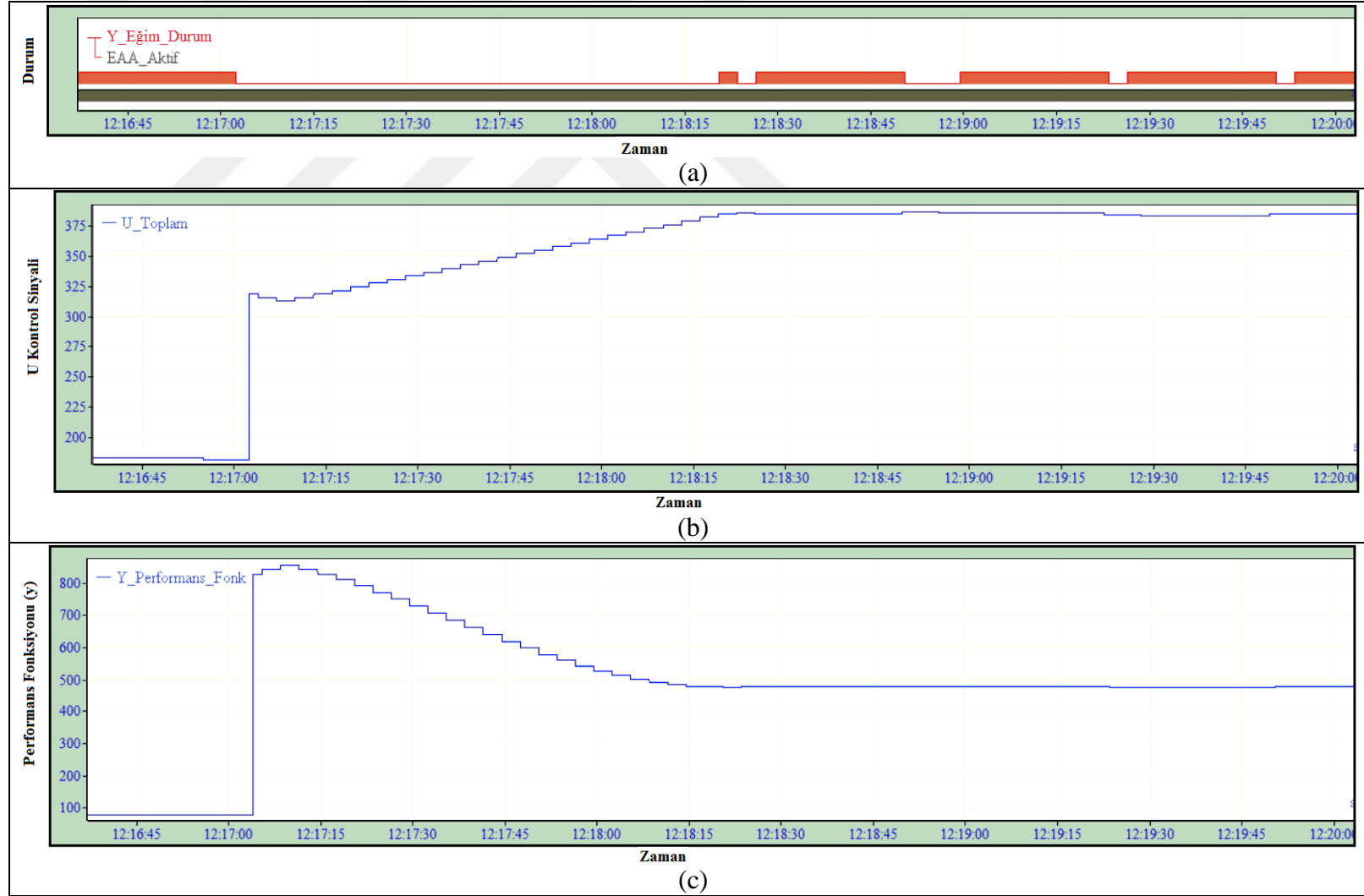
Şekil 5.8. Giriş kontrol sinyalinin başlangıç noktası 115 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği



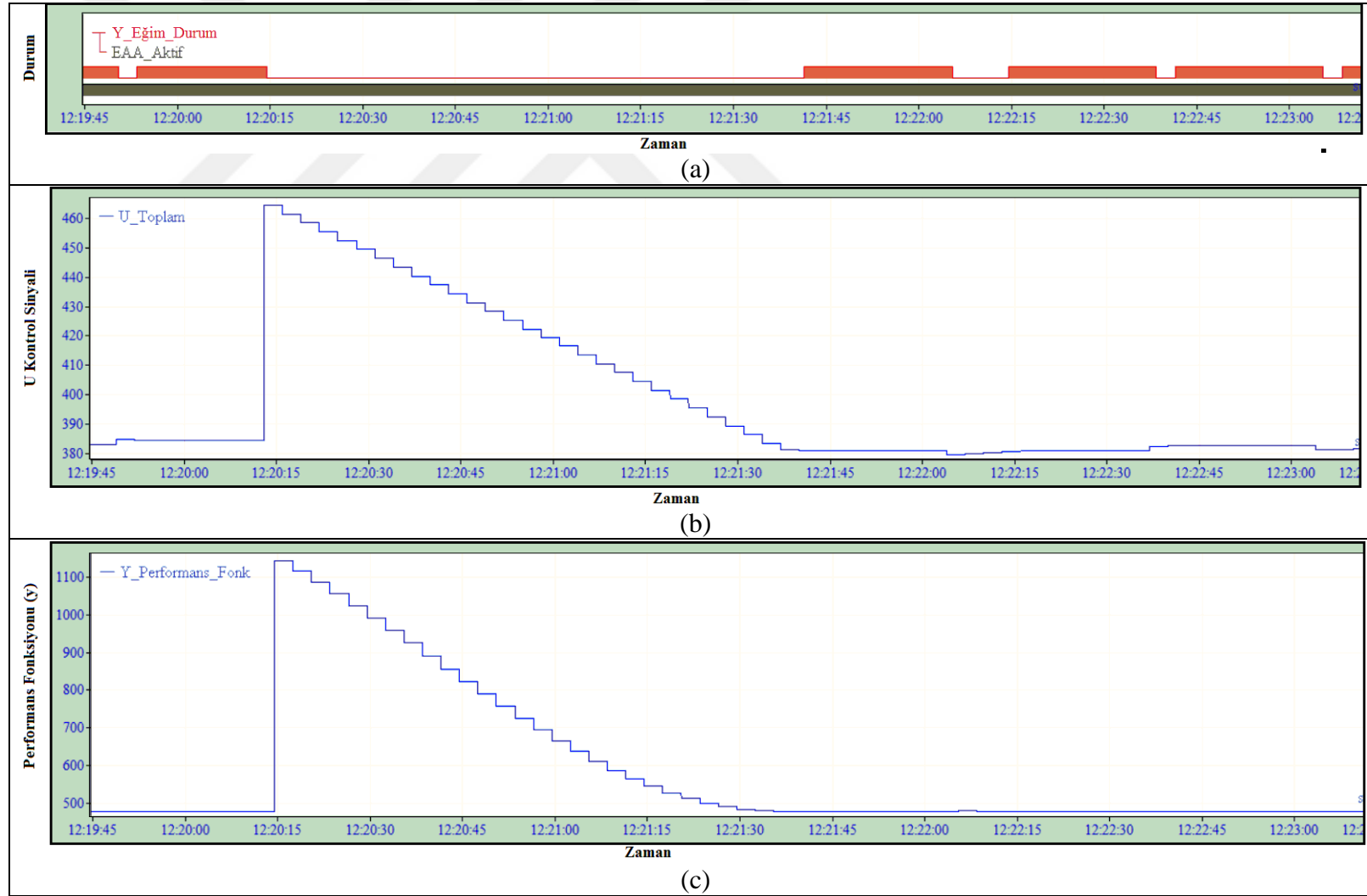
Şekil 5.9. Giriş kontrol sinyalinin başlangıç noktası 263 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği

Benzer şekilde U_{Toplam} değişkenine başlangıç değeri olarak 315 verilmiştir (Şekil 5.10.b). Seçilen değerin en yakın olduğu yerel minimum nokta Şekil 5.7'nin ikinci bölgesi olduğundan performans fonksiyonu da ikinci yerel noktaya yaklaşmıştır. EAA aktif edildikten sonra U_{Toplam} değeri EAA yazılım kurgusuna göre artmış ve Şekil 5.10.b'de görüldüğü gibi 385'e geldiğinde performans fonksiyonu da Şekil 5.9.c'de görüldüğü gibi grafiğin yerel en düşük aralığı olan 479,14'e ulaşmıştır. Şekil 5.10.a'da da EAA aktif süresi ve performans fonksiyonu eğim bilgisi verilmiştir.

Aynı şekilde U_{Toplam} değişkenine başlangıç değeri olarak 464 verilmiştir. Seçilen değerin en yakın olduğu yerel minimum nokta Şekil 5.7'nin ikinci bölgesi olduğundan performans fonksiyonu da ikinci yerel noktaya yaklaşmıştır. EAA aktif edildikten sonra U_{Toplam} değeri EAA yazılım kurgusuna göre azalmış ve Şekil 5.11.b'de görüldüğü gibi 384'e geldiğinde performans fonksiyonu değeri de grafiğin yerel en düşük aralığı olan 478,84'e ulaştırmıştır (Şekil 5.11.c). Şekil 5.11.a'da da EAA aktif süresi ve performans fonksiyonu eğim bilgisi verilmiştir.

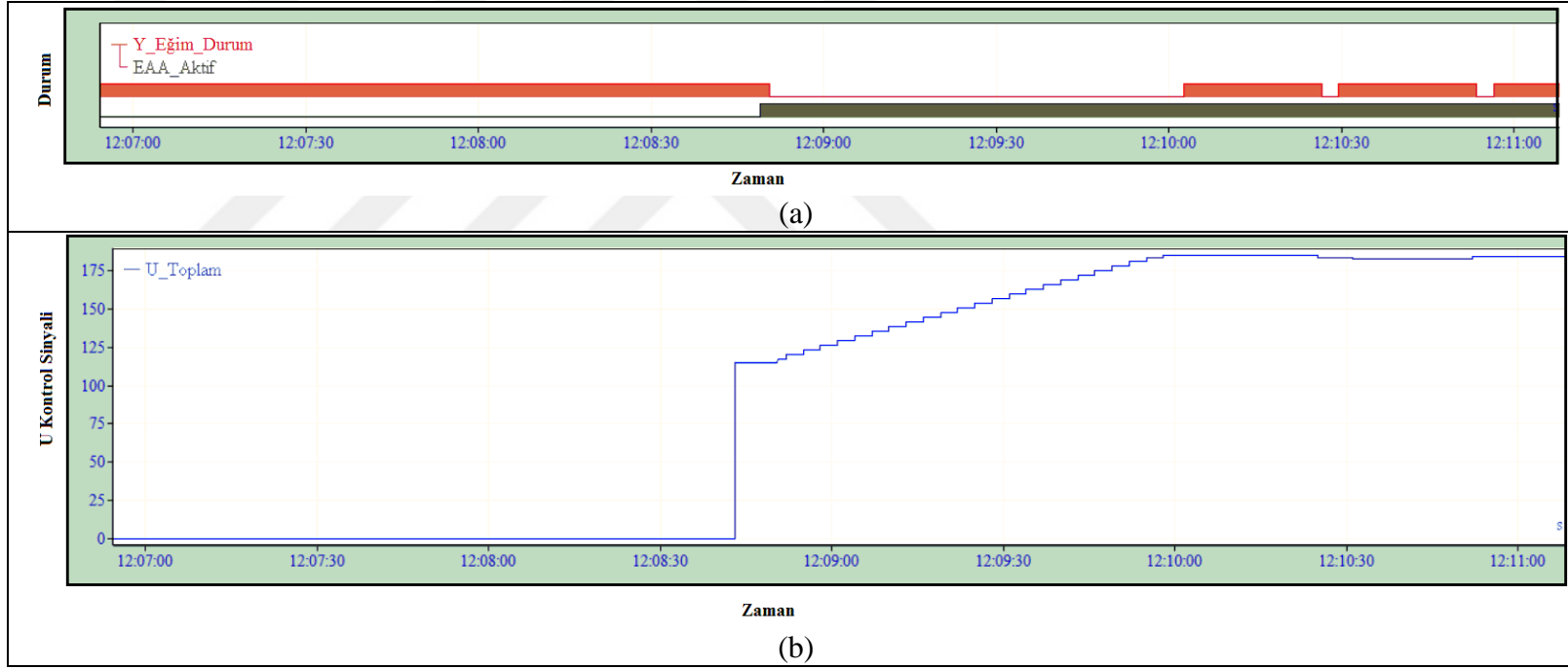


Şekil 5.10. Giriş kontrol sinyalin başlangıç noktası 315 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği

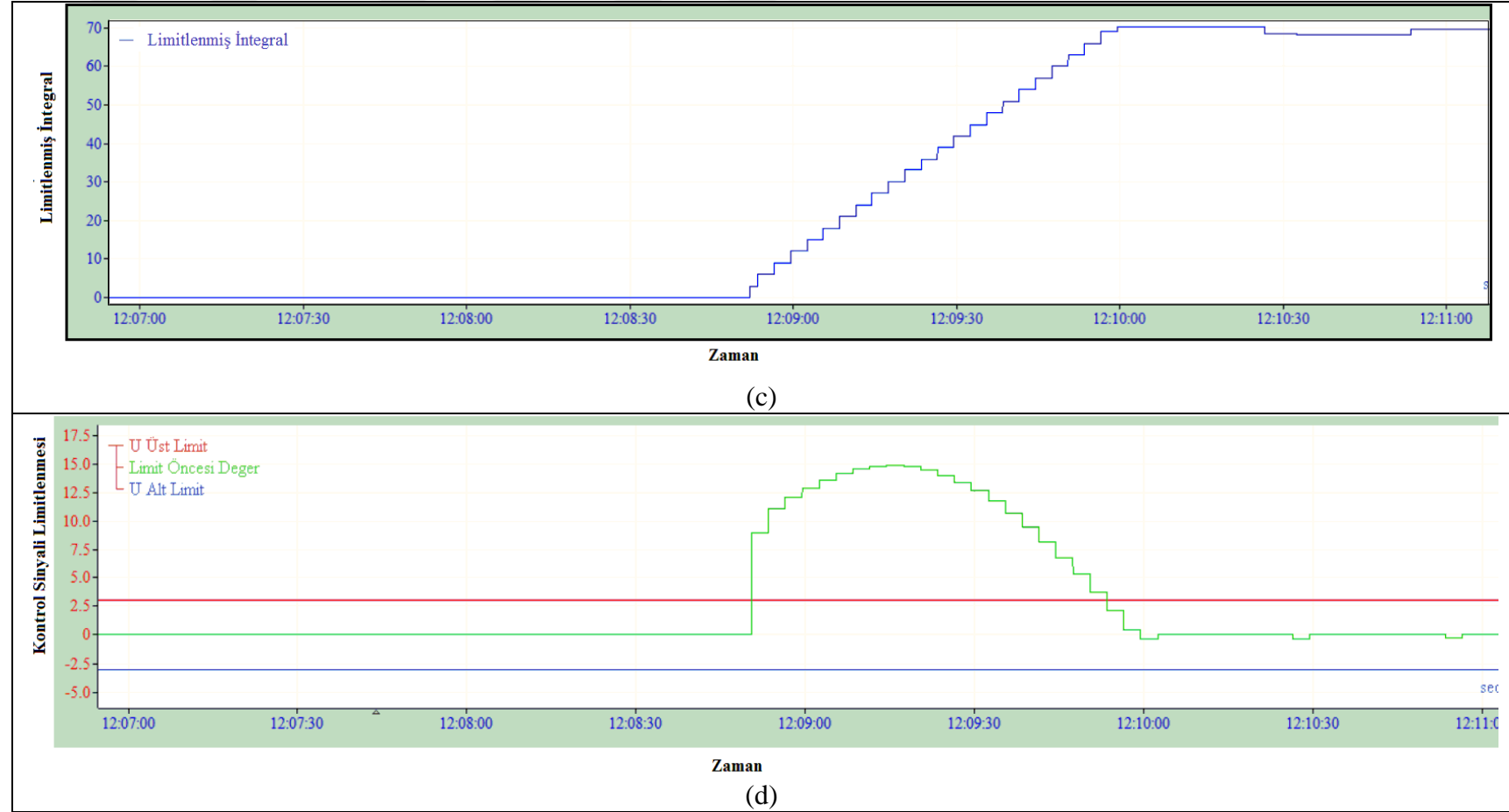


Şekil 5.11. Giriş kontrol sinyalinin başlangıç noktası 464 seçildiğinde; a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali, c) Performans fonksiyonunun grafiği

EAA'da kp kazanç değeri küçük seçildiğinde gerçek bir sistemin tepki verebilmesi için yeterli büyüklükte giriş sinyalinin artışına sebep olamayabilir. Diğer taraftan kp kazanç değeri büyük seçildiği zaman giriş kontrol sinyalinin artış değeri büyük olabilmekte ve bu durumda gerçek uygulamalarda kalite problemi, mekanik ekipmanlara zarar verme, güvenlik anlamında risk gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Bunun önüne geçmek için hesaplanan eğim kazançla çarpıldıktan sonra çıkan sonucu sınırlandırmak için limit fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 5.12'de kazanç değerinin 2 seçildiği durumda her bir adım için gerçek hesaplanan değer ile (Şekil 5.12.d. Limit Öncesi Değer) sınırlandırılmış integral değer (Şekil 5.12.c) karşılaştırılması verilmiştir. Eğer değer sınırın üstünde ise üst sınır değeri alınır. Sınır fonksiyonu kullanılmamış olsaydı giriş kontrol sinyali (Şekil 5.12.b) artış adımları çok yüksek olacaktı. Sınır değerleri; prosesin gereksinimlerine, kontrol edilen ekipmana, proses emniyet risklerine göre değişiklik gösterir.



Şekil 5.12. Limit öncesi ve sonrası giriş sinyali artış miktarı grafiği, a) EAA durum sinyali, b) Giriş kontrol sinyali



Şekil 5.12. (devam) Limit öncesi ve sonrası giriş sinyali artış miktarı grafiği

Kontrol sistemlerinde en sık karşılaşılan sıkıntılardan bir tanesi de integral wind-up problemidir. Bu da Eş. 4.6'daki eklenen kontrol bloğu ile çözülmüştür.

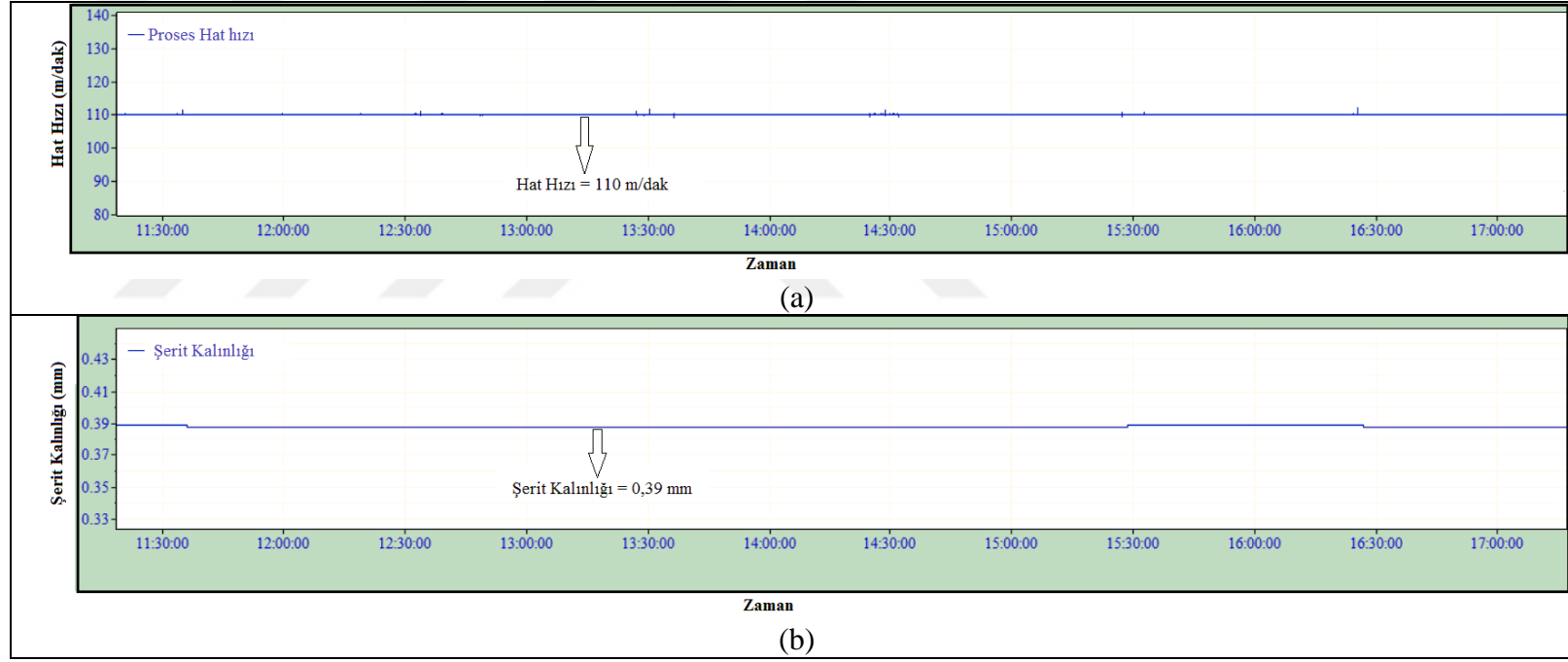
Yukarıdaki deneylerin sonucunda yapılan yazılımın yerel minimum noktayı bulduğu görülmüş ve bu algoritmanın gerçek fırın sistemindeki uygulaması bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

5.2. Fırın Optimizasyonu Çalışması ve Sonuçlar

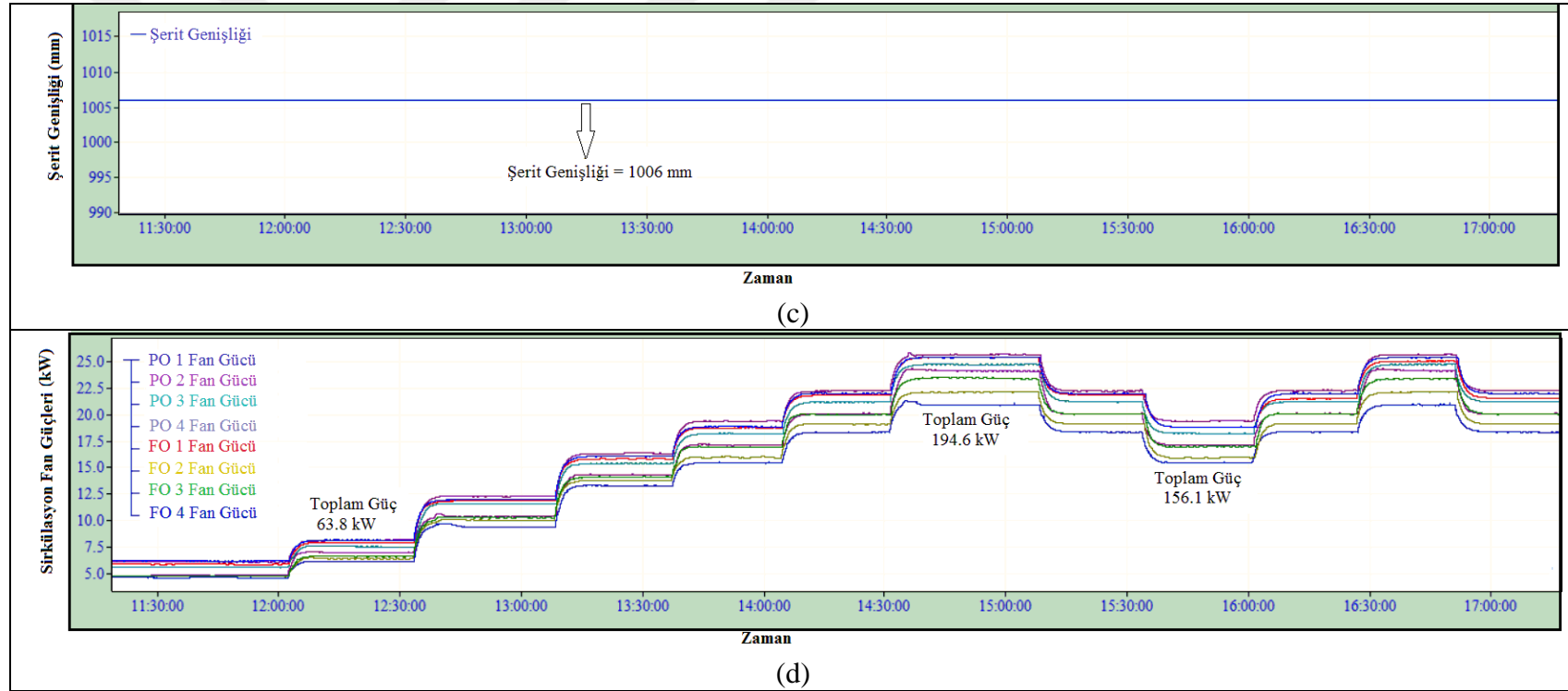
Bir önceki bölümde simülasyon çalışmasında test edilen otomasyon yazılımlarıyla hazırlanan algoritma, dış bükey bir fonksiyonun yerel minimum noktayı bulduğu ispatlanmış ve gerçek bir sistem üzerinde çalıştırılması için hazır olduğu ortaya konmuştur. Bölüm 3'te, çalışan üretim hattında yapılan testlerde boya kaplama hattı fırınının sirkülasyon fan hızının değişiminde farklı birim fiyatlarda toplam maliyetin dış bükey bir yapı olduğu belirlenmişti. Dolayısıyla hazırlanan yazılımın fırın sistemi üzerinde uygulanabilirliği kanaatine varılmıştır.

Bu bölüm, önceki bölümlerde tartışılan çalışmanın deneysel sonuçlarını sunmaktadır. Test aynı malzeme tipi, şerit kalınlığı, şerit genişliği ve hat hızında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi testler yaklaşık 0,39 mm şerit kalınlığı, 1006 mm bobin genişliği ve 110 m/dak hat hızı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçek üretim yaklaşık saat 11:00'da başlatılıp 17:30'da siparişin tamamlanmasıyla bitmiştir. EAA ise 11:30'da başlatılmış ve yaklaşık 17:15 civarı durdurulmuştur.

Başlangıçta, fırını üretime hazırlamak için deneme şeriti kullanılır. Şerit sıcaklığı dahil fırın parametreleri ayarlanır ve fırın çalıştırılır. Şerit sıcaklığı proses gereksinimlerine uygun ise ve laboratuvar testlerinden uygunluk onayı alınmışsa gerçek üretime geçilir. Bu sırada tasarlanan ekstremum arama algoritması da etkinleştirilmiştir. Tasarlanan algoritma fırının otomasyon sistemi içerisinde çalışmaktadır. Algoritmada, şeridin kalınlığı ve genişliği ile hat hızı değiştirilmeden hem elektrik enerjisi hem de doğal gazın sembolik fiyatları birim fiyat (br) cinsinden kullanılarak fırının toplam maliyeti hesaplanmıştır. Şekil 5.13'te, şerit kalınlığı, şerit genişliği, hat hızı ve sirkülasyon fanlarının ayrı ayrı enerji tüketimlerinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir.



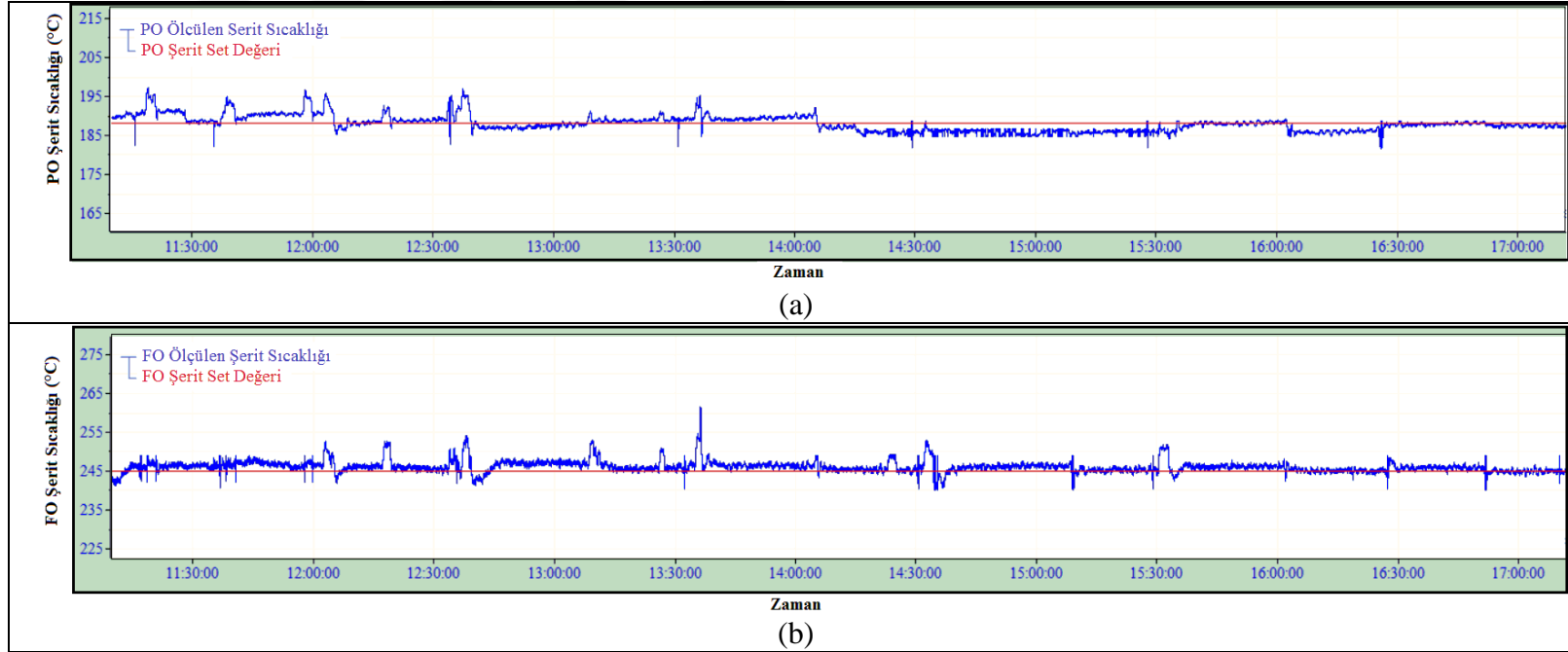
Şekil 5.13. Deneysel çalışma boyunca; a) Hat hızı, b) Şerit kalınlığı



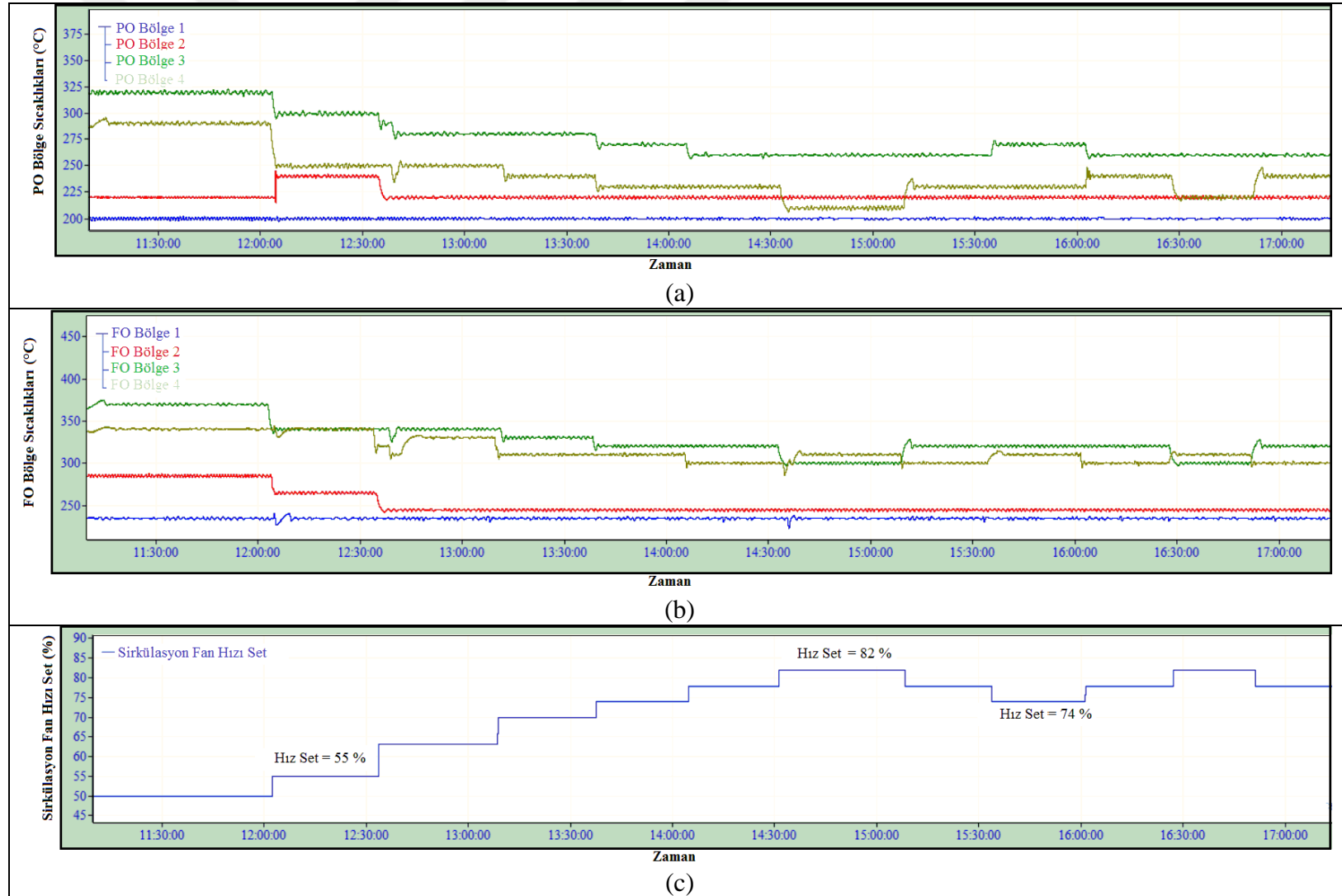
Şekil 5.13. (devam) c) Şerit genişliği, d) Sirkülasyon fanları anlık güç değerleri

Fırın sisteminde sirkülasyon fanlarının ilgili sürücülerine tek bir kontrol giriş sinyali uygulanarak tüm fan hızları kontrol edilir. Bu nedenle tüm sirkülasyon fanlarının aynı hızı için aynı enerji tüketimi beklenir. Diğer yandan Bölüm 4.1.4. Açıklama 5'te belirtildiği gibi, mekanik yük gürültüleri, aşınma ve yıpranmaya bağlı belirsizlikler ve diğer bilinmeyen çevresel faktörler nedeniyle her bir fanın enerji tüketiminde farklılıklar gözlemlenmektedir.

Tasarlanan EAA 11:30'da etkinleştirildiğinde, sirkülasyon fan hızları %50 kapasitede başlatılmıştır. Sirkülasyon fanlarının işlevlerinden biri, bölgedeki ısının homojenliğini sağlamak olduğundan, fan kapasiteleri %50'den daha aşağı düşürülemez. Sistemin ataletini yenmek için ilk adım artışı %5 olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, şeridin sıcaklığındaki büyük artışı veya azalışı önlemek için pozitif ve negatif yönde sınırlar %8 olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, integral hesaplama ve kp kazanç çarpımı sonucu 8'den büyük olsa dahi, sirkülasyon fan hızının adım değişimi 8 olacaktır. Bu sınırlama ile kp büyük bir değer seçilse dahi, şeritte herhangi bir büyük sıcaklık değişimine neden olmaz. Fanların hızı %5 değiştiğinde, şerit sıcaklığı değişmiştir (Şekil 5.14) ve şerit sıcaklığını set değerinin tolere edilebilir bölgesinde tutmak için fırın bölgesi sıcaklığı da değiştirilmiştir. Şekil 5.15'te, hem PO hem de FO fırın bölümleri için bölge sıcaklıklarının ve fanların hızının değişim grafiği gösterilmiştir.

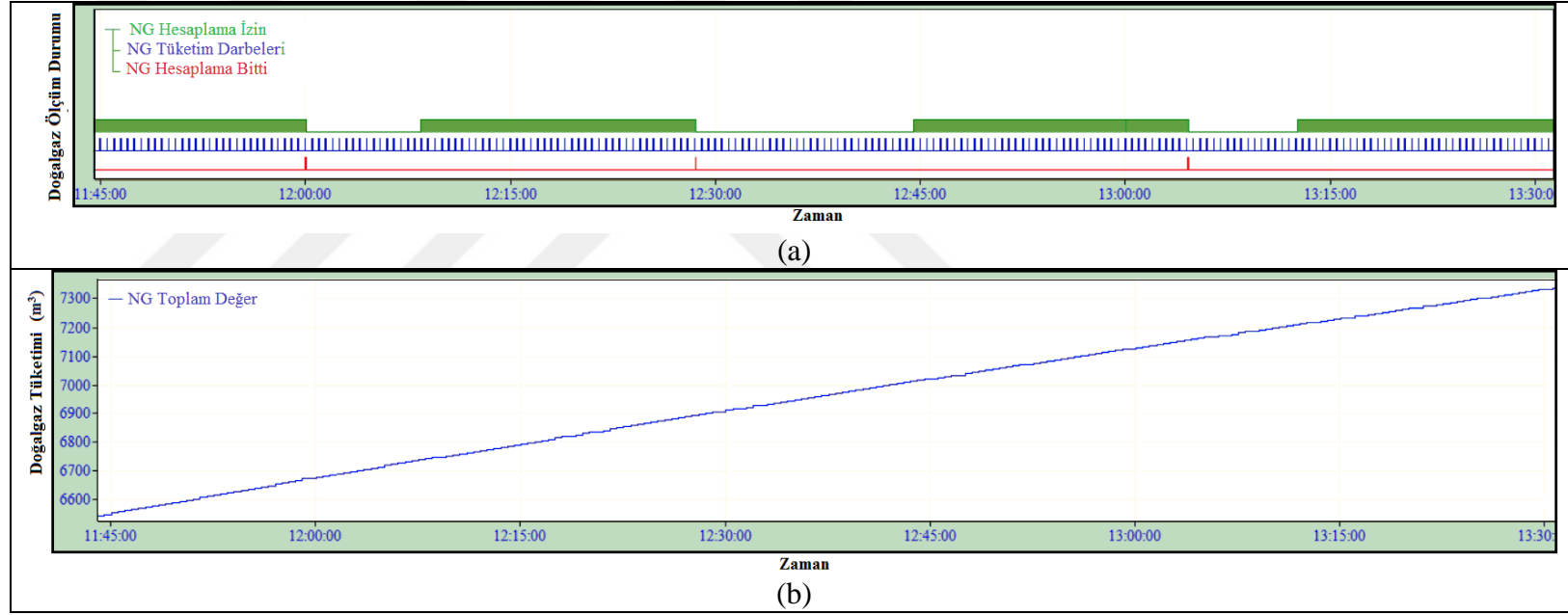


Şekil 5.14. Deneysel çalışma boyunca; a) PO çıkışı şeritin sıcaklık set değeri ve ölçülen sıcaklık değeri, b) FO çıkışı şeritin sıcaklık set değeri ve ölçülen sıcaklık değeri

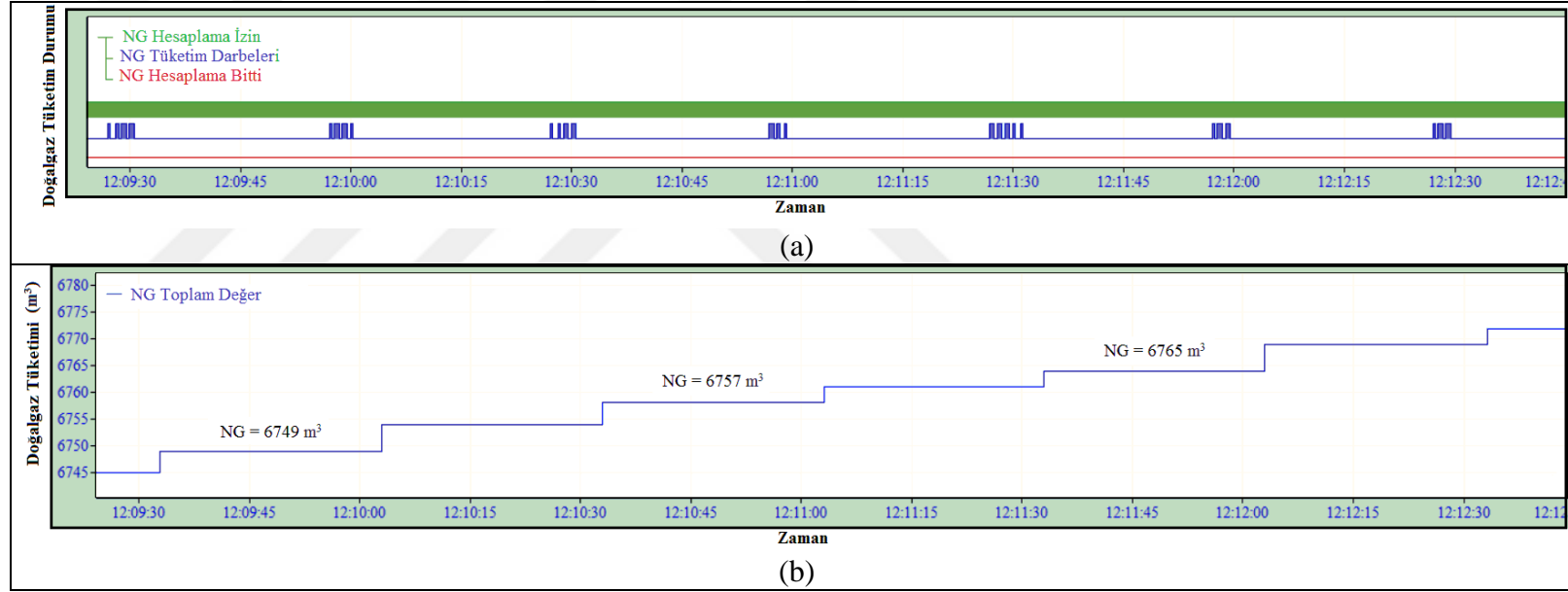


Şekil 5.15. Deneysel çalışma boyunca; a) PO bölge sıcaklık değerleri, b) FO bölge sıcaklık değerleri, c) Sirkülasyon fanlarının hız set değeri

Sirkülasyon fanlarında hız değişimi olduğunda, bir zaman gecikmesi yaklaşık 3 dakika bekler. Bu zaman gecikmesi, sistemin atalet tepkisi için kullanılır. Bu zaman gecikmesi sisteme ve kontrol edilen ekipmana göre değişir. Belirtilen süre geçtikten ve sistemin kendi kontrolcüsü tekrar ayarlanan sıcaklık değerini yakaladıktan sonra 30 saniyelik ikinci bir zaman gecikmesi aktif edilir. Eğer gerçek değer belirtilen bu 30 saniye süresi boyunca tolerans içerisinde ise doğal gaz hesaplaması başlar. Doğal gaz debimetresi çevrim içi olmadığından ve darbe üretici şeklinde çalıştığından, yaklaşık her 30 saniyede, fırın kontrolcüsüne darbe/m³ olarak akış bilgisi göndermektedir. Doğal gazın m³/saat olarak ortalama hesaplaması için sisteme 20 dakikalık bir gecikme eklenmiştir. Bu periyotta sistem doğal gaz tüketim oranını hesaplamaktadır. Doğal gaz tüketimini daha hassas hesaplamak için iki program bloğu yazılmıştır. Programın sözde kodları bölüm 4.2.2’de kısım A ve kısım B olarak verilmiştir. İlk program bloğunda sistem ilk darbeyi algılayınca sistem darbeleri saymaya başlar ve darbe 2 saniyeden uzun süre gelmezse 30 saniyelik darbe serisi bitmiş olarak algılar. Sayma işlemini durdurur. Sayılan darbe sayısını “Toplam_NG_m3” değişkenine transfer eder ve sayıcı bir sonraki 30 saniyelik sayım için sıfırlanır. Böylelikle “Toplam_NG_m3” değişkeninin değeri 30 saniyede bir defa değişmiş olur. Şekil 5.16a’da doğal gaz ölçüm durumları ile ilgili bitler verilmiştir. Şekil 5.16.b’de ise “Toplam_NG_m3” değişkeninin aldığı değer (NG toplam değer) verilmiştir. Şekil 5.17’de ise doğal gaz ölçüm durum bitleri ile doğal gaz totalizerin daha kısıtlı bir zaman aralığı için görüntüsü verilmiştir.



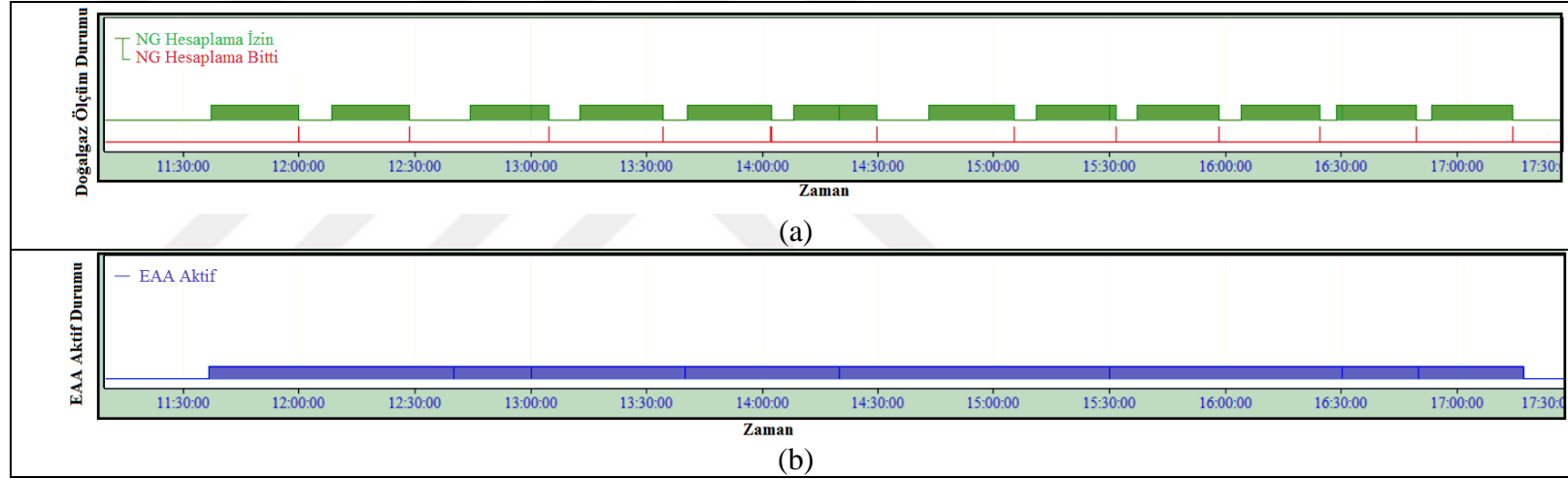
Şekil 5.16. Deneysel çalışma boyunca; a) Doğal gaz darbelerinin geniş zaman aralıklı genel görünüşü, b) Doğalgaz totalizerin geniş zaman aralıklı genel görünüşü



Şekil 5.17. Deneysel çalışma boyunca; a) Doğal gaz darbelerinin dar zaman aralıklı genel görünüşü, b) Doğalgaz totalizerin dar zaman aralıklı genel görünüşü

İkinci program bloğunda program bloğu doğal gaz totalizerin ilk değer değişimini bekler. Değişim gerçekleşince sistem başlangıç zamanının kaydeder. 20 dakika sonra tekrar sistem doğal gaz değişimini bekler. Değişim gerçekleşince bunu da bitiş zamanı olarak kaydeder. Bu zaman aralığındaki hesaplanan doğal gazı hesaplanan zaman aralığına böler. Böylelikle doğal gaz tüketimi m^3 /saat cinsinden daha hassas hesaplama sağlar.

Şekil 5.18’de yeşil bar kısmı doğal gaz akış hesaplama periyodunu göstermektedir. Hesaplama tamamlandınc bir bit aktif edilir (NG_Hesaplama_Bitti) ve hesaplama sağlanır. “NG_Hesaplama_Bitti” biti her adımda yalnızca bir döngü aktif edilir. İki yeşil çubuk arasındaki süre, sistem atalet tepki süresi gecikmesini, şerit sıcaklığı yakalama süresini ve sistem kararlılığı için gerekli gecikme süresini (30s) kapsar. Bölge sıcaklık farkları, şerit sıcaklık sapma miktarı ve diğer bazı çevresel nedenlerden dolayı, şerit sıcaklığı yakalama süresi sabit süre olamaz. Bu nedenle, iki yeşil çubuk arasındaki süre, yukarıda belirtilen zaman gecikmelerine göre değişir.



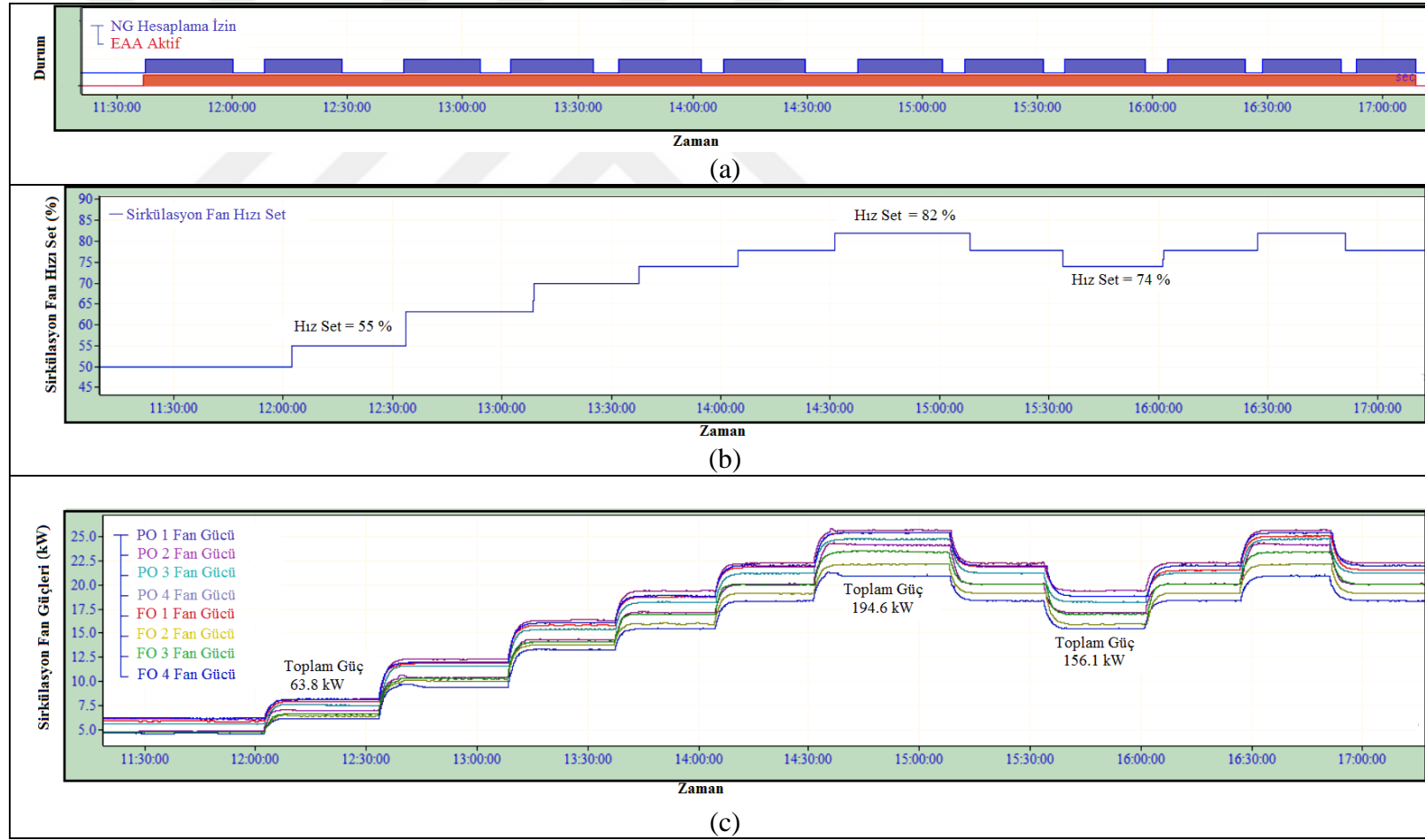
Şekil 5.18. Deneysel çalışma boyunca; a) Doğalgaz hesaplama zaman periyodu (yeşil bar) ve NG_Hesaplama_Bitti (kırmızı) biti, b) EAA aktif olma süresi

Doğal gaz tüketiminin çevrim içi hesaplanmasında cihaz ölçüm tipinden kaynaklı bir kısıtlama olmasına rağmen, fanların elektrik enerjisi tüketiminin online hesaplanmasında herhangi bir kısıtlama yoktur. Fanların tüketim güçleri sadece fan hızları artırılırken veya azaltılırken salınım yapar. Fan hızları set değerine ulaşıncaya fan tüketim güçleri kabul edilebilir aralıkta salınım yapar. Çizelge 5.4’te farklı fan hız kapasitelerinde fanların kWh cinsinden saatlik enerji tüketim değerleri verilmiştir. Doğal gaz ve elektrik tüketimleri ölçüldükten sonra, elektrik enerjisi maliyeti ile doğal gaz maliyetinin toplamı performans fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.19’da bu üretimin belirli bir zaman aralığındaki elektrik maliyeti, doğal gaz maliyeti ve hesaplanan performans fonksiyonu görülmektedir. Maliyet hesaplamasından sonra, EAA bir döngü çalışır, sirkülasyon fan hızı değişim miktarı hesaplanır ve değişim miktarı fanların set değerlerine eklenir.

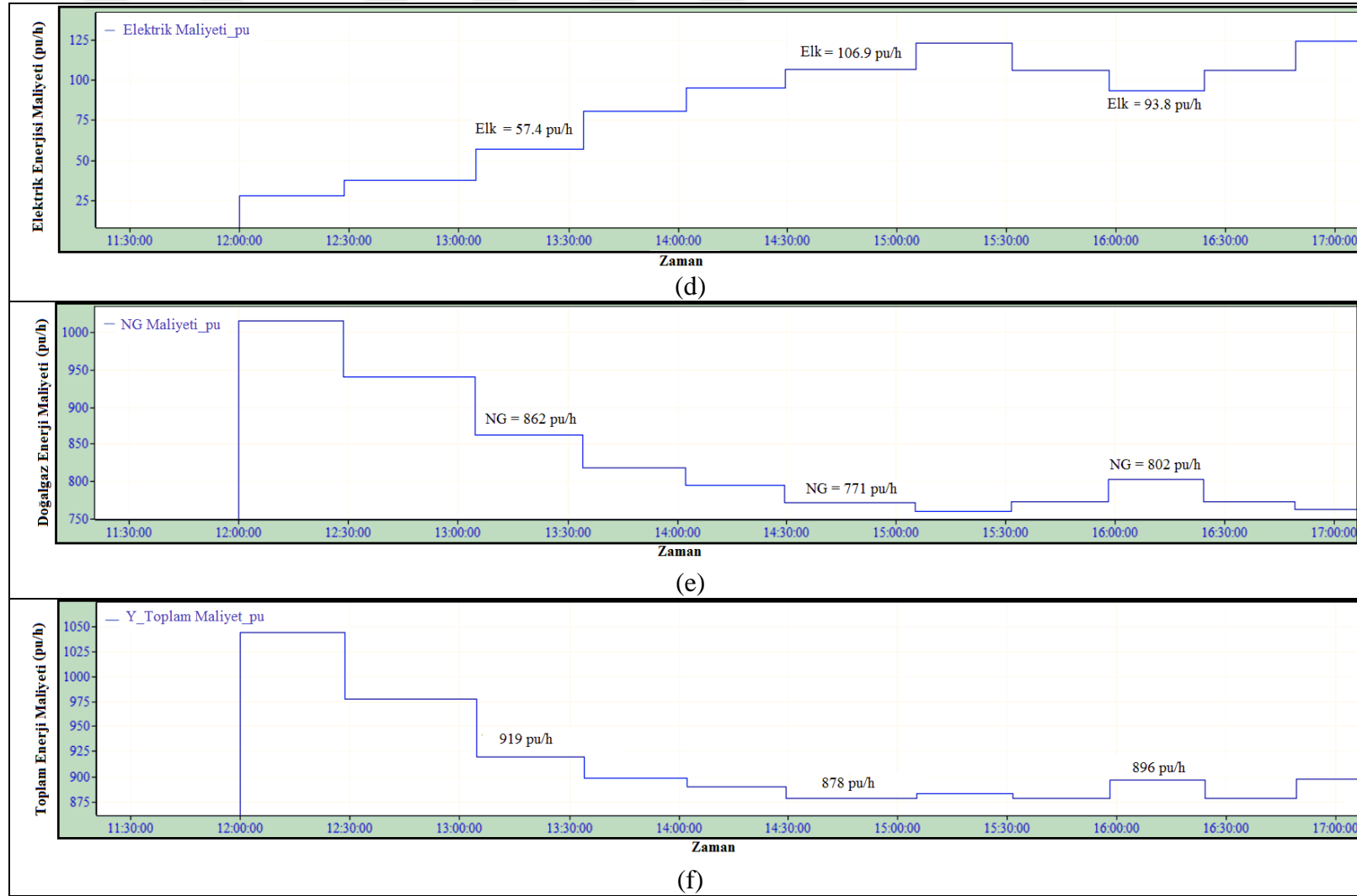
Çizelge 5.4. Sirkülasyon fanlarının elektrik tüketimi ve maliyet tablosu

Sirkülasyon Fanlarının Kapasitesi (%)	50	55	63	70	74	78	82
8 Fanın Saatlik Toplam Elektrik Enerjisi Tüketimi (Kwh)	48,8	63,8	91,2	127,9	153,6	176,9	194,6

Minimum maliyet, sirkülasyon fanlarının kapasitelerinin yaklaşık %78 olduğu aralıkta elde edildiği görülmektedir. Doğal gaz ve elektriğin birim fiyatları değişirse, performans fonksiyonunun ekstrem noktası kayacağından sirkülasyon fanlarının ekstrem çalışma hız noktası da kayacaktır. Bunun yanında, hat hızı, materyal tipi, şerit set sıcaklık değeri sirkülasyon fanlarının hızlarının ekstrem noktasını etkiler. Mevcut durumda işletme operatörleri fırında sirkülasyon hızlarını %70’e ayarlayarak kullanmaktadır. Deney sonuçları, EAA sayesinde operatör kontrolü sonuçları ile karşılaştırıldığında yaklaşık %3,44 civarı enerji tasarrufu sağlandığını göstermiştir. Sağlanan iyileştirme Çizelge 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.19. Deneysel çalışma boyunca; a) EAA durum sinyalleri, b) Sirkülasyon fanların hızı set değerleri, c) Sirkülasyon fanları anlık güç değerleri



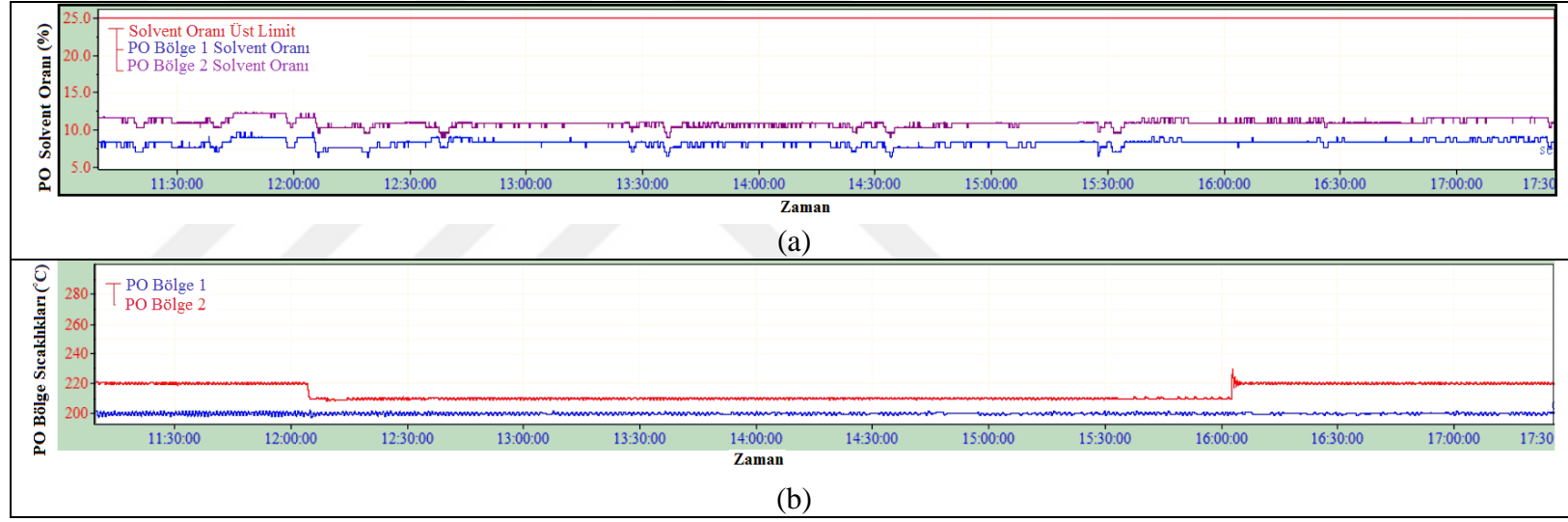
Şekil 5.19. (devam) d) Elektrik enerjisi maliyeti, e) Doğal gaz maliyeti, f) Toplam maliyet

Çizelge 5.5. Değiştirilmiş eğitim tabanlı EAA sonuçlarının detayları

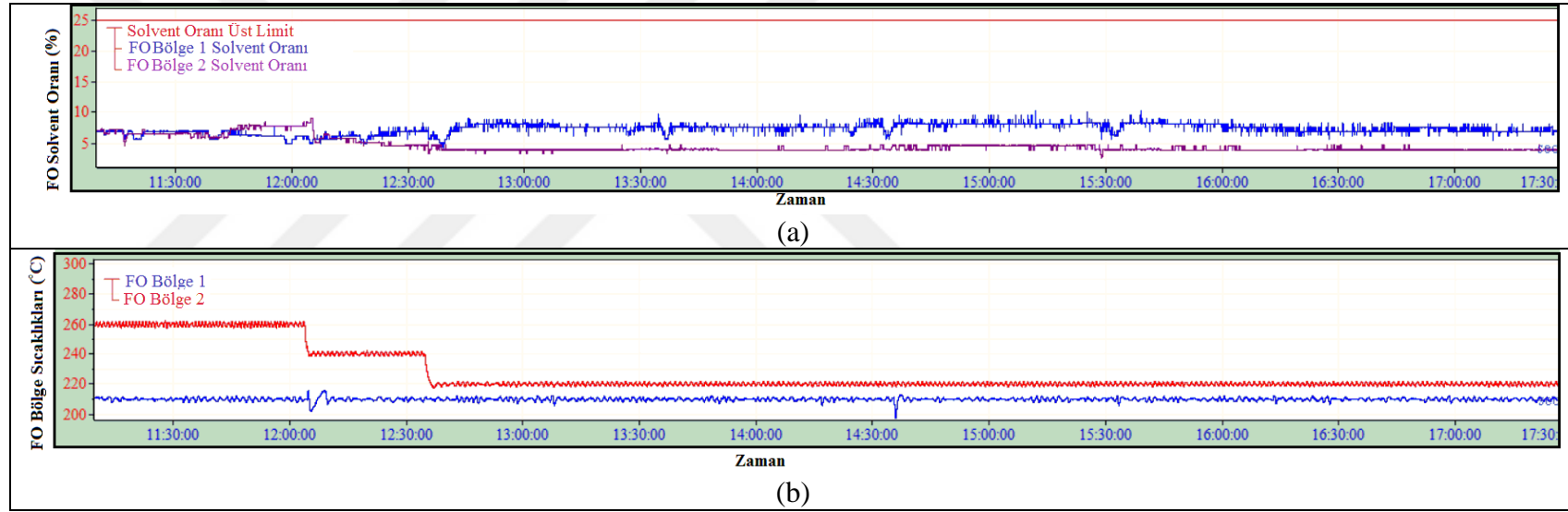
Ayarlamalar	Sirkülasyon Fan Kapasiteleri (%)	Toplam Elektrik Maliyeti (br)	Toplam doğal gaz Maliyeti (br)	Toplam Maliyet (br)	İyileşme (br)
Operator	70	72,96	844,6	917,56	31,52 (%3,44)
Değiştirilmiş Eğitim Tabanlı EAA	78	100,89	785,15	886,04	

Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi, değiştirilmiş eğitim tabanlı EAA ile sirkülasyon fan hızları %70'den %78'e çıkarılmıştır. Bu değişim elektrik maliyetinde 72,96 birimden 100,89 birime artışa neden olmuştur. Bununla birlikte toplam doğal gaz maliyeti 844,6 birimden 785,15 birime düşmüştür. Bu düşüş değeri ise toplam elektrik maliyetinin değişiminden daha yüksektir. Sonuç olarak fırınların toplam maliyeti 917,56 birimden 886,04 birime düşmüştür. Bu değer de enerji maliyetinde %3,44 verim artışına denk gelmektedir.

Gerçek sistemler üzerinde çalışırken ayar değişiklikleri yapılması durumunda sistemin güvenli çalışmasına da çok dikkat edilmelidir. Üzerinde çalışma yapılan fırında boya inceltmede kullanılan patlayıcı özelliği olan solvent kullanılmaktadır. Bölgedeki solvent oranının da emniyetli bölge içerisinde olup olmadığı gözlemlenmiştir. Her bir fırın bölmesinde dört bölge bulunmasına rağmen, fırın bölmelerinin ilk iki bölmelerinde solvent oranına uyulmaktadır. Geri kalan bölgelerde solvent oranındaki değişim dikkate alınabilecek oranda oluşmaz. Bu nedenle, PO ve FO bölümlerinin ilk iki bölgesi için solvent oranlarının değişimi sırasıyla Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de verilmiştir. PO fırın bölgelerinin sıcaklığı küçük bir değerde düşürüldüğünden solvent oranında önemsiz bir azalma gözlenmiştir. Öte yandan, FO fırın bölgelerinin sıcaklığındaki önemli değişiklik solvent oranında önemli bir değişikliğe neden olmuştur.



Şekil 5.20. Deneysel çalışma boyunca; a) PO bölümü birinci ve ikinci bölgedeki solvent değerleri, b) PO bölümü birinci ve ikinci bölgedeki sıcaklık değerleri



Şekil 5.21. Deneysel çalışma boyunca; a) FO bölümü birinci ve ikinci bölgedeki solvent değerleri, b) FO bölümü birinci ve ikinci bölgedeki sıcaklık değerleri

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, Hatay Dört Yol ilçesinde, MMK Metalurji firmasının çelik şerit boya kaplama hattı kurutma fırınının tükettiği doğal gaz ile elektrik enerjisinin toplam maliyetinin optimizasyonu için değiştirilmiş eğim tabanlı EAA önerilmiş ve fırına herhangi bir yapısal değişiklik yapılmadan başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Çelik şerit boya kaplama hattı fırını iki bölümden ve her bölüm dört ayrı ısıtma bölgesi olmak üzere toplamda sekiz bölgeden oluşmaktadır. Her ne kadar şeriti ısıtmak için hem doğal gaz hem de elektrik olmak üzere iki enerji kaynağı kullanılsa da şeritin sıcaklığını referans değerinde tutulması brülörlerin kontrol edilmesiyle sağlanmaktadır. Fırının ısıtma prensibi, taşınım ısı transferine dayalı olduğundan, değiştirilmiş eğim tabanlı EAA, şeritin istenen çıkış sıcaklığından ödün vermeden toplam enerji maliyetinin minimum noktasını bulmak için sirkülasyon fan hızlarını ayarlamak için kullanılmıştır. Bu çalışmada tek giriş tek çıkış EAA uygulanmıştır. Çalışma aşamasında birçok yapısal zorlukla karşılaşmıştır. Bu zorluklar yazılımsal olarak aşılmıştır. Isıtma sisteminin zaman gecikmesi de dikkate alınmıştır.

Üretim sırasında 6 saatlik deneysel bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Fırın imalatçısının tavsiye ettiği sirkülasyon fan hızlarına göre toplam maliyetin %3,44 oranında azaldığı gözlenmiştir. Fırın sistemleri yüksek enerji tüketen sistemler olduğundan, kesintiye uğramadan çalıştığında bu gelişme enerji maliyeti tasarrufu noktasında ciddi derecede önemlidir. Doğal gaz ve elektrik birim fiyatları değişirse, sirkülasyon fanlarının hızı, kayan ekstrem noktaya göre değişir. Ayrıca hat hızı, malzeme kalitesi, şerit sıcaklık set değeri de sirkülasyon fanlarının ekstrem noktasını etkiler.

Literatürde sadece simülasyonla teorik veya deney setleri seviyesinde uygulaması yapılmış olan EAA çalışmalarının yanında, yukarıda özellikleri verilen değiştirilmiş eğim tabanlı EAA ilk defa bir endüstriyel fırına uygulanarak optimizasyonda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, her bir bölgenin doğal gazını çevrim içi ölçebilecek doğal gaz debimetreleri montajı yapıldığında çalışmaya çok girişli çok çıkışlı EAA olarak devam edilecektir. Böylece, tasarruf miktarının daha fazla olması hedeflenmektedir.

Mevcut çalışmada, tüm doğal gaz tüketimi tek bir noktadan ölçüldüğünden çevre şartlarından dolayı ölü aralık büyük seçilmişti. Her bölgenin debimetresi ayrı olduğunda

ölu aralığı da çok daha küçük seçme imkânı doğacaktır. Aynı zamanda sirkülasyon fan hızının minimum adım miktarını da daha fazla kısma mümkün olacağından ekstrem noktaya daha fazla yaklaşılabilecektir. Sonuç olarak, elde edilecek tasarruf miktarı da daha fazla olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] İnternet: IEA. World Energy Outlook 2021 - revised version October 2021, URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>, Son Erişim Tarihi: 31.01.2023
- [2] Khodabandeh, E., Pourramezan, M., Pakravan, M.H. (2016). Effects of excess air and preheating on the flow pattern and efficiency of the radiative section of a fired heater. *Appl Therm Eng*, 105, 537-548, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.038>.
- [3] Maduko, C.F., Akuru U.B. (2013). Future Trends on Global Energy Demand. *ES4PG-2013*, p. 217–23.
- [4] Luo, Y., Woolley, E., Rahimifard, S., Simeone, A. (2015). Improving energy efficiency within manufacturing by recovering waste heat energy. *J Therm Eng Tildiz Tech Univ Press*, 1(5),337–44. <https://doi.org/10.18186/jte.49943>.
- [5] Ozturk, I. (2015) Measuring the impact of energy consumption and air quality indicators on climate change: evidence from the panel of UNFCC classified countries. *Environ Sci Pollut Res*, 22:15459–68. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4757-3>.
- [6] He, K., Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renew Sustain Energy Rev*, 70, 1022–39. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>.
- [7] Kang, J., Rong, Y. (2006). Modeling and Simulation of Load Heating in Heat Treatment Furnaces. *J Mater Process Techno*, 174, 109–14. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.037>.
- [8] Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., Hosenuzzaman, M., Saidur, R., Mahbubul, I.M., Rashid, M.M. (2012). Energy savings in the combustion based process heating in industrial sector. *Renew Sustain Energy Rev*, 16, 4527–36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.027>.
- [9] Burns, D.J., Laughman, C. (2012). Extremum Seeking Control for Energy Optimization of Vapor Compression Systems. *Int Refrig Air Cond Conf*, 1–7.
- [10] Trollberg, O., Carlsson, B., Jacobsen, E.W. (2014). Extremum seeking control of the CANON process - Existence of multiple stationary solutions. *J Process Control*, 24, 348–56. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.11.007>.
- [11] King, R., Becker, R., Feuerbach, G., Henning, L., Petz, R., Nitsehe, W., Lemke, O., Neise, W. (2006). Adaptive flow control using slope seeking. 14th Mediterr Conf Control Autom MED'06, <https://doi.org/10.1109/MED.2006.328753>.
- [12] Dochain, D., Perrier, M., Guay, M. (2011). Extremum seeking control and its application to process and reaction systems: A survey. *Math Comput Simul*, 82, 369–80. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2010.10.022>.

- [13] Tan, Y., Moase, W.H., Manzie, C., Nešić, D., Mareels, I.M.Y. (2010). Extremum seeking from 1922 to 2011. *Proc 29th Chinese Control Conf CCC'10*, 14–26.
- [14] Krstić, M., Wang, H.H. (2000). Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems. *Automatica*, 36, 595–601. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(99\)00183-1](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00183-1).
- [15] Wang, W., Li, Y., Cao, F. (2019). Extremum seeking control for efficient operation of an air-source heat pump water heater with internal heat exchanger cycle vapor injection. *Int J Refrig*, 99, 153–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.01.002>.
- [16] Sotiropoulos, F.E., Asada, H. (2019). A Model-Free Extremum-Seeking Approach to Autonomous Excavator Control Based on Output Power Maximization. *IEEE Robot Autom Lett*, 4, 1005–12. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2893690>.
- [17] Rampazzo, M., Cervato, A., Corazzol, C., Mattiello, L., Beghi, A., Cecchinato, L., Virzi, A. (2019). Energy-efficient operation of transcritical and subcritical CO₂ inverse cycles via Extremum Seeking Control. *J Process Control*, 81, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.06.008>.
- [18] Shi, J., Hu, L., Xue, F., Qin, Z., Ling, L., Ma, L. (2019). IIWO based sliding mode extremum seeking control for MPPT in wind energy conversion system. *Energy Procedia*, 158, 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.050>.
- [19] Power, M. (2022). Tracking P. Experimental validation of Extremum Seeking and Sliding Mode-based Control for an autonomous PV System under partial shading conditions, *J Electrical Systems*, 18(4), 520–32.
- [20] Huang, K., Qian, T., Tang, W. (2020). Solar energy tracking based on extremum seeking control method. *ISPEC 2020 - Proc IEEE Sustain Power Energy Conf Energy Transit Energy Internet*, 212–7. <https://doi.org/10.1109/iSPEC50848.2020.9351172>.
- [21] Lara-Cisneros, G., Dochain, D., Alvarez-Ramírez, J. (2019). Model based extremum-seeking controller via modelling-error compensation approach. *J Process Control*, 80, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.04.014>.
- [22] Kheirabadi, A.C., Nagamune, R. (2019). A quantitative review of wind farm control with the objective of wind farm power maximization. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 192, 45–73. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.06.015>.
- [23] Kebir, A., Woodward, L., Akhrif, O. (2019). Real-time optimization of renewable energy sources power using neural network-based anticipative extremum-seeking control. *Renew Energy*, 134, 914–26. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.083>.
- [24] van der Hoek, D., Kanev, S., Allin, J., Bieniek, D., Mittelmeier, N. (2019). Effects of axial induction control on wind farm energy production - A field test. *Renew Energy*, 140, 994–1003. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.117>.

- [25] Fatemi, S.M., Shadlu, M.S., Talebkah, A. (2020). A New Method for Maximum Power Point Tracking in Solar PV Systems by Combining Extremum Seeking Method (ESM) and Model Predictive Control (MPC). *11th Power Electron Drive Syst Technol Conf PEDSTC 2020* 2020:1–5. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC49159.2020.9088424>.
- [26] Yin, C., Dadras, S., Huang, X., Chen, Y.Q., Zhong, S. (2019). Optimizing Energy Consumption for Lighting Control System via Multivariate Extremum Seeking Control with Diminishing Dither Signal. *IEEE Trans Autom Sci Eng*, 16, 1848–59. <https://doi.org/10.1109/TASE.2019.2901432>.
- [27] van der Weijst, R., van Keulen, T., Willems, F. (2019). Constrained multivariable extremum-seeking for online fuel-efficiency optimization of Diesel engines. *Control Eng Pract*, 87, 133–44. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.03.008>.
- [28] Ma, K., Hu, S., Hu, G., Bai, Y., Yang, J., Dou, C., Guerrero, J.M. (2020). Energy Management Considering Unknown Dynamics Based on Extremum Seeking Control and Particle Swarm Optimization. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 28, 1560–8. <https://doi.org/10.1109/TCST.2019.2910158>.
- [29] Silveira, R.D., das Neves, G.P., da Silva, S.A.O., Angélico, B.A. (2021). An enhanced MPPT algorithm based on adaptive extremum-seeking control applied to photovoltaic systems operating under partial shading. *IET Renew Power Gener*, 15, 1227–39. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12102>.
- [30] Zhou, B., Ke, J., Han, Z., Guan, X. (2019). A Review of Extremum Seeking Control or Source Seeking Control and its Application of Mobile Robot. *9th IEEE Int Conf Cyber Technol Autom Control Intell Syst CYBER 2019*, 1541–6. <https://doi.org/10.1109/CYBER46603.2019.9066568>.
- [31] Hazeleger, L., Haring, M., van de Wouw. N. (2020). Extremum-seeking control for optimization of time-varying steady-state responses of nonlinear systems. *Automatica*, 119, 109068. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2020.109068>.
- [32] Straus, J., Krishnamoorthy, D., Skogestad, S. (2019). On combining self-optimizing control and extremum-seeking control – Applied to an ammonia reactor case study. *J Process Control*, 78, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.01.012>.
- [33] Ciri, U., Leonardi, S., Rotea, M.A. (2019). Evaluation of log-of-power extremum seeking control for wind turbines using large eddy simulations. *Wind Energy*, 22, 992–1002. <https://doi.org/10.1002/we.2336>.
- [34] Calli, B., Carls, W., Jonker, P., Wisse, M. (2012). Comparison of extremum seeking control algorithms for robotic applications. *IEEE Int Conf Intell Robot Syst*, 3195–202. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6386180>.
- [35] Olalla, C., Arteaga, M.I., Leyva, R., El Aroudi, A. (2007). Analysis and comparison of extremum seeking control techniques. *IEEE Int Symp Ind Electron*, 72–6. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2007.4374576>.

- [36] Pan, Y., Özgüner, Ü. (2002). Extremum seeking control with sliding mode. *IFAC 15th Triennial World Congr*, Barcelona, Spain, 15, 371–6. <https://doi.org/10.3182/20020721-6-es-1901.00311>.
- [37] Yau, H.T., Lin, C.J., Wu, CH. (2013). Sliding mode extremum seeking control scheme based on PSO for maximum power point tracking in photovoltaic systems. *Int J Photoenergy*. 2013, 1-11, <https://doi.org/10.1155/2013/527948>.
- [38] Dinçmen, E., Güvenç, B.A., Acarman, T. (2014). Extremum-seeking control of ABS braking in road vehicles with lateral force improvement. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 22, 230–7. <https://doi.org/10.1109/TCST.2012.2229465>.
- [39] Xue, F., Qin, Z., Ma, X., Qiao, W. (2020). MPPT for Wind Energy Conversion System Based on Improved Sliding Mode Extremum Seeking Control. *Asia-Pacific Power Energy Eng Conf APPEEC*, 3–6. <https://doi.org/10.1109/APPEEC48164.2020.9220664>.
- [40] Hernandez-Sanchez, A., Chairez, I., Poznyak, A. (2020). Extended integral sliding mode robust sub-gradient extremum seeking control for tracking trajectory of autonomous underwater vehicle. *7th Int Conf Control Decis Inf Technol CoDIT*, 433–8. <https://doi.org/10.1109/CoDIT49905.2020.9263845>.
- [41] Hu, L., Xue, F., Qin, Z., Shi, J., Qiao, W., Yang, W., Yang, T. (2019). Sliding mode extremum seeking control based on improved invasive weed optimization for MPPT in wind energy conversion system. *Appl Energy*, 248, 567–75. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.073>.
- [42] Koeln, J.P., Alleyne, A.G. (2014). Optimal subcooling in vapor compression systems via extremum seeking control: Theory and experiments. *Int J Refrig*, 43, 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.03.012>.
- [43] Tan, Y., Nešić, D., Mareels, I. (2008). On the choice of dither in extremum seeking systems: A case study. *Automatica*, 44, 1446–50. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.10.016>.
- [44] Ghaffari, A., Krstic, M., Seshagiri, S. (2014). Extremum seeking for wind and solar energy applications. *Mech Eng*, 136, 13–21. <https://doi.org/10.1115/3.2016-mar-5>.
- [45] Killingsworth, N.J., Krstić, M. (2006). PID Tuning Using Extremum Seeking: Online, Model-Free Performance Optimization. *IEEE Control Syst*, 26, 70–9. <https://doi.org/10.1109/MCS.2006.1580155>.
- [46] Brunton S.L., Clarence, W., Rowley, S.R.K. (2010). Maximum power point tracking for photovoltaic system using ripple-based extremum seeking control. *IEEE Trans Power Electron*, 25, 2531–40. <https://doi.org/10.1109/TCST.2012.2223819>.
- [47] Dong, L., Li, Y., Mu, B., Xiao, Y. (2015). Self-optimizing control of air-source heat pump with multivariable extremum seeking. *Appl Therm Eng*, 84, 180–95. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.038>.

- [48] Li, P., Li, Y., Seem, J.E. (2010). Efficient operation of air-side economizer using extremum seeking control. *J Dyn Syst Meas Control Trans ASME*, 132, 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4001216>.
- [49] Wang, W., Li, Y., Cao, F. (2019). Extremum seeking control for efficient operation of an air-source heat pump water heater with internal heat exchanger cycle vapor injection. *Int J Refrig*, 99, 153–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.01.002>.
- [50] Li, X., Li, Y., Seem, J.E., Li, P. (2013). Dynamic modeling and self-optimizing operation of chilled water systems using extremum seeking control. *Energy Build*, 58, 172–82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.010>.
- [51] Yin, C., Zhou, S., Wu, S., Wang, W., Wei, X., Cheng, Y., Huang, X. (2017). Tracking the Minimum Energy Consumption for the Lighting System through Modified Extremum Seeking Method. *Energy Procedia*, 105, 2583–8. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.741>.
- [52] Yin, C., Dadras, S., Huang, X., Mei, J., Malek, H., Cheng, Y. (2017). Energy-saving control strategy for lighting system based on multivariate extremum seeking with Newton algorithm. *Energy Convers Manag*, 142, 504–22. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.072>.
- [53] Ghaffari, A., Krstić, M., Seshagiri, S. (2014). Power optimization for photovoltaic microconverters using multivariable newton-based extremum seeking. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 22, 2141–9. <https://doi.org/10.1109/TCST.2014.2301172>.
- [54] Oliveira, T.R., Krstić, M. (2015). Gradient extremum seeking with delays. *IFAC-PapersOnLine*, 28, 227–32. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.382>.
- [55] Santos, G.C., Oliveira, T.R. (2020). Gradient Extremum Seeking with Nonconstant Delays. *IEEE Access*, 8, 120429–46. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005186>.
- [56] Yilmaz, S., Furat, M. (2023). A real-time cost optimization of two-section oven system with discrete gradient extremum seeking control : An experimental study in iron and steel industry. *J Process Control*, 122, 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.12.005>.
- [57] Poveda, J., Quijano, N. (2012). A Shahshahani Gradient based extremum seeking scheme. *Proc IEEE Conf Decis Control*, 5104–9. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426134>.
- [58] Xiao, Y., Li, Y., Seem, J.E. (2014). Multi-variable Extremum Seeking Control for Mini-split Air-conditioning System. *Int Refrig Air Cond Conf*, 1–12.
- [59] Zhang, C., Ordóñez, R. (2007). Numerical optimization-based extremum seeking control with application to ABS design. *IEEE Trans Automat Contr*, 52, 454–67. <https://doi.org/10.1109/TAC.2007.892389>.

- [60] Zhang, C., Ordóñez, R. (2006). Extremum seeking control based on numerical optimization and state regulation - Part I: Theory and framework. *Proc IEEE Conf Decis Control*, 4466–71. <https://doi.org/10.1109/cdc.2006.376858>.
- [61] Zhang, C., Ordóñez, R. (2009). Robust and adaptive design of numerical optimization-based extremum seeking control. *Automatica*, 45, 634–46. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2008.09.025>.
- [62] İnternet: Trust Region Methods. https://Optimization.Mccormick.Northwestern.Edu/IndexPhp/Trust-Region_methods (Son Erişim Tarihi 28.03.2021).
- [63] Yuan, Y.X. (1994). Trust region algorithms for nonlinear programming, *Recent Advances in Trust Region Algorithms*, 1-25. <https://doi.org/10.1090/conm/163/01559>.
- [64] Zhang, C., Ordóñez, R. (2006). Extremum seeking control based on numerical optimization and state regulation - Part I: Theory and framework. *45th IEEE Conf Decis Control*, 4466–71. <https://doi.org/10.1109/cdc.2006.376858>.
- [65] Haskara, I., Zhu, G.G., Winkelman, J. (2006). Multivariable EGR/spark timing control for IC engines via extremum seeking. *Proc Am Control Conf*, 1173–8. <https://doi.org/10.1109/acc.2006.1656376>.
- [66] Trollberg O, Jacobsen EW. Greedy extremum seeking control with applications to biochemical processes. *IFAC-PapersOnLine* 2016; 49:109–14. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.225>.
- [67] Ghaffari, A., Krstic, M., Seshagiri, S. (2012). Power optimization for photovoltaic micro-converters using multivariable Newton-based extremum-seeking. *Proc IEEE Conf Decis Control*, 2421–6. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426293>.
- [68] Marjanovic, A., Krstic, M., Durovic, Z., Kovacevic, B. (2017). Control of Thermal Power Plant Combustion Distribution Using Extremum Seeking. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 25(5), 1670-82, <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2627499>.
- [69] Schuster, E., Romero, C., Yao, Z., Si, F. (2010). Integrated real-time optimization of boiler and post-combustion system in coal-based power plants via extremum seeking. *IEEE Int Conf Control Appl Part 2010 IEEE Multi-Conference Syst Control Yokohama, Japan*, 2184–9. <https://doi.org/10.1109/CCA.2010.5611176>.
- [70] Choi, J.Y., Rrstic, M., Ariyur, K.B., Lee, J.S. (2002). Extremum Seeking Control for Discrete-Time Systems. *IEEE Trans Automat Contr*, 47, 318–23. <https://doi.org/10.1109/9.983370>.
- [71] Guay, M., Burns, D.J. (2017). A Proportional Integral Extremum-Seeking Control Approach for Discrete-Time Nonlinear Systems. *Int J Control*, 90, 1543–54. <https://doi.org/10.1080/00207179.2016.1213425>.
- [72] Liu, S.J., Krstic, M. (2016). Stochastic Averaging in Discrete Time and It's Applications to Extremum Seeking. *IEEE Trans Automat Contr*, 61, 90–102. <https://doi.org/10.1109/TAC.2015.2427672>.

- [73] Frihauf, P., Krstić, M., Baar, T. (2013). Finite-Horizon LQ Control for Unknown Discrete-Time Linear Systems via Extremum Seeking. *Eur J Control*, 19, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2013.05.015>.
- [74] Vandermeulen, I., Guay, M., McLellan, P.J. (2017). Formation Control of High-Altitude Balloons Experiencing Real Wind Currents by Discrete-Time Distributed Extremum Seeking Control. *Proc Am Control Conf*, 991–6. <https://doi.org/10.23919/ACC.2017.7963082>.
- [75] Shekhar, R.C., Moase, W.H., Manzie, C. (2014). Discrete-Time Extremum-Seeking for Wiener-Hammerstein Plants. *Automatica*, 50, 2998–3008. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.10.030>.
- [76] Zargarzadeh, H., Jagannathan, S., Drallmeier, J.A. (2014). Extremum-Seeking for Nonlinear Discrete-Time Systems with Application to HCCI Engines. *Proc Am Control Conf*, 861–6. <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6858872>.
- [77] Ebegbulem, J., Guay, M. (2018). Power Maximization of Wind Farms using Discrete-time Distributed Extremum Seeking Control. *IFAC-PapersOnLine*, 51, 339–44. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.323>.
- [78] Guay, M., Burns, D.J. (2019). Extremum Seeking Control for Discrete-Time with Quantized and Saturated Actuators. *Processes*, 7, 1–14. <https://doi.org/10.3390/pr7110831>.
- [79] Ahmadi, R., Zargarzadeh, H. (2015). A New Discrete-in-Time Extremum Seeking Based Technique for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Systems. *Conf Proc - IEEE Appl Power Electron Conf Expo – APEC*, 2015-May, 1751–6. <https://doi.org/10.1109/APEC.2015.7104583>.
- [80] Guay, M. (2014). A Time-Varying Extremum-Seeking Control Approach for Discrete-Time Systems. *J Process Control*, 24, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.11.014>.
- [81] Guay, M., Beerens, R., Nijmeijer, H. (2014). A time-varying extremum-seeking control approach for discrete-time systems with application to model predictive control. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 1023–8. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-za-1003.02598>.
- [82] Lange, A., King, R. (2020). Discrete-Step, Quasi-Newton Extremum Seeking Control for Multivariable Real-Time Optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 53, 1608–13. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2206>.
- [83] Gelbert, G., Moeck, J.P., Paschereit, C.O., King, R. (2012). Advanced algorithms for gradient estimation in one- and two-parameter extremum seeking controllers. *J Process Control*, 22, 700–9. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2012.01.022>.
- [84] Poveda, J.I., Krstić, M. (2020). Fixed-Time Extremum Seeking. *2020 Am. Control Conf.*, 2838–43.

- [85] Yin, C., Dadras, S., Huang, X., Cheng, Y., Malek, H. (2018). The design and performance analysis of multivariate fractional-order gradient-based extremum seeking approach. *Appl Math Model*, 62, 680–700. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.06.028>.
- [86] Gadpayle SP, Baxi RN. (2014). Electric melting furnace-a review. *Int J Emerg Sci Eng*, 2, 80–3.
- [87] Pfeifer, H. (2017). Industrial Furnaces-Status and Research Challenges. *Energy Procedia*, 120, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.153>.
- [88] Lee, C.L., Jou, C.J.G. (2011). Improving Furnace and Boiler Cost-Effectiveness and CO₂ Emission by Adjusting Excess Air. *Environ Prog Sustain Energy*, 31, 676–80. <https://doi.org/10.1002/ep>.
- [89] Rahman, D.A., Hendrawati, T.Y. (2022). Simulation of Efficiency in Improving the Performance of Cylindrical Vertical Furnace Using Indirect Method, *Journal of Applied Sciences and Advanced Technology*, 5(1), 7–12.
- [90] Gao, Q., Pang, Y., Sun, Q., Liu, D., Zhang, Z. (2021). Numerical Analysis of the Effects of Oxygen-Enriched and Different Inlet Conditions on Performance of an Indirect Reheating Furnace with Pulse Combustion. *ACS Omega*, 6, 30627–43. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04450>.
- [91] Kumbhar, S.V., Sonage, B.K. (2019). Enhancement of thermal efficiency and cost effectiveness by development of melting furnace by revamping and troubleshooting fuel-fired furnace. *Heat Transf - Asian Res*, 48, 164–81. <https://doi.org/10.1002/htj.21377>.
- [92] Narsaiah, J., Laxminarayana, P., Govardhan, J. (2020). Energy Improvement in Natural Gas Furnace using Oscillating Combustion Technology with Variation of Amplitudes, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 07(10), 2000–8.
- [93] Milićević, A., Belošević, S., Crnomarković, N., Tomanović, I., Tucaković, D. (2020). Mathematical modelling and optimisation of lignite and wheat straw co-combustion in 350 MWe boiler furnace. *Appl Energy*, 260, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114206>.
- [94] González Rebordinos, J., Herce, C., González-Espinosa, A., Gil, M., Cortés, C., Brunet, F., Ferre, L., Arias, A. (2019). Evaluation of retrofitting of an industrial steam cracking furnace by means of CFD simulations. *Appl Therm Eng*, 162(5), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114206>.
- [95] Jin, B., Wang, L., Liu, C. (2020). Experimental Analysis of Thermal Efficiency of Biomass-burning Hot Blast Furnace. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 721, 1-5. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/721/1/012072>.
- [96] Szwaja, S., Zajemska, M., Szwaja, M., Maroszek, A. (2021). Integration of waste biomass thermal processing technology with a metallurgical furnace to improve its efficiency and economic benefit. *Clean Technol Environ Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02195-9>.

- [97] Mironov, Y.M. (2020). Optimization of the Electric Arc Furnace Transformer Power. *Russ Metall*, 2020, 654–8. <https://doi.org/10.1134/S0036029520060142>.
- [98] Meng, D., Shao, C., Zhu, L. (2022). Two-level comprehensive energy-efficiency quantitative diagnosis scheme for ethylene-cracking furnace with multi-working-condition of fault and exception operation. *Energy*, 239, 121835. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121835>.
- [99] Wu, X., Dai, J.T., Yan, J., Li, L. (2021). Optimization of heat treatment furnace based on automatic control system. *J Phys Conf Ser* 2044(2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2044/1/012194>.
- [100] Chunsheng, W., Yan, Z., Zejun, L., Fuxiang, Y. (2019). Heat transfer simulation and thermal efficiency analysis of new vertical heating furnace. *Case Stud Therm Eng*, 13, 100414. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100414>.
- [101] Griffin, P.W., Hammond, G.P. (2019) Industrial energy use and carbon emissions reduction in the iron and steel sector: A UK perspective. *Appl Energy*, 249, 109–25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.148>.
- [102] Ma, L., Fang, Q., Yin, C., Wang, H., Zhang, C., Chen, G. (2019). A novel corner-fired boiler system of improved efficiency and coal flexibility and reduced NOx emissions. *Appl Energy* 238:453–65. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.084>.
- [103] Wang, Y., Zhou, Y. (2020). Numerical optimization of the influence of multiple deep air-staged combustion on the NOx emission in an opposed firing utility boiler using lean coal. *Fuel*, 269, 116996. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116996>.
- [104] Berghout, N., Meerman, H., van den Broek, M., Faaij, A. (2019). Assessing deployment pathways for greenhouse gas emissions reductions in an industrial plant – A case study for a complex oil refinery. *Appl Energy*, 236, 354–78. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.074>.
- [105] Ren, L., Zhou, S., Peng, T., Ou, X. (2021). A review of CO2 emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China. *Renew Sustain Energy Rev*, 143, 110846. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110846>.
- [106] Rosado, P.J., Levinson, R. (2019). Potential benefits of cool walls on residential and commercial buildings across California and the United States: Conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Build*, 199, 588–607. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.028>.
- [107] Ubando, A.T., Chen, W.H., Ong, H.C. (2019). Iron oxide reduction by graphite and torrefied biomass analyzed by TG-FTIR for mitigating CO2 emissions. *Energy*, 180, 968–77. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.149>.
- [108] Holappa, L. (2020). A General Vision for Reduction of Energy Steel Industry. *Metals (Basel)*, 10, 1117.

- [109] Tuttle, J.F., Vesel, R., Alagarsamy, S., Blackburn, L.D., Powell, K. (2019). Sustainable NO_x emission reduction at a coal-fired power station through the use of online neural network modeling and particle swarm optimization. *Control Eng Pract*, 93, 104167. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104167>.
- [110] Tan, X., Li, H., Guo, J., Gu, B., Zeng, Y. (2019). Energy-saving and emission-reduction technology selection and CO₂ emission reduction potential of China's iron and steel industry under energy substitution policy. *J Clean Prod*, 222, 823–34. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.133>.
- [111] Rehfeldt, M., Worrell, E., Eichhammer, W., Fleiter, T. (2020). A review of the emission reduction potential of fuel switch towards biomass and electricity in European basic materials industry until 2030. *Renew Sustain Energy Rev*, 120, 109672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109672>.
- [112] Device TC. Volume and Temperature Conversion Device EK220. Technical Datasheet, 2020.
- [113] Palacio-Caro, I.D., Alvarado-Torres, P.N., Cardona-Sepúlveda, L.F. (2020). Numerical Simulation of the Flow and Heat Transfer in an Electric Steel Tempering Furnace. *Energies*, 13, 3655. <https://doi.org/10.3390/en13143655>.
- [114] Eldigair, Y., Garelli, F., Kunusch, C., Ocampo-martinez, C. (2020). Adaptive PI control with robust variable structure anti-windup strategy for systems with rate-limited actuators: Application to compression systems. *Control Eng Pract*, 96, 104282. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104282>.
- [115] Oliveira, T.R., Tsubakino, D., Krstic, M. (2020). A Simplified Multivariable Gradient Extremum Seeking for Distinct Input Delays with Delay-Independent Convergence Rates. *Proc Am Control Conf 2020*, 608–13. <https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147370>.
- [116] Galarza-Jimenez, F., Poveda, J.I., Bianchin, G., Dall'anese, E. (2022). Extremum Seeking under Persistent Gradient Deception: A Switching Systems Approach. *IEEE Control Syst Lett*, 6, 133–8. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3050451>.
- [117] Torres-Zúñiga, I., López-Caamal, F., Hernández-Escoto, H., Alcaraz-González, V. (2021). Extremum seeking control and gradient estimation based on the Super-Twisting algorithm. *J Process Control*, 105, 223–35. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.08.004>.
- [118] Chaudhari, S.D., Shendge, P.D., Phadke, S.B. (2022). Dynamic Nonlinear Gradient Observer Based Extremum Seeking Control for Optimum Braking. *IEEE Trans Ind Electron*, 69, 2833–42. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3065612>.
- [119] Huang, G. (2011). Model predictive control of VAV zone thermal systems concerning bi-linearity and gain nonlinearity. *Control Eng Pract*, 19:700–10. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.03.005>.
- [120] Huang, H., Chen, L., Hu, E. (2015). A neural network-based multi-zone modelling approach for predictive control system design in commercial buildings. *Energy Build*, 97:86–97. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.045>.

- [121] Mounaam, A., Bichri, A., Oulhiq, R., Souissi, A., Salouhi, M., Benjelloun, K., ve ark. (2022). Dynamic Modeling and Simulation of the Sulfur Combustion Furnace in Industrial Smelter. *Processes*, 10:1–19. <https://doi.org/10.3390/pr10122655>.
- [122] Balli, L., Hlimi, M., Achenani, Y., Atifi, A., Hamri, B. (2022). Experimental study and numerical modeling of the thermal behavior of an industrial prototype ceramic furnace: Energy and environmental optimization. *Energy Built Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.10.001>.
- [123] Arroyo, J., Pérez, L., Cuervo-Piñera, V. (2023). CFD Modeling and Validation of Blast Furnace Gas/Natural Gas Mixture Combustion in an Experimental Industrial Furnace. *Processes*, 11:1–24. <https://doi.org/10.3390/pr11020332>.
- [124] Afram, A., Janabi-Sharifi, F. (2014). Review of modeling methods for HVAC systems. *Appl Therm Eng*, 67:507–19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.055>.



EK-1. Isıtma Fırınının Matematiksel Modeli

Literatür incelendiğinde, fırınların matematiksel modelinin çıkarılmasında fiziksel özelliklere dayalı enerji denge denklemleri kullanıldığı görülmektedir [119-122]. Bunların yanında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) kullanılan bir modelleme bir endüstriyel fırın için yapılmıştır [123].

Şekil Ek.1'de bu çalışmada kullanılan fırının enerji bakımından giriş ve çıkışları gösterilmiştir. Buna göre, fırının matematiksel modeli iki aşamalı olarak elde edilebilir. İlk aşamada fırının PO bölümü için enerji denge denklemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\Delta Q_p(t) = Q_{pgiren}(t) - Q_{pçikan}(t) \quad (1.1)$$

$$\Delta Q_p(t) = \underbrace{\sum_{i=1}^4 Q_{pi}(t)}_{\text{Giren ısı enerjisi}} - \underbrace{\left[\sum_{i=1}^4 Q_{bi}(t) + \sum_{i=1}^4 Q_{di}(t) + \sum_{i=1}^4 Q_{ki}(t) + Q_{s1}(t) + Q_{pdiger}(t) \right]}_{\text{Çıkan ısı enerjisi}} \quad (1.2)$$

Benzer şekilde, fırının FO bölümü için enerji denge denklemi:

$$\Delta Q_f(t) = Q_{fgiren}(t) - Q_{fçikan}(t) \quad (1.3)$$

$$\Delta Q_f(t) = \underbrace{\sum_{i=1}^4 Q_{fi}(t)}_{\text{Giren ısı enerjisi}} - \underbrace{\left[\sum_{i=5}^8 Q_{bi}(t) + \sum_{i=5}^8 Q_{di}(t) + \sum_{i=5}^8 Q_{ki}(t) + Q_{s2}(t) + Q_{fdiger}(t) \right]}_{\text{Çıkan ısı enerjisi}} \quad (1.4)$$

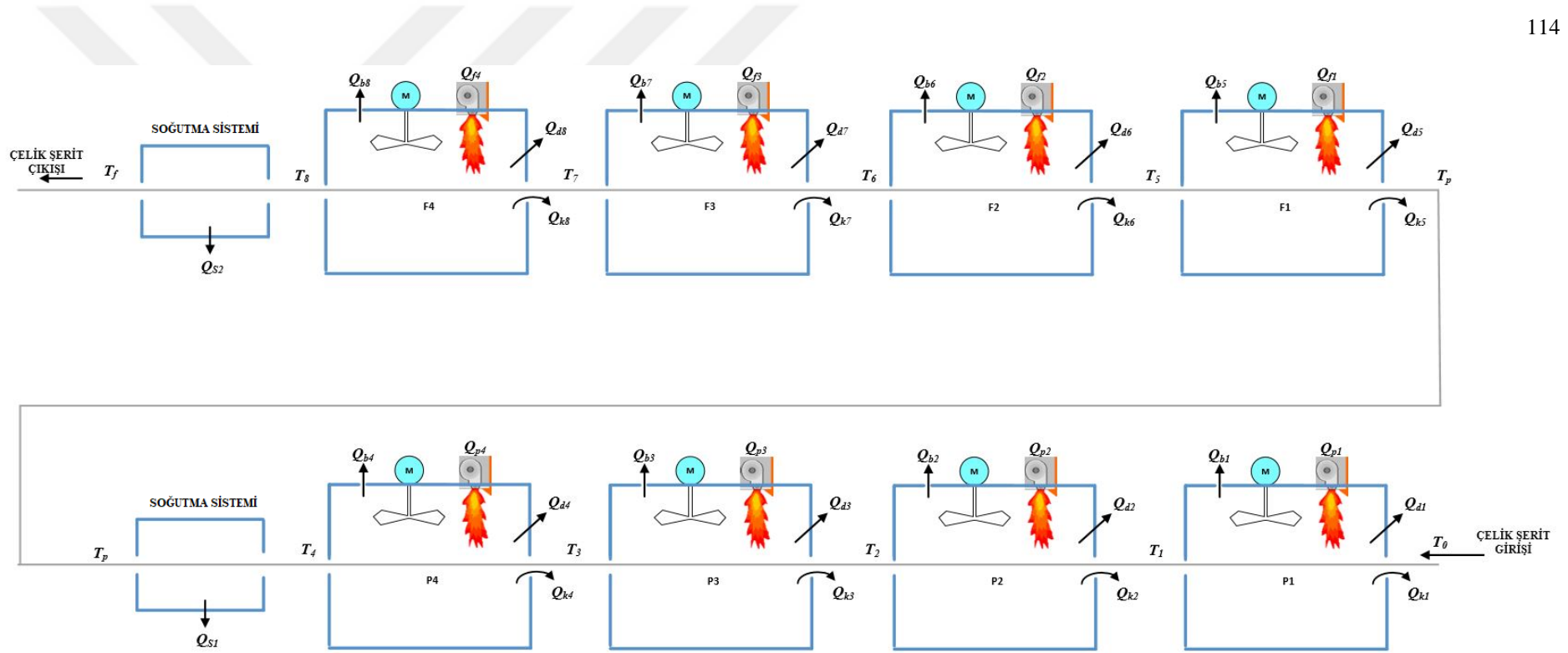
olarak bulunabilir.

İkinci aşamada ise çelik şeride aktarılan ısı enerjisinden yola çıkılarak PO ve FO çıkışındaki çelik şerit sıcaklıklarının değişimini elde etmek için tekrar enerji denge denklemleri kurulur. Buna göre, fırının PO ve FO bölümü soğutma üniteleri çıkışı çelik şerit sıcaklık değişimleri:

$$\rho VC \frac{d}{dt} T_p(t) = Q_0(t) + \Delta Q_p(t) \quad (1.5)$$

$$\rho VC \frac{d}{dt} T_f(t) = Q_0(t) + \Delta Q_p(t) + \Delta Q_f(t) \quad (1.6)$$

ile elde edilir. Burada ρ çelik şeridin yoğunluğu, V fırın içindeki çelik şeridin hacmi ve C çelik şeridin ısı kapasitesidir.



Şekil Ek.1. Bu çalışmada kullanılan fırının enerji bakımından giriş ve çıkışları

Yukarıda verilen eşitliklerdeki parametreler Şekil Ek.1'de gösterilmiş ve açıklamaları aşağıda verilmiştir:

T_0 : Çelik şerit giriş sıcaklığı, ($^{\circ}C$).

Q_0 : Çelik şeridin girişteki ısı enerjisi, (J / s).

Q_{pgiren} : Fırının PO bölümüne giren enerji, (J / s).

$Q_{pçikan}$: Fırının PO bölümünden çıkan enerji, (J / s).

ΔQ_p : Fırının PO bölümünde çelik şeride aktarılan enerji, (J / s).

$Q_{p1}, Q_{p2}, Q_{p3}, Q_{p4}$: Fırın PO bölümü brülörlerinden ısı enerjisi girişleri, (J / s).

$Q_{b1}, Q_{b2}, Q_{b3}, Q_{b4}$: Fırın PO bölümü baca kayıpları, (J / s).

$Q_{d1}, Q_{d2}, Q_{d3}, Q_{d4}$: Fırın PO bölümü duvar kayıpları, (J / s).

$Q_{k1}, Q_{k2}, Q_{k3}, Q_{k4}$: Fırın PO bölümü kapak kayıpları, (J / s).

$Q_{pdig\er}$: Fırın PO bölümü diğer ısı enerjisi kayıpları, (J / s).

Q_{s1} : Birinci soğutma ünitesi tarafından çelik şeritten alınan ısı enerjisi, (J / s).

T_p : Çelik şeridin birinci soğutma ünitesinden çıkış sıcaklığı, ($^{\circ}C$).

Q_{fgiren} : Fırının FO bölümüne giren enerji, (J / s).

$Q_{fçikan}$: Fırının FO bölümünden çıkan enerji, (J / s).

ΔQ_f : Fırının FO bölümünde çelik şeride aktarılan enerji, (J / s).

$Q_{f1}, Q_{f2}, Q_{f3}, Q_{f4}$: Fırın FO bölümü brülörlerinden ısı enerjisi girişleri, (J / s).

$Q_{b5}, Q_{b6}, Q_{b7}, Q_{b8}$: Fırın FO bölümü baca kayıpları, (J / s).

$Q_{d5}, Q_{d6}, Q_{d7}, Q_{d8}$: Fırın FO bölümü duvar kayıpları, (J / s).

$Q_{k5}, Q_{k6}, Q_{k7}, Q_{k8}$: Fırın FO bölümü kapak kayıpları, (J / s) .

$Q_{fdiğer}$: Fırın FO bölümü diğer ısı enerjisi kayıpları, (J / s) .

Q_{s2} : İkinci soğutma ünitesi tarafından çelik şeritten alınan ısı enerjisi, (J / s) .

T_f : Çelik şeridin ikinci soğutma ünitesinden çıkış sıcaklığı, $(^{\circ}C)$.

Ancak, kullanılan parametrelerin belirlenmesi ile fırının fiziksel yapısının büyük ve hareketli parçalardan oluşması nedeniyle kayıpların ölçümünün güçlüğü gibi nedenlerden dolayı yaklaşık modeller ile de temsil edilmesi önerilmiştir [124]. Isıtma sistemlerinin yüksek ataletinden dolayı görülen gecikme zamanı da dikkate alınarak fırın sistemleri ikinci derece (aşırı sönümlü) gecikme zamanlı bir model ile temsil edilebilir [124]:

$$G(s) = \frac{b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0} e^{-Ls} \quad (1.7)$$

Burada a_0, a_1, a_2, b_0 model parametreleri, L ise gecikme zamanını temsil etmektedir.

DİZİN

A

Analog EAA · 7

B

Bozucu Sinyal Tabanlı EAA · 11

Ç

Çizgisel Takip Yöntemi · 22

D

deneysel çalışmalar · 4

Dijital tabanlı EAA · 7

Draper · 6

düşük sıcaklıklı fırınlar · 29

E

EAA · iv, v, vii, xiii, 3, 6, 7, 8, 9,
10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18,
19, 20, 24, 45, 46, 48, 49, 52,

53, 60, 61, 65, 67, 68, 70, 72,
73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80,
82, 85, 92, 93, 94, 96, 99

ekstrem · 3

Ekstremum Arama Algoritması ·
iv, xiii, 3

F

Finish Oven · 34

G

Geliştirilmiş EAA · iv

Güvenli Bölge Yöntemi · 22

K

Kayma Tabanlı EAA · 8

Krstic ve Wang · 6

M

maliyet optimizasyonu · iv, 3

MMK Metalurji · vi, xii, 32, 34,
99

O

optimizasyon · 2, 3, 8, 17, 20, 21,
22, 23, 24

P

Prime Oven · 34

S

Sıcak kompleks · 33

Soğuk kompleks · 33

Y

Yüksek sıcaklıklı fırınlar · 29



TEKNOVERSİTE



teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

