T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EV TİPİ ELEKTRİKLİ FIRINLARDA MERKEZ SICAKLIK TAHMİNİ VE KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERDAR ALTINKAYA

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Alper BAYRAK

BOLU, EYLÜL - 2022

KABUL VE ONAY SAYFASI

Serdar ALTINKAYA tarafından hazırlanan "**EV TİPİ ELEKTRİKLİ FIRINLARDA MERKEZ SICAKLIK TAHMİNİ VE KONTROLÜ**" adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 19/08/2022

Jüri Üyeleri	**İmza**
Danışman Doç. Dr. Alper BAYRAK Abant İzzet Baysal Üniversitesi	
Üye Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT Abant İzzet Baysal Üniversitesi	
Üye Doç. Dr. Uğur HASIRCI Düzce Üniversitesi	

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- 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.

Teze ilişkin 31/08/2022 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 6 olarak tespit edilmiştir.

……..

SERDAR ALTINKAYA

ÖZET

EV TİPİ ELEKTRİKLİ FIRINLARDA MERKEZ SICAKLIK ÖLÇÜMÜ VE TAHMİNİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
SERDAR ALTINKAYA
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ALPER BAYRAK)

BOLU, EYLÜL - 2022
XV + 102

Bu çalışmada, ev tipi elektrikli fırınların merkez noktasının sıcaklık kontrolü ele alınmıştır. Sistem, fırının sıcaklık ölçümü, tahmini ve kontrolü olmak üzere üç kısma ayrılmıştır. Sıcaklık ölçümü platin dirençli sıcaklık sensörü (RTD) kullanılarak yapılmıştır. RTD'den okunan değerler kullanılarak fırının merkez sıcaklığı tahmin edilmiştir. Sıcaklık ölçümü ve tahmin çalışmalarının ardından, fırın merkez sıcaklığının kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, fırın merkez sıcaklığının tahmini ve kontrolü, belirlenen hata aralıklarında başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Ev tipi elektrikli fırın, PT sensör, Sıcaklık Tahmini, Gürbüz kontrol,

ABSTRACT

THE ESTIMATION AND CONTROL OF CENTER TEMPERATURE IN THE HOUSEHOLD-TYPE ELECTRIC OVENS
MSC THESIS
SERDAR ALTINKAYA
BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ELEKTRONIC ENGINEER
(SUPERVISOR: DOÇ. DR., ALPER BAYRAK)

BOLU, SEPTEMBER 2022
XV + 102

In this study, the temperature control of the central point of household electric ovens is considered. The system is divided into three parts: temperature measurement, forecasting and control of the oven. Temperature measurement is made by using a platinum resistance temperature sensor (RTD). The center temperature of the oven is estimated from the values read from the RTD. After the temperature measurement and estimation studies, the oven center temperature is controlled. As a result of the studies, the estimation and control of the oven center temperature is successfully realized

KEYWORDS: Household type electric oven, PT sensor, Temperature estimation, robust control,

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI ..... **iii**
ETİK BEYAN ..... **iv**
ÖZET ..... **v**
ABSTRACT ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ ..... **xiv**
TEŞEKKÜR ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ **2**
3. SİSTEMİN TANITIMI **5**
3.1 Rezistans Yerleşimleri 9
3.2 Çalışma Modları 14
3.3 Test ve Kontrol Protokolleri 15
4. SICAKLIK ÖLÇÜMÜ **17**
4.1 Ölçüm Devreleri 17
4.1.1 Sabit Akım Ölçüm Devresi 18
4.1.2 Wheatstone Köprüsü ile Ölçüm Devresi 20
4.2 Sayısal Filtreler 21
4.2.1 Kalman Filtresi 22
4.2.2 Sonsuz Darbe Cevaplı (ing: IIR) Filtresi 26
5. SICAKLIK TAHMİNİ **32**
5.1. Yapay Sinir Ağı (YSA) 36
5.2 .2 Polinom Uydurma 40
5.1.1 Sadece Üst Sıcaklık Sensörünün Kullanıldığı Polinom Uydurma 41
5.1.2 Üst ve Alt Sıcaklık Sensörünün Kullanıldığı Polinom Uydurma 54
6. SICAKLIK KONTROLÜ **73**
6.1 On-Off Kontrol Yöntemi 73
6.2 Proportional Integral Derivative (PID) Kontrol Yöntemi 75
6.3 RISE (Robust Integral of Sign of Error) Kontrol Yöntemi 80
7. TEST SONUÇLARI **86**

7.1 Enerji Testi 86
7.2 Sıcaklık Testi 87
7.3 Pişirme Testi 88
8. SONUÇ 92
9. KAYNAKLAR 93
10. EKLER 98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 Sistemin Blok Şeması 5
Şekil 3.2 Laboratuvar Ortamı Görüntüsü 6
Şekil 3.3 Bilgisayar Yazılımı 6
Şekil 3.4 Anakart Görüntüsü 7
Şekil 3.5 Röle Kartı Devre Şeması 8
Şekil 3.6 Röle Kartı Fiziksel Görüntüsü 9
Şekil 3.7 Ev Tipi Elektrikli Fırın Ön Yüzeyi 10
Şekil 3.8 Ev Tipi Elektrikli Fırın İç Yüzeyi 11
Şekil 3.9 Ev Tipi Elektrikli Fırın Üst Rezistans Yerleşimi 11
Şekil 3.10 Ev Tipi Elektrikli Fırın Turbo Rezistans ve Fan Yerleşimi 12
Şekil 3.11 Ev Tipi Elektrikli Fırın Alt Rezistans Yerleşimi 13
Şekil 3.12 Ev Tipi Elektrikli Fırın Üst Fan Yerleşimi 13
Şekil 3.13 Ev Tipi Elektrikli Fırın Arka Fan Yerleşimi 14
Şekil 4.1 Sabit Akım Ölçüm Devresi 18
Şekil 4.2 Akım Devresi Çıkışında Alınan Ölçüm 19
Şekil 4.3 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Devresi 20
Şekil 4.4 Wheatstone Köprüsü Devresi Çıkışından Alınan Ölçüm 21
Şekil 4.5 Sabit Akım Ölçüm Verisine Kalman Filtresinin Uygulanması 25
Şekil 4.6 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Verisine Kalman Filtresinin Uygulanması 26
Şekil 4.7 Sabit Akım Ölçüm Verisine IIR Filtresinin Uygulanması ($\alpha = 0.2$) . 28
Şekil 4.8 Sabit Akım Ölçüm Verisine IIR Filtresinin Uygulanması ($\alpha = 0.05$) 29
Şekil 4.9 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Verisine IIR Filtresinin Uygulanması ($\alpha = 0.2$) 30
Şekil 4.10 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Verisine IIR Filtresinin Uygulanması ($\alpha = 0.05$) 30
Şekil 5.1 Keysight Data Logger [33] 33
Şekil 5.2 3 Giriş 1 Çıkışlı Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı [34] 37
Şekil 5.3 Seçilen Input Output için Elde Edilen Yapay Sinir Ağı 38
Şekil 5.4 Levenberg-Marquardt Eğitim Algoritması Sonuçları 38
Şekil 5.5 Levenberg-Marquardt Eğitim Algoritması Hata Grafiği 39
Şekil 5.6 Turbo Mod Sadece Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği 41
Şekil 5.7 Turbo Mod Sadece Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Grafiği 42
Şekil 5.8 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Veri 43
Şekil 5.9 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Grafiği 43
Şekil 5.10 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Tahmin Hata Grafiği 44
Şekil 5.11 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomla 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 44

Şekil 5.12 Statik Fanlı Mod Sadece Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği 45
Şekil 5.13 Statik Fanlı Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 46
Şekil 5.14 Pizza Mod Sadece Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği.....47
Şekil 5.15 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 48
Şekil 5.16 Grill Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği.....48
Şekil 5.17 Grill Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 49
Şekil 5.18 Statik Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği.....50
Şekil 5.19 Statik Mod Üst Sensör ADC ve Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 51
Şekil 5.20 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği.....51
Şekil 5.21 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 52
Şekil 5.22 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği 55
Şekil 5.23 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Grafiği.....55
Şekil 5.24 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Hata Grafiği 56
Şekil 5.25 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 56
Şekil 5.26 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği.....57
Şekil 5.27 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Grafiği 57
Şekil 5.28 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Hata Grafiği 58
Şekil 5.29 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 58
Şekil 5.30 Statik Fanlı Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği 59
Şekil 5.31Statik Fanlı Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 60

Şekil 5.32 Statik Fanlı Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 61
Şekil 5.33 Pizza Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği 62
Şekil 5.34 Pizza Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 63
Şekil 5.35 Pizza Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 63
Şekil 5.36 Grill Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği 64
Şekil 5.37 Grill Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 65
Şekil 5.38 Grill Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 66
Şekil 5.39 Statik Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği 67
Şekil 5.40 Statik Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 68
Şekil 5.41 Statik Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 68
Şekil 5.42 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği69
Şekil 5.43 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 70
Şekil 5.44 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği 71
Şekil 6.1 On-Off Kontrol Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomla Alınan 1 Saatlik Ölçüm..... 74
Şekil 6.2 PID Zaman Analiz Grafiği [36] 76
Şekil 6.3 PID Kontrol Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomla Alınan 1 Saatlik Ölçüm..... 78
Şekil 6.4 1 Saatlik Deney Sonucunda Elde Edilen PID Kontrol Sinyali 79
Şekil 6.5 1 Saatlik Deney Sonucunda Elde Edilen PID Kontrol Hatası 80
Şekil 6.6 RISE Kontrol Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomla Alınan 1 Saatlik Ölçüm..... 82
Şekil 6.7 1 Saatlik Deney Sonucunda Elde Edilen RISE Kontrol Sinyali 82
Şekil 6.8 1 Saatlik Deney Sonucunda RISE Kontrolcüyle Elde Edilen Takip Hatası 83

Şekil 7.1 Turbo Mod Small Kek Pişirme Testi 89
Şekil 7.2 Statik Mod Small Kek Pişirme Testi 89
Şekil 7.3 Statik Fanlı Mod Ispanaklı Börek Pişirme Testi 90

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Devresi ve IIR Sayısal Filtresi Kullanılarak Alınan Ölçüm 35
Tablo 5.2 Statik Fanlı Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 46
Tablo 5.3 Pizza Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 47
Tablo 5.4 Grill Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 49
Tablo 5.5 Statik Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 50
Tablo 5.6 Alt Rezistans Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 52
Tablo 5.7 Tüm Modlar için Üst Sensör ve Türevi ile Elde Edilen Hata Değerlerinin Karşılaştırılması 53
Tablo 5.8 Statik Fanlı Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 60
Tablo 5.9 Pizza Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 62
Tablo 5.10 Grill Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 65
Tablo 5.11 Statik Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 67
Tablo 5.12 Alt Rezistans Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler 70
Tablo 5.13 Tüm Modlar için Üst ve Alt Sensör ve Türevi ile Elde Edilen Hata Değerlerinin Karşılaştırılması 72
Tablo 6.1 PID Kaysayı Belirleme Yöntemi [35] 76
Tablo 6.2 RISE Kontrol Yöntem Katsayıları 84
Tablo 6.3 RISE Kontrol Yöntemi ile Alınan Ölçüm Hataları (1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakikası) 85
Tablo 7.1 RISE Kontrol Yöntemi ile Alınan Sıcaklık Testi 87
Tablo 7.2 RISE Kontrol Yöntemi ile Alınan Pişirme Testi 88

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AA **:** Alt ADC

AAT **:** Alt ADC Türevi

AF **:** Alt Fan

AR **:** Alt Rezistans

AS **:** Alt Sıcaklık

TR **:** Turbo Rezistans

MS **:** Merkez Sıcaklık

ÜA **:** Üst ADC

ÜAT **:** Üst ADC Türevi

ÜDR **:** Üst Dış Rezistans

ÜF **:** Üst Fan

ÜİR **:** Üst İç Rezistans

ÜS **:** Üst Sıcaklık

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanı yürütülmesi sırasında desteğini ve yardımını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Alper BAYRAK'a, tez süresi boyunca bilgi ve deneyimiyle konulara hâkim olmamı sağlayan Doç. Dr. Nihat DALDAL'a, lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca bilgileriyle geleceğime yön veren, akademik alanda kendimi geliştirmemi sağlayan Abant İzzet Baysal Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümündeki tüm hocalarıma sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca maddi manevi tüm desteğiyle yanımda olan ve haklarını ödeyemeyeceğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasına konu olan proje, 5200025 proje numarası ile TÜBİTAK TEYDEB tarafından desteklenmiştir. TÜBİTAK'a desteklerinden ötürü teşekkür ederim. Projede müşteri firma olarak yer alan ARÇELİK firmasına katkılarından ve desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Beyaz eşyalar her evde mutlaka bulunan ve sıklıkla kullanılan ürünlerdir. Beyaz eşyalar arasında yer alan elektrikli fırınlarda bu kategori arasında en çok kullanılan ürünler arasındadır. Çoğu beyaz eşya gibi fırınların daha teknolojik, verimli, kararlı ve daha kullanışlı olması istenmektedir. Bu isteğin karşılanması için birçok AR-GE çalışması yapılmaktadır.

Elektrikli fırınlarda yapılan AR-GE çalışmalarında fırının sıcaklığının daha kararlı ölçülmesi istenmektedir. Çünkü ne kadar kararlı bir ölçüm alınırsa fırının iç sıcaklığının tahmini o kadar kolay olabilmektedir. Daha iyi bir ölçüm alınabilmesi için kullanılan sıcaklık sensörüyle birlikte ölçüm devreleri ve filtre devreleri kullanılmıştır. Sensör ile kullanılan ek devreler sayesinde ölçüm istenilen ölçüm kararlılığa yaklaşmıştır. İstenilen ölçüm kararlılığı için sayısal filtreler de kullanılmıştır. Birden çok sayısal filtre yapısından uygun olan sayısal filtre seçilmiş ve ölçümler alınmıştır.

Fırının merkez sıcaklığının istenilen sıcaklık değerinde sabitlenmesi istenmektedir. Bu nedenle kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan kontrol yöntemleri arasından sıcaklığı istenilen sıcaklık seviyesinde tutabilen en uygun kontrol yöntemi seçilmiştir.

Bütün denemeler fırının test edildiği 6 farklı çalışma modu için tek tek yapılmıştır. Her çalışma modu için en uygun yöntemler belirlenerek çalışma tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Literatürde RTD'lerin kullanıldığı sistemler ile ilgili çok farklı kaynak olmakla birlikte, sadece RTD'lerin dinamik özelliklerini, karakteristiklerini ve ölçüm yöntemlerini içeren yayınlar kısıtlıdır. Aşağıda proje konusuna uygun olan ve çalışmada faydalanılan kaynaklar sunulmuştur.

Liu ve diğ. sabit akım kaynağı kullanarak PT100 sensöründen yüksek hassasiyetli ölçüm sistemi tasarlamışlardır. Bu çalışmada 40 °C – 400°C aralığında %1'in altında ölçüm hassasiyeti elde edilmiştir [1]. Rupnik ve diğ. Dirençli sıcaklık sensörlerinin dinamik özelliklerinin tanımlanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada PT1000 sensörü kullanılmıştır ve sensör, gerilim ile tahrik edilmiştir [2]. Wang ve diğ. PT100 sensörünün üçüncü dereceden model ile sıcaklık karakteristiklerini sunmuşlardır. Kompanzasyon algoritması olarak en küçük karaler yöntemi tabanlı transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntem ile elde edilen en yüksek hata değeri 0,05 olarak verilmiştir [3]. Boya ve diğ. PT100 sensöründen yüksek doğrulukla ölçüm alınabilmesi için kullanılabilecek opamplı bir devre yapısı sunmuşlardır [4]. Liu ve diğ., sabit akım kaynağı kullanan AD7711 entegresi kullanılarak PT100 sensörü ile sıcaklık ölçümü uygulaması yapmışlardır [5]. Chauhan ve Neelakantan gerilim ve akım uyarlamalı devreler kullanılarak PT1000 sensörü ile sıcaklık ölçüm deneyleri yapmışlardır. Gerilim uyartımlı devrede Wheatstone köprüsü kullanılmıştır. Gerilim ve akım uyartımlı devreler ile alınan sıcaklık ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır [6]. Qian ve diğ., kablosuz bir sıcaklık ölçüm sistemi tasarımı sunmuşlardır. Sıcaklık ölçümü sabit akım kaynağı kullanılarak PT100 sıcaklık sensörü kullanılarak yapılmıştır [7]. Korkmaz ve Can, daha doğru sıcaklık ölçümü için bulanık mantıklı bir filtreleme yöntemi ortaya koymuştur [8]. Ren ve diğ., PT100 sensöründen yüksek doğrulukta ölçüm alınabilmesi için LM324 entegresi kullanan bir yapı sunmuştur [9]. Dubois ve diğ. ısıtma ve soğutma olmak üzere iki girişe sahip bir fırının yapay sinir ağları ile modellenmesi, sıcaklık ölçümü ve sıcaklık kontrolü üzerine bir çalışma sunmuşlardır [37]. Changhao ve Yong'un çalışmasında yapay sinir ağı kullanılarak RTD'lerin giriş-çıkış karakteristikleri çıkartılmıştır [38]. Danışman ve diğ. yapay sinir ağı kullanılarak termokapl sıcaklık sensörlerinden hassas sıcaklık ölçümü yapan bir sistem sunmuşlardır [39]. [40]'de, malzeme ve makine sanayinde işlenen

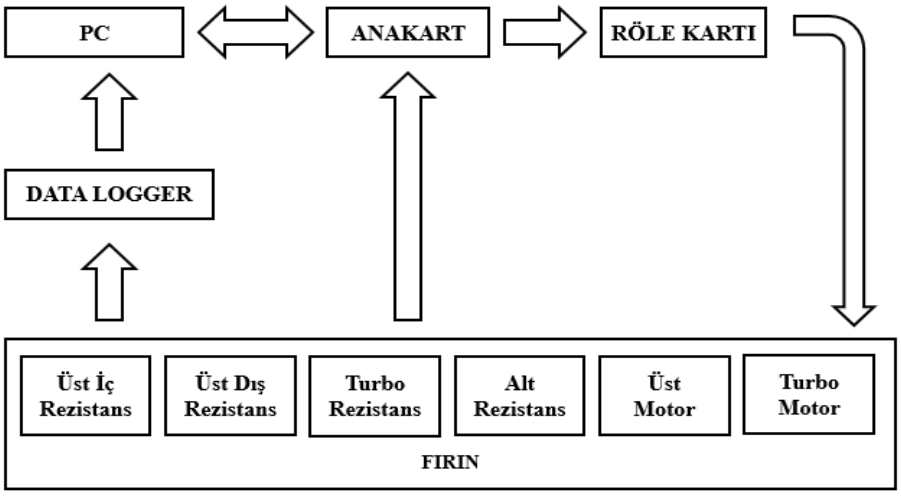
malzemelerin iç sıcaklıklarının yapay sinir ağı kullanılarak dolaylı olarak ölçülmesi için yapılan çalışma sunulmuştur. Mustafaraj ve diğ. bir açık ofisin ısıl davranışını modellemek için harici girişlerle doğrusal parametrik öz bağlamlı model (ARX) ve harici girişlerle sinir ağı tabanlı doğrusal olmayan öz bağlamlı model (NNARX) geliştirmiş ve model sonuçlarını karşılaştırmışlardır [41]. [42]'de, geri yayılım tabanlı bir sinir ağı sistemi kullanılarak çevre sıcaklığı modeli geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, diğer sinir ağı modelleri ile karşılaştırılmıştır. Hussein ve Chehade yapay sinir ağı kullanılarak bataryalar için sensörsüz sıcaklık ölçümü yöntemi sunmuşlardır [43]. Çalışmada, gerçek sistem giriş-çıkışları kullanılarak yapay sinir ağı eğitilmiş, sinir ağının çıkışı ile gerçek sistem çıkışı arasındaki tahmin hatası, sıcaklık ölçümü için sinir ağının eğitimde kullanılmıştır. Bu şekilde batarya modelindeki olası değişiklikler, sıcaklık tahmin modeline yansıtılmıştır. Lee ve Ha sabit mıknatıslı senkron makinenin sıcaklığının geribeslemeli sinir ağı yardımı ölçülmesi üzerine çalışmışlardır [44]. Yapay sinir ağı çalışmaların [45], [46] ve [47]'deki kitaplardan faydalanılmıştır. Bolat, çeşitli öz ayarlamalı PID yöntemlerini kullanılarak Matlab-SIMULINK tabanlı gerçek zamanlı fırın sıcaklık kontrolü üzerine bir çalışma sunmuştur. Deneysel düzenek üzerinde, Ziegler Nichols basamak yanıtı yöntemi, Röle ayarlama yöntemi (Relay Tuning Method) ve hatanın karesinin integrali bozulma (Square Time Error disturbance) ölçütü yöntemi sıcaklık kontrolü için kullanılmıştır [48]. Pamela ve Premi, PID, bulanık kontrol ve uyarlamalı Smith öngörücü gibi kontrol yöntemleri ile sterilizasyon için kullanılan sıcak hava fırınının sıcaklık kontrolü üzerine çalışmışlardır [49]. Ryckaert ve diğ. PID kontrol yöntemi kullanarak fırın sıcaklık kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada fırın için matematiksel bir model geliştirilmiş ve bu matematiksel model kontrol kazançlarını ayarlamak için kullanılmıştır [50]. [51]'de uyarlamalı model tabanlı kontrol yöntemlerinin mikrodalga fırınlardaki referans sıcaklık takip performansları incelenmiştir. Bolat ve diğ. deneysel bir düzenek üzerinde öz ayarlamalı PID kontrol yöntemi ile fırın sıcaklık kontrolü üzerine çalışmışlardır [52]. [53]'da sıcaklık kontrol uygulamaları için bulanık kontrol ile PID birleştirilerek bir kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Ohishi, termostatik fırınlar için basit bir gürbüz kontrol yöntemi geliştirmiştir [54]. Mastacan ve Dosoftei, elektrik fırınlarında sıcaklık kontrolü için öz ayarlama yeteneğine sahip bir bulanık öğrenme algoritması geliştirmişlerdir [55]. Palaniyappan ve diğ. Ziglor-Nicholos yöntemi ile kazançları ayarlanan PID kontrol

yöntemi kullanarak fırın sıcaklığı kontrol uygulaması sunmuşlardır [56]. [57]'da bir kalıp makinesi için geri ve ileri beslemeli PID kullanılarak sıcaklık kontrolü sunulmuştur.

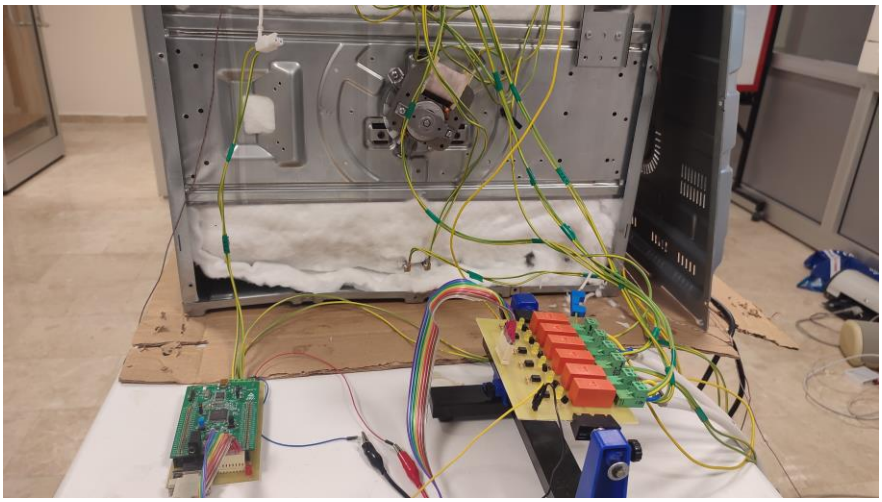
3. SİSTEMİN TANITIMI

Fırınlar kısaca tanımlanacak olursa, ısı enerjisinden yararlanılarak kullanılan bir araçtır. Fırınlar temel olarak yemek pişirmek için kullanılmaktadır. Birçok fırın çeşidi bulunmaktadır. Bu fırınların bazıları şunlardır; mikrodalga fırınlar, yüksek ateşli fırınlar, ekmek fırınları, kazanlar ve ev tipi fırınlar örnek olarak gösterilebilir [32].

Fırın üzerinde deneylerin gerçekleştirilebilmesi için fırının bilgisayar üzerinden denetlenebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Sistem, bilgisayar yazılımı, mikrodenetleyici tabanlı bir anakart, röle kartı ve sensör okuma devresinden oluşmaktadır. Sistemin blok şeması ve laboratuvar ortamının görüntüsü, sırasıyla, Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir. Bilgisayar yazılımı, fırından okunan sıcaklık değerlerini metinsel ve grafiksel olarak ekranda göstermekte ve kaydetmektedir. Bilgisayar yazılımı aynı zamanda kullanıcının rölelerin durumunu görmesini ve kontrol etmesini sağlamaktadır. Anakartın görevi, fırın üzerinden alınan sıcaklık değerlerini işlemek, bu bilgileri bilgisayara göndermek, bilgisayardan gelen röle açma kapama bilgilerini rölelere iletmek ve denetim işaretini üretmektir. Sensör okuma devresi sensör sinyallerini okumakta ve anakarta iletmektedir. Röle kartı, anakarttan gelen sinyallere göre rölelerin açılıp kapatılmasını sağlamaktadır.

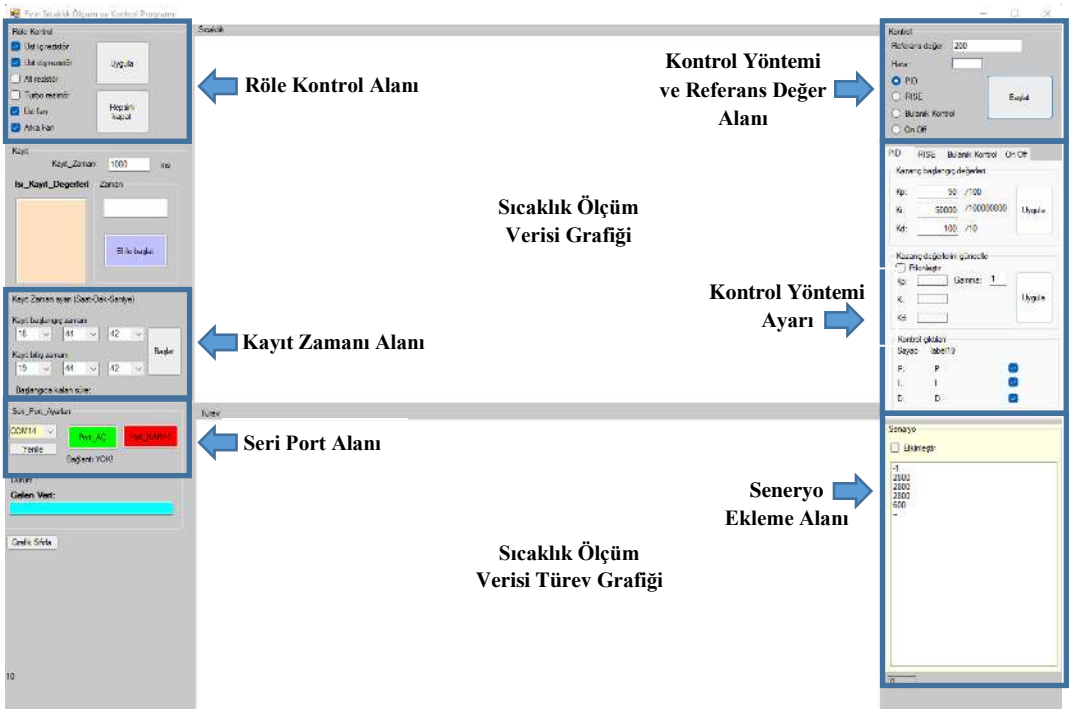


Şekil 3.1 Sistemin Blok Şeması



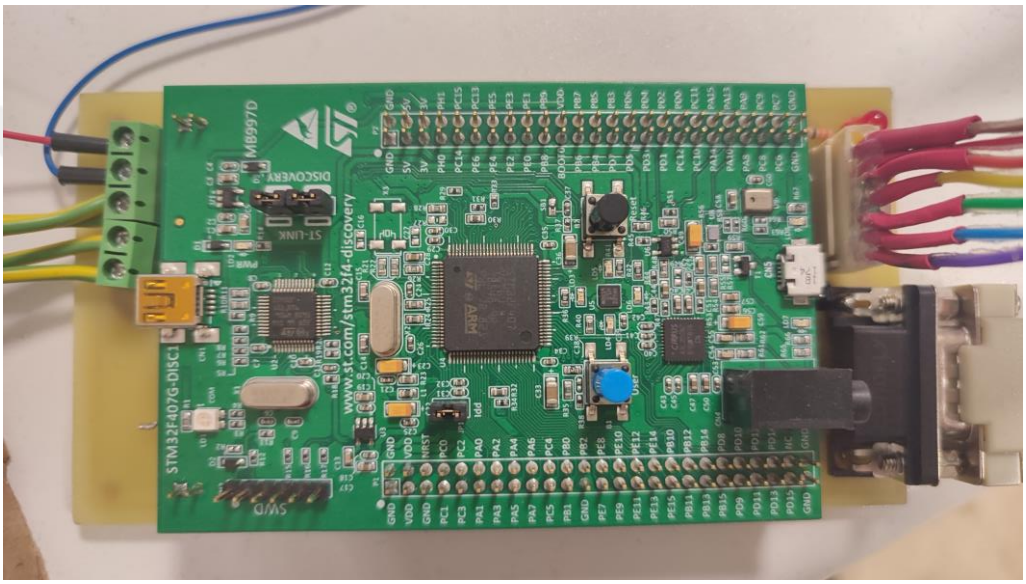
Şekil 3.2 Laboratuvar Ortamı Görüntüsü

Bilgisayar yazılımı Visual C# programlama dili kullanılarak hazırlanmıştır. Yazılım grafiksel bir arayüze sahiptir. Bu arayüz anakarttan gelen sıcaklık verilerini metinsel ve grafiksel olarak ekranda göstermekte ve kaydetmektedir. Kullanıcı, arayüzü kullanarak rölelerin durumlarını belirleyebilmektedir. Söz konusu röleler, fırındaki rezistans ve fanları sürmektedirler. Yazılım, tercih edilen bir kontrol yöntemini kullanarak kontrol işareti üretebilmekte ve röleleri otomatik olarak kontrol edebilmektedir. Yazılımın ekran görüntüsü Şekil 3.3'te verilmiştir.



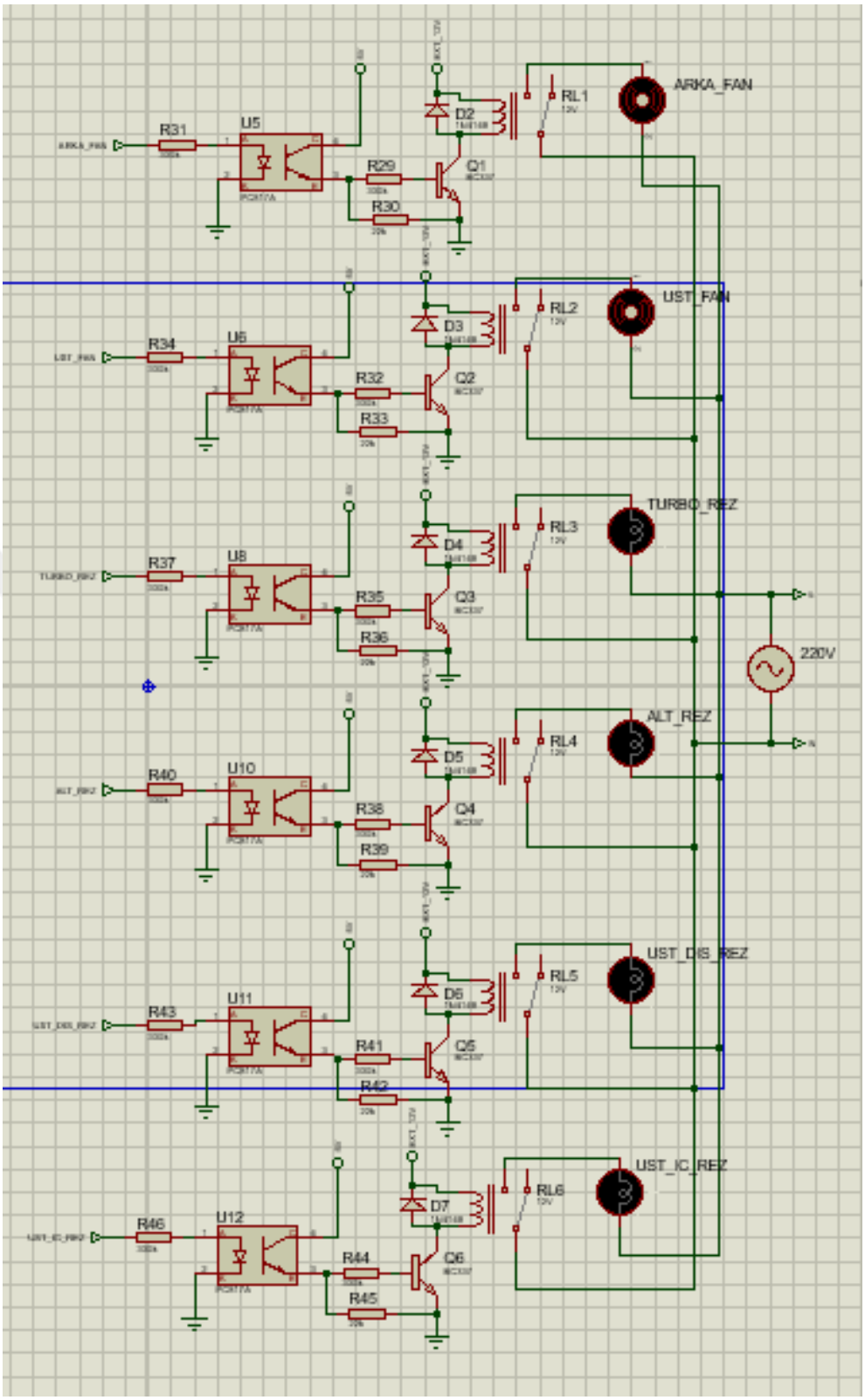
Şekil 3.3 Bilgisayar Yazılımı

Anakart olarak STM32F407G Discovery Geliştirme Kiti kullanılmıştır. Bu kart üzerinde programlayıcı katı ve mikrodenetleyicinin bacaklarına erişebilmek için soketler bulunmaktadır. Anakartın fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için gerekli olan yazılım hazırlanmıştır. Bu yazılım, sensör okuyucu devreden gelen analog sinyali okumakta, işlemekte, bilgisayara göndermekte ve bilgisayardan gelen komutlar doğrultusunda röle kartını sürmektedir. Anakart ile bilgisayar arasındaki iletişim RS232 seri haberleşme protokolü ile sağlanmaktadır. Anakartın görüntüsü Şekil 3.4'te verilmiştir.

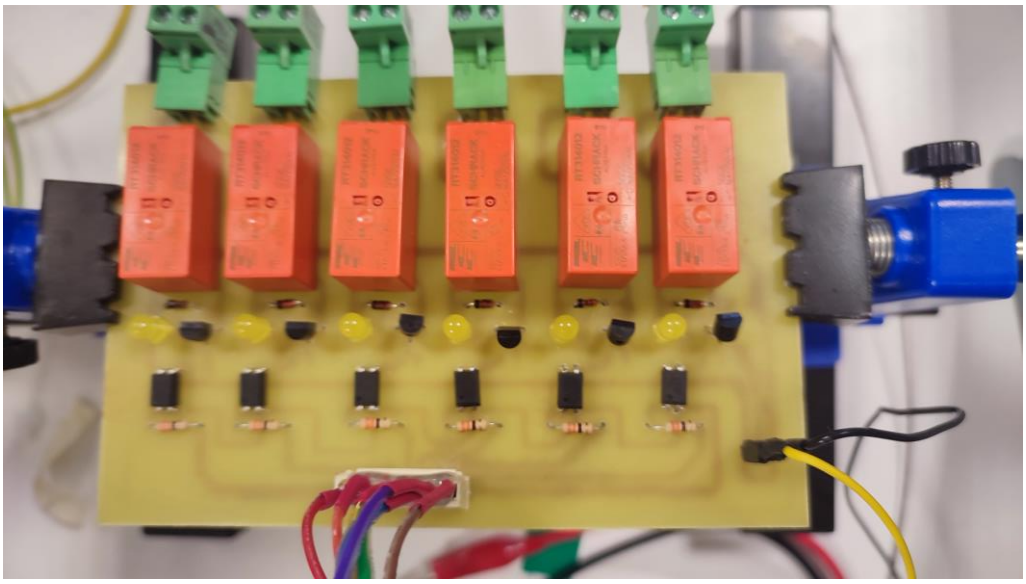


Şekil 3.4 Anakart Görüntüsü

Röle kartı, anakarttan gelen sinyalleri yükseltmekte ve rölelere uygulamakta böylelikle rezistansları sürmektedir. Röle kartının devre şeması ve görüntüsü, sırasıyla, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5 Röle Kartı Devre Şeması



Şekil 3.6 Röle Kartı Fiziksel Görüntüsü

Sensör okuma devresi, fırın içerisinde bulunan sıcaklık sensörünü okumak için tasarlanmıştır. Fırın içi sıcaklık ölçümünde PT1000 tipi sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır [2]. Bu sensör, 0°C'de 1 kohm direnç göstermektedir ve direnci sıcaklıkla orantılı olarak değişmektedir. Sensör -50 °C ile 600 °C aralığında ölçüm yapmaktadır

3.1 Rezistans Yerleşimleri

Deneylerin yapıldığı elektrikli fırında bulunan 4 adet rezistansın 2 tanesi fırının üst bölümünde 1 tanesi fırının arka bölümünde ve sonuncu rezistansta fırının altında bulunmaktadır. Fanların biri üstte diğeri de fırının arka kısmında bulunmaktadır.

Şekil 3.7'de deneylerin yapıldığı ev tipi elektrikli fırın görülmektedir. Fırın ankastre fırın olarak geçmektedir. Fırın hacmi 72 litredir. Fırın üzerinde kendi anakartında farklı özellikler bulunmaktadır. Ancak fırın anakartı çıkarılıp sadece rezistansların ve fanların kontrolü yapılmıştır.

Şekil 3.7 Ev Tipi Elektrikli Fırın Ön Yüzeyi

Şekil 3.8'de fırının iç kısmı yani pişirme alanı görülmektedir. Burada kırmızı ile işaretlenen alan fırının merkez noktasıdır. Merkez noktasına bir termokupl yerleştirilmiştir. Yerleştirilen termokupl üzerinden sıcaklık ölçümü alınarak bir referans sıcaklık değeri elde edilmektedir. Ayrıca fırın üzerinde 2 adet PT1000 sensörü bulunmaktadır. Bu iki sensör üzerinde de ayrıca termokupl bulunmaktadır. Bu termokupllar sensörlerin sıcaklık değerleri için bir referans oluşturmaktadır.

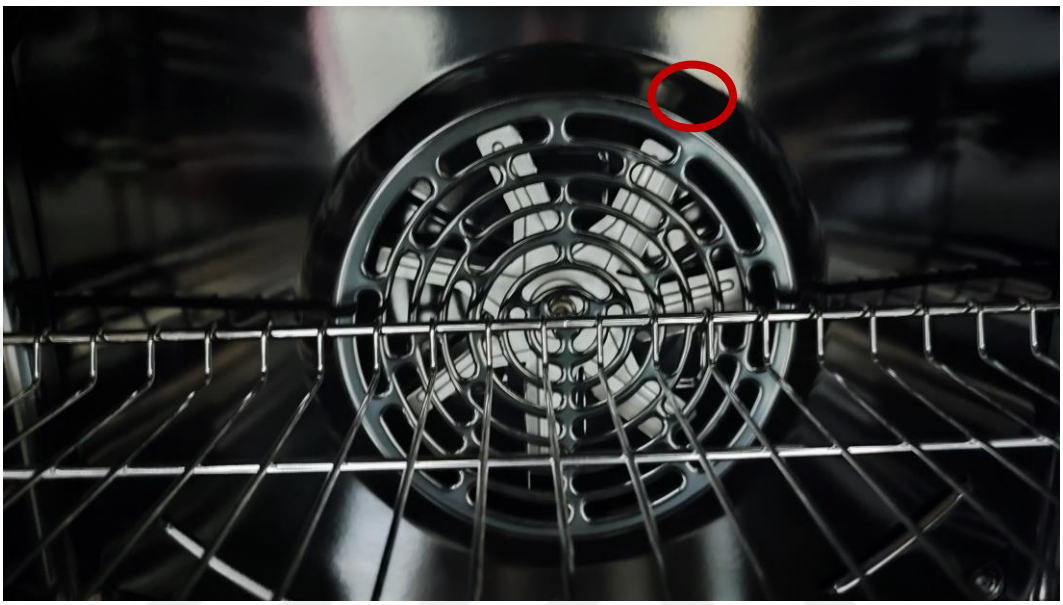
Şekil 3.8 Ev Tipi Elektrikli Fırın İç Yüzeyi

Şekil 3.9'da fırının üst kısmında yer alan 2 rezistans görülmektedir. Burada dışta olan rezistans üst dış rezistans olarak adlandırılmaktadır. İçte yer alan rezistans üst iç rezistans olarak adlandırılmaktadır. Üst iç rezistans sadece grill modunda kullanılmaktadır.

Şekil 3.9 Ev Tipi Elektrikli Fırın Üst Rezistans Yerleşimi

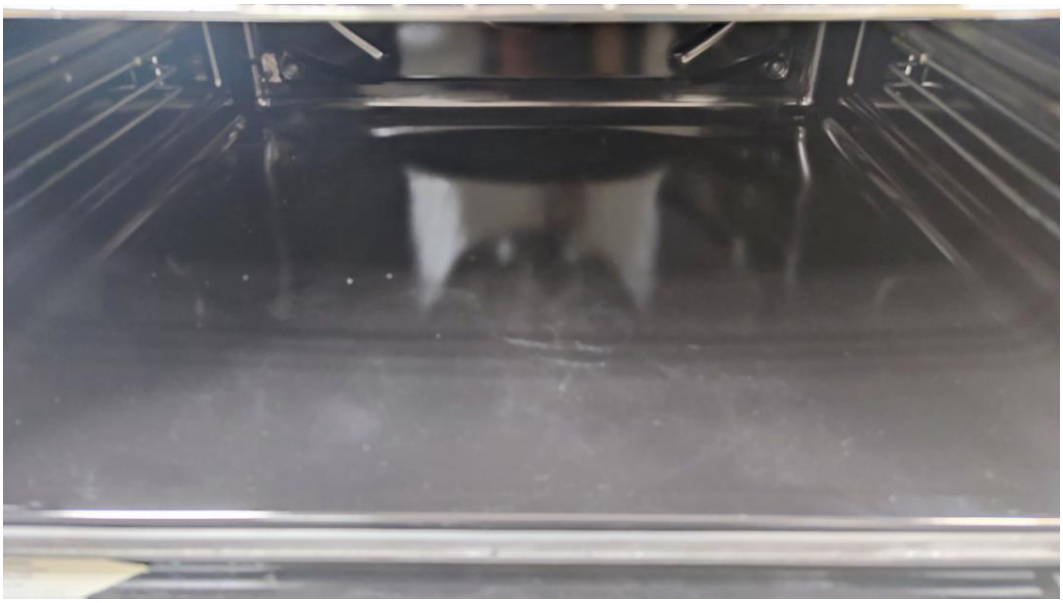
Şekil 3.10'da fırının orta kısmında bulunan turbo fan pervanesi görülmektedir. Burada bulunan kapağın arkasında turbo rezistans bulunmaktadır.

Bu turbo rezistans, turbo fanın etrafına yerleştirilmiştir. Kırmızı ile işaretlenen alanda bir delik bulunmaktadır ve bu delik ısıyı RTD'nin bulunduğu bölgeye üfleyerek rezistanstan elde edilen sıcaklık değerinin daha net ölçülmesine katkı sağlamaktadır.



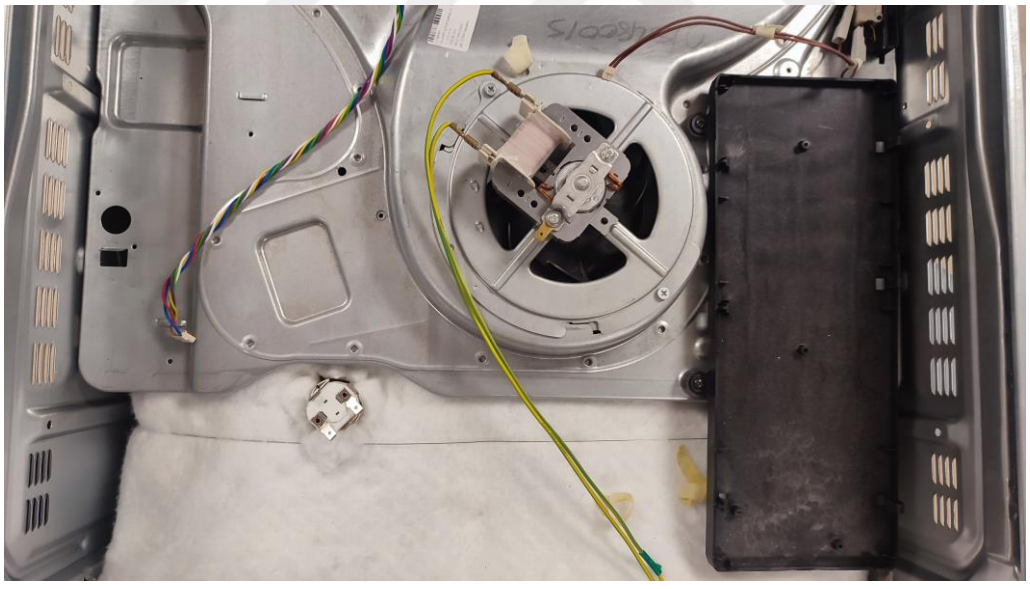
Şekil 3.10 Ev Tipi Elektrikli Fırın Turbo Rezistans ve Fan Yerleşimi

Şekil 3.11'de fırının alt kısmı görülmektedir. Burada bulunan metal alanın altında alt rezistans bulunmaktadır. Burada da görüldüğü üzere fırının yanları hariç her yerinde rezistans bulunmaktadır. Bu da fırının istenilen bölgesini istenildiği kadar ısıtılmasında önemli bir rol oynamaktadır.



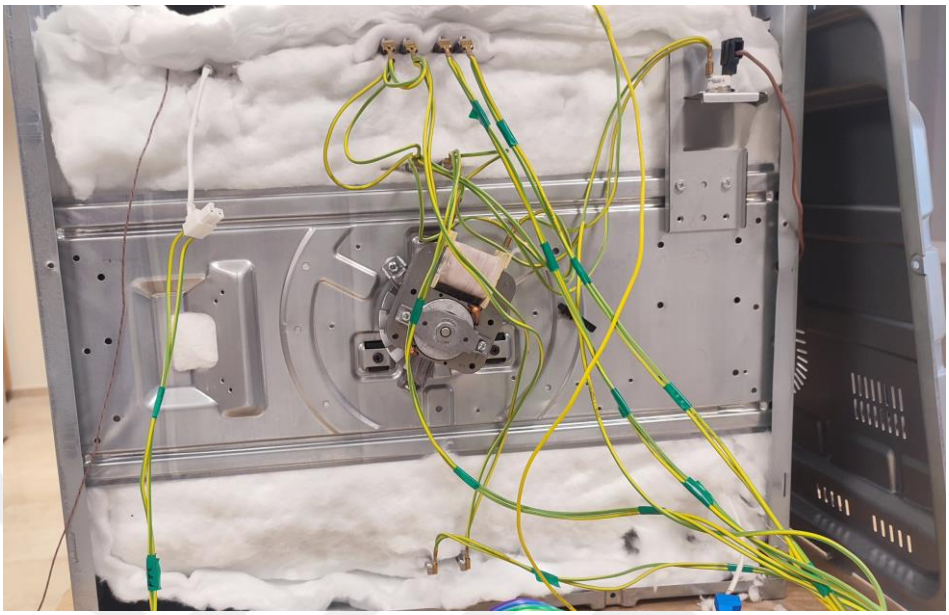
Şekil 3.11 Ev Tipi Elektrikli Fırın Alt Rezistans Yerleşimi

Şekil 3.12'de görülen fırının üst kısmında üst fan konumlandırılmıştır. Burada yer alan fan fırının her modunda sürekli çalışmaktadır.



Şekil 3.12 Ev Tipi Elektrikli Fırın Üst Fan Yerleşimi

Şekil 3.13'te fırının arka kısmında bulunan fanın yerleşimi ve kablo bağlantıları görülmektedir.



Şekil 3.13 Ev Tipi Elektrikli Fırın Arka Fan Yerleşimi

Rezistans ve fanların kullanımı çalışma moduna göre belirlenmektedir.

3.2 Çalışma Modları

Ev tipi elektrikli fırında farklı farklı ürünlerin pişirilmesi için farklı çalışma modları bulunmaktadır. Bu çalışma modları arasında temel 6 çalışma modu üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma modları şunlardır;

1. Turbo Mod
2. Statik Fanlı Mod
3. Pizza Mod
4. Grill Mod
5. Statik Mod
6. Alt Rezistans Mod

Belirtilen bu çalışma modlarının hepsinde üst fan sürekli çalışmaktadır. Ancak arka fan bu çalışma modlarının 3 tanesinde çalışmaktadır. Aşağıda tüm çalışma modlarının rezistans ve fan kullanımları tek tek açıklanmaktadır;

Turbo mod: Turbo çalışma modunda rezistanslardan sadece fırının arkasında bulunan turbo rezistans çalışmaktadır. Fanlar sürekli çalışmaktadır.

Statik Fanlı Mod: Statik fanlı çalışma modunda üst dış ve alt rezistanslar çalışmaktadır. Turbo fan çalışmaktadır.

Pizza Mod: Pizza çalışma modunda sadece alt rezistans çalışmaktadır. Turbo fan çalışmaktadır.

Grill Mod: Grill çalışma modunda fırının sadece üstünde bulunan üst iç ve üst dış rezistanslar çalışmaktadır. Turbo fan çalışmamaktadır.

Statik Mod: Statik çalışma modunda fırının üst dış ve alt rezistanslar çalışmaktadır. Turbo fan çalışmamaktadır.

Alt Rezistans Mod: Alt rezistans çalışma modunda adından da belli olduğu gibi sadece alt rezistans çalışmaktadır. Turbo fan çalışmamaktadır.

Deneylerin yapıldığı tüm çalışma modları yukarıda tek tek belirtilmektedir. Çalışma modları temel olarak turbo fanın çalışıp çalışmamasına göre ikiye ayrılabilir. Fanlı modların sıcaklık ölçümü ve kontrolü fansız modlara göre daha kolay yapılmaktadır. Sıcaklık ölçümünün nasıl yapıldığı ilerleyen bölümlerde bahsedilmektedir.

3.3 Test ve Kontrol Protokolleri

Fırınlarda alınan ölçümlerde tahmin başarımı hesaplanırken, Arçelik firması tarafından bildirilen test protokolü kullanılmıştır. Bu protokol şu şekildedir:

- Fırın istenilen sabit sıcaklık değeri için 1 saat boyunca çalıştırılır.
- Tahmin edilen sıcaklık değerleri ile merkez noktadaki sıcaklık sensöründen okunan sıcaklık değeri arasındaki fark hesaplanarak, tahmin hatası elde edilir.

- 1 saatlik çalışmanın son 20 dakikasındaki ortalama hata değeri hesaplanır ve tahmin başarımı hesaplanan bu değer ile belirlenir.

Yukarıda açıklanan protokol ele alındığında fırın içi merkez sıcaklığın ±2 °C hata payı ile elde edilmesi istenmektedir.

Fırınlarda alınan ölçümlerde kontrol başarımı hesaplanırken yine Arçelik firması tarafından bildirilen test protokolü kullanılmıştır. Bu protokol şu şekildedir:

- Fırın istenilen sabit sıcaklık değeri için 1 saat boyunca çalıştırılır.
- Tahmin edilen sıcaklık değerleri ile referans sıcaklık değeri arasındaki fark hesaplanarak, kontrol hatası elde edilir.
- 1 saatlik çalışmanın son 20 dakikasındaki ortalama kontrol hata değeri hesaplanır ve hata başarımı hesaplanan bu değer ile belirlenir.

Yukarıda açıklanan protokol ele alındığında fırın içi merkez sıcaklığın ±1 °C hata payı ile kontrol edilmesi istenmektedir.

4. SICAKLIK ÖLÇÜMÜ

Elektrikli fırınlarda sıcaklık ölçümü sıcaklık sensörleri kullanılarak yapılmaktadır. Elektrikli fırınların iç sıcaklığı 200 °C'nin üzerine çıkabildiğinden bu sıcaklık değerlerinde bile ölçümü etkilemeyecek sensörlerin kullanılması önemlidir. Bu nedenle tercih edilen sıcaklık sensöründe platin kullanılmaktadır. PT ön adıyla üretilen sensörlerin farklı direnç değerlerine göre üretimleri mevcuttur. Elektrikli fırın üzerinde yer alan PT1000 sıcaklık sensörü 1k ohm direnç değerine sahiptir [3, 7, 10].

Bu sıcaklık sensöründen ölçüm almak için ölçüm devresine ihtiyaç vardır ve bilinen direnç değerine uygun bir ölçüm devresi tasarımı yapılmalıdır. Ölçüm devresi ne kadar sensöre uygun üretilirse ölçüm sonuçları o kadar düzgün alınabilmektedir. Alınan ölçümün iyi olması sayesinde elektrikli fırınlarda merkez sıcaklığının tahmin edilebilmesi de kolaylaşmaktadır. Tahminin iyi olması fırının merkez sıcaklığının daha iyi kontrol edilebilmesi için önemlidir.

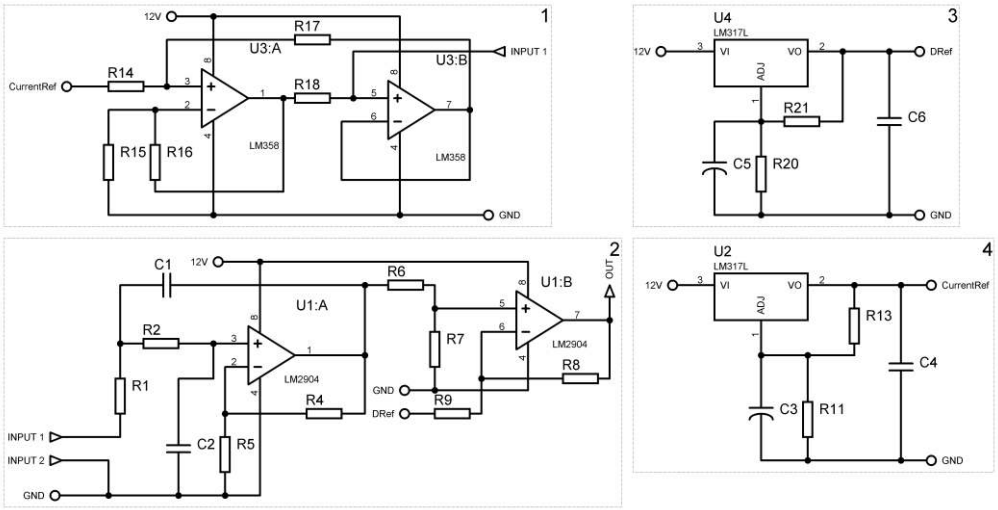
Ölçüm devrelerinin çıkış işareti (gerilimi) PT1000 sensörünün direnç değişimine göre değiştirmektedir. Değişen gerilim değeri ölçülerek sıcaklık ölçümü yapılmaktadır. Ölçüm devresinin çıkışına bağlanan bir filtre devresiyle ölçüm işlemi daha kararlı yapılabilmektedir. Dirençli sıcaklık sensörü ölçümü için kullanılan birçok filtre yapısı bulunmaktadır. Literatürde temek olarak iki farklı ölçüm devresi kullanılmaktadır. Bu devreler ilerleyen kısımlarda ayrıntılı olarak anlatılmaktadır [3, 7, 10]

4.1 Ölçüm Devreleri

Dirençli sıcaklık sensörlerinin ölçülebilmesi için temel olarak sıcaklık sensörünü başka bir direnç ile seri bağlayıp bir gerilim bölücü devre elde edilmelidir. Bu gerilim bölücü devrenin birleşim noktasından gerilim ölçülerek gerilimin değerinden direnç değeri hesaplanmaktadır. Ancak kullandığımız sistemde bu kadar basit bir ölçüm devresi kurmak yetersiz sonuç vermektedir. Daha kompleks ve işlevsel ölçüm devreleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan sabit akım ve Wheatstone köprüsü devreleri kullanılmıştır

4.1.1 Sabit Akım Ölçüm Devresi

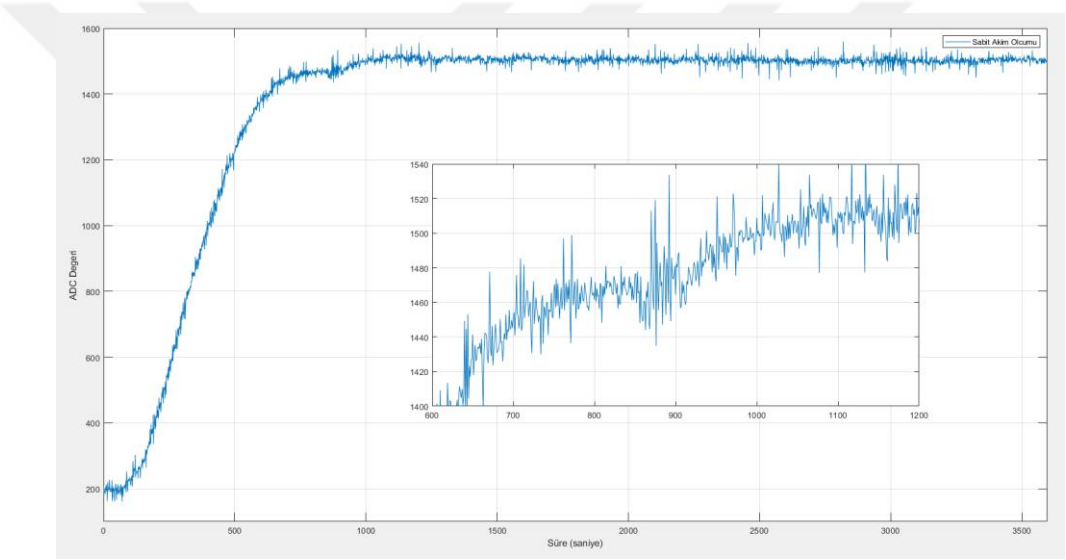
Sabit akım kaynağının kullanılmasındaki temel amaç, direnç üzerinden geçen akımın sabit tutularak direnç üzerindeki gerilimin değişiminin sadece direnç değerinin değişimiyle gerçekleşmesini sağlamaktır. Sabit akım ölçüm devresi Şekil 4.1'de gösterilmektedir. LM358 entegresinin 5 numaralı bacağına direnç tipi sıcaklık sensörünün bir bacağı bağlanmaktadır. Sensörün diğer bacağı da toprağa bağlanmalıdır. Ancak bu ölçüm devresinin düzgün çalışabilmesi için sabit bir gerilim kaynağına ve bir akım referansına ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan sabit akım devresi Şekil 4.1'de gösterilen 4 numaralı devrede gösterilmektedir. LM317 voltaj regülatörü kullanılarak ihtiyaç duyulan akım referansı elde edilmiştir [1, 4, 5, 7].



Şekil 4.1 Sabit Akım Ölçüm Devresi

Bu sabit akım devresinde gerilim kaynağının dalgalanmaması çok önemlidir. Dalgalanan gerilim kaynağı ölçümde hatalara neden olabilmektedir. Ölçülen gerilim değerinin daha kararlı ölçülebilmesi için ekstra bir filtre devresinin kullanılması ölçümün iyileştirilmesi için önemli bir etkendir. Ölçüm devresiyle alınan ölçümlerin daha kararlı olabilmesi için sabit akım ölçüm devresinde alçak geçiren filtre yapısı kullanılmıştır [1, 4, 5, 7].

Şekil 4.1'de 1 ve 3 numaralı devreler filtre devresidir. 3 numaralı devre filtre devresi için opamp olarak LM2904 entegresi kullanılmıştır. Burada yer alan giriş 1 ve giriş 2'ye PT1000 sensörü bağlanmaktadır. Ölçüm devresinden gelen sabit akım sayesinde üzerine düşen gerilim opamp çıkışında belirlenen kazanç ile ölçülebilmektedir. Opamp kazancı R4, R5, R8 ve R9 dirençleri ile ayarlanabilmektedir. Çıkışta elde edilecek değerler bu dirençlerin yardımıyla kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Bu filtre devresi 12V ile beslenmektedir. Çıkışta elde edilen gerilim değeri 0 ile 3.3V aralığında sınırlandırılmalıdır. Çıkış geriliminin 3.3V'tan fazla olması STM32F407VG mikroişlemcisinde yer alan ADC portunun bozulmasına neden olacaktır.

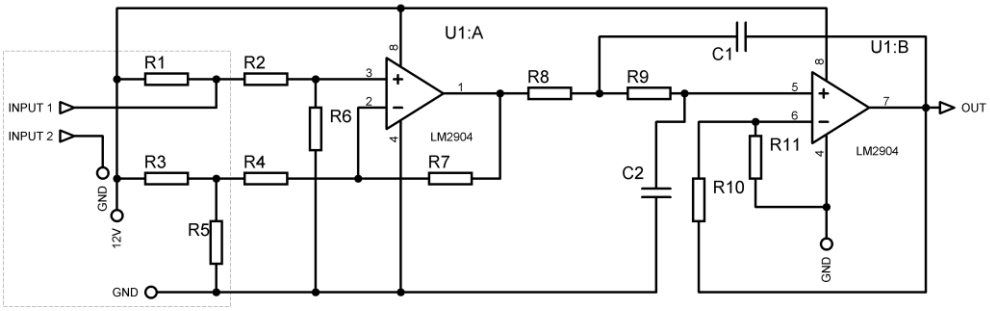


Şekil 4.2 Akım Devresi Çıkışında Alınan Ölçüm

Şekil 4.2'de sabit akım ölçüm devresiyle alınan 1 saatlik deney sonucunda elde edilen ölçüm görülmektedir. Yakından incelendiğinde grafik üzerinden alınan ölçümün anlık olarak çok yüksek bir gürültüyle hesaplandığı görülebilmektedir. Burada x ekseni saniyeyi y ekseni ölçülen ADC değerini göstermektedir. Grafikte rahatlıkla görülebildiği üzere ölçüm değerleri çok dalgalı ve kararsızdır. Bu durumda daha ileride yapılacak olan tahmin işlemini zorlaştıracaktır. Bu nedenle farklı bir ölçüm devresi ile de deneyler alınmıştır.

4.1.2 Wheatstone Köprüsü ile Ölçüm Devresi

Bu yöntemde, sensör Wheatstone köprü devresine bağlanmakta ve denge noktasındaki çıkış ölçülmektedir. Şekil 4.3'te Wheatstone köprüsü ile sıcaklık ölçüm devresi gösterilmiştir. PT1000 sensörü Wheatstone köprüsüne bağlanmaktadır. Fırında en düşük sıcaklık ölçümü 0°C olarak belirlendiği için Wheatstone köprüsü 0°C'de 0 volt gerilim farkı verecek şekilde ayarlanmıştır. Wheatstone köprüsü üzerindeki dirençler PT1000 sensörünün üzerinden 1 mA civarında akım geçecek şekilde seçilmişlerdir. Burada R5 direncinin hassasiyeti çok önemlidir. Çünkü PT1000 sensörünün referans direnç değerini oluşturmaktadır. PT1000 sensörünün veri setinde 0°C'de 1K ohm değerinde olduğu belirtilmektedir. Burada R5 direncinin tam olarak 1K ohm değerinde olması istenmektedir. Bunun nedeni PT1000 sensörünün referans direnci olmasıdır. R1 ve R3 dirençleri Wheatstone köprüsünün referans ölçüm aralığının ayarlanmasında kullanılmaktadır [2, 4, 6, 9].



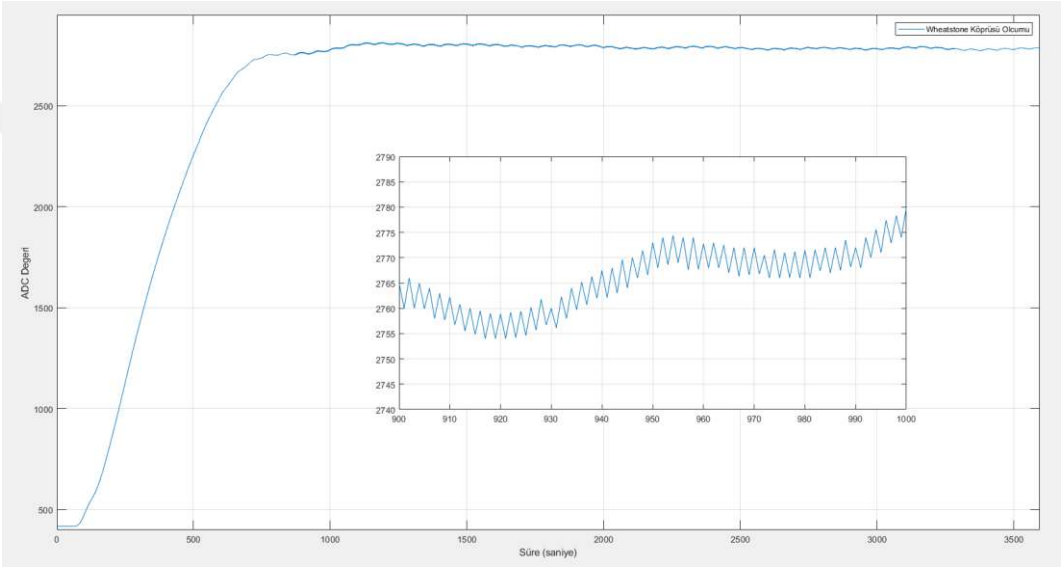
Şekil 4.3 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Devresi

R1 ve R3 dirençleri birbirine eşit ve 10K ohm olarak ayarlanmıştır. Ölçüm aralığı aşıldığında fırının iç sıcaklığı 260 °C'yi geçmektedir. Ölçülen sıcaklık verisini sınırlandırılması, yüksek sıcaklık değerlerine çıkmadan sistemin kapatılması için önemli bir erken uyarı sistemidir.

R1 direnci ve input 1 girişinin bağlantı noktası ve R3 ve R5 dirençlerinin bağlantı noktası ölçüm devresinin çıkışı olarak kabul edilmektedir. Şekil 4.4'te Wheatstone köprüsü ölçüm devresinde alçak geçiren filtre yapısı kullanılmıştır. Filtre yapısında opamp olarak LM2904 entegresi kullanılmıştır. R2 ve R6 dirençleri girişin gerilim bölücü yapısını oluşturmaktadır. Çıkış için kazanç dirençleri R10 ve

R11 dirençleridir. Bu dirençler kullanılarak çıkış gerilimi istenilen seviyeye getirilmektedir. Daha önce belirtildiği üzere çıkış geriliminin 3.3V değerinin üzerine çıkması istenmemektedir [2, 4, 6, 9].

Burada belirtilen filtre yapısı ölçümde yeterli bir verim sağlamaktadır. Ölçüm dalgalanması bu filtre yapılarıyla engellenmektedir ancak Şekil 4.4'te de görüldüğü üzere bu filtre yapıları tek başına ölçümün daha kararlı yapılması için yeterli değildir.



Şekil 4.4 Wheatstone Köprüsü Devresi Çıkışından Alınan Ölçüm

Görüldüğü üzere kullanılan ölçüm devreleri ve filtre yapılarına rağmen istenilen ölçüm doğruluğu hala elde edilememektedir. Bu nedenle alınan ölçüme sayısal bir filtre eklenmesi ölçümün daha stabil bir şekilde alınmasına yardımcı olmaktadır.

4.2 Sayısal Filtreler

Sensör okuma devresinden alınan ölçümler, mikrodenetleyici tarafında, önce ortalama filtreye tabi tutulmuştur. Bu yöntemde art arda 50 ölçüm alınmıştır. Alınan bu 50 ölçüm verisi küçükten büyüğe sıralanmıştır. Sıralı verinin de ortasında yer alan 10 verinin ortalaması alınmıştır. Bu elde edilen veri hala tam istenilen durumda olmadığından daha kompleks bir filtre yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle sistemde ayrıca bir sayısal filtre yapısı kullanılmıştır.

IIR filtre ve Kalman filtre olmak üzere 2 farklı filtre yapısı üzerinde deneyler alınmıştır. İki farklı fitre yapısı da sistemde gözle görülür bir iyileştirme sağlamıştır. Daha önce belirtildiği üzere sistemde her iki filtre yapısının da bir kayba neden olduğu göz ardı edilemeyecektir. Bu kayıp sinyali gürültüden arındırmak istenirken ölçüm değerinden uzaklaşmak olarak adlandırılabilir. İki farklı filtre yapısı üzerinden en az kayba neden olan filtre yapısı seçilmiştir. Filtre yapılarına daha detaylı incelemek istersek her ikisinin de aynı ölçüm üzerinde gösterdiği etkinin incelenmesi yeterli olacaktır.

4.2.1 Kalman Filtresi

Kalman filtresi, durum uzayı tekniklerinin ve özyinelemeli algoritmaların kullanımına dayanan özyinelemeli bir tahmin filtresidir. Dinamik sistemlerin tahminlerini yapmaktadır. Bu dinamik sistem, çoğunlukla beyaz gürültü olarak kabul edilen bazı gürültülerden etkilenebilir. Kalman filtresi tahmin durumunu iyileştirmek için durumla ilgili ölçümlerde, aynı zamanda bozulan ölçümlerde de kullanılmaktadır [62, 65, 67, 69, 74, 75, 77].

Kalman filtresi hesaplanırken model tahmini gözlem ile karşılaştırılır. Elde edilen fark, Kalman kazancı olarak bilinen bir çarpan ile ölçeklendirilir. Daha sonra sıradaki tahminleri iyileştirmek için modele bir girdi olarak geri besleme uygulanır. Yüksek bir kazanç ile, filtre gözlemleri daha yakın olarak takip edilir. Düşük bir kazanç ile, filtre model tahminini daha yakın takip eder [62, 65, 67, 69, 74, 75, 77].

Her bir zaman adımında, Kalman filtresi, gerçek bilinmeyen değerlerin tahminlerini belirsizlikleriyle beraber üretir. Sıradaki ölçümün sonucu gözlendiğinde, bu tahminler, belirsizliği düşük tahminlere daha fazla ağırlık vererek, ağırlık ortalama ile güncellenir [62, 65, 67, 69, 74, 75, 77].

Kalman filtresi sensör füzyonu ve veri füzyonu için kullanılır. Tipik olarak, gerçek zamanlı sistemler bir sistemin durumunu elde etmek için tek bir ölçüm yapmak yerine birçok ardışık ölçüm üretilir. Bu birçok ölçüm daha sonra o zaman anında sistemin durumunu üretmek için matematiksel olarak birleştirilir [62, 65, 67, 69, 74, 75, 77].

Kalman filtresi denklemi elde edilirken aşağıdaki ayrık zamanlı lineer sistem ele alınır.

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1} \quad \textbf{4.1}$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad \textbf{4.2}$$

Burada X_k durum vektörü, $\Phi_{k,k-1}$ durum geçiş matrisi, Z_k ölçüm vektörü, H_k ölçüm matrisi, $W_k \sim N(0, Q)$ sistem işlem gürültüsü ve $V_k \sim N(0, R)$ ölçüm gürültüsüdür. Q ve R sırasıyla sistem gürültüsü ve ölçüm gürültüsünü kovaryans matrisleridir [62, 65, 67, 69, 74, 75, 77].

Kalman filtresi adımları aşağıdaki gibidir;

1. Tek adımlı durum tahmini hesaplanır.

$$\hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad \textbf{4.3}$$

2. Kovaryans matrisinin tek adımlı tahmini hesaplanır.

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \hat{X}_{k-1} \quad \textbf{4.4}$$

3. Filtre kazancı hesaplanır

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \quad \textbf{4.5}$$

4. Durum güncellenir.

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k \left[Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}\right] \quad \textbf{4.6}$$

5. Kovaryans matrisi tahminini hesaplanır.

$$P_k = \left[I - K_k H_k\right] P_{k,k-1} \left[I - K_k H_k\right]^{-1} + K_k R K_k^T \quad \textbf{4.7}$$

Q ve R, filtre davranışında önemli rol oynar. Kovaryans değerlerini elde etmek için iki yöntem ele alınabilir. Bu yöntemlerden biri sinyallerin Allan varyansını hesaplamaktır. Ancak Allan varyansı sadece durağan koşullar için bilgi verir. Başka bir deyişle, sistemin çıktısı durağan olmalıdır. Bu nedenle, sistem uyarıldığında Allan varyansı güvenilir değildir. Diğer yöntem, Q veya R'yi veya her ikisini güncellemek için uyarlanabilir Kalman filtresini kullanmaktır. Ancak pratikte, bu yöntem yüksek dereceli sistemler için iyi çalışmayabilir. Yukarıdaki yöntemlerin yanı sıra, bir başka yaygın yöntem de Q ve R'yi ampirik olarak ayarlamaktır. R, gözlem gürültüsünün kovaryans matrisidir ve ölçümün ne kadar güvenilir olduğunu tanımlar. Benzer şekilde Q, tahminin güvenilirliğini tanımlar. Örneğin, küçük bir Q ile büyük bir R ayarlamak, tahminin ölçümden daha fazla tahmine duyduğu anlamına gelir [62, 65, 67, 69, 74, 75, 77].

Bu çalışmada Kalman filtresinin ayrık durum uzay modeli şu şekilde oluşturulmuştur.

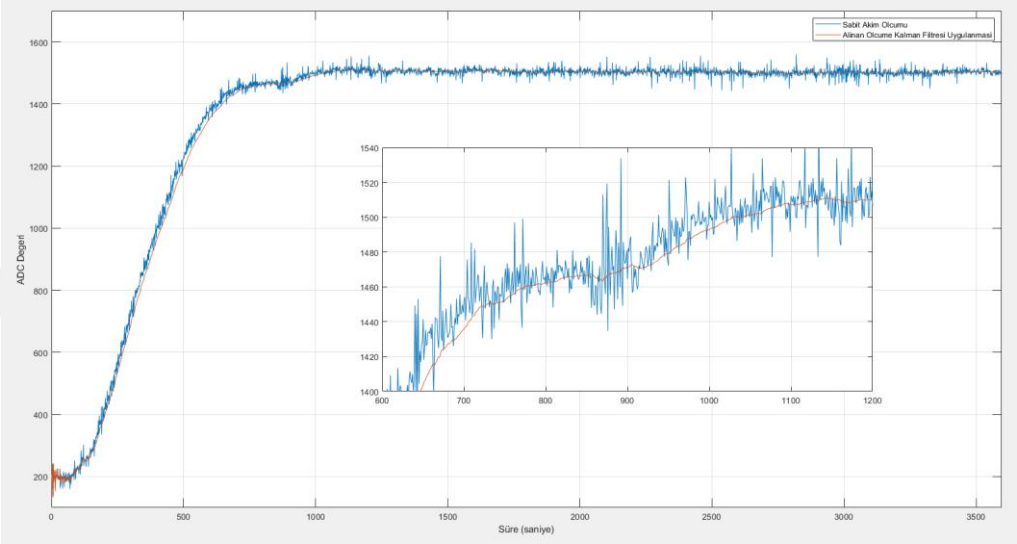
$$\begin{bmatrix} x_k \\ \Delta x_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ \Delta x_{k-1} \end{bmatrix} \quad \textbf{4.8}$$

$$z_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ \Delta x_k \end{bmatrix} \quad \textbf{4.9}$$

Burada x, RTD üzerindeki voltajın ADC değeri, Δx, x'in değişimi, τ örnekleme periyodu ve k örnek sayısıdır. Hem sabit akım hem de Wheatstone köprüsü ölçüm devresi için kalman filtresi denenmiştir. Ölçüm devresi için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.2.1.1 Sabit Akım Ölçüm Devresine Kalman Filtresinin Uygulanması

Şekil 4.2'de sabit akım ölçüm devresi ile alınan sayısal filtre uygulanmamış ölçüm sonucu görülmektedir. Elde edilen bu ölçüm verisine kalman filtresi uygulanmıştır. Kalman filtresi uygulanırken en önemli parametrelerden olan kalman kazancı sabit olarak uygulanmamıştır.

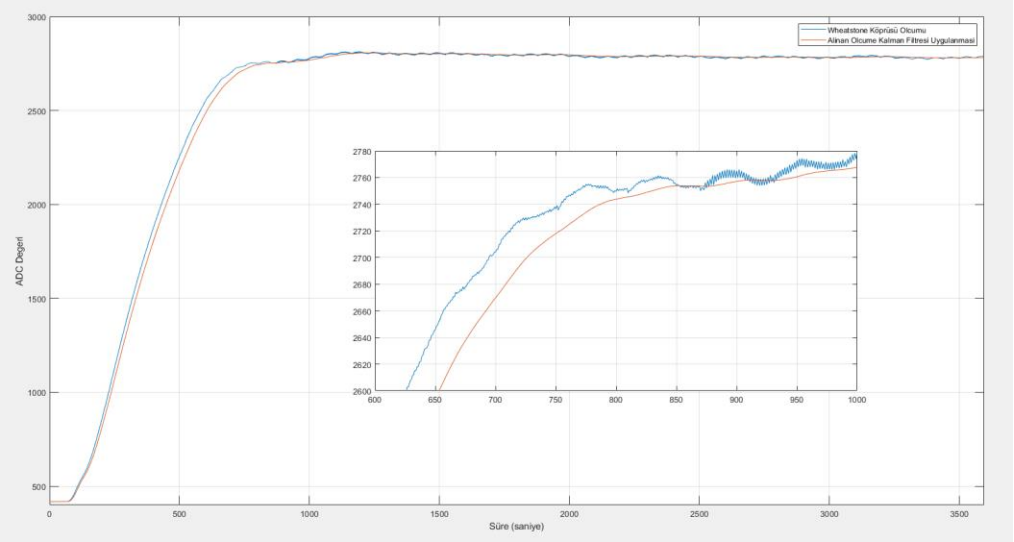


Şekil 4.5 Sabit Akım Ölçüm Verisine Kalman Filtresinin Uygulanması

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere uygulanan kalman filtresi ölçüm verisini oldukça gürültüden arındırmaktadır. Ancak uygulanan filtre yapısıyla elde edilen yeni ölçüm verisi, ölçümün doğruluğundan uzaklaşılmasına neden olmaktadır. Ana ölçüm verisinden bu kadar uzaklaşmak istenilmemektedir. Bu sonuç katsayıları değiştirerek düzeltilebilmektedir.

4.2.1.2 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Devresine Kalman Filtresinin Uygulanması

Şekil 4.3'te Wheatstone köprüsü ile alınan sayısal filtre uygulanmamış ölçüm verisi görülmektedir. Elde edilen ölçüm verisine kalman filtresi uygulanmaktadır. Sabit akım devresinde kullanılan kalman filtresi katsayıları, Wheatstone köprüsü ölçüm devresinde de kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm sonucu Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Verisine Kalman Filtresinin Uygulanması

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere uygulanan kalman filtresi sonucunda ölçüm verisindeki iyileşme gözle görülmektedir. Ancak grafikte görüldüğü üzere ölçüm üzerinde büyük bir gecikme oluşmaktadır. Bu ölçüm verisinden uzaklaşmak olduğundan kaynaklı istenilen bir durum değildir. İleride belirtilecek olan seçilen ölçüm devresi ve sayısal filtre bu konular göz önüne alınarak seçilmiştir.

4.2.2 Sonsuz Darbe Cevaplı (ing: IIR) Filtresi

Infinite impulse response yani sonsuz darbe cevaplı olarak adlandırılan IIR filtresi bir alçak geçiren filtre yapısıdır. Bu belirtilen filtre yapısının yanı sıra sonlu darbe cevaplı (FIR) filtre yapısı da bulunmaktadır. Kalman filtresine göre kullanımı daha basittir. Uygulaması daha kolay bir denklem yapısı vardır [8, 61, 77].

IIR filtresi matematiksel yapısı kullanım açısından çok basittir. Genel mantık olarak eski ölçüm verisiyle yeni ölçüm verisi arasındaki farkı belirlenen bir katsayıya bölüp, eski ölçüm verisine ekleyerek hesaplanmaktadır. IIR filtresi aşağıdaki fark denklemiyle tanımlanabilir [8, 61, 77].

$$y(k) = -\sum_{n=1}^{N} b_n y(k-n) + \sum_{n=0}^{M} a_n x(k-n) \qquad \textbf{4.10}$$

Burada y(k) filtre çıkışı, x(k) filtre girişi, a_n ve b_n katsayılardır. 4.10'da akım çıktısının hem önceki çıktıya hemde akım girdisine bağlı olduğu görülmektedir. IIR'nin transfer fonksiyonu karmaşık düzlemde aşağıdaki gibi elde edilmektedir [8, 61; 77].

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = H(z) = \frac{\sum_{n=0}^{M} a_n z^{-n}}{1 + \sum_{n=1}^{N} b_n z^{-n}} \quad \textbf{4.11}$$

Burada $z = re^{jw}, w \in [0, 2\pi]$ dijital frekanstır ve r, w'nun açısal dönüşü ile oluşturulan dairenin yarıçapıdır. Sayısal sistemlerde r=1 olan birim çember dikkate alınır. IIR filtresinin büyüklüğü ve faz tepkileri aşağıdaki denklemler çözülerek elde edilmektedir [8, 61; 77].

$$\left\|H(e^{jw})\right\| = \frac{\left\|\sum_{n=0}^{M} a_n z^{-jwn}\right\|}{\left\|1 + \sum_{n=1}^{N} b_n z^{-jwn}\right\|} \quad \textbf{4.12}$$

ve

$$\theta = arg\{H(e^{jw})\} \quad \textbf{4.13}$$

Bu çalışmada, aşağıdaki alçak geçiren tek kutuplu IIR filtresi kullanılmıştır [8, 61; 77].

$$y(k) = y(k-1) + \alpha(x(k) - y(k-1)) \quad \textbf{4.14}$$

Burada $\alpha \in R^{+}$sabittir.

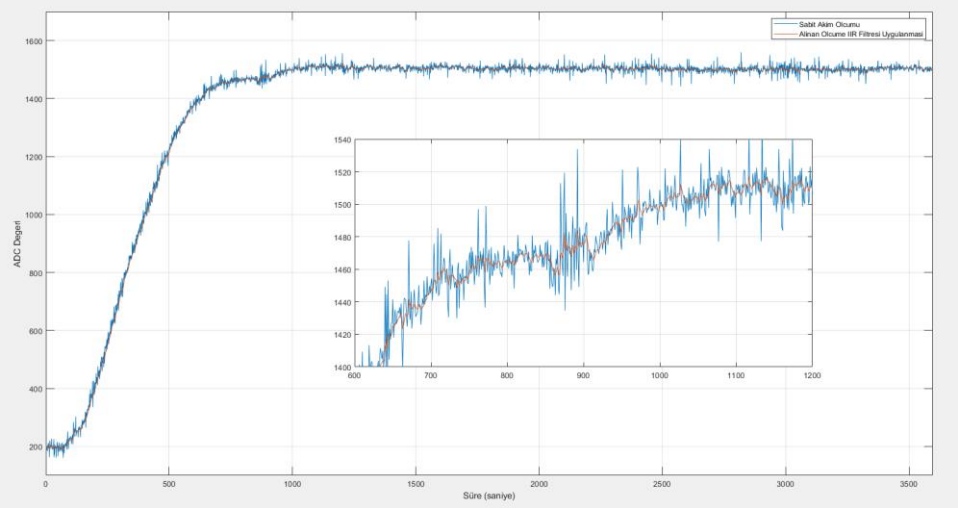
Yukarıda görülen denklemde bulunan α değeri filtrenin derecesini belirlemektedir. Denklemde bulunan α üzerinde değişiklik yapılarak filtrenin derecesi değişmektedir. Filtrenin derecesi yükseltildikçe ölçüm gürültülerden daha çok arınmış şekilde elde edilmektedir. Ancak bu durum ana ölçüm verisinden

uzaklaşılmasına neden olacağı için α değerinin düzgün seçilmesi gerekmektedir. Filtrenin derecesinin yüksek olması sistemde alınan ölçümde bir gecikme oluşmasına neden olmaktadır.

Yapılan birçok değer denemesinde sistemin istenildiği gibi çalışması için değerler belirlenmiştir. Hem sabit akım ölçüm devresi hem de Wheatstone köprüsü ölçüm devresi için alınan ölçümler için IIR filtre yapısı denenmiştir.

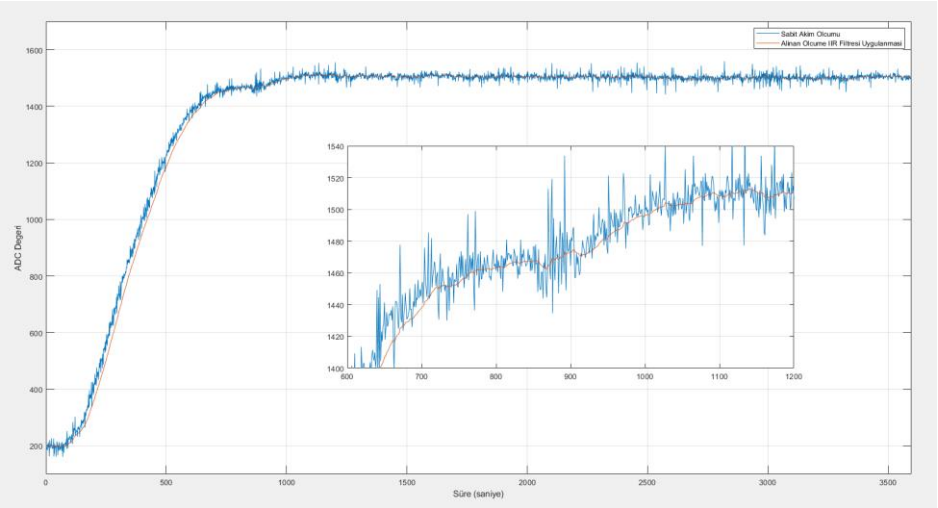
4.2.2.1 Sabit Akım Ölçüm Devresine IIR Filtresinin Uygulanması

Şekil 4.2'de görülen sabit akım devresi ölçüm verisine IIR filtresi uygulanmıştır. Uygulanan filtrede α katsayısı 0.2 olarak belirlenmiştir. Ancak farklı katsayı değerlerine göre elde edilen filtreli ölçümlerde ileride gösterilmektedir. Şekil 4.2'de gösterilen ölçüm verisine uygulanan filtre sonucu elde edilen yeni filtreli ölçüm verisi Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Sabit Akım Ölçüm Verisine IIR Filtresinin Uygulanması (α = 0.2)

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere filtreli sinyal ölçüm verisine oldukça yakın ve gürültüden olabildiğince arındırılmış bir haldedir. Şekil 4.7'de elde edilen sinyal incelendiğinde α değerini azaltıp 0.05 yaparak elde edilen ölçümün daha az gürültüsü olması sağlanabilmektedir. Elde edilen yeni ölçüm verisi Şekil 4.8'de gösterilmektedir.

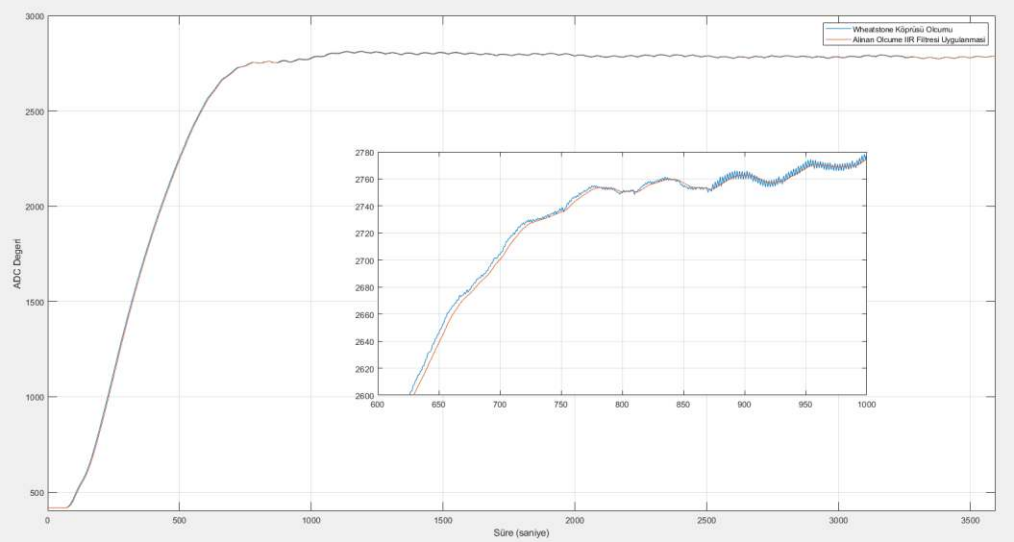


Şekil 4.8 Sabit Akım Ölçüm Verisine IIR Filtresinin Uygulanması (α = 0.05)

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere uygulanan yeni α değeri ölçüm verisinin daha sabit olmasını sağlamıştır. Ancak sistemde ciddi bir gecikmeye neden olmaktadır. Elde edilen yeni sinyal ölçüm için kullanılabilir ancak kontrol edilmesi açısından 0 noktasının 20 saniye kaçırılmasına neden olmaktadır.

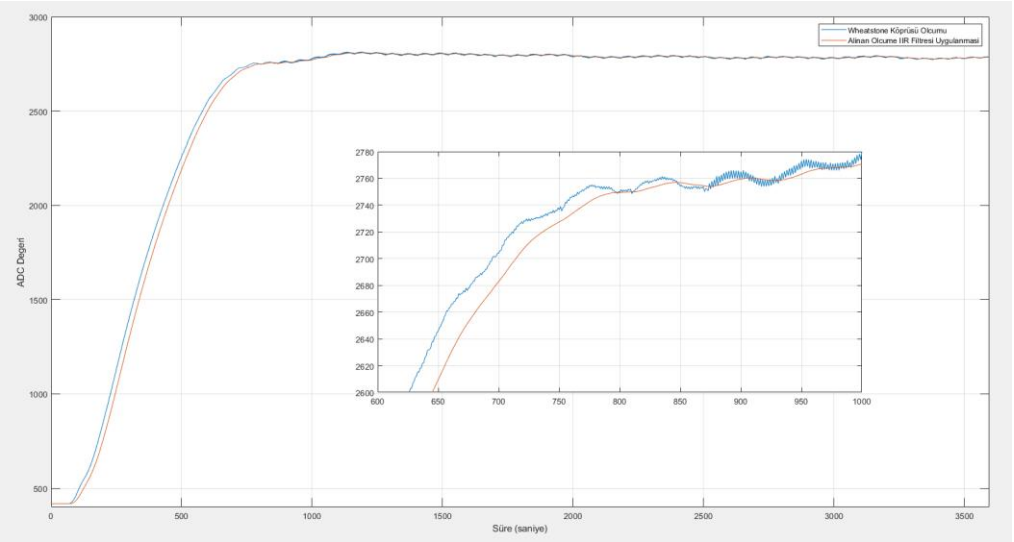
4.2.2.2 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Devresine IIR Filtresinin Uygulanması

Şekil 4.4'te görülen Wheatstone köprüsü ölçüm verisine IIR filtresi uygulanmıştır. Uygulanan filtrede α katsayısı 0.2 olarak belirlenmiştir. Ancak farklı katsayı değerlerine göre elde edilen filtreli ölçümlerde ileride gösterilmektedir. Şekil 4.4'te gösterilen ölçüm verisine uygulanan filtre sonucu elde edilen yeni filtreli ölçüm verisi Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Verisine IIR Filtresinin Uygulanması ($\alpha = 0.2$)

Şekil 4.9'da görüldüğü üzere filtreli sinyal ölçüm verisine oldukça yakın ve gürültüden olabildiğince arındırılmış bir haldedir. Kalman filtresini IIR filtresine göre daha sabit olsa da ana ölçümden uzaklaşmamak için IIR filtresini kullanmak daha kullanışlı görülmektedir. Şekil 4.9'da elde edilen sinyal incelendiğinde α değerini azaltılıp 0.05 yaparak elde edilen ölçümün daha az gürültüsü olması sağlanabilmektedir. Elde edilen yeni ölçüm verisi Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Verisine IIR Filtresinin Uygulanması ($\alpha = 0.05$)

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere uygulanan yeni α değeri ölçüm verisinin daha sabit olmasını sağlamıştır. Ancak sistemde ciddi bir gecikmeye neden olmaktadır. Elde edilen yeni sinyal ölçüm için kullanılabilir. Ancak kontrol edilmesi açısından ölçüm verisinin türev 0 noktasının uygulanan filtre yapısı nedeniyle 20 saniyenin üzerinde kaçırılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ölçümün kontrolü için kullanılması tercih edilmemektedir

Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmadan önce kontrol işleminin yapılacağı sistemin çalışması düşünülmelidir. Sıcaklık kontrolünün yapılacağı fırına 60 saniyelik periyotlarla kontrol sinyali gönderilecektir. Bu nedenle fırının kontrol edilmesi işlemi oldukça yavaş olacaktır. Fırının dinamikleri nedeniyle de fırın içerisindeki sıcaklık değişimleri de oldukça yavaş olmaktadır. Elde edilen bu nedenlerden dolayı ölçümlerde gecikmenin en aza indirilmesi gerekmektedir.

Fırın dinamikleri düşünüldüğünde sayısal filtrelerden kalman filtresi daha düzgün bir sinyal verdiği için düşünülebilir ama daha önce belirtilen gecikmenin azaltılması nedeniyle fırın kontrol sisteminde sayısal filtre olarak kullanılması kontrol işlemini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle IIR filtresi, hem kullanışının rahatlığı, sistemdeki gecikmenin azaltılması ve ana ölçüme daha yakın bir filtre sinyali elde edilmesi nedeniyle tercih edilmiştir.

Sayısal filtreler ile hangi ölçüm devresinin kullanılacağı da belirlenmelidir. Sabit akım ölçüm devresinden alınan ölçümler, Wheatstone köprüsü ölçüm devresinden alınan ölçümlere göre daha gürültülüdür. Bu nedenle ölçümün daha gürültüsüz olması istenildiğinden Wheatstone köprüsü ölçüm devresi daha kullanışlı bir ölçüm devresidir. Sıcaklık tahmini ve kontrolü yapılırken Wheatstone ölçüm devresi ve IIR filtresi kullanılarak deneyler yapılmıştır.

5. SICAKLIK TAHMİNİ

Mikroişlemci ile alınan ölçümlerde alınan ölçüm verisi grafikte görüldüğü üzere çok yüksek değerlerdedir. Bu değer 12 bitlik Analog-Digital-Dönüştürücünün (ing. ADC) maksimum 4095'e çıkan ADC değeridir. Burada her bir ADC değeri karşılık gelen sıcaklık değerinin bulunması önemlidir. Sıcaklık tahmininin yapılmasındaki önem burada görülmektedir. Yani kısaca sıcaklık tahminindeki amaç elde edilen ADC değerine denk gelen sıcaklık değerinin bulunmasıdır.

Mikroişlemci ile alınan ADC değerleri PT1000 sensörünün teknik kılavuzunda yer alan doğruluk tablosunda yer alan veriler kullanılarak da sıcaklık değerine dönüştürülebilir. Ancak daha öne belirtildiği üzere PT1000 sensörü birçok filtre yapısından geçirilmiştir. Yapılan çalışmada fırının merkez noktasının tahmini yapıldığı için PT1000 sensörünün doğruluk tablosu bu çalışmada kullanılamamaktadır.

Belirtilen durumun çözülmesi için farklı bir tahmin metodu düşünülmelidir. Ayrıca mikroişlemci ile alınan ölçümün hangi sıcaklık değerine karşılık geldiğinin biliniyor olması gereklidir. Bu nedenle sıcaklık ölçümleri alınırken, fırının ilgili noktalarına termokupl adında 3 sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bu termokupllar, sıcaklık ölçüm konusunda net bilgi verdiği konusunda sertifikalara sahip Keysight marka data logger (Şekil 5.1) kullanılarak ölçülmüştür.

Şekil 5.1 Keysight Data Logger [33]

Şekil 5.1'de ölçüm alınması için kullanılan data logger görülmektedir. Data logger ölçümleri üzerinde bulunan ölçüm kanallar üzerinden yapmaktadır. Birçok farklı sensör tipini (termokupl, RTD, termistör, AC/DC voltları ve akımı) ölçebildiği için çoğu AR-GE departmanı tarafından tercih edilmektedir. Üzerinde bulunan ölçüm kanallarından 250 tanesini aynı anda kullanabilme imkânı sağlamaktadır. Kullanıma başlamadan önce referans bir termokupl kullanılmalıdır. Ancak kullanılan ölçüm cihazı üzerinde referans bir termokupl bulunmaktadır.

Alınan ölçümler ağ üzerinden veya RS232 haberleşme arabirimi üzerinden alınabilmektedir. Ancak kullanılan 34970A model data logger üzerinde ağ girişi bulunmadığı için sadece RS232 arabirimi kullanılabilmektedir.

Data logger üzerinden saniyede 250 kanal üzerinden ölçüm alınabileceği daha önce belirtilmişti. Ancak kullanılan cihaz üzerinde sadece 20 adet kanal bulunmaktadır. Fırın üzerine sadece 3 termokupl yerleştirildiği ve 1 adet referans termokuplu olduğu için mevcut kanal sayısı oldukça yeterlidir.

Data logger üzerinden ölçüm alınabilmesi için BenchVue DAQ Kontrol ve Analizi (BenchVue DAQ Control and Analysis) programı kullanılmaktadır. Bu program üzerinden hangi kanalların çalışacağı, ne kadar süre aralıkla ölçüm alınacağı ve toplamda ne kadar süre ölçüm alınacağı belirlenebilmektedir. Alınan ölçümler bir grafik ekranı üzerinden görüntülenebilmektedir.

Şekil 3.1'de görülen tasarladığımız ölçüm programı data logger ile ortak bir amaç uğruna tasarlanmıştır. Tasarladığımız program mikroişlemci üzerinden gelen ölçüm verisini göstermek üzerine tasarlanmıştır ve aynı zamanda mikroişlemcinin çalışmasını kontrol etmektedir. Mikroişlemci üzerinden alınan ölçümlerin tahmininin yapılabilmesi için data logger üzerinden gelen ölçüm verileri kullanılacaktır. Ölçümün tahmininin yapılabilmesi için alınan ölçümlerin ölçüm zamanlarının üst üste gelebiliyor olması gerekmektedir. Bu nedenle tasarladığımız ölçüm programı ve BenchVue DAQ Kontrol ve Analizi programı üzerinden ölçümler aynı anda başlatılmalıdır.

İki ölçüm noktası üzerinden alınan veriler tek bir veri dosyası üzerinde bir araya getirilmelidir. Mikroişlemci ve data logger üzerinden alınan ölçümler saniyelerine kadar aynı olmalıdır çünkü tahmin işlemi yapılırken iki ölçüm arasında gecikme olması tahmin yapılmasını zorlaştıracaktır. Bu nedenle mikroişlemci üzerinden alınan ölçümle, data logger üzerinden alınan ölçüm aynı anda gerçekleştirilmiştir.

Standartlara göre alınan ölçümler 1 saat sürmelidir. Ancak fırın dinamiği düşünüldüğünde bir sıcaklık değerinde ölçüm yapılması için 1 saat yeterlidir ancak fırın tek bir sıcaklıkta çalışmayacağı için birçok sıcaklık değerinde ölçüm alınması gerekmektedir. Bu nedenle birçok sıcaklık değeri için 1 saatlik veriler alınmalıdır. Tablo 5.1'de seçilen Wheatstone köprülü ölçüm devresine IIR sayısal filtresinin uygulandığı ölçüm verisi gösterilmektedir. Tabloda yer alan kısaltmalar, kısaltma ve semboller listesi içerisinde açıklanmıştır.

Tablo 5.1 Wheatstone Köprüsü Ölçüm Devresi ve IIR Sayısal Filtresi Kullanılarak Alınan Ölçüm

Mikroişlemci Ölçüm Verileri										**Data Logger Ölçüm Verileri**		
AA	**ÜA**	**AAT**	**ÜAT**	**ÜİR**	**ÜDR**	**AR**	**TR**	**ÜF**	**TF**	**MS**	**ÜS**	**AS**
418	446.66	0.02	0.03	0	0	0	0	1	1	25.736	25.826	25.814
417.6	446.73	0.02	0.03	0	0	0	0	1	1	25.734	25.805	25.81
417	446.8	0.01	0.03	0	0	0	0	1	1	25.732	25.791	25.775
418	446.88	0.01	0.03	0	0	0	0	1	1	25.748	25.787	25.789
417.4	446.92	0.01	0.03	0	0	0	0	1	1	25.744	25.799	25.785
418	446.94	0.01	0.03	0	0	0	0	1	1	25.762	25.791	25.802
418	447.03	0.01	0.03	0	0	0	0	1	1	25.771	25.797	25.802
418	447.07	0.01	0.03	0	0	0	0	1	1	25.795	25.803	25.802
418	447.05	0.01	0.03	0	0	0	0	1	1	25.781	25.803	25.804
418	447.16	0	0.03	0	0	0	0	1	1	25.779	25.793	25.795

Tablo 5.1'de sütün adları kısaltma listesinde bulunmaktadır. Mikroişlemci ve data logger ile ölçülen veriler birleştirilerek gösterilmektedir. 60 dakika alınan ölçümün sadece 10 saniyelik kısmı görülmektedir. Mikroişlemci üzerinden alınan veriler arasında fırının ön tarafına göre sol altta ve sağ üst köşesinde yer alan sensörlerden ölçülen ADC verileri ve bu ölçülen ADC verilerinin türevleri, alınan ADC verileriyle hesaplanan sıcaklık tahmini verisi ve tahmin değerinin türevi ve fırın üzerinde yer alan, rezistans ve fanları kontrol eden rölelerin durumu bulunmaktadır. Data logger üzerinden alınan veriler arasında 3 noktaya yerleştirilen termokupl sıcaklık verileri yer almaktadır.

Daha önce bahsedildiği üzere fırının birden fazla pişirme modu bulunmaktadır. Fırında bulunan tüm pişirme modları için tek bir tahmin verisi üretmek neredeyse imkansızdır. Bunun nedeni her pişirme modunun kendine has bir iç dinamiğinin bulunmasıdır. Bu nedenle her pişirme modu için tek tek tahmin verisinin bulunması uygun görülmüştür.

Her pişirme modu için merkez sıcaklık tahmininin yapılması için 2 farklı tahmin yöntemi denenmiştir. Bu tahmin yöntemleri MATLAB programı üzerinden denenmiştir. MATLAB üzerinde kullanılan tahmin yöntemleri şunlardır;

- Yapay Sinir Ağı

- Polinom Uydurma

Belirtilen iki tahmin yönteminin kendilerine göre artıları ve eksileri bulunmaktadır. Tahmin yöntemleri farklı mantıklarda çalışsa da belirli bir yeterlilik sağlamıştır ama kullanış bakımından daha rahat ve daha iyi bir tahmin sonucu veren yöntem seçilmiştir.

5.1. Yapay Sinir Ağı (YSA)

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin bilgi işleme tekniğinden esinlenerek geliştirilmiş bir işlem teknolojisidir. YSA ile basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli taklit edilir. Yani biyolojik nöron hücrelerinin ve bu hücrelerin birbirleri ile arasında kurduğu sinaptik bağın dijital olarak modellenmesidir. Nöronlar çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak ağlar oluştururlar. Bu ağlar öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahiptirler [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

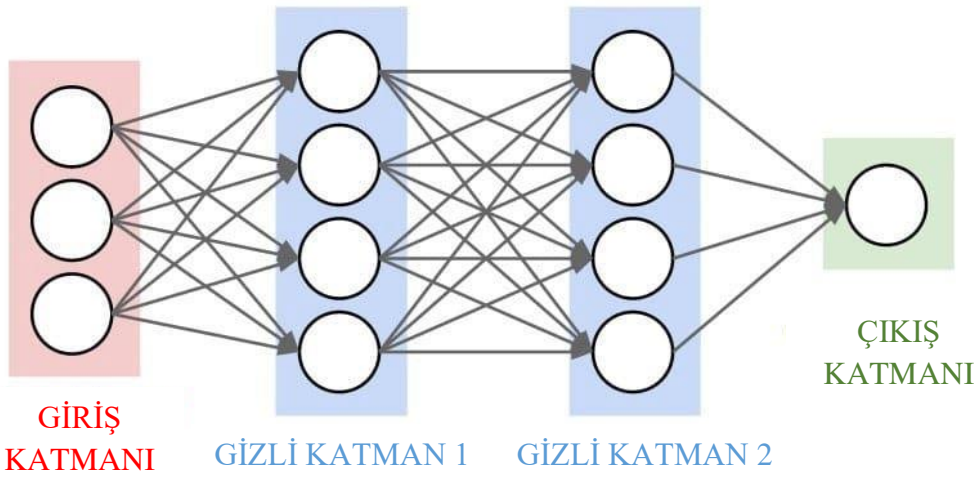
Biyolojik sistemlerde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik bağlantıların ayarlanması ile olur. Yani, insanlar doğumlarından itibaren bir yaşayarak öğrenme süreci içine girerler. Bu süreç içinde beyin sürekli bir gelişme göstermektedir. Yaşayıp tecrübe ettikçe sinaptik bağlar ayarlanır ve hatta yeni bağlar oluşur. Bu sayede öğrenme gerçekleşir. Bu durum YSA için de geçerlidir. Öğrenme, eğitme yoluyla örnekler kullanarak olur. Başka bir deyişle, gerçekleşme girdi/çıktı verilerinin işlenmesiyle, yani eğitme algoritmasının bu verileri kullanarak bağlantı ağırlıklarını bir yakınsama sağlanana kadar, tekrar tekrar ayarlamasıyla olur [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

YSA'lar, ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış birçok işlem biriminden (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir. Bir işlem birimi, aslında sık sık transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Bu işlem birimi, diğer nöronlardan sinyalleri alır; bunları birleştirir, dönüştürür ve sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Genelde, işlem birimleri kabaca gerçek nöronlara karşılık gelirler ve bir ağ

içinde birbirlerine bağlanırlar; bu yapı da sinir ağlarını oluşturmaktadır [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

YSA'nın ana öğesi olan matematiksel fonksiyon, ağın mimarisi tarafından şekillendirilir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, fonksiyonun temel yapısını ağırlıkların büyüklüğü ve işlem elemanlarının işlem şekli belirler. YSA'ların davranışları, yani girdi veriyi çıktı veriye nasıl ilişkilendirdikleri, ilk olarak nöronların transfer fonksiyonlarından, nasıl birbirlerine bağlandıklarından ve bu bağlantıların ağırlıklarından etkilenir [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

Şekil 5.2'de bir yapay sinir ağı katman yapısı görülmektedir. Yapay sinir ağı katman yapısında 1 giriş katmanı, 2 gizli katman ve 1 çıkış katmanı olmak üzere 4 katman bulunmaktadır. Ancak gizli katman sayısı isteğe göre değişebilmektedir.

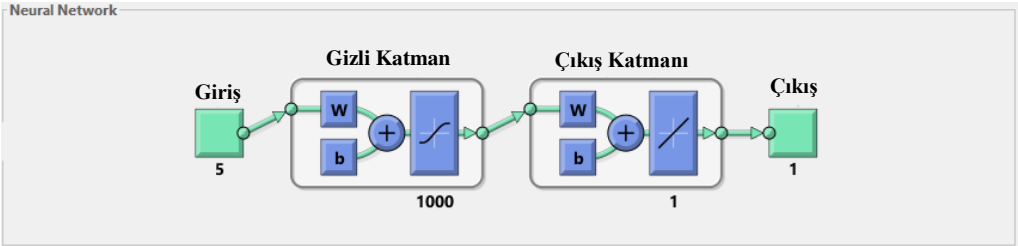


Şekil 5.2 3 Giriş 1 Çıkışlı Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı [34]

Şekil 5.2'de görülen yapay sinir ağı yapısı isteklere göre düzenlenebilir bir yapıdadır. Giriş katmanındaki giriş sayısı, gizli katman sayısı ve oradaki nöron sayısı ve isteğe göre çıkış sayısı bile değişebilmektedir.

Tablo 5.1'de görülen veri seti sistemi eğitmek için kullanılabilecek bir veri setidir. Giriş olarak sistemin birçok verisi kullanılabilmektedir. Yapay sinir ağı için giriş verisi olarak fırının ADC verileri, türev verileri ve röle durumları eklenmiştir. Fırın üzerinde 6 röle kullanıldığı için her röle eklenmelidir ancak deneyin yapıldığı turbo mod için sadece turbo rezistans verisi üzerinde değişim olmaktadır. Bu

nedenle geri kalan 5 rölede değişim olmadığından kaynaklı yapay sinir ağına eklenmesine gerekmemektedir. Oluşturulan input ve outputa göre elde edilen yapay sinir ağı verisi şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3 Seçilen Input Output için Elde Edilen Yapay Sinir Ağı

Şekil 5.3'te görüldüğü üzere tablo 5.1'de görülen verilerden 5 input (2 ADC, 2 ADC türevi ve turbo rezistans durumu) ve 1 output (merkez sıcaklığı) YSA'ya eklenmiştir. Sisteme giriş ve çıkış olarak yüklenen veri 3595 satırdan oluşmaktadır. Bu 3595 verinin %65'i (2337 adeti) eğitim için, %20'si (719 adeti) doğrulama ve geri kalan %15'i (539 adeti) yapay sinir ağının testi için kullanılmaktadır. Gizli katman nöron sayısı için birçok deneme yapılmıştır. Çünkü katman sayısı YSA'da seçilmesi en önemli değerlerden biridir. Ne çok yüksek seçilmelidir ne de çok düşük uygun orta bir değerde karar kılınmalıdır. 2–1000 arasında nöron sayısı denenmiştir ve en iyi sonuç 100 nöronda alınmıştır.

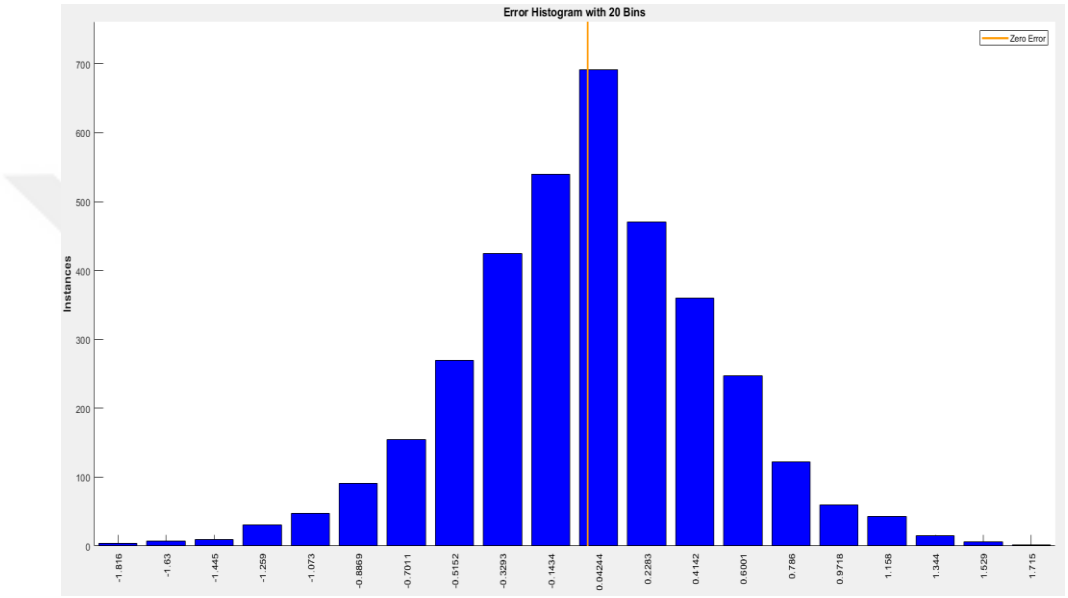
Elde edilen YSA'ya Levenberg-Marquardt eğitim algoritması uygulanmıştır. Uygulanan eğitim algoritması sonucunda elde edilen sonuçlar şekil 5.4'te gösterilmektedir.

Results

	Samples	MSE	R
Training:	2337	2.11165e-1	9.99933e-1
Validation:	719	2.84339e-1	9.99891e-1
Testing:	539	2.49637e-1	9.99913e-1

Şekil 5.4 Levenberg-Marquardt Eğitim Algoritması Sonuçları

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere örnekler (samples) kısmında hangi kısım için ne kadar veri kullanıldığı görülmektedir. R-squared çıkışın girişe olan benzerliğini belirtmektedir. Bizim için en önemli veri olan MSE verisi de elde edilen tahminin hata oranını göstermektedir. Genellikle istenilen hata oranı e^{-2} seviyesinde olmalıdır. Ancak şu an ki elde edilen hata miktarı da istenilen değerlere yakın olduğu için sonuç kabul edilebilirdir. Elde edilen hata grafik verisi şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5 Levenberg-Marquardt Eğitim Algoritması Hata Grafiği

Şekil 5.5'te hata grafiği görülmektedir. İncelendiğinde hataların büyük bir çoğunluğunun 1 derecenin altında olduğu görülmektedir. Elde edilen bu grafik verisi incelendiğinde Turbo mod için kullanılabilir bir tahmin verisi olduğu düşünülebilir.

Ayrıca YSA üzerine anlatılan bu kadar olumlu bilginin yanı sıra olumsuz yanları da vardır. YSA'nın öğrenebilmesi için kullanılan girdi/çıktılar çok önemlidir. YSA sonuçları incelendiğinde ağın gerçekten öğrenip öğrenmediği kontrol edilmelidir.

YSA'ya başka bir ölçüm verisi gönderildiği zaman aslında sistemin öğrenmediği sadece verilen verileri ezberlediği görülmektedir. Bu nedenle YSA

üzerinden elde edilen tahmin verisi her ne kadar kullanılabilir olsa da yeni verilerde işlevsiz olacağından kontrol yapılırken kullanılması tercih edilmemektedir.

5.2 .2 Polinom Uydurma

Polinom uydurma yöntemi matlabda bulunan curve fitting uygulaması kullanılarak yapılmaktadır. Curve fitting uygulaması kullanılarak birden çok işlem yapılabilir. Bu işlemlerden biri olan polinom uydurma yöntemi için fonksiyon üretme yapılabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken polinom uydurma işlemi yapılırken maksimum 2 giriş verisi verilebilmektedir. Bu giriş verileri için birçok kombinasyon denenebilir. En iyi sonucu veren 2 giriş verisiyle elde edilen fonksiyon yeni ölçümler alınırken kullanılmaktadır. Tahmin verisi ne kadar doğru olursa sistemi kontrol etmesi o kadar kolay olmaktadır.

Daha önce belirtildiği üzere fırında 2 tane PT1000 sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Ancak kullanılan fırınların standart üretimlerinde 1 adet PT1000 sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Bu nedenle öncelikle 1 adet sensöre göre fonksiyon tahminleri yapılmıştır. Burada giriş olarak sadece fırının ön yüzüne göre sol üst köşede bulunan sensör ölçüm verisinin IIR sayısal filtresinden geçirilmiş hali kullanılmıştır. Çıkış olarak da data logger ile ölçülen merkez sıcaklık verisi kullanıp polinomlar denenmiştir.

Yine daha önce belirtildiği gibi fırının farklı çalışma modları bulunmaktadır. Bu nedenle her bir çalışma modu için ayrı polinom uydurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca fırının standart üretimi düşünülerek önce standart üretime göre polinom uydurma gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3.3'te verildiği gibi fırınlarda alınan test ölçümleri 1 saat süreyle yapılmıştır. Ancak fırında yapılacak tahminin doğruluğunun kontrolü için 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasında alınan ölçüme bakılmaktadır. Tahmin işleminin son 20 dakikada +2 ve -2 derece arasında tutulması istenmektedir. Ancak temel olarak maksimum ve minimum hata arasındaki farkın 4 derecede tutulması istenildiği düşünülebilir.

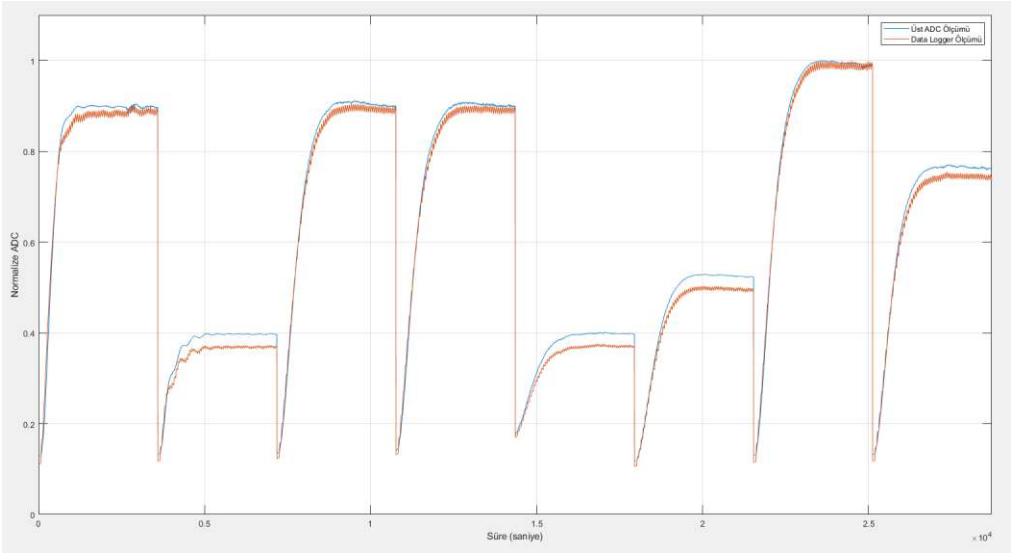
5.1.1 Sadece Üst Sıcaklık Sensörünün Kullanıldığı Polinom Uydurma

Fırın üzerinden ölçüm alınırken sadece üst sensörün kullanıldığı fırınlar düşünülerek sadece üst PT1000 sıcaklık sensörünün kullanıldığı verilerle polinom uydurma gerçekleştirilmiştir. Alınan ölçümler için her çalışma modunda tahmin işlemi yapılmıştır. Aşağıda turbo mod için alınan ölçüm grafikleri gösterilmektedir. Diğer çalışma modları için elde edilen grafik tablo halinde gösterilecektir.

Sadece üst sıcaklık sensöründen gelen ADC ölçümü kullanılarak elde edilen polinom ve ADC ölçümüne ADC ölçümünün türevinin eklenmesiyle elde edilen polinom olmak üzere 2 farklı polinom uydurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çıkış verisi olarak data logger üzerinden alınan merkez sıcaklık verisi kullanılmıştır.

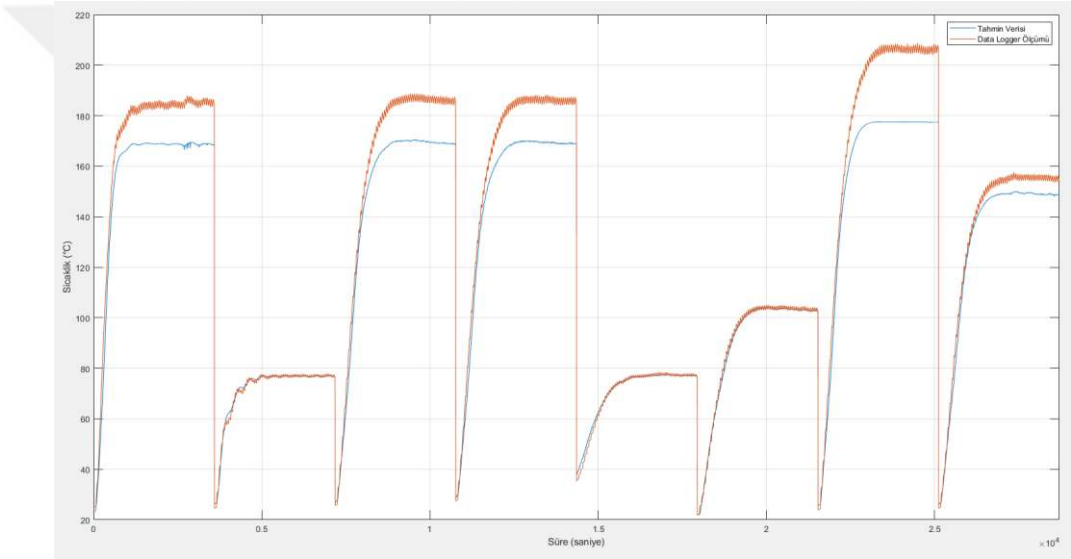
Daha önce de belirtildiği üzere test ölçümleri 1 saat yapılmaktadır. Alınan ölçümlerin doğruluğunun kontrolü için ölçümlerin son 20 dakikasında elde edilen hata verisi kullanılacaktır. Daha önce belirtilen hata oranının altında olursa yeterli bir tahmin verisi olduğu görülecektir. Sadece üst sensör ADC ölçümü ile elde edilen polinom verisiyle elde edilen ölçüm grafikleri aşağıda gösterilmiştir.

Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Turbo Mod Sadece Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

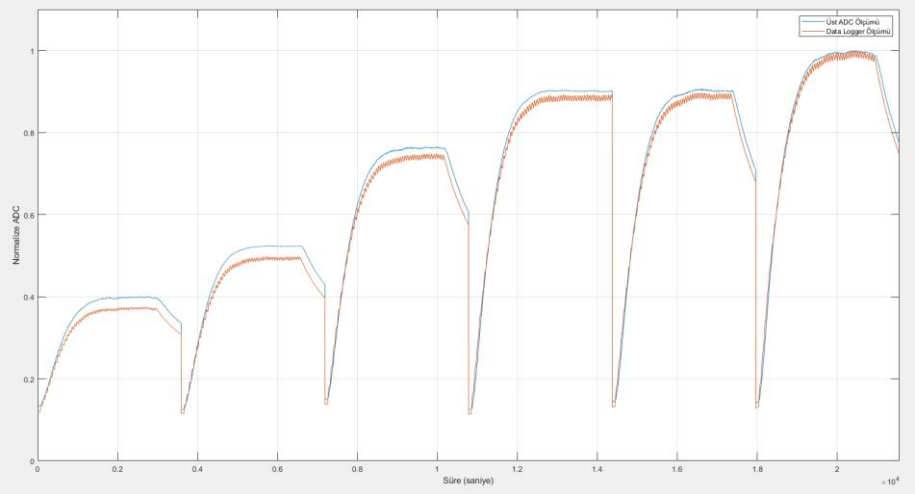
Elde edilen grafik verisi incelendiğinde tek bir sıcaklık ölçümünden oluşmadığı görülmektedir. Bunun nedeni sıcaklık kontrolü yapılırken istenilen her sıcaklıkta kontrolün rahatlıkla yapılmasının sağlanmak istenmesindendir. Normalize edilen ölçümler incelendiğinde bazı noktalarda sıcaklığın oldukça benzer olduğu bazı noktalarda ise sıcaklığın oturma noktalarında ölçümün farklılaştığı görülmektedir. Ancak genel olarak ölçümün üst üste olmasına değil davranış benzerliğine dikkat edilmelidir. Grafikler ne kadar benzer bir davranışa sahipse tahmin işleminin yapılması o kadar kolay olmaktadır. Görüldüğü üzere üst ADC ölçümü ile data logger ölçümü arasında benzer davranış vardır. Alınan bu iki ölçüm ile elde edilen tahmin verisi Şekil 5.7'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7 Turbo Mod Sadece Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Grafiği

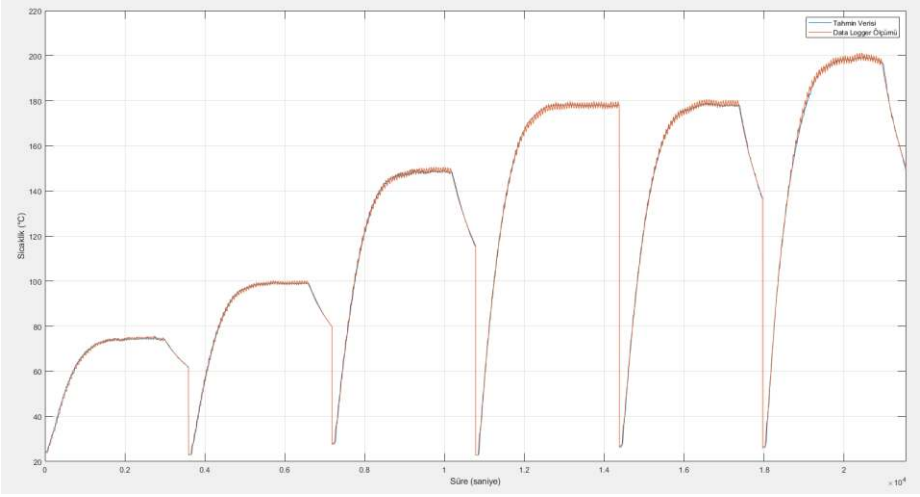
Şekil 5.7'de elde edilen tahmin verisinde görüldüğü üzere tahmin hatası yüksektir. Tahmin verilerinde oluşan maksimum ve minimum hata farkı 35.438 derecelere kadar çıkmaktadır. Bu hata miktarında çalışılması mümkün değildir. Normalize edilen veri incelendiği zaman benzer noktaların olduğu görülmüştü ancak sadece üst sensör verisi kullanılarak merkez sıcaklığının tahmininin yapılamadığı görülmüştür. Bu nedenle tahmin işleminin daha iyi yapılabilmesi için ölçülen ADC'nin türevinin eklenmesi de denenmektedir. Aşağıda üst sensör ADC ölçümü ve üst sensör ADC ölçüm türeviyle elde edilen polinom verisiyle elde edilen ölçüm grafiği görülmektedir.

Burada türev verisi değişimi ve yönünü gösterdiği için tahmin işleminin yapılmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 5.6'da görülen iki veride alınan ölçümlerden bazıları değiştirilerek yeni bir tahmin verisi oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni verinin normalize edilmiş hali şekil 5.8'de gösterilmektedir.



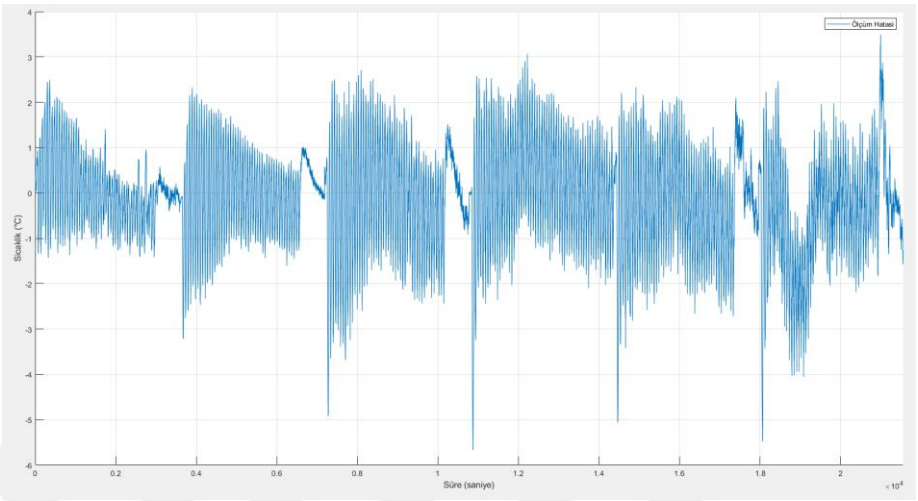
Şekil 5.8 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Veri

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde ölçüm davranışları olarak oldukça benzer olduğu görülmektedir. Bu nedenle sadece üst sensör ADC ve türevi ile tahmin yapılması daha rahat olmaktadır. Uydurulan polinom ile elde edilen tahmin verisi Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



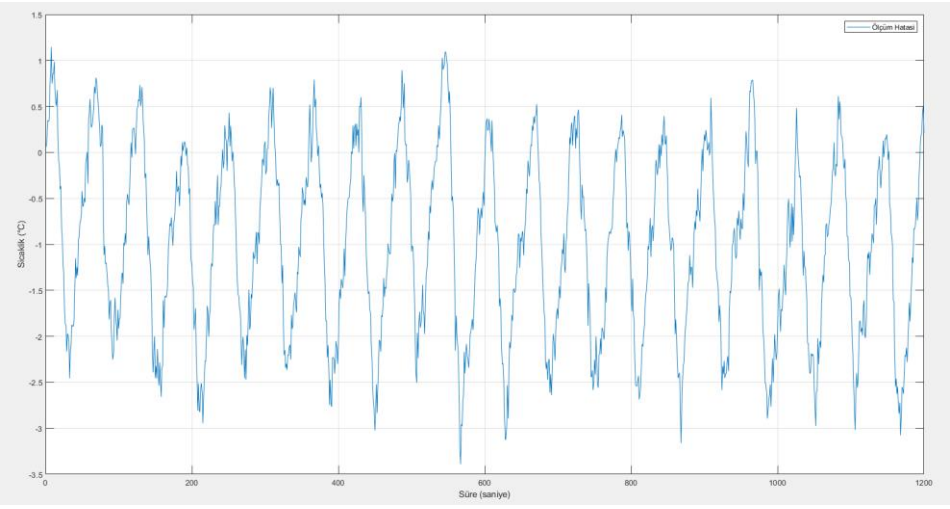
Şekil 5.9 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Grafiği

Görüldüğü üzere tahmin verisi ile data logger ile ölçülen ölçüm verisi üst üstedir. Ancak grafik verisindeki hata incelendiğinde elde edilen hata grafiği şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Tahmin Hata Grafiği

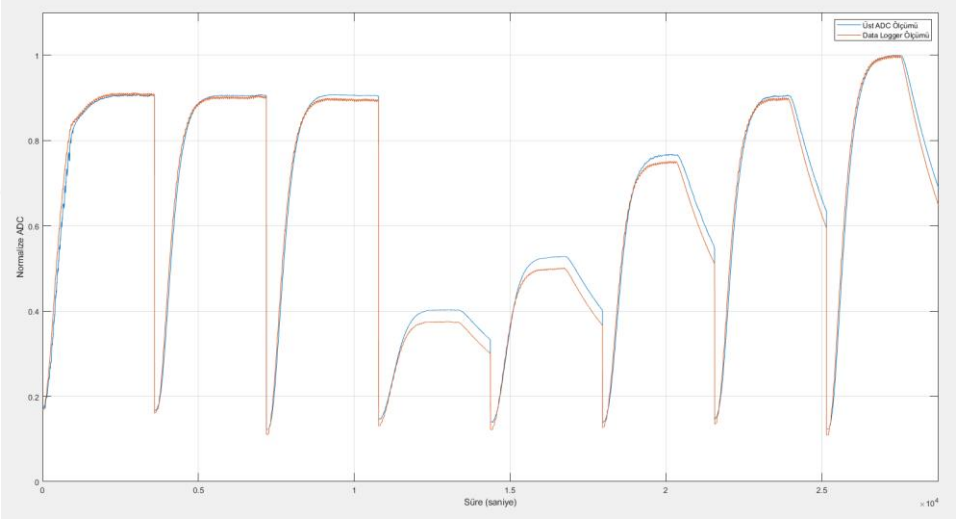
Şekil 5.10'da görüldüğü üzere hata değeri grafiğinde maksimum hata değeri 3.499 derece minimum hata değeri -5.671 derece olarak hesaplanmıştır. Ancak daha önce belirtildiği üzere 1 saatlik alınan ölçümün son 20 dakikası incelenmelidir. 1 saatlik yapılan bir deneyin sonucunda elde edilen son 20 dakika hata verisi şekil 5.11'de gösterilmektedir.



Şekil 5.11 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomla 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Şekil 5.11'de yeni polinom ile yapılan ölçümle alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasında hesaplanan hata verisi görülmektedir. Hesaplanan maksimum ve minimum hata değerleri sırasıyla 1.146 derece ve -3.390 derecedir. Son 20 dakikalık hata grafiğinin hata ortalaması -1.0101 derecedir. Standart sapması 1.001 derecedir. Kabul edilebilir bir tahmin hatası için hata farkının 4 derecede tutulması gerektiği belirtilmişti. Bu durum incelendiğinde 4.536 derecelik hata farkına sahip olan bu tahmin hatası kabul edilebilir hata değerine yakın olsa da geçer bir değerde değildir.

Statik fanlı mod için elde edilen polinom ile turbo mod için alınan tüm ölçümler tek tek alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.12).



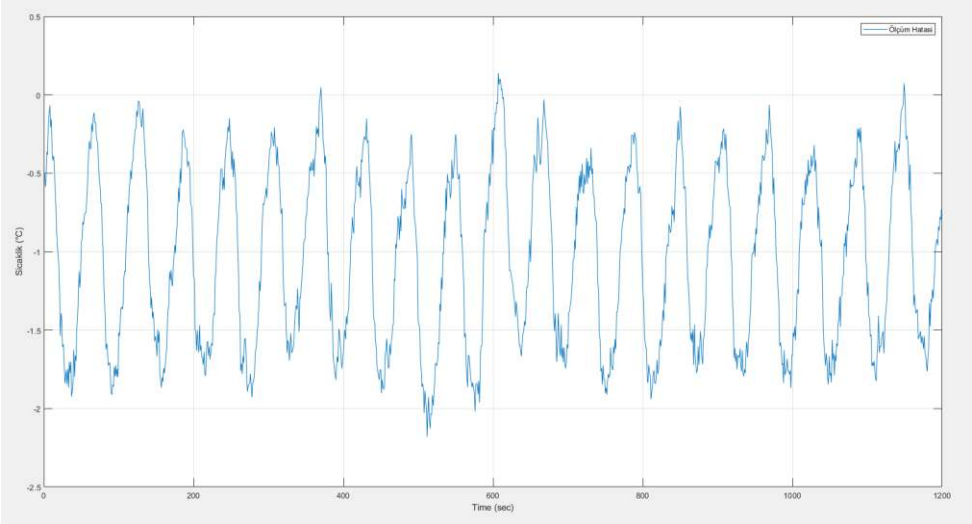
Şekil 5.12 Statik Fanlı Mod Sadece Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde üst sensör ölçüm verisiyle data logger ölçüm verisinin davranış olarak benzediği görülmektedir. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.2'de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Statik Fanlı Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

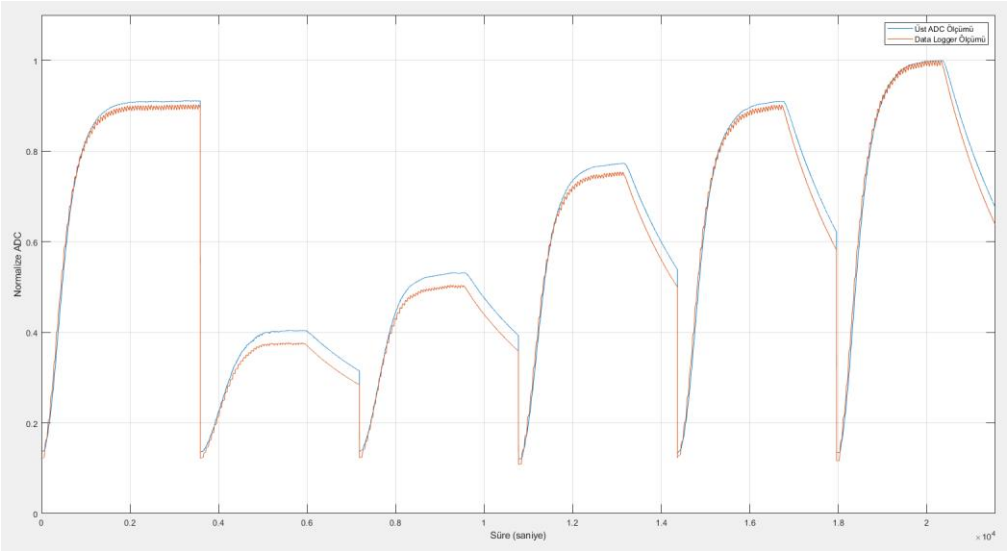
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Sadece Üst Sensör ile Tahmin	12.305	-19.651	1.5256	5.515
Üst Sensör ve Türevi ile Tahmin	3.153	-3.149	0.058	0.807
Üst Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	0.138	-2.180	-1.046	0.568

Üst sensör ADC ve türevi ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.13'te görülmektedir.



Şekil 5.13 Statik Fanlı Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aynı ölçümler Pizza mod içinde alınmaktadır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.14).



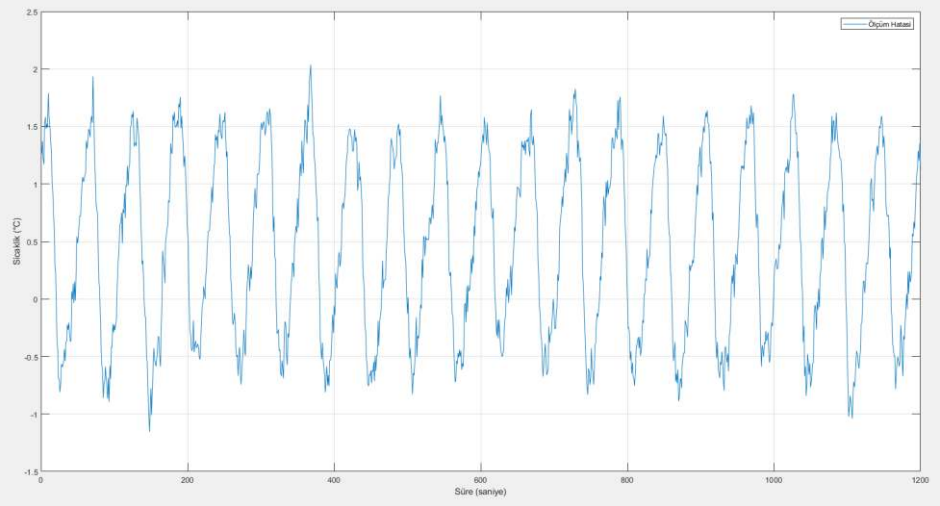
Şekil 5.14 Pizza Mod Sadece Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde ölçümler arasında davranış farklılığı pek görülmemektedir. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.3'te sunulmuştur.

Tablo 5.3 Pizza Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

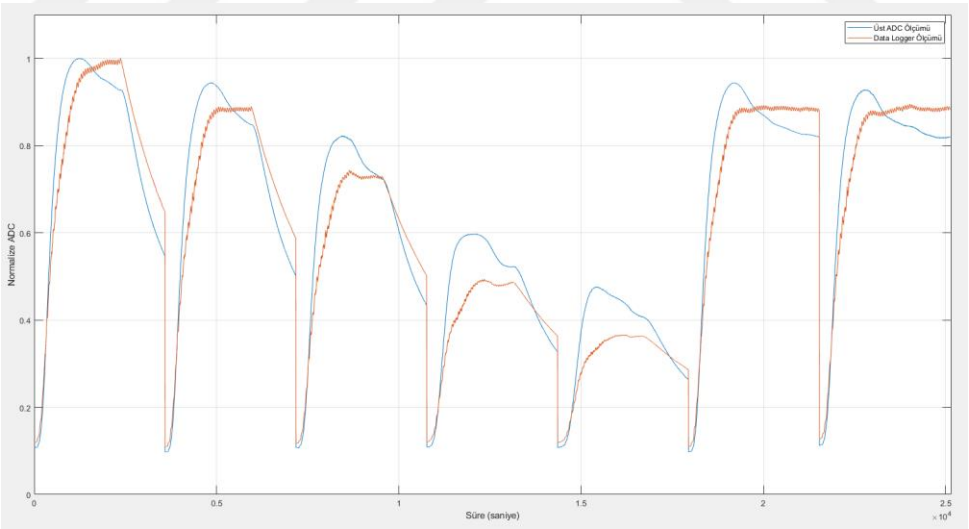
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Sadece Üst Sensör ile Tahmin	316.024	-12.065	71.731	87.144
Üst Sensör ve Türevi ile Tahmin	4.023	-5.115	-0.079	1.093
Üst Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	2.036	-1.154	0.447	0.788

Üst sensör ADC ve türevi ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.15'te görülmektedir.



Şekil 5.15 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aynı ölçümler Grill mod içinde alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.16).



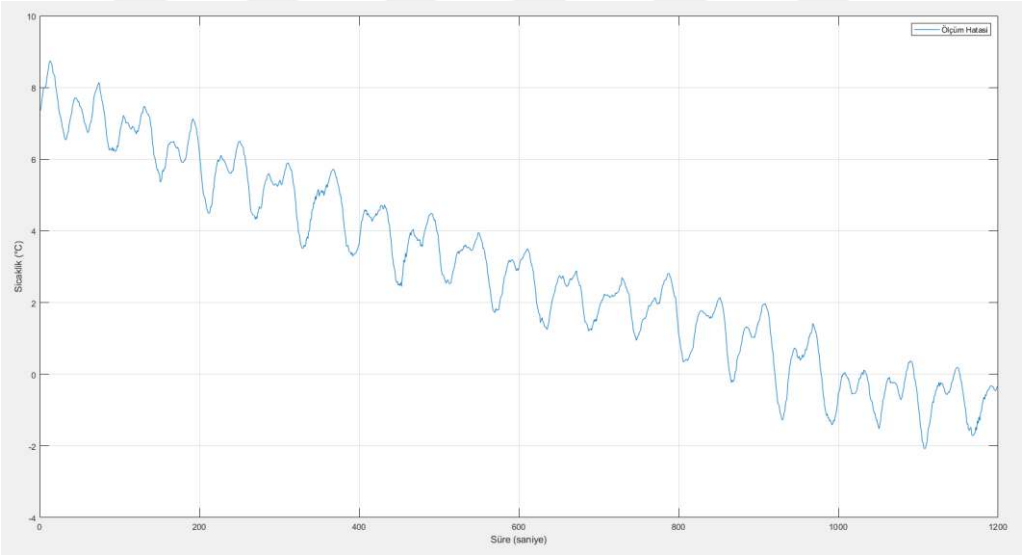
Şekil 5.16 Grill Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında davranış benzerliği olmadığı görülmüştür. Bu tarz bir ölçümün tahmini oldukça zordur. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.4'te sunulmuştur.

Tablo 5.4 Grill Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

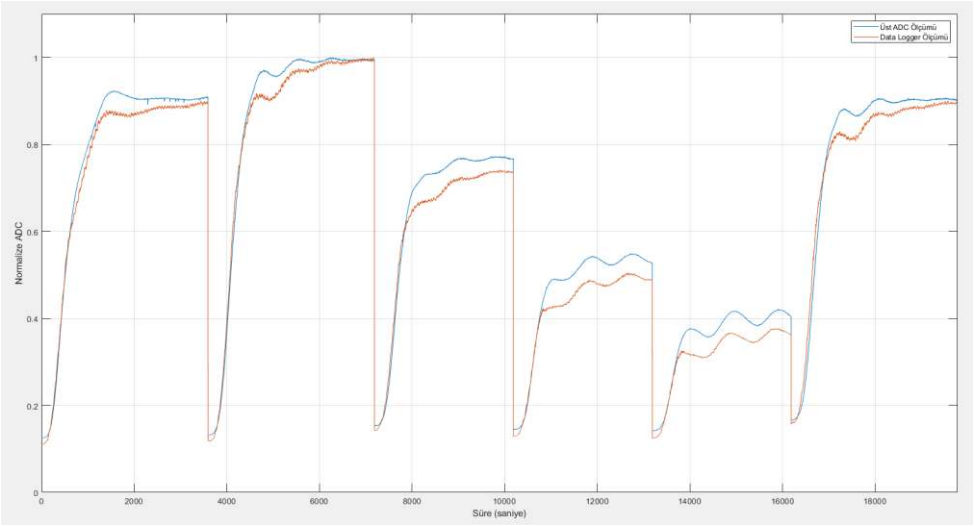
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Sadece Üst Sensör ile Tahmin	13.506	-691.275	-151.020	175.610
Üst Sensör ve Türevi ile Tahmin	22.409	-23.049	-0.885	8.266
Üst Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	8.745	-2.079	2.945	2.658

Üst sensör ADC ve türevi ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.17'de görülmektedir.



Şekil 5.17 Grill Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aynı ölçümler Statik mod içinde alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.18).



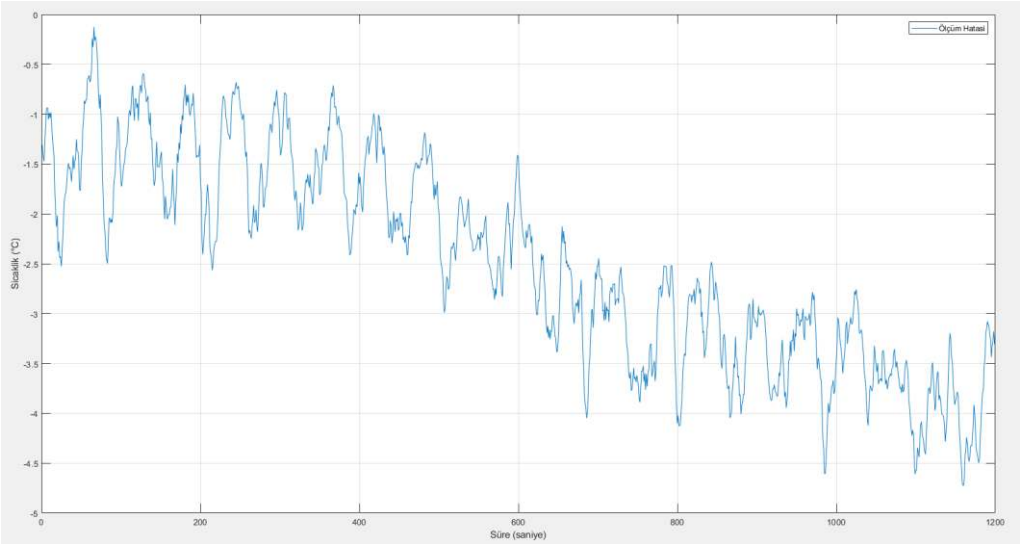
Şekil 5.18 Statik Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında benzerlik olmadığı görülmüştür. Bu tarz bir ölçümün tahmini oldukça zordur. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.5 Statik Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

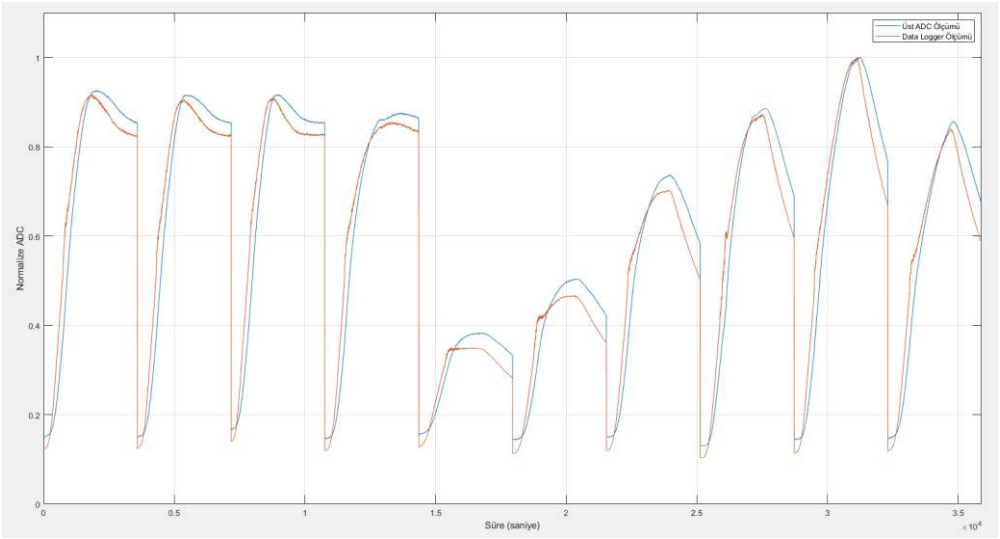
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Sadece Üst Sensör ile Tahmin	234.797	-25.183	61.732	73.340
Üst Sensör ve Türevi ile Tahmin	12.074	-9.496	0.287	2.670
Üst Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	-0.125	-4.725	-2.486	1.034

Üst sensör ADC ve türevi ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.19'da görülmektedir.



Şekil 5.19 Statik Mod Üst Sensör ADC ve Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aynı ölçümler Alt rezistans mod içinde alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

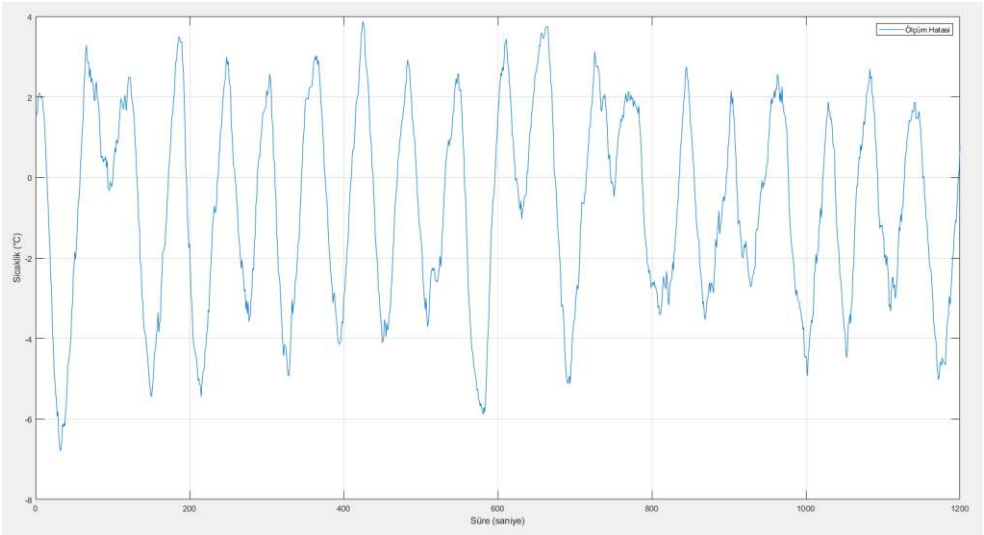
Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında benzerlik olmadığı görülmüştür. Bu tarz bir ölçümün tahmini

oldukça zordur. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.6'da sunulmuştur.

Tablo 5.6 Alt Rezistans Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Sadece Üst Sensör ile Tahmin	13.330	-3192.583	-615.228	718.862
Üst Sensör ve Türevi ile Tahmin	13.966	-14.915	-0.068	2.0167
Üst Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	3.870	-6.789	-0.715	2.454

Üst sensör ADC ve türevi ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.21'de görülmektedir.



Şekil 5.21 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Her mod için hata değerleri ayrı ayrı verilmiştir. Elde edilen hata değerlerinin karşılaştırılabilmesi için Tablo 5.7'de sadece üst sıcaklık sensörü ile elde edilen polinomlarla elde edilen hata değerleri, çalışma modlarına göre gösterilmiştir.

Tablo 5.7 Tüm Modlar için Üst Sensör ve Türevi ile Elde Edilen Hata Değerlerinin Karşılaştırılması

	Ortalama Hata	**Ortalama Hata** (40<t<60)	**Maksimum Hata** (40<t<60)	**Minimum Hata** (40<t<60)	**Standart Sapma** (40<t<60)
Turbo Mod	-0.577	-1.010	1.146	-3.390	1.001
Statik Fanlı Mod	-0.620	-1.046	0.138	-2.180	0.568
Pizza Mod	0.164	0.447	2.036	-1.154	0.788
Grill Mod	11.217	2.945	8.745	-2.079	2.660
Statik Mod	0.065	-2.486	-0.125	-4.725	1.034
Alt Rezistans Mod	-0.218	-0.715	3.870	-6.789	2.454

Elde edilen tablolarda görüldüğü üzere sadece ADC ölçümünün kullanıldığı ölçümlerde elde edilen hatalarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle sadece üst sensörün ADC ölçümüyle elde edilen polinomu kullanmak pek işe yarar bir yöntem olmayacaktır. ADC ölçümüne türev verisi eklendiğinde daha iyi bir tahmin polinomu elde edildiği hata değerlerinden görülmektedir. Ancak turbo fanın çalıştığı modlar için son 20 dakika hata derecesi belirlenen standardın altında olsa bile turbo fanın çalışmadığı modlar için son 20 dakika hata derecesi belirlenen standardın üstündedir. Bu nedenle turbo fanın çalışmadığı modların iyi çalışacağı yeni yöntem veya yöntemlerin bulunması gerekmektedir. Bu nedenle fırınına 2. sıcaklık sensörü eklenmiştir. Yeni eklenen sıcaklık sensörüyle yeni

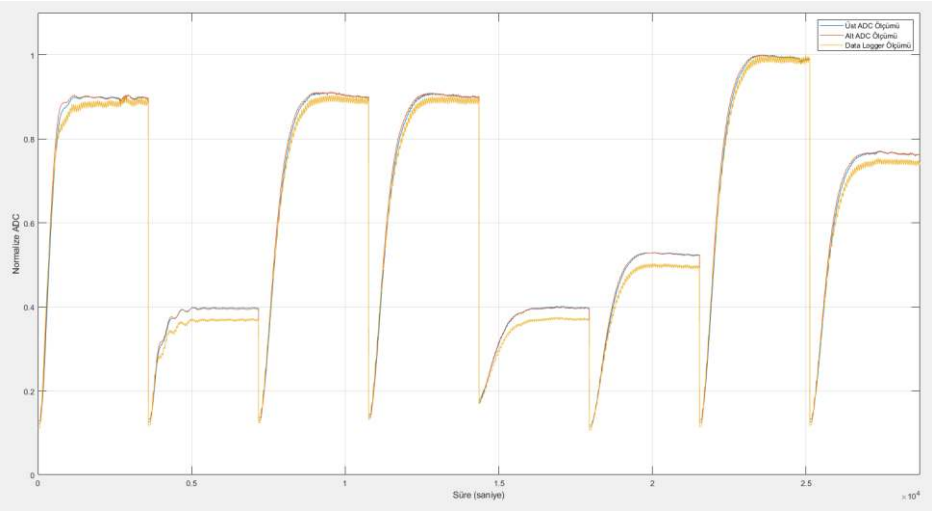
ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler sonucunda elde edilen sonuçlar ileride sunulmaktadır.

5.1.2 Üst ve Alt Sıcaklık Sensörünün Kullanıldığı Polinom Uydurma

Bölüm 5.1.1'de belirtildiği üzere fırın üzerine ikinci bir sıcaklık sensörü eklenmiştir. Eklenen yeni sıcaklık sensörü üst sensörün tam çaprazı olan fırının alt kısmına eklenmiştir. Fırının alt köşesine konumlandırılan sıcaklık sensörü, fırının üstünde ve altında oluşan sıcaklık farkının daha iyi yakalanabilmesini amaçlamaktadır. Bu aşamadan sonra alınan ölçümler fırının üzerinde bulunan 2 sensör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alınan ölçümler için her çalışma modunda tahmin işlemi yapılmıştır. Aşağıda Turbo Mod üzerinde alınan ölçümler görülmektedir.

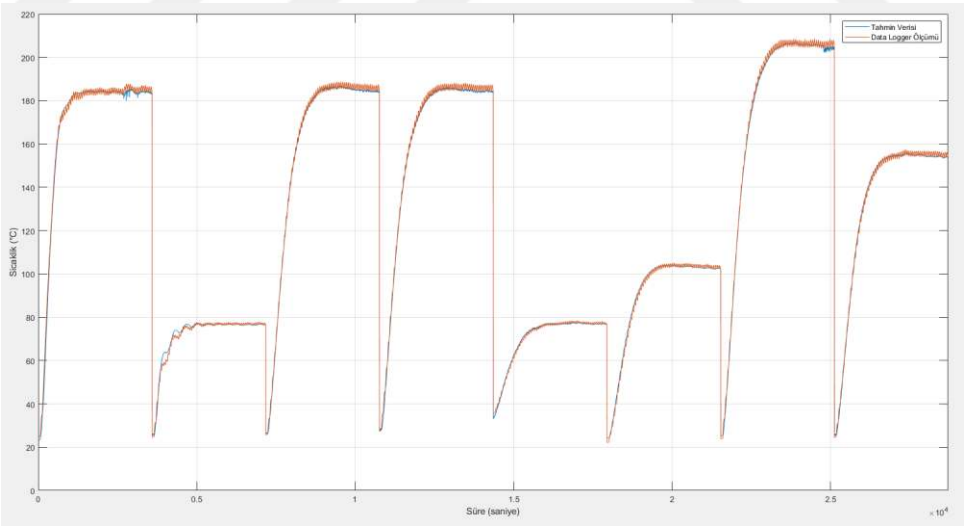
Burada 2 farklı polinom uydurma işlemi yapılmıştır. İlk polinom uydurma işlemi için giriş verileri, üst sensör sıcaklık ölçümü ve alt sensör sıcaklık ölçümüdür. İkinci polinom uydurma işlemi için giriş verileri, üst sensör sıcaklık ölçümü ve alt sensör sıcaklık ölçümünün ağırlıklarına göre oranlanıp toplanmasıyla elde edilen yeni sıcaklık ölçümü ve polinom uydurma işleminin yapılacağı sıcaklık moduna uygun olan türev ölçümüdür. Çıkış verisi olarak data logger üzerinden alınan merkez sıcaklık verisi kullanılmıştır.

Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ve alt sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.22).



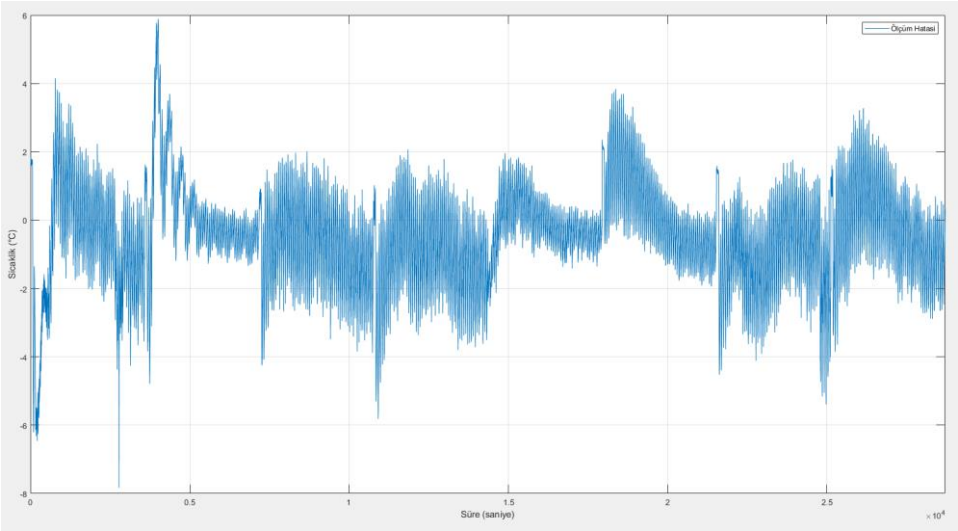
Şekil 5.22 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında davranış açısından yer yer benzerlik vardır. İki sensör kullanıldığı için tahmin işleminin yapılabilmesi daha kolaydır. Alınan bu ölçüm verileri ile elde edilen tahmin verisi Şekil 5.23'te gösterilmektedir.



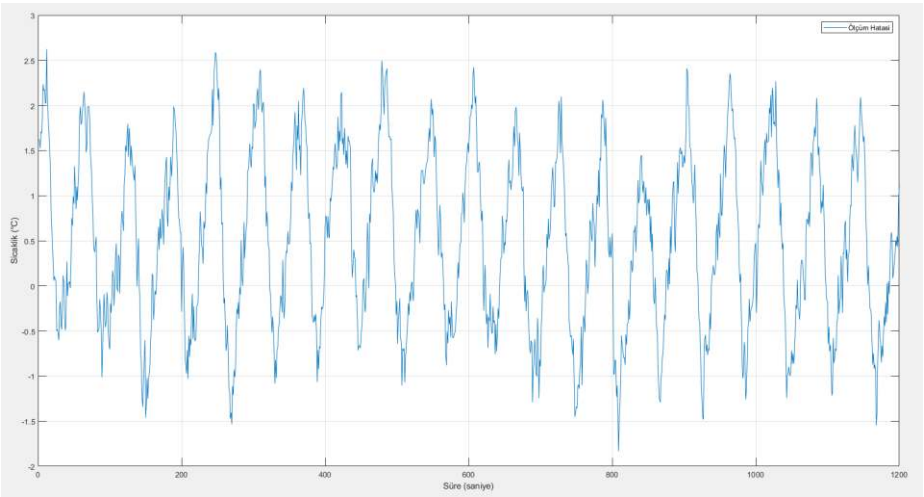
Şekil 5.23 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Grafiği

Görüldüğü üzere yapılan tahminle ölçümün arasında bir uyum bulunmaktadır. Tahmin hatasının yakından incelenmesi gerekmektedir. Elde edilen tahmin hatası grafiği Şekil 5.24'te gösterilmektedir.



Şekil 5.24 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Hata Grafiği

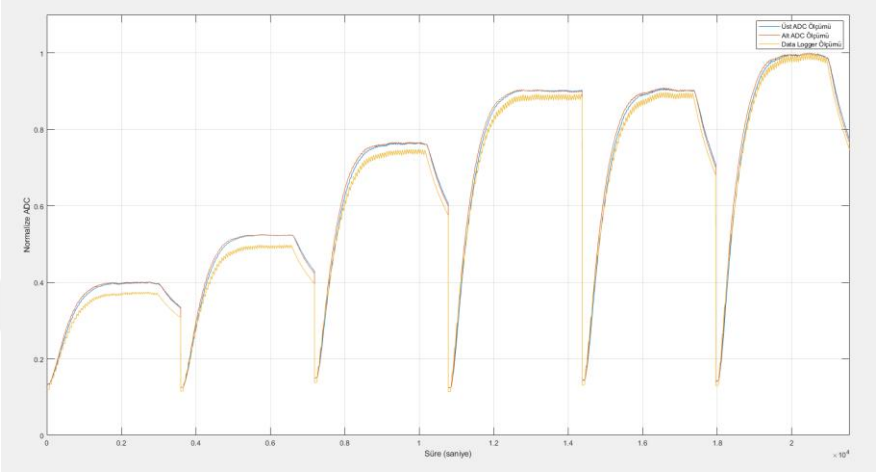
Şekil 5.24'te elde edilen tahmin hatası görülmektedir. Tahmin hatasının 5.887 ve -7.832 derece arasında olduğu görülmektedir. Bu hata miktarının kullanılabilir olup olmadığını görmek için 1 saatlik ölçümün son 20 dakikası incelenmelidir. Şekil 5.25'te 1 saatlik ölçümün son 20 dakikadaki hatası görülmektedir.



Şekil 5.25 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

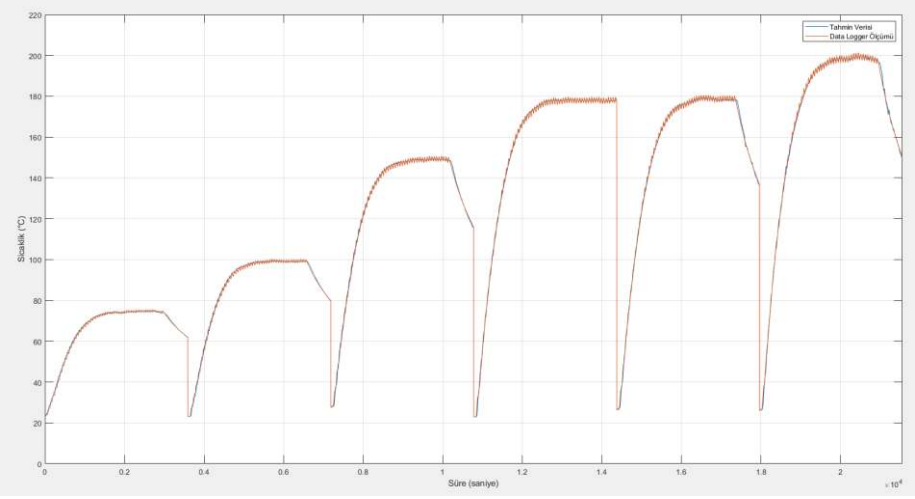
Şekil 5.25'te 1 saatlik deneyin son 20 dakikasında elde edilen tahmin hatası görülmektedir. Tahmin hatasının +2.625 ve -1.833 derece arasında olduğu görülmektedir. Tahmin hata farkı hesaplandığında 4.458 derece bir sıcaklık tatmin

farkı olduğu görülmektedir. Elde edilen son 20 dakika ortalama hatası 0.499, standart sapması 0.968 derece olarak hesaplanmıştır. Kabul edilebilir tahmin hata farkına yakın bir tahmin hatası bulunmaktadır. Aşağıda üst sensör ve alt sensör ADC ölçümüne türev verisi eklenerek elde edilen polinom gösterilmektedir. Şekil 5.22'de görülen normalize edilmiş veride değişiklik yapılmıştır. Yeni ölçüm verisinin normalize edilmiş hali Şekil 5.26'da gösterilmektedir.



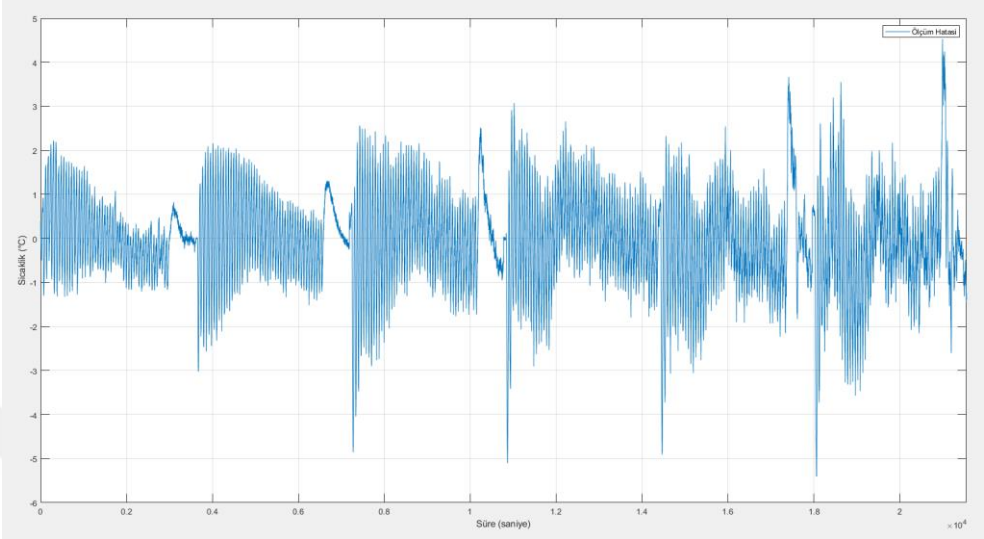
Şekil 5.26 Turbo Mod Üst Sensör ADC Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Elde edilen normalize veri incelendiğince ölçümlerin davranışlarının benzer olduğu görülmektedir. Uydurulan polinom ile elde edilen tahmin verisi Şekil 5.27'de gösterilmektedir



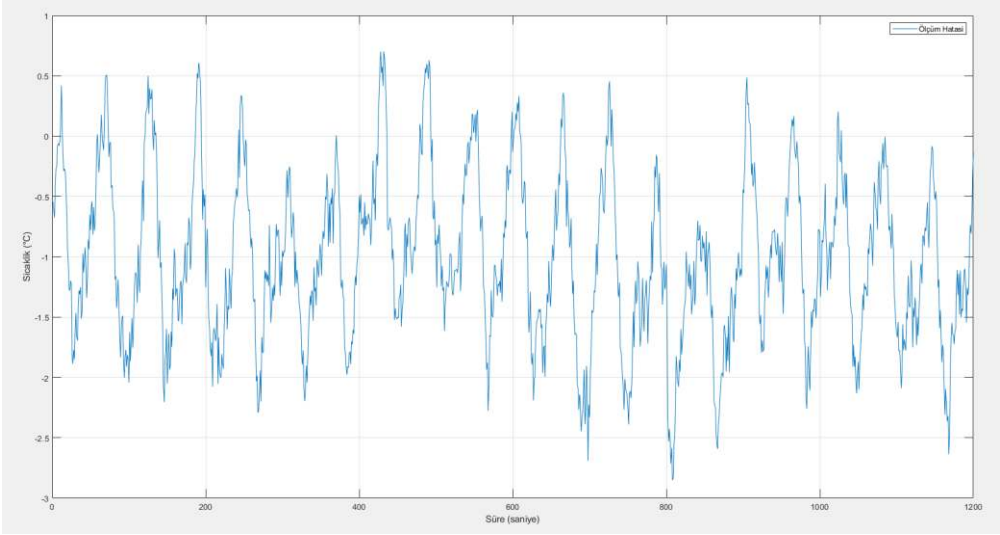
Şekil 5.27 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Grafiği

Görüldüğü üzere tahmin verisi ile data logger ile ölçülen ölçüm verisi arasında uyum görünmektedir. Ancak detaylı incelenmesi gereken bir tahmin grafiğidir. Grafik verisindeki hata incelendiğinde elde edilen hata grafiği Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



Şekil 5.28 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Alınan Tahmin Hata Grafiği

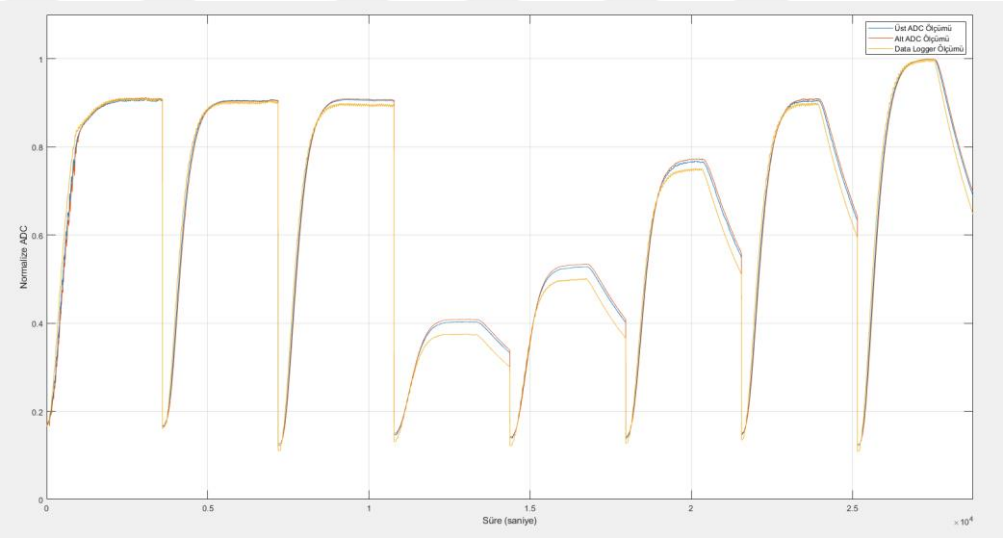
Şekil 5.28'de görüldüğü üzere maksimum hata değeri 4.530 derece minimum hata değeri -5.409 derece olarak hesaplanmıştır. 1 saatlik yapılan bir deneyin sonucunda elde edilen son 20 dakika hata verisi şekil 5.29'da gösterilmektedir.



Şekil 5.29 Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Şekil 5.29'da yeni polinom ile yapılan ölçümle alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasında hesaplanan hata verisi görülmektedir. Hesaplanan maksimum ve minimum hata değerleri sırasıyla 0.702 ve -2.850 derecedir. Elde edilen son 20 dakika ortalama hatası -0.812, standart sapması 0.695 derece olarak hesaplanmıştır. Bu durum incelendiğinde yaklaşık 3.552 derece hata farkına sahip olan bu tahmin hatası kabul edilebilir hata değerinin altındadır.

Statik fanlı mod için elde edilen polinom ile turbo mod için alınan tüm ölçümler tek tek alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ve alt sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.30).



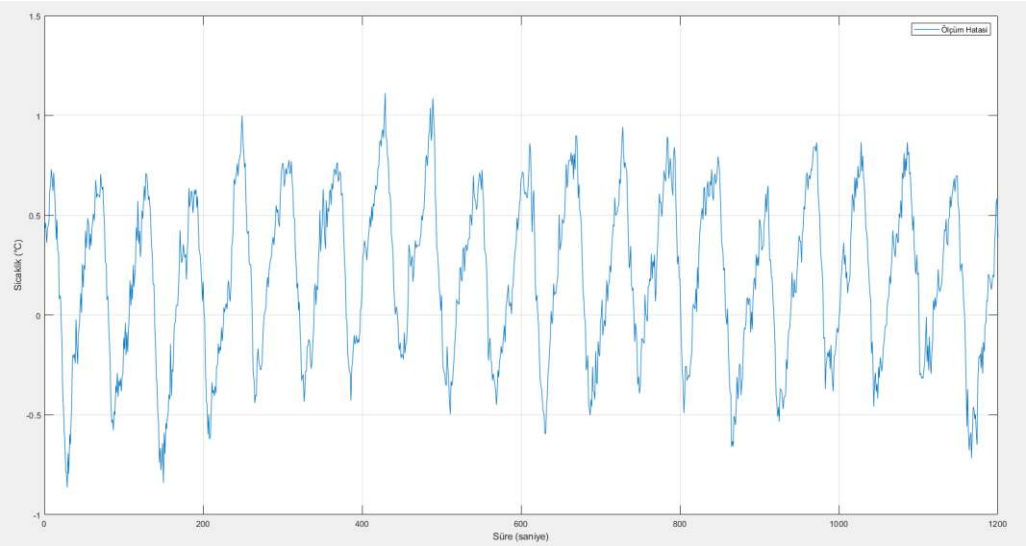
Şekil 5.30 Statik Fanlı Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında benzerlik vardır. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.7'de sunulmuştur.

Tablo 5.8 Statik Fanlı Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

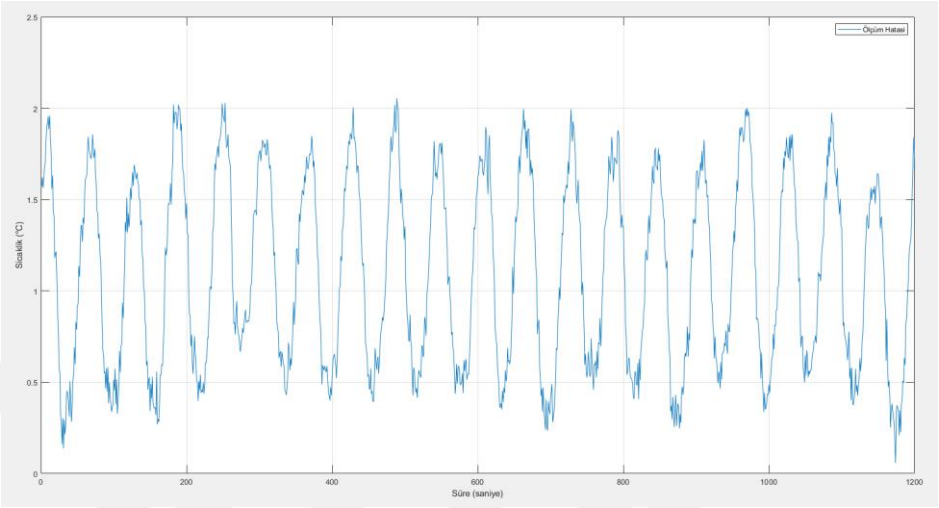
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Tahmin	4.367	-15.115	-0.593	1.452
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakikası	1.113	-0.864	0.055	0.676
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi ile Tahmin	3.611	-23.754	-0.181	1.544
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	2.055	0.057	1.095	0.523

Üst sensör ve alt sensör ADC ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.31'de görülmektedir.



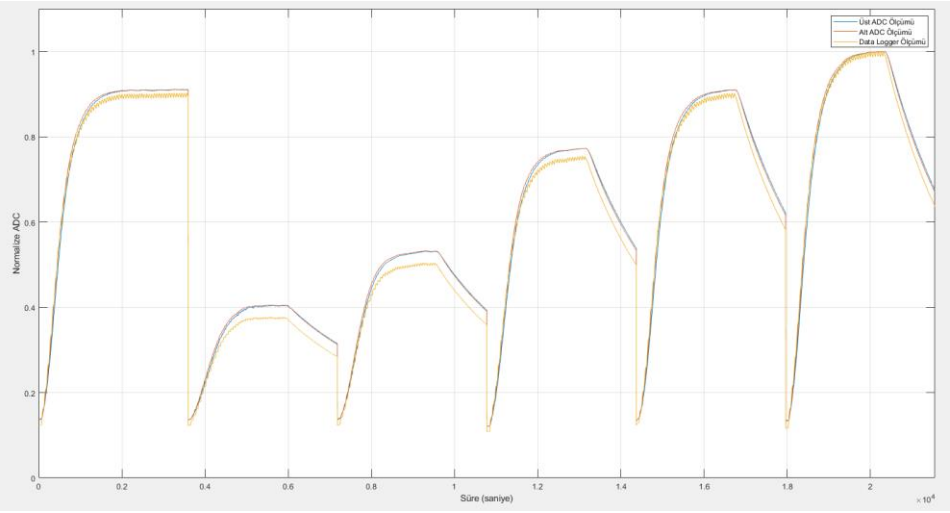
Şekil 5.31Statik Fanlı Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aşağıda üst sensör ve alt sensör ADC ölçümüne türev verisinin eklenmesiyle elde edilen polinom verisi görülmektedir. Şekil 5.30'da alınan normalize veride bir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır. 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.32'de gösterilmektedir.



Şekil 5.32 Statik Fanlı Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Pizza mod için elde edilen polinom ile turbo mod için alınan tüm ölçümler tek tek alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ve alt sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.33).



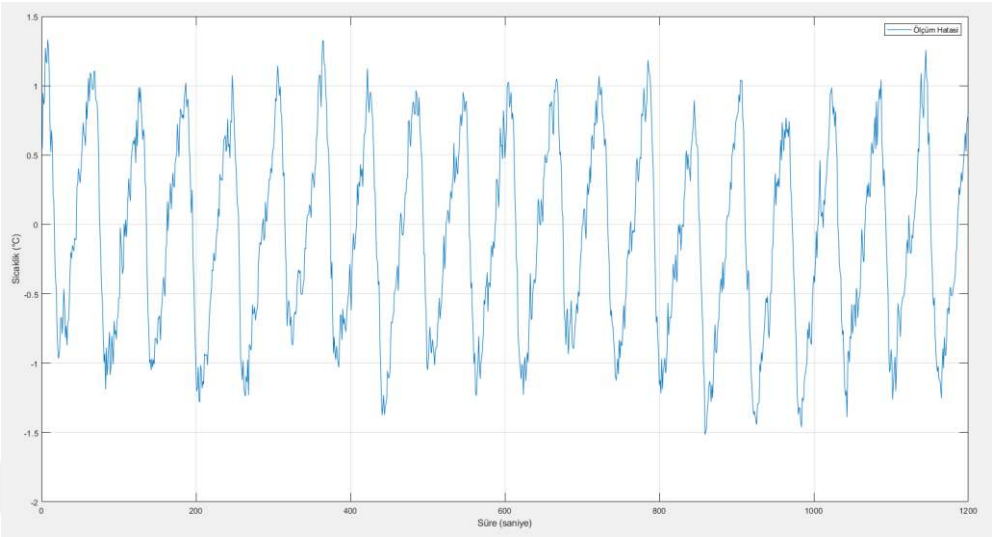
Şekil 5.33 Pizza Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında benzerlik vardır. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.8'de sunulmuştur.

Tablo 5.9 Pizza Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

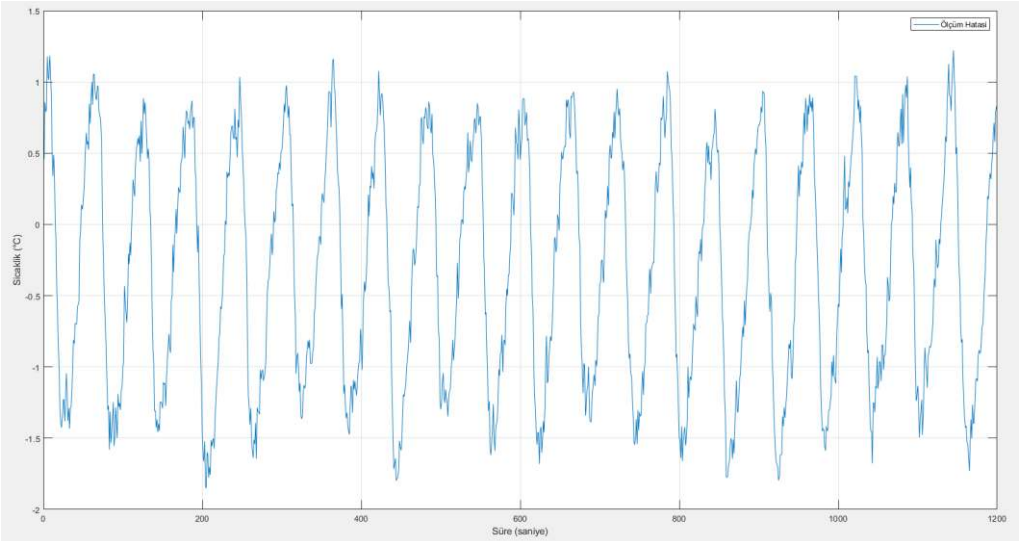
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Tahmin	3.801	-6.032	0.104	1.195
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakikası	1.332	-1.516	-0.104	0.698
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi ile Tahmin	2.891	-5.282	-0.106	0.988
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	1.221	-1.850	-0.321	0.837

Üst sensör ve alt sensör ADC ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.34'te görülmektedir.



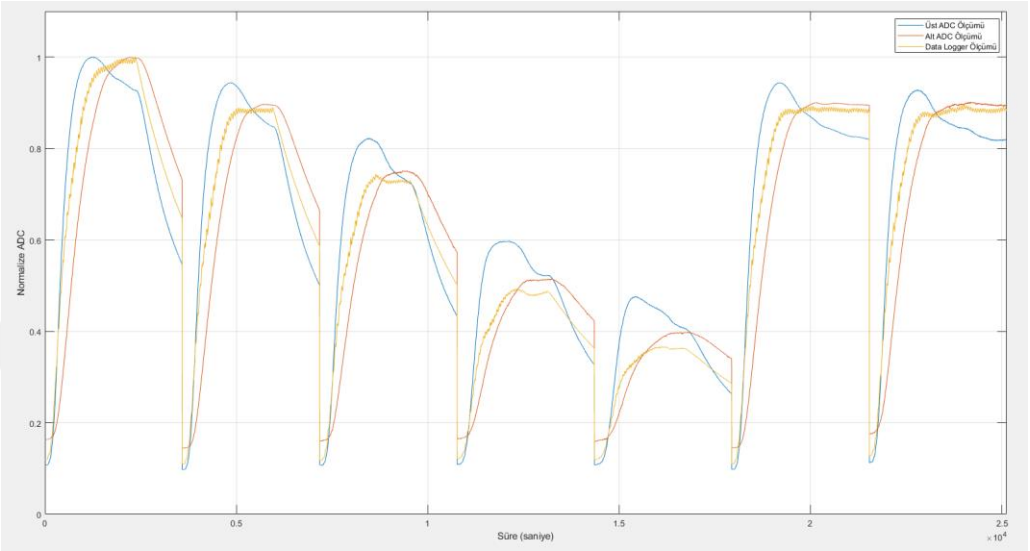
Şekil 5.34 Pizza Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aşağıda üst sensör ve alt sensör ADC ölçümüne türev verisinin eklenmesiyle elde edilen polinom verisi görülmektedir. Şekil 5.33'te alınan normalize veride bir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır. 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.35'te gösterilmektedir.



Şekil 5.35 Pizza Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Grill mod için elde edilen polinom ile turbo mod için alınan tüm ölçümler tek tek alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ve alt sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.36).



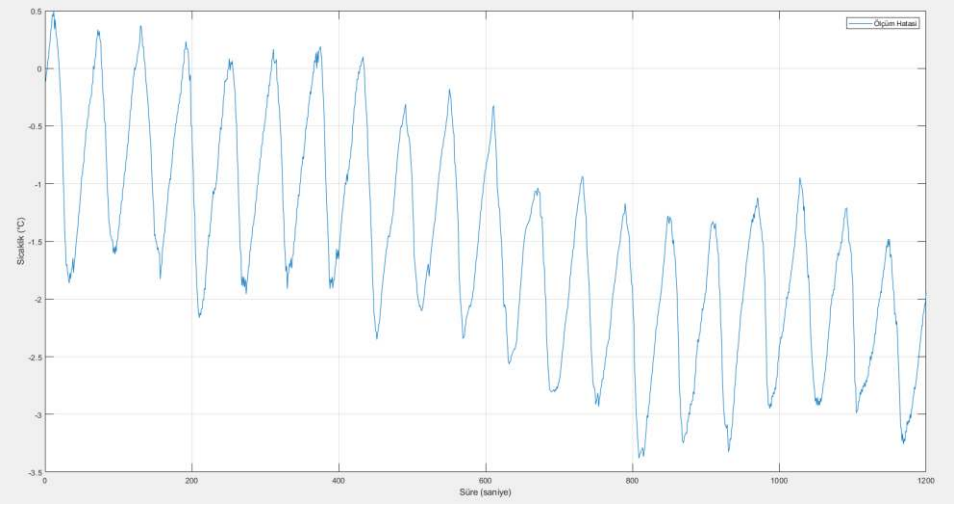
Şekil 5.36 Grill Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında çok benzerlik yoktur. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.9'da sunulmuştur.

Tablo 5.10 Grill Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

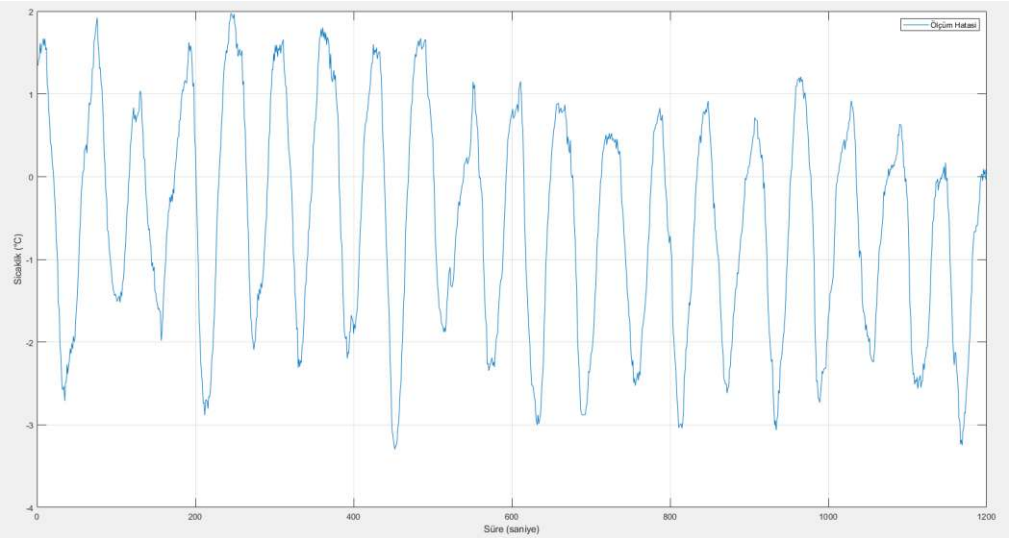
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Tahmin	9.765	-12.627	0.605	2.799
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakikası	0.492	-3.380	-1.520	0.914
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi ile Tahmin	6.072	-7.894	-0.101	1.691
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	1.976	-3.296	-0.555	1.350

Üst sensör ve alt sensör ADC ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.37'de görülmektedir.



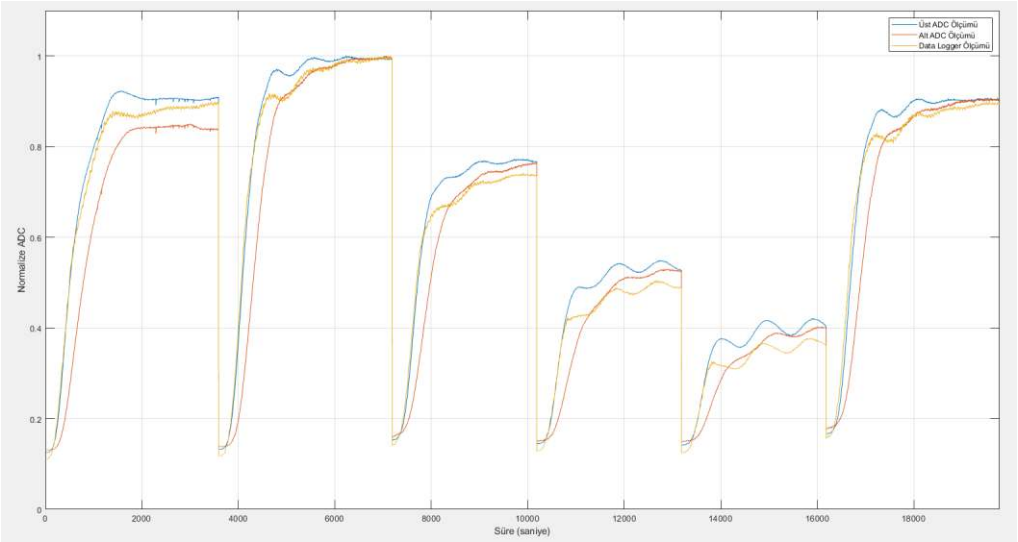
Şekil 5.37 Grill Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aşağıda üst sensör ve alt sensör ADC ölçümüne türev verisinin eklenmesiyle elde edilen polinom verisi görülmektedir. Şekil 5.36'da alınan normalize veride bir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır. 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.38'de gösterilmektedir.



Şekil 5.38 Grill Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Statik mod için elde edilen polinom ile turbo mod için alınan tüm ölçümler tek tek alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ve alt sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.39).



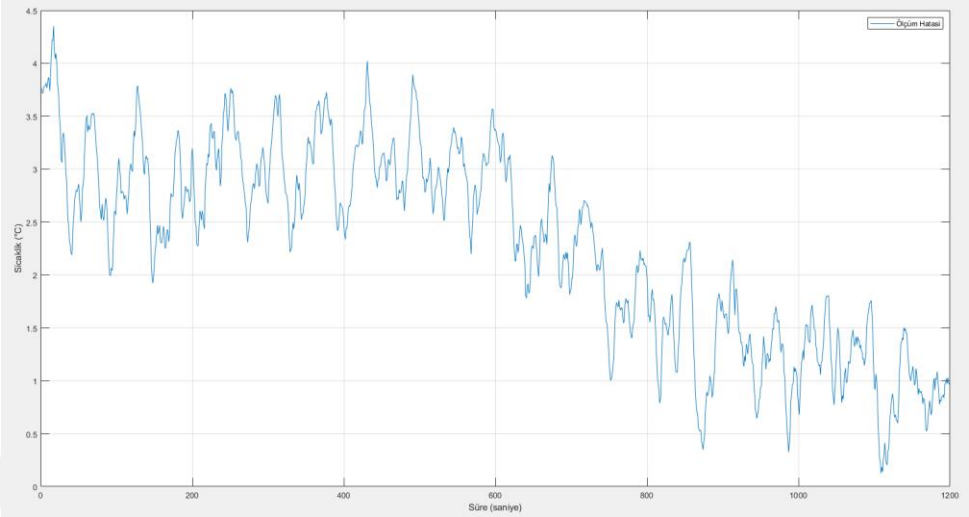
Şekil 5.39 Statik Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında çok benzerlik yoktur. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.10'da sunulmuştur.

Tablo 5.11 Statik Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

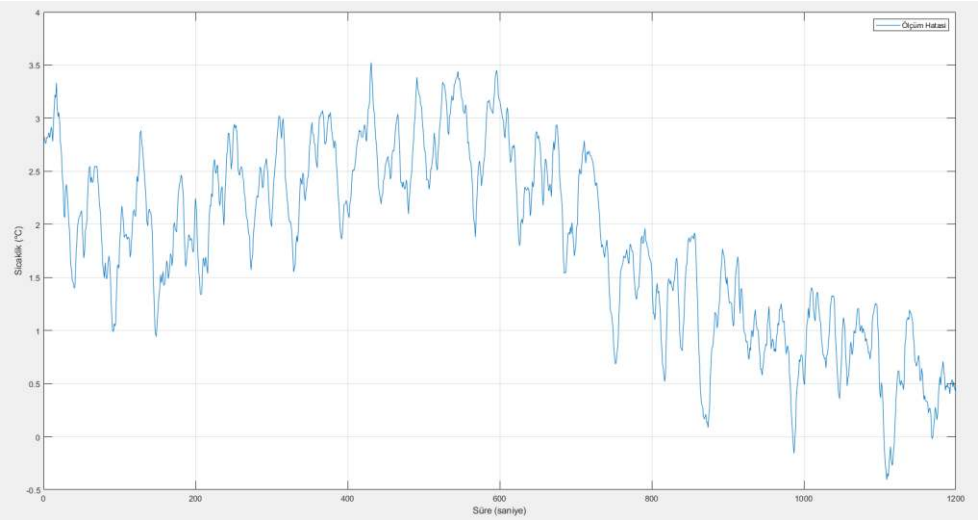
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Tahmin	6.966	-19.737	-0.487	3.026
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakikası	4.351	0.126	2.276	0.928
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi ile Tahmin	8.026	-12.453	-0.209	2.447
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	3.526	-0.407	1.839	0.869

Üst sensör ve alt sensör ADC ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.40'ta görülmektedir.



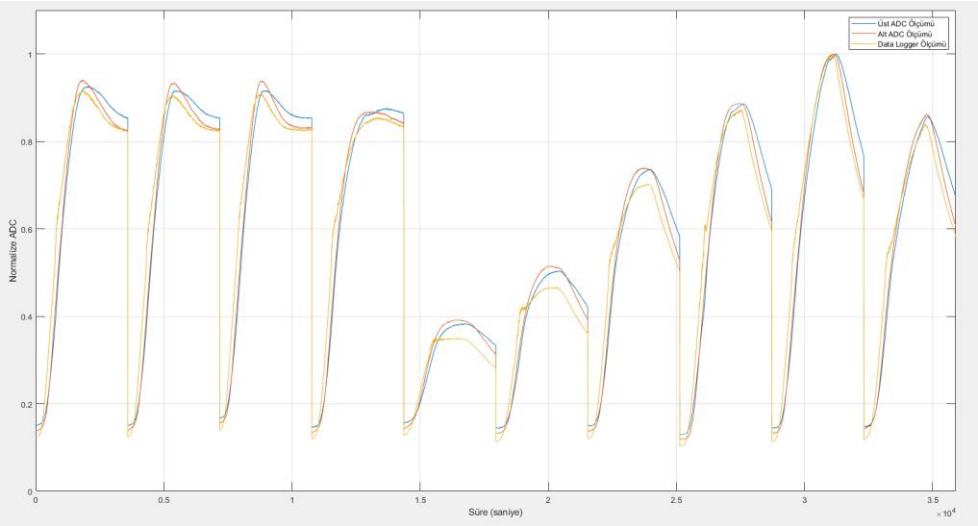
Şekil 5.40 Statik Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aşağıda üst sensör ve alt sensör ADC ölçümüne türev verisinin eklenmesiyle elde edilen polinom verisi görülmektedir. Şekil 5.39'da alınan normalize veride bir değişiklik yapılmıştır. Yeni normalize veri ile elde edilen polinom ile alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.41'de gösterilmektedir.



Şekil 5.41 Statik Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Alt rezistans mod için elde edilen polinom ile turbo mod için alınan tüm ölçümler tek tek alınmıştır. Aşağıda mikroişlemci ile ölçülen üst sensör ve alt sensör ADC sıcaklık verisi ve data loggerdan alınan merkez sıcaklık ölçümünün normalize edilerek elde edilen grafik verisi görülmektedir (Şekil 5.42).



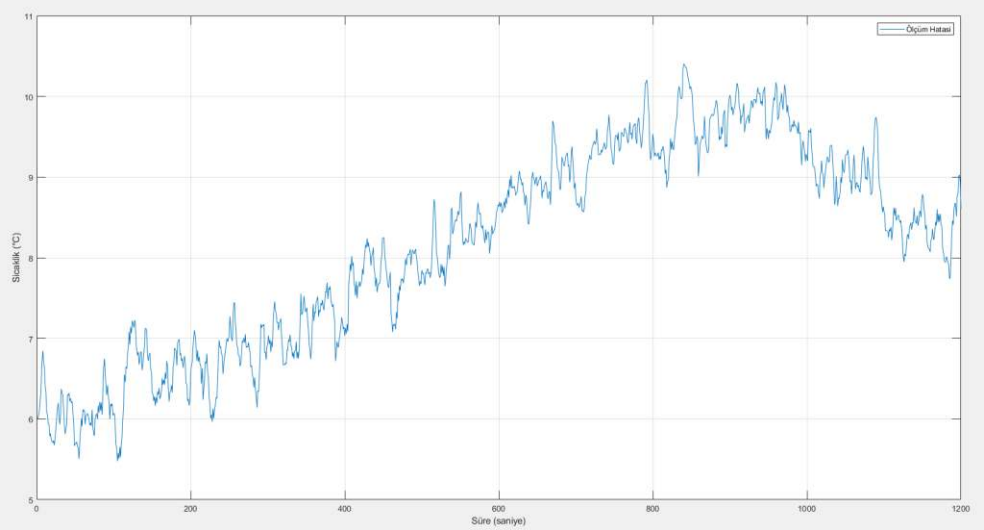
Şekil 5.42 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Normalize Grafiği

Normalize edilen ölçümler incelendiğinde mikroişlemci ile data logger ölçümleri arasında yer yer benzerlik vardır. Alınan ölçümlerle birlikte elde edilen grafikler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.11'de sunulmuştur.

Tablo 5.12 Alt Rezistans Mod Verisi ile Elde Edilen Ölçümler

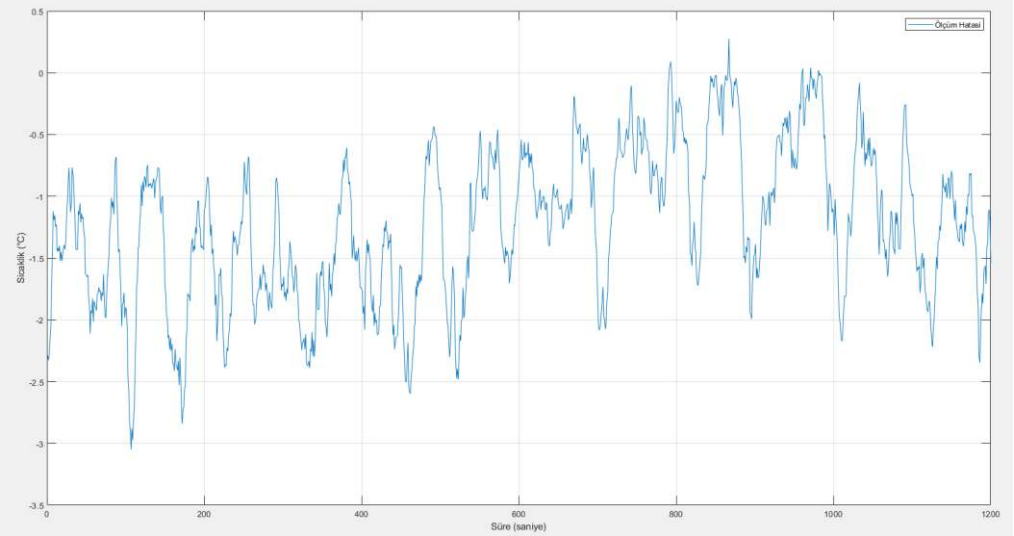
	Maksimum Hata	**Minimum Hata**	**Ortalama Hata**	**Standart Sapma**
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Tahmin	24.661	-32.406	3.546	10.867
Üst Sensör ve Alt Sensör ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakikası	10.403	5.477	8.145	1.254
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi ile Tahmin	10.987	-8.158	0.006	1.605
Üst Sensör, Alt Sensör ve Türevi Polinomu ile Alınan 1 Saatlik Ölçümün Son 20 dakikası	0.276	-3.051	-1.231	0.619

Üst sensör ve alt sensör ADC ile elde edilen polinom kullanılarak alınan 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.43'te görülmektedir.



Şekil 5.43 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü ile Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Aşağıda üst sensör ve alt sensör ADC ölçümüne türev verisinin eklenmesiyle elde edilen polinom verisi görülmektedir. Şekil 5.42'de alınan normalize veride bir değişiklik yapılmamıştır. 1 saatlik ölçümün son 20 dakikasındaki hata grafiği Şekil 5.44'te gösterilmektedir.



Şekil 5.44 Alt Rezistans Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomun 1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakika Hata Grafiği

Her mod için hata değerleri ayrı ayrı verilmiştir. Elde edilen hata değerlerinin karşılaştırılabilmesi için Tablo 5.7'de sadece üst ve alt sıcaklık sensörü ile elde edilen polinomlarla elde edilen hata değerleri, çalışma modlarına göre gösterilmiştir.

Tablo 5.13 Tüm Modlar için Üst ve Alt Sensör ve Türevi ile Elde Edilen Hata Değerlerinin Karşılaştırılması

	Ortalama Hata	**Ortalama Hata** (40<t<60)	**Maksimum Hata** (40<t<60)	**Minimum Hata** (40<t<60)	**Standart Sapma** (40<t<60)
Turbo Mod	-0.812	-1.011	0.702	-2.850	0.695
Statik Fanlı Mod	0.707	1.095	2.055	0.057	0.523
Pizza Mod	-0.268	-0.306	1.266	-1.890	0.811
Grill Mod	-0.101	-0.555	1.976	-3.296	1.350
Statik Mod	-0.209	1.839	3.526	-0.407	0.869
Alt Rezistans Mod	0.006	-1.231	0.276	-3.051	0.619

Elde edilen tablolarda görüldüğü üzere sadece ADC ölçümünün kullanıldığı ölçümlerde elde edilen hatalar yüksektir ancak son 20 dakikasındaki hata incelendiğinde kullanılabilir hata aralığında olan modlar bulunmaktadır. Ancak türevinde eklendiği ölçümlerle daha iyi bir tahmin polinomu elde edildiği hata değerlerinden görülmektedir. Grill modu haricinde diğer modlarda belirlenen standardın altında bir tahmin hatası bulunmaktadır. Grill mod ayrıca incelendiğinde kabul edilebilir hataya yakın bir hata değeri elde edilmiştir. Bu nedenle 2 sensör ve türev ile elde edilen polinom kullanılabilir bir polinom olarak kabul edilebilir.

6. SICAKLIK KONTROLÜ

Sıcaklık kontrolünde amaç fırın merkez sıcaklığının istenilen referans değerini takip etmesidir. Sıcaklık kontrolünde hata payının 0 olması mümkün değildir. Çünkü rezistansların açılıp kapatılmasıyla oluşan artık ısınmalar ve rezistansların hemen ısı üretememesinden kaynaklı olarak dalgalanmalı bir sıcaklık ölçümü gerçekleşmektedir. Sıcaklık kontrolünün yapılabilmesi için birçok kontrol yöntemi bulunmaktadır. Bu kontrol yöntemleri arasında ;

- On-Off Kontrol Yöntemi
- PID Kontrol Yöntemi
- RISE Kontrol Yöntemi

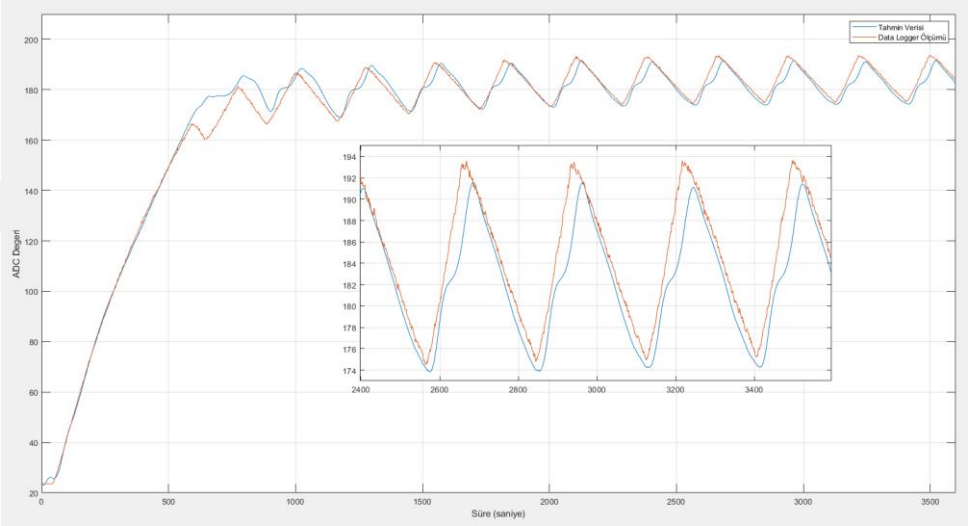
Kullanılan her bir kontrol yönteminin kendine has avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bütün kontrol yöntemleri test edilerek en kullanışlı ve en avantajlı kontrol yöntemi tercih edilecektir. Kontrol yöntemleri tercih edilirken ki tercih kriteri kontrol hatasının ±1 derecede olmasıdır. Bu kontrol yöntemleri arasında kullanımı en kolay yöntem on-off kontrol yöntemidir.

Fırının sıcaklık kontrolü yapılırken, röleler PWM sinyali ile kontrol edilmektedir. PWM sinyalinin periyodu 60 saniye olarak ayarlanmıştır. Burada 60 saniyelik periyot süresi rölelerin ömrünü uzatmak için tercih edilmiştir. PWM sinyalinin doluluk oranına göre rölelerin açık olma süresi belirlenmektedir.

6.1 On-Off Kontrol Yöntemi

On off kontrol yöntemi diğer kontrol yöntemlerinden farklı olarak bir kontrol çıkış süresi üreten bir fonksiyona sahip değildir. Temel olarak kullanım mantığı o an ölçülen sıcaklık değeri belirlenen referans değerinin altındaysa kontrol süresi boyunda rezistansları çalıştırmak, üstündeyse rezistansları kapatmak üzere tasarlanmıştır. Bu kontrol yönteminin iyi çalışabilmesi için kontrol süresinin olabildiğince kısa tutulması gerekmektedir. Ancak kontrol süresinin düşük tutulması rezistansların kontrolünün gerçekleştirilmesini sağlayan rölelerin daha sık açılıp kapatılmasına neden olacaktır. Bu durum göz önüne alındığında rölelerin ömrünün maksimuma çıkartılabilmesi için kontrol süresinin belirli bir sürenin altında olması istenmemektedir.

On-Off kontrol yöntemi uygulanmadan önce sistemden referans ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler ile on-off kontrol yöntemine özel polinom uydurma gerçekleştirilmiştir. Polinom uydurma işlemi gerçekleştirilirken daha önce bahsedilen üst sensör ve alt sensör ADC verisi ve türev kullanılmıştır. Elde edilen polinom kullanılarak Turbo modda 1 saatlik deney gerçekleştirilmiştir. Deney için referans sıcaklığı 180 derece olarak ayarlanmıştır. Yapılan deney sonucunda elde edilen 1 saatlik deney Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 On-Off Kontrol Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomla Alınan 1 Saatlik Ölçüm

Şekil 6.1'de görüldüğü üzere sıcaklık ölçümü 180 dereceye ulaşmıştır. Ancak 180 derecede dalgalanmaktadır. Kontrol edilen sistem incelendiğinde, tahmin hatasının düşük olduğu hesaplanmıştır. Sıcaklık kontrolünden önce sistemdeki hatanın az olmasının öneminden bahsedilmişti. Görüldüğü üzere az hataya sahip olmasına rağmen sıcaklık kontrolü yapılan sistem yeterince verimli çalışmamaktadır. On-Off kontrol yöntemiyle çalışan sistemde kontrol hatası 6.169 derece ile -11.598 derece arasındadır. Belirtilen hata değerinin oldukça üstünde olan bu kontrol yöntemini mevcut sistem için kullanışlı değildir. Bu hata değerini tutturmak için farklı kontrol yöntemleri de kullanılacaktır. On-Off kontrol yöntemi basit bir kontrol yöntemi olarak farklı sistemlerde kullanılabilir. Ancak elektrikli fırınlarda kontrol süresi 60 saniyeden 40 saniyeye düşürülmesine rağmen hala kullanılabilir değildir. Kontrol süresinin daha düşük olduğu farklı sistemlerde

kullanılabilir bir kontrol yöntemidir. Daha kompleks bir sistem olan elektrikli fırınlarda ona uygun bir kontrol yöntemi kullanılması gereklidir.

6.2 Proportional Integral Derivative (PID) Kontrol Yöntemi

Proportional Integral Derivative (PID) kontrol yöntemi adından da anlaşılacağı gibi oransal integral ve türev kullanarak çalışan bir kontrol yöntemidir. Kontrolde hata değerini azaltmak için 3 değer kullanmaktadır. Bu nedenle 3 aşamalı kontrol olarak da adlandırılmaktadır. İlk değer olan proportional (P), ölçülen sıcaklık değeriyle referans sıcaklık arasındaki farkın bir Kp katsayısıyla orantılanarak kullanılmaktadır. Burada belirtilen katsayı ne kadar yüksek olursa yükselme süresi o kadar kısalmaktadır. Ancak belirtilen katsayı çok yüksek olduğu durumda da aşım adı verilen durum yaşanmaktadır [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 30, 36].

İkinci değer olan integral (I) matematikte alan hesabı olarak kullanılmaktadır. Bu mantıkla düşünüldüğünde alan hesabı yapıldığı için birikimli olarak kullanılması gerekmektedir. Her bir birim saniyede hata Ki katsayısıyla orantılanarak kullanılmaktadır. Birikimli olarak ilerleyen integral verisinde Ki katsayısı çok yüksek seçildiği durumda sistemdeki sapma çok geç toparlanacaktır. Ancak integralin kullanılması sistemi 0 hataya götüreceği için Ki katsayısının düşükte seçilmemesi gerekmektedir [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 30, 36].

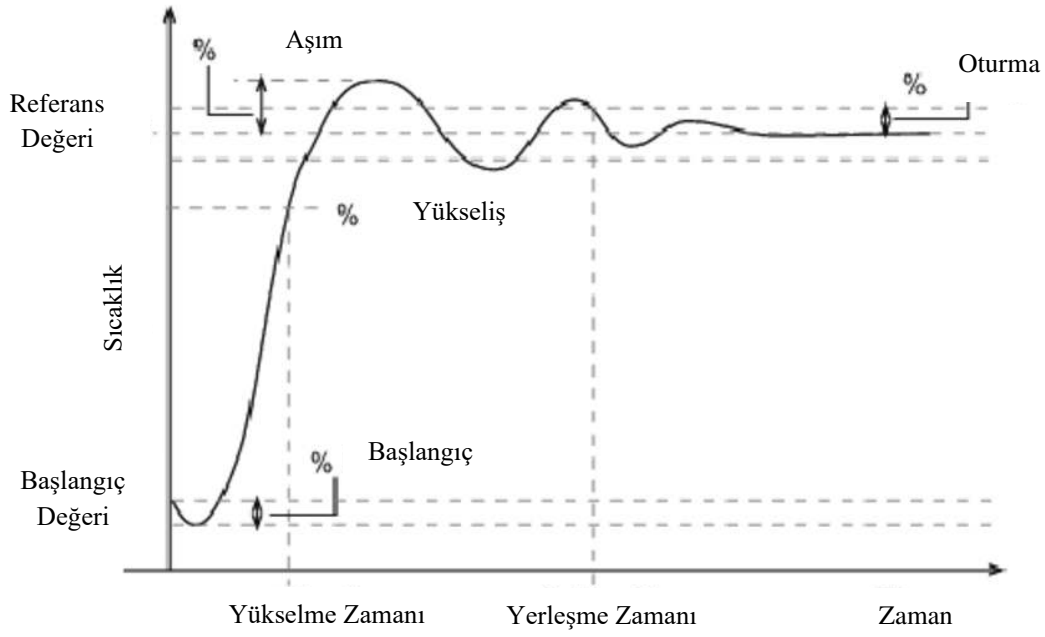
Üçüncü ve son değer olan Derivative (D) matematikteki türev işlemini gerçekleştirmektedir. Ölçümler saniyelik aralıklarla alındığı için hesaplanması da kolaydır. Anlık alınan sıcaklık ölçümüyle bir önceki saniyede alınan sıcaklık ölçümünün farkıyla hesaplanmaktadır. Sıcaklıklar arasındaki bu fark bir Kd katsayısıyla çarpılmaktadır. Ölçülen sıcaklıklar arasındaki fark ne kadar yüksekse sisteme etkisi o kadar fazla olmaktadır. Hata değeri 0'a yaklaştıkça sisteme etkisi de sıfıra yaklaşacaktır [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 30, 36].

PID kontrol değeri elde edilen P, I ve D değerlerinin toplanmasıyla elde edilmektedir. Elde edilen PID sonucu kontrol süresi olarak kullanılmaktadır. Hesaplanan PID değeri süresince rezistanslar çalışmakta, 60 saniyeden geri kalan

sürede de rezistanslar kapatılmaktadır. Kontrolün en iyi şekilde çalışabilmesi için n P-I-D değerleri düzgün ayarlanmalıdır. Bu nedenle Kp, Ki ve Kd değerleri düzgün belirlenmelidir. Ancak katsayıların belirlenmesi için belirli bir kural yoktur. Katsayılar deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir. Bu nedenle tek bir doğru katsayı değeri de yoktur. Sistemin çalışmasının istenildiği şekilde katsayılar seçilip kullanılabilir. Tablo 6.1'de katsayıların değerlerinin değişimine göre sistemde oluşan etki gösterilmektedir [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 30, 36].

Tablo 6.1 PID Kaysayı Belirleme Yöntemi [35]

Katsayı	**Aşım**	**Yükselme Zamanı**	**Oturma Zamanı**	**Dalgalanma**
Kp	Azalır	Artar	Küçük Değişim	Azalır
Ki	Azalır	Artar	Artar	Ortadan Kaldırır
Kd	Küçük Değişim	Artar	Azalır	Küçük Değişim



Şekil 6.2 PID Zaman Analiz Grafiği [36]

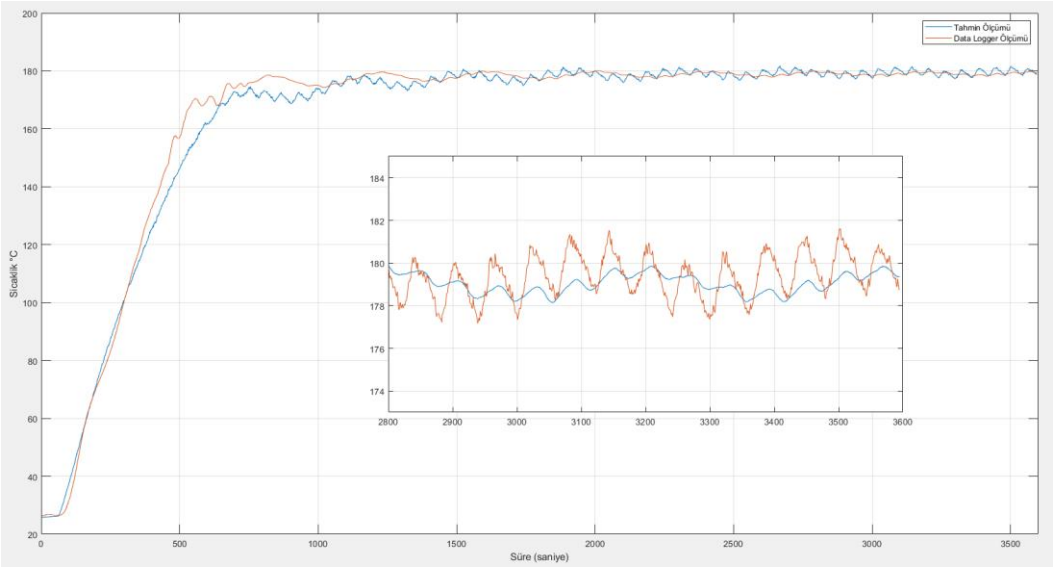
Tablo 6.1'de görüntülenen veriler Şekil 6.2 üzerinden tek tek açıklanacaktır. Tablo 6.1'de görüntülenen katsayı değerlerinin artması ile etkiler

değerlendirilmektedir. Kp katsayısının artması aşım değerinin artmasına neden olmaktadır. Aşım değerinin çok yüksek olması istenmemektedir. Ancak Kp katsayısı arttıkça yükselme zamanı da azaldığından Kp katsayısı sisteme uygun olan bir aralıkta ayarlanmalıdır.

Ki katsayısının artmasının sisteme etkisi incelendiğinde çoğunlukla oturma zamanına etki ettiği görülmektedir. Integrel (I) verisi birikimli olarak ilerlediği için sistem çalışmaya başladığı anda etkisi 0'a yakındır. Sistem ne kadar uzun süre çalışırsa etkisi o kadar artmaktadır. Sistemin oturma anına etkisi en çok olan parametredir.

Türev (D) verisi sistemde negatif etkili bir parametredir. Sistemdeki hata oranını ne kadar fazlaysa etkisi o kadar yüksektir. Kd katsayısının artmasıyla bu etkinin daha fazla artacağı düşünülebilir. Kontrol çıkışına negatif etkisi olduğundan dolayı artması kontrol çıkış süresinin azalmasını sağlamaktadır. Bu nedenle sistemdeki yükselme zamanı da azalacaktır. Hata oranının düştüğü ve hatta 0'a yaklaştığı anlarda hesaplanan D değeri 0'a çok yakın olacağından kaynaklı kontrol çıktısına etkisi azdır.

PID kontrol yöntemi uygulanmadan önce sistemden referans ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler ile PID kontrol yöntemine özel polinom uydurma gerçekleştirilmiştir. Polinom uydurma işlemi gerçekleştirilirken daha önce bahsedilen üst sensör ve alt sensör ADC verisi ve türev kullanılmıştır. Elde edilen polinom kullanılarak Turbo modda 1 saatlik deney gerçekleştirilmiştir. Deney için referans sıcaklığı 180 derece olarak ayarlanmıştır. Yapılan deney sonucunda elde edilen 1 saatlik deney Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3 PID Kontrol Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomla Alınan 1 Saatlik Ölçüm

Şekil 6.3'te elde edilen ölçüm için belirlenen katsayılar Kp=14, Ki = 0.0012 ve Kd = 1 olarak belirlenmiştir. Görüldüğü üzere Ki katsayısı oldukça küçük seçilmiştir. Birikimli ilerleyen bir değer olduğu nedeniyle olabildiğince küçük seçilmelidir.

PID tasarımı için hata sinyali tanımı aşağıda verilmiştir:

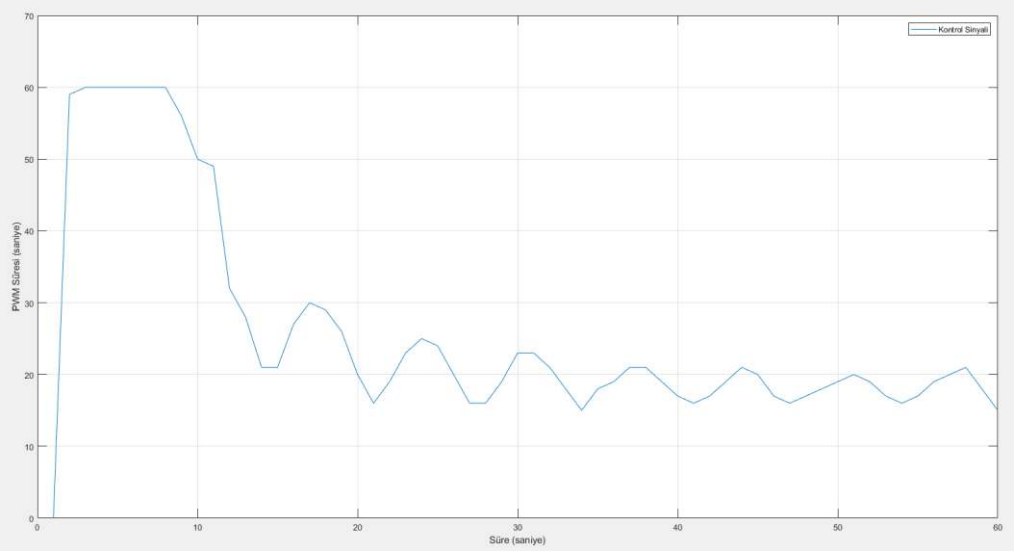
$$e(t) = x(t) - x_r(t) \tag{6.1}$$

Burada x(t) ve $x_r(t)$ ölçülen sıcaklık değeridir. Kontrol kuralı ise aşağıda verildiği gibi tanımlanmıştır:

$$u = K_p\, e(t) + K_i \int_0^t e(t)\, dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{6.2}$$

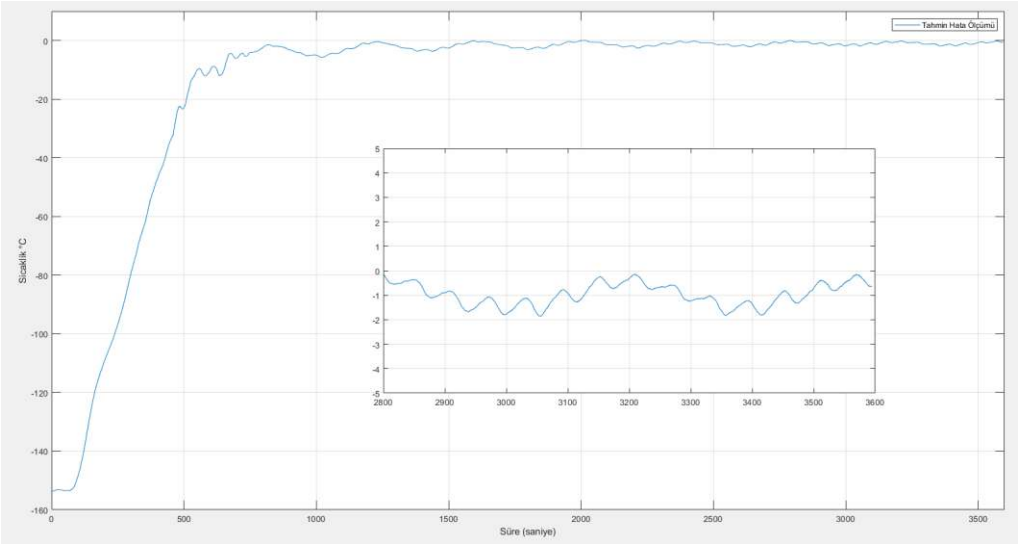
Burada $K_p, K_i, K_d \in \mathcal{R}^+$ kontrol kazançlarıdır. Şekil 10.3.3'te görülen C# programı içerisinde PID çıkışının minimum değeri 0 olarak ayarlanmıştır. PID değerinin maksimum sınırı bulunmasa bile hesaplanan PID değeri 256'nın üzerine çıksa bile sistem 60 saniye çalışmaktadır. Ancak PID değeri artmaya devam

edebilmektedir. 1 saatlik deney sonucunda elde edilen PID kontrol sinyali Şekil 6.4'te gösterilmektedir.



Şekil 6.4 1 Saatlik Deney Sonucunda Elde Edilen PID Kontrol Sinyali

Şekil 6.4'te elde edilen kontrol sinyali incelendiğinde yaklaşık 10 dakika boyunca rölelerin kapatılmadan çalıştığı görülmektedir. Bu süre sonunda fırın referans sıcaklığa ulaşmaktadır ve Şekil 6.3'te görülen aşım ve dalgalanmayı yapmaktadır. Sıcaklık oturma noktasına ulaştığında kontrol sinyalinde rölelerin açık olduğu on süresi 17 saniye olarak hesaplanmaktadır. Burada hesaplanan kontrol süresi fırının o anki iç dinamiklerine göre hesaplandığı için değişiklik gösterebilir. Farklı çalışma modları için farklı saniyelerin hesaplandığı görülmüştür. Kontrol sinyali ile hesaplanmış 180 derecelik sıcaklıkta elde edilen kontrol hata sinyali Şekil 6.5'te gösterilmektedir.



Şekil 6.5 1 Saatlik Deney Sonucunda Elde Edilen PID Kontrol Hatası

Şekil 6.5'te görüldüğü üzere kontrol hatası 0'a yaklaşmaktadır. Kontrol hatasının son 20 dakikalık hatası incelendiğinde maksimum ve minimum hatalar değerlendirmelidir. Son 20 dakikada olan maksimum hata -0.0219 derece, minimum hata -2.1052 derece olarak hesaplanmıştır. Burada görüldüğü üzere 2 derecenin üzerinde bir kontrol hatasına sahip bir kontrol sinyali elde edilmiştir. Belirtilen sınırın üzerinde bir kontrol hatası elde edilmiştir ancak hata aralığına oldukça yakındır.

6.3 RISE (Robust Integral of Sign of Error) Kontrol Yöntemi

RISE denetim yöntemi, Lyapunov temelli sürekli bir denetim yöntemidir. Bu denetim yöntemi n. mertebeden sistemler için geçerlidir. Bu çalışmada kullanılan RISE denetim yöntemi Xian vd. çalışmasından alınmıştır [31]. Üzerinde çalışılan sistemin ikinci dereceden olduğu varsayılmıştır. Bu sebeple [31]'deki kontrol tasarımı ikinci mertebeden bir sistem için uyarlanmıştır [31].

Denetim yöntemi için aşağıda verilen ikinci mertebeden sistem modeli ele alınmaktadır.

$$m(\mathbf{x})\ddot{x} + f(\mathbf{x}) = \mathrm{u} \qquad 6.3$$

Burada $x(t) \in \mathcal{R}$ durum değişkeni, $\mathbf{x}(t) = [x(t)\ \dot{x}(t)] \in \mathcal{R}^2$ durum vektörü, $m(\mathbf{x}) > 0$ ve $f(\mathbf{x})$ belirsiz doğrusal olmayan C^2 sınıfında fonksiyonlar ve $u(t) \in \mathcal{R}$ kontrol girişidir. Sistemin hata sinyali aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$e_1 = x_r - x \tag{6.4}$$

Burada $x_r(t)$ $\in$ referans yörüngedir ve kendisi ve dördünce mertebeye kadar zaman türevleri sınırlıdır. Filtre edilmiş zaman türevleri aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$e_2 = \dot{e_1} + \alpha_1 e_1 \tag{6.5}$$

$$r = \dot{e}_2 + \alpha_2 e_2 \tag{6.6}$$

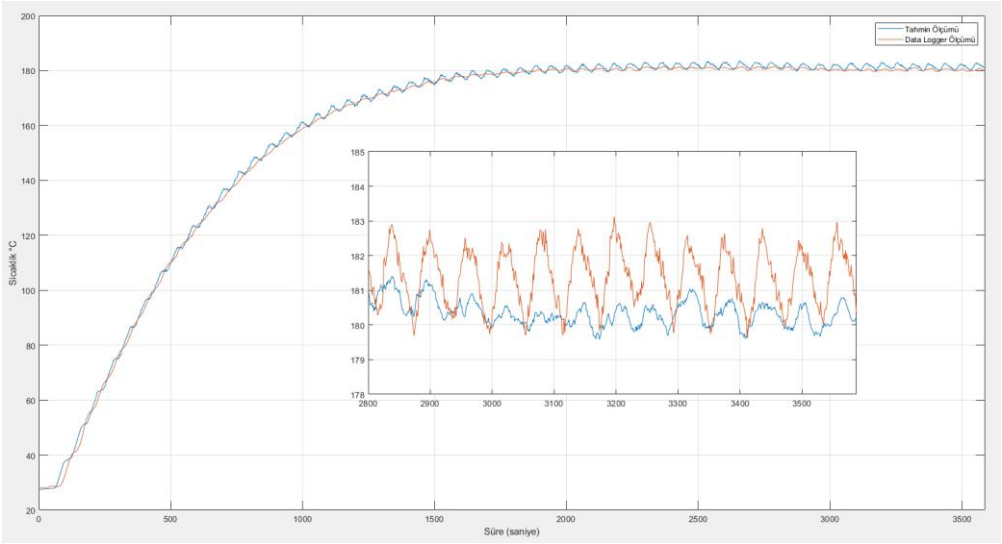
Denetim kuralı aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

$$\dot{u} = (k+1)r + \beta sgn(e_2) \tag{6.7}$$

Burada $k \in \mathcal{R}^+ - \{0\}$ kontrol kazancıdır [58, 59, 60].

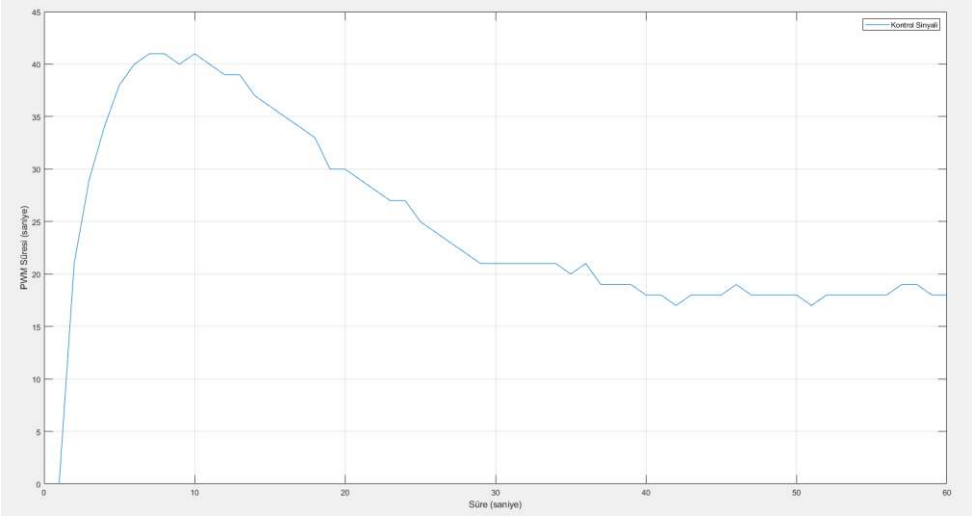
Kararlılık analizi Ek-1'de verilmiştir. Mevcut sistem için m(**x**) sabit alınmıştır (m(**x**)=1). Bu durum kararlılık analizini etkilememektedir.

Turbo mod için yapılan kontrol deneylerinde katsayılar $\alpha_1 = 0.002$, $\alpha_2 = 3$, $\beta = 2$ ve $k = 1.2$ olarak kullanılmıştır. Turbo mod 180 derecede yapılan 1 saatlik deneyde elde edilen tahmin verisi Şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.6 RISE Kontrol Turbo Mod Üst Sensör ve Alt Sensör ADC Ölçümü, Türev Ölçümü ve Data Logger Merkez Sıcaklık Ölçümü ile Elde Edilen Polinomla Alınan 1 Saatlik Ölçüm

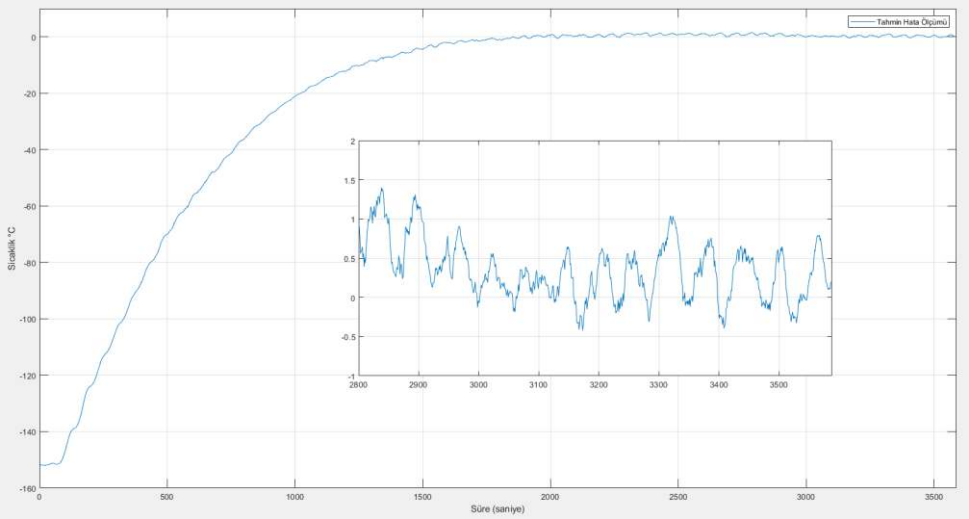
Elde edilen kontrol sinyali incelendiğinde ölçümün son 20 dakikasındaki kontrol hatasının maksimum değeri 1.627 derece, minimum değeri -0.419 derece olarak hesaplanmaktadır. Kontrol değerleri istenen sınırın altındadır. Kontrol kuralıyla elde edilen kontrol sinyali Şekil 6.7'de gösterilmektedir.



Şekil 6.7 1 Saatlik Deney Sonucunda Elde Edilen RISE Kontrol Sinyali

Şekil 6.7'de elde edilen RISE kontrol sinyali görülmektedir. PID kontrol sinyalindeki gibi yükseliş bölgesinde rezistanslar sürekli açık kalmamaktadır. Fırın sıcaklığının sabitlendiği noktalarda kontrol sinyali yaklaşık 18 saniyedir. Kontrol

sinyali ile hesaplanmış 180 derecelik sıcaklıkta elde edilen kontrol hata sinyali Şekil 6.8'de gösterilmektedir.



Şekil 6.8 1 Saatlik Deney Sonucunda RISE Kontrolcüyle Elde Edilen Takip Hatası

Şekil 6.8'de görüldüğü üzere kontrol hatası 0'a yaklaşmaktadır. Kontrol hatasının son 20 dakikasındaki maksimum hata 0.720 derece, minimum hata -0.678 derece olarak hesaplanmıştır. Burada görüldüğü üzere yaklaşık 2 derecelik hata değerinin altındadır.

Turbo mod için ölçümler incelendiğinde RISE kontrol yönteminin en kullanılabilir kontrol yöntemi olduğu görülmektedir. Diğer çalışma modları içinde RISE kontrol yöntemi denenmelidir. Her çalışma modunun kendine has iç dinamikleri bulunduğu için kontrol katsayıları çalışma modlarına göre değişiklik gösterebilir. Tablo 6.3'te çalışma modları için alınan ölçüm verileri gösterilmektedir.

Tablo 6.2 RISE Kontrol Yöntem Katsayıları

	Alpha 1	**Alpha 2**	**Beta**	**k**
Turbo Mod	0.002	3	2	1.2
Statik Fanlı Mod	0.002	3	0.7	1
Pizza Mod	0.002	3	0.7	1
Grill Mod	0.002	3	0.2	1
Statik Mod	0.002	3	0.2	1
Alt Rezistans Mod	0.0014	10	0.1	1

Çalışma modları için katsayılar incelendiğinde her çalışma modunun dinamiklerine uygun katsayılar seçildiği görülmektedir. Alpha değeri incelendiğinde çoğu modda eşit bir değer olduğu görülmektedir. Daha yavaş bir ısınmaya sahip olan alt rezistans mod için alpha değeri düşük tutulmuştur. Alpha 2 değerleri incelendiğinde alt rezistans mod için kullanılan 10 değeri daha hızlı bir yükselme zamanı elde edilmesi için diğer değerlere göre büyük seçilmiştir. Beta değerinin diğer sistemlere göre düşük olmasının nedeni de sıcaklık değerindeki değişim referans noktasına yaklaştıkça daha yavaş gerçekleşmektedir. Kullanılan kontrol değerleri ile çalışma modlarında elde edilen hasta değerleri Tablo 6.4'te gösterilmektedir.

Tablo 6.3 RISE Kontrol Yöntemi ile Alınan Ölçüm Hataları (1 Saatlik Ölçümün Son 20 Dakikası)

	Maksimum Tahmin Hatası	**Minimum Tahmin Hatası**	**Maksimum Kontrol Hatası**	**Minimum Kontrol Hatası**
Turbo Mod	1.627	-0.419	0.720	-0.678
Statik Fanlı Mod	2.055	0.057	1.405	-0.498
Pizza Mod	1.221	-1.850	0.726	-0.525
Grill Mod	1.976	-3.296	3.233	-1.195
Statik Mod	3.526	-0.407	1.902	-0.328
Alt Rezistans Mod	0.276	-3.051	1.421	-2.912

Tablo 6.4'te yer alan tahmin ve kontrol hataları incelendiğinde fanlı çalışma modlarının tahmin hataları kabul edilebilir bir seviyededir. Aynı şekilde kontrol hataları incelendiğinde fanlı çalışma modlarında kontrol hataları kullanılabilir seviyededir. Fansız çalışan çalışma modları incelendiğinde tahmin hatalarında sadece Grill çalışma modunda tahmin hatası istenilen değerin dışındadır. Ancak kontrol hataları incelendiğinde fansız çalışma modlarında kontrol hata aralığının dışında bir kontrol hatası bulunmaktadır. Ancak elde edilen sinyaller incelendiği zaman kullanılabilir bir kontrol hata grafiği elde edilmektedir.

7. TEST SONUÇLARI

Çalışmanın gerçekleştirildiği ev tipi elektrikli fırın Arçelik A.Ş. Pişirici Cihazlar İşletmesi tarafından temin edilmiştir. Projenin malzeme desteğini sağlayan Arçelik firmasıyla ortak gerçekleştirilen bu projede elde edilen yeni kazanımlar paylaşılmıştır. Bu kazanımlar sonucunda Arçelik A.Ş. Pişirici Cihazlar İşletmesi Bolu fabrikasında çalışmada kullanılan fırınla ayrıca testler alınmıştır.

Bolu Arçelik fabrikasında tezin gerçekleştirildiği ev tipi elektrikli fırın kullanılarak Arçelik firmasının yeni fırın piyasaya sürerken gerçekleştirdiği testler gerçekleştirilmiştir. Ancak tezde kullanılan fırın için Arçelik firmasının her testine gerek duyulmamıştır. Bu testler enerji testi, sıcaklık testi ve pişirme testi olmak üzere 3 tanedir.

7.1 Enerji Testi

Fırınlarda enerji testi fırının harcadığı enerjiyi test etme amacıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak gerçekçi bir test olabilmesi için fırının içerisinde bir yiyeceğin bulunması gerekmektedir. Her enerji testi için fırında bir yiyecek pişirme yerine Arçelik fabrikasında gerçekleştirilen enerji testi için fırın özel bir alana yerleştirilmiştir.

Ev tipi elektrikli fırının enerji testi, 220-240V 50-60Hz gerilim ve frekansında gerçekleştirilmiştir. Alınan enerji testi Turbo mod 180 °C'de gerçekleştirilmiştir. Ev tipi elektrikli fırın, Abant İzzet Baysal Üniversitesi Kontrol Laboratuvarı'nda hazırlanan test düzeneği kullanılarak gerçekleştirildiği için standart testlerden farklı olarak bilgisayarla müdahale edilerek kullanılmıştır. Gerçekleştirilen testte 815 Wh enerji ölçümü hesaplanmıştır. IEC 60350-1 (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) standartlarına göre A enerji sınıfını sağlamıştır. EN 60350-1 (Avrupa Standartları) standartlarına göre A enerji sınıfını sağlamadığı görülmüştür.

7.2 Sıcaklık Testi

Sıcaklık testi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi Kontrol Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen standart testlerin aynısıdır. Arçelik firması data logger üzerinden gerçek ölçümleri alırken testin gerçekleştirilmesinde kullanılan bilgisayar üzerinden de tahmin sıcaklık değeri hesaplanmıştır.

Sırasıyla Turbo, Statik ve Statik Fanlı modlarda sıcaklık testi yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri Tablo 7.1'de gösterilmektedir.

Tablo 7.1 RISE Kontrol Yöntemi ile Alınan Sıcaklık Testi

	Referans Sıcaklık	**Ortalama Sıcaklık** (40<t<60)	**Maksimum Sıcaklık**	**Minimum Sıcaklık**
Turbo Mod	**100**	100,4	101,4	98,8
	150	150,2	151,7	148,5
Statik Mod	**100**	96,7	97,4	96,0
	160	156,5	157,4	155,7
Statik Fanlı Mod	**180**	179,3	180,0	178,2

Tablo 7.1'de merkez nokta ±1 sıcaklık sapması kontrolü için gerçekleştirilen sıcaklık testi sonucunda elde edilen ölçüm verileri görülmektedir. Alınan ölçümler sonucunda Turbo ve Statik fanlı mod için belirtilen referans aralığında hataların ölçüldüğü görülmektedir. Fakat Statik modunda yaklaşık -3 derecelik bir fark olduğu görülmektedir. Tezde anlatılan veriler ışığında elde edilen sonuçlar tezde elde edilen sonuçlarla tutarlı olduğu görülmektedir.

7.3 Pişirme Testi

Fırın üzerinde alınan birçok teste rağmen fırının asıl önemli işlevi nasıl yemek pişirebildiğidir. Bu nedenle fırında yemek pişirme testinin yapılması elzemdir. Pişirme testi için sıcaklık testinde tercih edilen çalışma modları için gerçekleştirilmiştir. Çalışma modları için elde edilen sonuçlar Tablo 7.2'de gösterilmektedir.

Tablo 7.2 RISE Kontrol Yöntemi ile Alınan Pişirme Testi

	Ürün Adı	**Referans Sıcaklık**	**Ön Isıtma Süresi (dk)**	**Raf No**	**Son Sıcaklık**
Turbo Mod	Small Kek	150	30:47	3	150,2
Statik Mod	Small Kek	160	29:00	3	156,5
Statik Fanlı Mod	Ispanaklı Börek	180	29:00	2	179,3

Tablo 7.2'de pişirme testi sonuçları görülmektedir. Turbo mod ve statik modda Amerika tarifine göre hazırlanan small kek, Statik fanlı modda Arçelik firmasına ait standart tarifi bulunan ıspanaklı börek pişirilmiştir. Her pişirme testi için kullanılan çalışma modlarına göre referans sıcaklığı bulunmaktadır.

Turbo modda pişirilen small kek için standartlara uygun olarak hazırlanan fırın tepsisi Şekil 7.1 (a)'da gösterilmektedir. Şekil 7.1 (a)'da görülen small kekin pişirilmesiyle elde edilen hali Şekil 7.1 (b)'de gösterilmektedir.

(a) (b)

Şekil 7.1 Turbo Mod Small Kek Pişirme Testi

Şekil 7.1'de pişirme öncesi (a) ve sonrasında (b) elde edilen small kek görülmektedir. Pişirme testi sonucunda kekin üst yüzeyi ve alt yüzeyi renk farkı kontrol edilmektedir. Renk farkının standart belirlenen bir aralıkta olması testin başarılı olup olmadığını göstermektedir. Turbo mod ile alınan small kek testinde Üst yüzey renk farkı 4 ve ortalaması 9.6 olarak hesaplanmıştır. Üst yüzey için alınan veriler incelendiğinde standartlara uygun olduğu görülmektedir. Alt yüzey için alınan renk farkı 1, ortalaması 10.2 olarak hesaplanmıştır. Alınan ölçüm sonucunda alt yüzey testi standartlara uygundur.

Statik modda pişirilen small kek için standartlara uygun olarak hazırlanan fırın tepsisi Şekil 7.2 (a)'da gösterilmektedir. Şekil 7.2 (a)'da görülen small kekin pişirilmesiyle elde edilen hali Şekil 7.2 (b)'de gösterilmektedir.

(a) (b)

Şekil 7.2 Statik Mod Small Kek Pişirme Testi

Şekil 7.2’de pişirme öncesi (a) ve sonrasında (b) elde edilen small kek görülmektedir. Statik mod ile alınan small kek testinde üst yüzey renk farkı 2 ve ortalaması 9.8 olarak hesaplanmıştır. Üst yüzey için alınan veriler incelendiğinde standartlara uygun olduğu görülmektedir. Alt yüzey için alınan renk farkı 2, ortalaması 12.7 olarak hesaplanmıştır. Alınan ölçüm sonucunda alt yüzey testi standartlara uygundur.

Statik fanlı modda pişirilen ıspanaklı börek için standartlara uygun olarak hazırlanan fırın tepsisi Şekil 7.3 (a)’da gösterilmektedir. Şekil 7.3 (a)’da görülen ıspanaklı böreğin pişirilmesiyle elde edilen hali Şekil 7.3 (b)’de gösterilmektedir.

(a) (b)

Şekil 7.3 Statik Fanlı Mod Ispanaklı Börek Pişirme Testi

Şekil 7.3’te pişirme öncesi (a) ve sonrasında (b) elde edilen ıspanaklı börek görülmektedir. Statik fanlı mod ile alınan ıspanaklı börek testinde üst yüzey renk farkı hesaplanmamaktadır ancak ortalaması 12.4 olarak hesaplanmıştır. Üst yüzey için alınan veriler incelendiğinde standartlara uygun olduğu görülmektedir. Alt yüzey için alınan renk ortalaması 10.6 olarak hesaplanmıştır. Alınan ölçüm sonucunda alt yüzey testi standartlara uygundur.

Arçelik firmasının raporları doğrultusunda elde edilen rapor sonucunda belirtilen sonuç, “Pişirme test sonuçları mevcut ürünlerin sonuçlarına yakın çıkmıştır fakat ön ısıtma süreleri çok uzundur.” şeklindedir. Burada belirtilen

pişirme süresinin uzunluğu kontrol yöntemi üzerindeki kontrol katsayıları değiştirilerek düşürülebilmektedir. Ancak bu sonuç karşısında belirtilen sıcaklık aralığından çıkılabileceği de akıllardan çıkartılmamalıdır.

8. SONUÇ

Bu tez kapsamında, ev tipi fırınların merkez sıcaklık ölçümü ve kontrolü üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında, fırın merkez sıcaklığının ±2 °C hata aralığında tahmin ve ±1 °C hata aralığında kontrol edilmesi amaçlanmıştır.

Fırının sıcaklığını ölçebilmek için PT1000 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. PT1000 sensörü platin tabanlı dirençtir. PT1000 sensöründen ölçüm alınabilmesi için sabit akım kaynağı ve Wheatstone köprüsü yöntemleri denenmiş ve en iyi sonuç Wheatstone yöntemi ile elde edilmiştir.

Sıcaklık tahmini için yapay sinir ağı ve polinom uydurma yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yöntemle de tatmin edici sonuçlar elde edilmiş ve basit yapısından dolayı eğri uydurma yöntemi tercih edilmiştir.

Elde edilen tahmin verisi kullanılarak, fırın merkez sıcaklığının kontrolü yapılmıştır. Kontrol uygulamasında on-off, PID ve RISE kontrol yöntemleri denenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda en iyi kontrol performansına RISE denetleyici ile ulaşılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında, geliştirilen sistem, Arçelik firması tarafından testlere tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda, sistemin, hedeflenen fırın çalışma modları için hedeflenen ölçütleri başarı ile karşıladığı görülmüştür.

9. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında Vancouver atıf sistemi kullanılmıştır.)

1. LIU, Long, et al. The Design of High-Precision Temperature Measurement System Based on C8051F350 and PT100. In: Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2013. p. 2559-2562.

2. RUPNIK, Klemen; KUTIN, Jože; BAJSIĆ, Ivan. Identification and prediction of the dynamic properties of resistance temperature sensors. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 197: 69-75.

3. WANG, Wei, et al. Design of PT100 high-precision temperature measurement systems based on third-order model. Ferroelectrics, 2020, 563.1: 118-127.

4. BOYA, NAGARAJU, et al. DESIGN AND DEVELOPMENT OF CPLD BASED TEMPERATURE MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEM. 2013.

5. LIU, Jiguang; LI, Yukun; ZHAO, Hongyan. A temperature measurement system based on pt100. In: 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. IEEE, 2010. p. 296-298.

6. CHAUHAN, Janhvi; NEELAKANTAN, Usha. An experimental approach for precise temperature measurement using platinum RTD PT1000. In: 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE, 2016. p. 3213-3215.

7. QIAN, Yu, et al. Application of rtd sensor in the real time measurement and wireless transmission. In: 2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. IEEE, 2014. p. 658-662.

8. KORKMAZ, Hayriye; CAN, Burhanettin. Fuzzy logic-based digital filtering for temperature measurement via K-type thermocouple. In: The 3rd International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2003. IEEE, 2003. p. 13-18.

9. REN, Jiming, et al. Multi-Channel Temperature Measurement System based on LabVIEW. International Journal of Engineering Research & Technology, 2015, 4: 485-488.

10. SARKAR, Shantanu. Platinum RTD sensor based multi-channel high-precision temperature measurement system for temperature range− 100 C to+ 100 C using single quartic function. Cogent Engineering, 2018, 5.1: 1558687.

11. BOLAT, Emine Dogru; ERKAN, Kadir; POSTALCIOGLU, S. Experimental autotuning PID control of temperature using microcontroller. In: EUROCON 2005-The International Conference on" Computer as a Tool". IEEE, 2005. p. 266-269.

12. BOLAT, Emine Doğru. Real time temperature control of oven using Matlab-Simulink. In: Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Systems, Agios Nikolaos, Crete Island, Greece. 2007. p. 424-429.

13. ELNOUR, Mohammed; TAHA, Waleed Ibrahim Mohammed. PID and fuzzy logic in temperature control system. In: 2013 International Conference on Computing, Electrical and Electronic Engineering (ICCEEE). IEEE, 2013. p. 172-177.

14. OHISHI, KIYOSHI. Robust temperature control of thermostatic oven based on adaptive and fuzzy algorithm. In: 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 1989. p. 721-725.

15. PALANIYAPPAN, T. K., et al. PID control design for a temperature control system. In: 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC). IEEE, 2018. p. 632-637.

16. PAMELA, D.; PREMI, Godwin. Wireless control and automation of hot air temperature in oven for sterilization using fuzzy PID controller and adaptive smith predictor. Wireless Personal Communications, 2017, 94.4: 2055-2064.

17. RYCKAERT, V. G.; CLAES, J. E.; VAN IMPE, J. F. Model-based temperature control in ovens. Journal of food engineering, 1999, 39.1: 47-58.

18. SANCHEZ, Isidro; BANGA, Julio R.; ALONSO, Antonio A. Temperature control in microwave combination ovens. Journal of Food Engineering, 2000, 46.1: 21-29.

19. TSAI, Ching-Chih; TSAI, Chia-Ta. Digital command feedforward and PID temperature control for PET stretch blow molding machines. In: 2017 11th Asian Control Conference (ASCC). IEEE, 2017. p. 1128-1133.

20. HUSSEIN, Ala A.; CHEHADE, Abdallah A. Robust artificial neural network-based models for accurate surface temperature estimation of batteries. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56.5: 5269-5278.

21. DUBOIS, O.; NICOLAS, J.; BILLAT, A. Adaptive neural network control of the temperature in an oven. In: IEE Colloquium on Advances in Neural Networks for Control and Systems. IET, 1994. p. 8/1-8/3.

22. DANISMAN, K.; DALKIRAN, I.; CELEBI, F. V. Design of a high precision temperature measurement system based on artificial neural network for different thermocouple types. Measurement, 2006, 39.8: 695-700.

23. LEE, Jun; HA, Jung-Ik. Temperature estimation of PMSM using a difference-estimating feedforward neural network. IEEE Access, 2020, 8: 130855-130865.

24. GOLZAR, Farzin; NILSSON, David; MARTIN, Viktoria. Forecasting wastewater temperature based on artificial neural network (ANN) technique and monte carlo sensitivity analysis. Sustainability, 2020, 12.16: 6386.

25. MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. Modeling ambient air temperature time series using neural networks. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103.D16: 19509-19517.

26. MOJŽIŠOVÁ, Andrea; KOSTÚR, Karol. Model of indirect temperature measurement by neural network. Network, 2008, 2.1: 3.

27. MUSTAFARAJ, Giorgio; LOWRY, Gordon; CHEN, Jie. Prediction of room temperature and relative humidity by autoregressive linear and nonlinear neural network models for an open office. Energy and Buildings, 2011, 43.6: 1452-1460.

28. CHANGHAO, Xia; YONG, Liu. Virtual Realization of Temperature Measurement of PRTD Based on Radial Basis Function Neural Network. In: 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. IEEE, 2007. p. 4-110-4-114.

29. QU, Zhihua. Robust control of nonlinear uncertain systems under generalized matching conditions. Automatica, 1993, 29.4: 985-998.

30. XIAN, Bin; QUEIROZ, Marcio S. de; DAWSON, Darren M. A continuous control mechanism for uncertain nonlinear systems. Optimal Control, Stabilization and Nonsmooth Analysis, 2004, 251-264.

31. XIAN, Bin, et al. A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain nonlinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49.7: 1206-1211.

32. Wikipedia, Fırın, https://tr.wikipedia.org/wiki/F%C4%B1r%C4%B1n (Ziyaret Tarihi : 4 Haziran 2022)

33. Keysight, 34970A Data Acquisition / Data Logger Switch Unit, https://www.keysight.com/us/en/product/34970A/34970a-data-acquisition-control-mainframe-modules.html#:~:text=The%2034970A%20will%20be%20discontinued,standard%20period%20of%205%20years. (Ziyaret Tarihi : 12 Mayıs 2022)

34. Realm, Bringing Machine Learning to your IOS Apps, https://academy.realm.io/posts/altconf-2017-meghan-kane-bringing-machine-learning-to-your-ios-apps/, (Ziyaret Tarihi : 11 Ağustos 2022)

35. Bayrak, Alper, PIC Mikrodenetleyiciler, Bursa: Ekin Basım Yayın,2018

36. AHSAN, Mansoor; RAFIQUE, Khalid; MAZHAR, Farrukh. Optimization based tuning of autopilot gains for a fixed wing UAV. International Journal of Computer and Systems Engineering, 2013, 7.5: 781-786

37. Dubois, O., Nicolas, J., & Billat, A. (1994, May). Adaptive neural network control of the temperature in an oven. In IEE Colloquium on Advances in Neural Networks for Control and Systems (pp. 8-1). IET.

38. Changhao, X., & Yong, L. (2007, August). Virtual Realization of Temperature Measurement of PRTD Based on Radial Basis Function Neural Network. In 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments (pp. 4-110). IEEE.

39. Danisman, K., Dalkiran, I., & Celebi, F. V. (2006). Design of a high precision temperature measurement system based on artificial neural network for different thermocouple types. Measurement, 39(8), 695-700.

40. Mojžišová, A., & Kostúr, K. (2008). Model of indirect temperature measurement by neural network. Network, 2(1), 3.

41. Mustafaraj, G., Lowry, G., & Chen, J. (2011). Prediction of room temperature and relative humidity by autoregressive linear and nonlinear neural network models for an open office. Energy and Buildings, 43(6), 1452-1460.

42. Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1998). Modeling ambient air temperature time series using neural networks. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 103(D16), 19509-19517.

43. Hussein, A. A., & Chehade, A. A. (2020). Robust Artificial Neural Network-Based Models for Accurate Surface Temperature Estimation of Batteries. IEEE Transactions on Industry Applications, 56(5), 5269-5278.

44. Lee, J., & Ha, J. I. (2020). Temperature Estimation of PMSM Using a Difference-Estimating Feedforward Neural Network. IEEE Access, 8, 130855-130865.

45. Herve Abdi, Dominique Valentin, Betty Edelman, Neural Networks, Sage Publications, London, UK, 1999.

46. Mehmet Önder Efe, Okyay Kaynak Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları, Boğaziçi Üniversitesi yayınları, İstanbul, Türkiye, 2000.

47. James A. Anderson, An Introduction to Neural Networks, London, UK, 1997.

48. Bolat, E. D. (2007, July). Real time temperature control of oven using Matlab-Simulink. In Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on SYSTEMS, Greece.

49. Pamela, D., & Premi, M. G. (2017). Wireless control and automation of hot air temperature in oven for sterilization using fuzzy PID controller and adaptive smith predictor. Wireless Personal Communications, 94(4), 2055-2064.

50. Ryckaert, V. G., Claes, J. E., & Van Impe, J. F. (1999). Model-based temperature control in ovens. Journal of food engineering, 39(1), 47-58.

51. Sanchez, I., Banga, J. R., & Alonso, A. A. (2000). Temperature control in microwave combination ovens. Journal of Food Engineering, 46(1), 21-29.

52. Bolat, E. D., Erkan, K., & Postalcioglu, S. (2005, November). Experimental autotuning PID control of temperature using microcontroller. In EUROCON 2005-The International Conference on" Computer as a Tool" (Vol. 1, pp. 266-269). IEEE.

53. Elnour, M., & Taha, W. I. M. (2013, August). PID and fuzzy logic in temperature control system. In 2013 International Conference on Computing, Electrical and Electronic Engineering (ICCEEE) (pp. 172-177). IEEE.

54. Ohishi, K. I. Y. O. S. H. I. (1989, November). Robust temperature control of thermostatic oven based on adaptive and fuzzy algorithm. In 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (pp. 721-725). IEEE.

55. Mastacan, L., & Dosoftei, C. C. (2016, October). Temperature intelligent control based on soft computing technology. In 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE) (pp. 020-025). IEEE.

56. Palaniyappan, T. K., Yadav, V., Tayal, V. K., & Choudekar, P. (2018, April). PID Control Design for a Temperature Control System. In 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC) (pp. 632-637). IEEE.

57. Tsai, C. C., & Tsai, C. T. (2017, December). Digital command feedforward and PID temperature control for PET stretch blow molding machines. In 2017 11th Asian Control Conference (ASCC) (pp. 1128-1133). IEEE.

58. BIDIKLI, Baris; BAYRAK, Alper. A self-tuning robust full-state feedback control design for the magnetic levitation system. Control Engineering Practice, 2018, 78: 175-185.

59. BIDIKLI, Baris, et al. A new robust 'integral of sign of error'feedback controller with adaptive compensation gain. In: 52nd IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2013. p. 3782-3787.

60. BIDIKLI, Baris; TATLICIOGLU, Enver; ZERGEROGLU, Erkan. A self tuning RISE controller formulation. In: 2014 American Control Conference. IEEE, 2014. p. 5608-5613.

61. N. Agrawal, A. Kumar, Varun Bajaj, and G.K. Singh. Design of digital iir filter: A research survey. Applied Acoustics, 172:107669, 2021.

62. Shahrokh Akhlaghi, Ning Zhou, and Zhenyu Huang. Adaptive adjustment of noise covariance in kalman filter for dynamic state estimation. In 2017 IEEE power & energy society general meeting, pages 1–5. IEEE, 2017.

63. Bonnie Baker. Using single supply operational amplifiers in embedded systems. AN682, Microchip Technology Inc., Chandle, Arizona, USA, DS00682, 2000.

64. Nagaraju Boya, Sreelekha Kande, Vijay Kumar Jinde, and MAHESH UNGARALA. Design and development of cpld based temperature measurement and control system. International Journal of Electronics and Communication Engineering, pages 41–48, 2013.

65. Shuo Cai, Yunfeng Hu, Haitao Ding, and Hong Chen. A noise reduction method for mems gyroscope based on direct modeling and kalman filter. IFAC-PapersOnLine, 51(31):172–176, 2018.

66. Janhvi Chauhan and Usha Neelakantan. An experimental approach for precise temperature measurement using platinum rtd PT1000. In 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), pages 3213–3215. IEEE, 2016.

67. Philipe Miranda De Moura. Algorithms of inertial measurement units based on kalman filter. Technical report, Texys.FR, Varennes-Vauzelles (France), 2017.

68. Arthur Gelb. Applied optimal estimation. MIT press, 1974.

69. MS Grewal and AP Andrews. Kalman filtering: Theory and practice using matlab, wiley, 2008.

70. Hui Guo and Huajie Hong. Research on filtering algorithm of mems gyroscope based on information fusion. Sensors, 19(16):3552, 2019.

71. Manon Kok, Jeroen D Hol, and Thomas B Sch¨on. Using inertial sensors for position and orientation estimation. arXiv preprint arXiv:1704.06053, 2017.

72. Jiguang Liu, Yukun Li, and Hongyan Zhao. A temperature measurement system based on PT100. In 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, pages 296–298. IEEE, 2010.

73. Long Liu, Yun Cui Zhang, Shen Hua, Jun Xiao, and Li Jia Huang. The design of high-precision temperature measurement system based on c8051f350 and PT100. In Applied Mechanics and Materials, volume 423, pages 2559–2562. Trans Tech Publ, 2013.

74. AH Mohamed and KP Schwarz. Adaptive kalman filtering for ins/gps. Journal of geodesy, 73(4):193–203, 1999.

75. Mundla Narasimhappa, Samrat L Sabat, and Jagannath Nayak. Fiberoptic gyroscope signal denoising using an adaptive robust kalman filter. IEEE Sensors Journal, 16(10):3711–3718, 2016.

76. Lawrence C Ng. On the application of allan variance method for ring laser gyro performance characterization. Technical report, Lawrence Livermore National Lab., CA (United States), 1993.

77. John G Proakis. Digital signal processing: principles algorithms and applications. Pearson Education India, 2001.

10. EKLER

EK-1

Eşitlik (6.6)'nın türevi,

$$\dot{r} = \ddot{e}_2 + \alpha_2 \dot{e}_2 \tag{10.1}$$

olarak elde edilir. Bu eşitliğin her iki tarafı *m* ile çarpılır ve Eşitlik (6.4)'ün birinci ve ikinci türevleri alınarak yerine konursa

$$m\dot{r} = m(\dddot{x}_r - \dddot{x} + \alpha_1 \ddot{e}_1 + \alpha_2 \ddot{e}_2) \tag{10.2}$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (6.3)'ün türevi alınır ve Eşitlik (10.2)'de yerine konulursa aşağıdaki eşitlik elde edilir,

$$m\dot{r} = -\frac{1}{2}\dot{m}r - e_2 - \dot{u} + N, \tag{10.3}$$

burada

$$N(x, \dot{x}, \ddot{x}) \triangleq \dot{f} + e_2 + \dot{m}\left(\ddot{x} + \frac{1}{2}r\right) + m(\dddot{x}_d + \ddot{e}_1 + \alpha \dot{e}_2) \tag{10.4}$$

olarak tanımlanmaktadır.

Eşitlik (6.8), Eşitlik (7.3)'te yerine konursa aşağıdaki eşitlik elde edilir,

$$m\dot{r} = -\frac{1}{2}\dot{m}r - e_2 + (k_s + 1)r + \beta sgn(e_2) + \tilde{N} + N_d \tag{10.5}$$

burada,

$$N_d(t) \triangleq N|_{\substack{x=x_d \\ \dot{x}=\dot{x}_d \\ \ddot{x}=\ddot{x}_d}}$$

$$= \dot{f}(x_r, \dot{x}_r) + \dot{m}(x_r, \dot{x}_r)\ddot{x}_r + m(x_r, \dot{x}_r)\dddot{x}_r \tag{10.6}$$

ve

$$\tilde{N}(x, \dot{x}, \ddot{x}, t) \triangleq N - N_d \tag{10.7}$$

olarak tanımlanmıştır.

Not 1: (7.4) eşitliğinde tanımlanan N sürekli türevlenebilir olduğu için, $\widetilde{N}$, aşağıda verildiği gibi üstten sınırlanabilir,

$$\left\|\widetilde{N}\right\| \leq \rho(\|z\|)\|z\|, \qquad 10.8$$

burada, $\|\cdot\|$, Öklid normu, $\rho: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ küresel olarak terslenebilir, azalmayan fonksiyon ve

$$z \coloneqq [e_1 \quad e_2 \quad r]^T \qquad 10.9$$

olarak verilmektedir [31].

Ön kuram 1* [31]*:

$L(t) \in \mathbb{R}$ fonksiyonu aşağıda verildiği gibi tanımlanmaktadır,

$$L \triangleq r\big(N_d - \beta sgn(e_2)\big). \qquad 10.10$$

Eğer β, kontrol kazancı, aşağıdaki gibi seçilirse,

$$\beta \geq \|N_d(x)\|_\infty + \frac{1}{\alpha}\left\|\dot{N}_d(x)\right\|_\infty \qquad 10.11$$

burada$\|\cdot\|_{\mathcal{L}_\infty}$, $\mathcal{L}_\infty$ normudur [31], bu durumda

$$\int_0^t L(\tau)d\tau \leq \zeta_b \qquad 10.12$$

eşitsizliği sağlanır. Burada

$$\zeta_b \coloneqq \beta|e_2(0)| - e_2(0)N_d(0) \qquad 10.13$$

olarak tanımlanmaktadır.

İspat için [31]'e bakılabilir.

Ön kuram 2* [31]*:

$\dot{\xi} = f(\xi, t)$ gibi bir sistem ele alınmaktadır, burada verilen $f: \mathbb{R}^{\boldsymbol{m}} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}^m$ çözümü mevcut bir fonksiyondur. Bu aşamada bir $\mathcal{D} \coloneqq \{\xi \in \mathbb{R}^{\boldsymbol{m}} | \|\xi\| < \boldsymbol{\varepsilon}\}$ bölgesi tanımlansın, burada, ε pozitif bir sabit ve $V: \mathcal{D} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, aşağıda verilen koşulu sağlayan, *s*ürekli türevlenebilir bir fonksiyon olsun,

$$\mathrm{W}_1(\xi) \leq \mathrm{V}(\xi, \mathrm{t}) \leq \mathrm{W}_2(\xi) \text{ ve } \dot{\mathrm{V}}(\xi, \mathrm{t}) \leq -\mathrm{W}(\xi) \qquad 10.14$$

burada $\forall t \geq 0$ ve $\forall \xi \geq \mathcal{D}$ olarak verilmektedir. $W_1(\xi)$ ve $W_2(\xi)$ sürekli pozitif tanımlı fonksiyonlardır ve $W(\xi)$ tekdüze sürekli pozitif yarı-tanımlı bir fonksiyondur. Eşitlik (10.14)'ün sağlanması ve $\xi(0) \in S$ olması koşuluyla

$$\mathrm{t} \to \infty \text{ iken } \mathrm{W}(\xi(\mathrm{t})) \to 0 \qquad 10.15$$

durumu elde edilir. Burada S ile belirtilen bölge aşağıdaki gibi tanımlanmıştır

$$S := \{\xi \in \mathcal{D} | \mathrm{W}_2(\xi) \leq \delta\} \qquad 10.16$$

burada

$$\delta < \min_{\|\xi\|=\varepsilon} \mathrm{W}_1(\xi) \qquad 10.17$$

δ , pozitif bir sabittir.

İspat için Kaynak [31]'e bakılabilir.

Aşağıdaki gibi tanımlanmış bir $P(t) \in \mathbb{R}$ fonksiyonumuz olsun

$$P \triangleq f_b - \int_0^+ L(\tau) d\tau. \qquad 10.18$$

Ön kuram 1'den $P(t) \geq 0$ olduğu gösterilebilir.

Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır

$$V(y,t) = \frac{1}{2} {e_1}^2 + \frac{1}{2} {e_2}^2 + \frac{1}{2} m(x) r^2 + P \qquad 10.19$$

burada

$$y := [z^T \quad \sqrt{P}]^T. \qquad 10.20$$

Mevcut sistem için $m(x)$ sabit alındığından aşağıdaki sınırlama yazılabilir

$$\underline{m} \leq m(x) \leq \bar{m}(\|y\|) \qquad 10.21$$

burada $\underline{m}$ pozitif bir sabit ve $\bar{m}: \mathbb{R}_{\geq 0} \to \mathbb{R}_{\geq 0}$, azalmayan bir fonksiyondur. (10.11) ve (10.21) kullanılarak (10.19) eşitliğindeki fonksiyon aşağıdaki gibi sınırlandırılabilir,

$$\lambda_1 \|y\|^2 \leq V \leq \lambda_2(\|y\|)\|y\|^2 \qquad 10.22$$

burada

$$\lambda_1 \coloneqq \frac{1}{2} min\{1, \underline{m}\} \tag{10.23}$$

ve

$$\lambda_2(\|y\|) \coloneqq max\left\{\frac{1}{2}\bar{m}(\|y\|), 1\right\}. \tag{10.24}$$

(7.19) eşitliğinin türevi alınıp, (6.5), (6.6) ve (7.5) eşitlikleri yerine konulursa,

$$\dot{V} = e_1\dot{e_1} + e_2\dot{e_2} + \frac{1}{2}\dot{m}r^2 + mr\dot{r} - L$$

$$= e_2e_1 - \alpha_1{e_1}^2 - \alpha_2{e_2}^2 - r^2 + r\tilde{N} - k_sr^2 + [r(N_d - \beta sgn(e_2)) - L] \tag{10.25}$$

olarak elde edilir. (7.10) eşitliği, $e_1e_2 \leq \frac{1}{2}({e_1}^2 + {e_2}^2)$ özelliği ve (7.8) eşitsizliği kullanılarak, $\dot{V}$, aşağıdaki gibi sınırlandırılabilir,

$$\dot{V} \leq -\lambda_3\|z\|^2 + |r|\rho(\|z\|)\|z\| - k_sr^2$$

$$\leq -\left(\lambda_3 - \frac{\rho^2(\|z\|)}{4k_s}\right)\|z\|^2 \tag{10.26}$$

burada $\alpha_1, \alpha_2 > \frac{1}{2}$ ve $\lambda_3 \triangleq min\left\{\left(\frac{1}{2}\right), \alpha_1 - \left(\frac{1}{2}\right), \alpha_2 - \left(\frac{1}{2}\right)\right\}$ olarak verilir.

(7.26)'dan

$$k_s > \frac{1}{4\lambda_3}\rho^2(\|z\|) \tag{10.27}$$

veya

$$\|z\| < \rho^{-1}\left(2\sqrt{\lambda_3k_s}\right) \tag{10.28}$$

şartı ile

$$\dot{V} \leq -\gamma\|z\|^2 \tag{10.29}$$

eşitsizliği yazılabilir, burada γ, pozitif sabittir.

Bu aşamadan sonra, eşitlik (7.22) ve (7.27)'e Ön kuram 2 uygulanacaktır. Eşitlik (7.10) için eşitlik (7.22)'deki alt ve üst sınırlar aşağıdaki gibi verilmiştir,

$$W_1(y) = \lambda_1\|y\|^2 \qquad W_2(y) = \lambda_2(\|y\|)\|y\|^2 \tag{10.30}$$

Eşitlik (7.19)'un türevi ise aşağıdaki gibi sınırlandırılmıştır,

$$W(y) = \gamma\|z\|^2. \tag{10.31}$$

Eşitlik (7.28) kullanılarak, Ön kuram 2'de belirtilen D bölgesi aşağıdaki gibi belirlenmiştir,

$$\mathcal{D} \coloneqq \left\{\mathrm{y} \in \mathbb{R}^{\mathrm{n+1}} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \middle| \|\mathrm{y}\| < \rho^{-1}\left(2\sqrt{\lambda_3 \mathrm{k_s}}\right)\right\}. \tag{10.32}$$

Eşitlik (7.22) ve (7.27)'den, $V(y(t), t) \in \mathcal{L}_\infty$ olduğu bilinmektedir, buradan $e_1(t), e_2(t), r(t) \in \mathcal{L}_\infty$ olur. Bu durumda, eşitlik (6.6)'dan, $\dot{e}_2(t) \in \mathcal{L}_\infty$ olur. Eşitlik (6.4) ve Bölüm 6.3'te bahsedilen x_r'nin kendisinin ve dördüncü dereceye kadar türevlerinin sürekli olması özelliği kullanılarak $x^{(i)}(t) \in \mathcal{L}_\infty\, i = 0,1, \ldots., n$ olduğunu gösterilebilir. $m(x), f(x) \in \mathcal{L}_\infty$ olduğu zaten bilinmektedir. Son olarak eşitlik (6.3), $u(t) \in \mathcal{L}_\infty$ olduğunu göstermek için kullanılabilir.

Buraya kadar bahsedilen sınır ifadelerinden yola çıkarak, eşitlik (3.15), (3.19) ve (7.31)'den $\dot{W}(y(t)) \in \mathcal{L}_\infty$ olduğu söylenebilir. Bu aşamada aşağıda gösterildiği gibi bir S bölgesi tanımlanırsa:

$$S \coloneqq \left\{\mathrm{y} \in \mathcal{D} \middle| \mathrm{W_2(y)} < \lambda_1\left(\rho^{-1}\left(2\sqrt{\lambda_3 \mathrm{k_s}}\right)\right)^2\right\}, \tag{10.33}$$

Ön kuram 2 kullanılarak, $\mathrm{t} \to \infty$ iken $\|z(t)\|^2 \to 0$, $\forall y(0) \in S$, durumu gösterilebilir. Eşitlik (3.19)'dan, $\mathrm{t} \to \infty$ iken $e_1(t),\ e_2(t),\ r(t) \to 0$, $\forall \mathrm{y}(0) \in \mathrm{S}$, olduğu görülür. Eşitlik (6.5) ve (6.6)'dan, $\mathrm{t} \to \infty$ iken $\dot{e}_1(t),\ \dot{e}_2(t) \to 0$, $\forall y(0) \in S$ olduğu görülür. Son olarak, eşitlik (6.5)'in türevinden, $\mathrm{t} \to \infty$ iken $\ddot{e}_1(t) \to 0$, $\forall \mathrm{y}(0) \in \mathrm{S}$ olduğu görülür [31].

Eşitlik (10.33)'deki bölge, k_s kontrol kazancı ayarlanarak, istenen başlangıç koşullarını içerecek şekilde genişletilebilir. Sonuç olarak, yarı-küresel kararlılık sonucu elde edilmiş olur [31].