

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÜÇ BOYUTLU ISITMA YAPAN BİR ELEKTRİK FIRININ  
TASARIMI VE GERÇEK ZAMANLI DENETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik - Elektronik Müh. Ali GÜNEY**

**HAZİRAN 2018  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÜÇ BOYUTLU ISITMA YAPAN BİR ELEKTRİK FIRINININ**  
**TASARIMI VE GERÇEK ZAMANLI DENETİMİ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Ali GÜNEY**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 / 05 / 2018**

**Tezin Savunma Tarihi : 01 / 06 / 2018**

**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR**

**Trabzon 2018**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında  
Ali GÜNEY Tarafından Hazırlanan**

**ÜÇ BOYUTLU ISITMA YAPAN BİR ELEKTRİK FIRINININ  
TASARIMI VE GERÇEK ZAMANLI DENETİMİ**

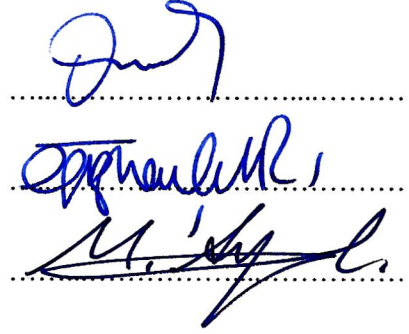
**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 08 / 05 / 2018 gün ve 1752 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ**

**Üye : Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR**

**Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Şinasi AYAS**

  
.....  
.....  
.....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ  
Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı çerçevesinde hazırlanmış olan bu tezde üç boyutlu ısıtma yapan bir elektrik fırının gerçek zamanlı sayısal denetimi yapılmıştır. Ayrıca elektrikli fırının açık kapalı, oransal, oransal integral, oransal türevsel, oransal integral türevsel kontrol yöntemleri uygulanmış ve bunların bir biri üzerindeki üstünlükleri görülmüştür.

Tez çalışmam boyunca, akademik desteği ve değerli fikirleriyle bana her zaman yardımcı olan danışmanım, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tüm hayatım boyunca, benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme en içten şükranlarımı sunuyorum.

Ali GÜNEY  
Trabzon 2018

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Üç Boyutlu Isıtma Yapan Bir Elektrik Fırınının Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Denetimi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 01/06/2018

Ali GÜNEY

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIV
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Oransal, Oransal İntegral ve Oransal Türevsel Denetim Yöntemleri.....	2
1.2.1. Oransal Denetim Yöntemi.....	4
1.2.2. Oransal İntegral Denetim Yöntemi.....	6
1.2.3. Oransal Türev Denetim Yöntemi.....	7
1.2.4. Oransal İntegral Türev Denetim Yöntemi.....	9
1.3. Açık Kapalı Kontrol.....	11
1.4. Güç Elektroniği.....	13
1.5. Güç Elektroniği Elemanları .....	14
1.5.1. Diyot.....	14
1.5.2. Transistor .....	16
1.5.2.1. BJT .....	16
1.5.2.2. FET .....	19
1.5.2.3. MOSFET .....	21
1.5.2.4. IGBT.....	25
1.5.3. Tristör .....	26
1.5.4. Triyak .....	28
1.6. Sıfır Geçiş Algılama Devreleri ve Çalışma Prensibi .....	30
1.7. Oransal İntegral Türevsel Denetleyici Parametrelerinin Belirlenmesi.....	31

1.7.1.	Açık Çevrim Ziegler-Nichols Metodu.....	32
1.7.2	Kapalı Çevrim Ziegler-Nichols Metodu.....	32
1.7.3	Tyres-Luyben Metodu.....	33
1.7.4	Cohen Coon Metodu.....	34
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME.....	36
2.1.	Giriş .....	36
2.2.	Mekanik Kısım.....	37
2.3.	Elektriksel Kısım.....	39
2.3.1.	Analog Dijital Dönüştürücü kartı.....	40
2.3.2.	Sıfır Geçiş Algılama Devresi.....	41
2.3.3.	Sürücü Devresi.....	43
2.4.	Yazılım Birimi.....	45
2.4.1	Kontrol Yazılımı.....	45
2.4.2.	Denetleyici Yazılımı.....	45
2.5.	DeneySEL Çalışmalar.....	45
2.5.1	Sistemin Modellenmesi ve PID Parametrelerinin Belirlenmesi.....	46
2.5.1.1.	Sistemin Modellenmesi.....	46
2.5.1.2.	PID Parametrelerinin Belirlenmesi.....	47
2.5.2.	Ölçüm Sonuçları.....	48
2.5.2.1.	Tek panel Sıcaklık Kontrolü.....	48
2.5.2.2.	İki Panel Sıcaklık Kontrolü.....	50
2.5.2.3.	Üç Panel Sıcaklık Kontrolü.....	52
2.5.2.4.	Dört Panel Sıcaklık Kontrolü .....	55
2.5.2.5.	Beş Panel Sıcaklık Kontrolü .....	59
2.5.2.6.	Altı Panel Sıcaklık Kontrolü.....	63
3.	SONUÇLAR .....	68
4.	ÖNERİLER .....	70
5.	KAYNAKLAR .....	71
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÜÇ BOYUTLU ISITMA YAPAN BİR ELEKTRİK FIRINININ  
GERÇEK ZAMANLI SAYISAL DENETİMİ

Ali GÜNEY

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR  
2018, 74 Sayfa

Günümüzde elektrik fırınları hem ticari hem de günlük hayatta sıklıkla kullanılan cihazların başında gelmektedir. Elektrikli fırınlar biri tabanında diğer tavanında olmak üzere iki ısıtıcı rezistansa sahiptir. Aynı zamanda sıcaklık kontrolü genelde fırın içerisinden tek noktadan ölçüm alınarak, kapalı çevrim açık-kapalı kontrol yöntemi ile sağlanmaktadır. Hem tek noktadan ölçüm alınması ve hem de kontrol yöntemi olarak açık-kapalı denetim yapılması fırın içerisindeki sıcaklığın referans değerden oldukça sapmasına yol açmaktadır. İlave olarak ısıtıcıların yalnızca fırının alt ve üst yüzeyinde bulunması, pişirme haznesinin homojen ısıtılmasını mümkün kılmamaktadır. Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen sorunları ortadan kaldırmak için üç boyutlu ısıtma yapabilen bir elektrik fırınının tasarımı, üretimi, testi ve analizi yapılmıştır. Gerçekleştirilen elektrik fırınının altı yüzeyinde de ısıtıcı ve sıcaklık algılayıcı bulunmaktadır. Fırının pişirme haznesi altı yüzeyden de ısıtılmakta ve fırın içi sıcaklığı her yüzeyden algılayıcılarla ölçülmektedir. Böylece pişirme haznesinin üç boyutlu homojen veya heterojen ısıtılması mümkün olmaktadır. Gerçekleştirilen ısıtıcıda, sıcaklık kontrolü gerçek zamanlı ve sayısal olarak yapılmıştır. Sıcaklık denetiminde açık-kapalı, oransal, oransal integral, oransal türev ve oransal integral türev yöntemleri kullanılmıştır. Belirlenen bir referans sıcaklık değeri ve farklı ısıtma şekilleri için ölçümler alınmış ve bu ölçümler analiz edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, fırının ayarlanan referans değer ve seçilen ısıtma şekli için kabul edilebilir bir hata ile istenen ısıtma dağılımını sağladığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrik fırını, üç boyutlu ısıtma, açık-kapalı kontrol, oransal denetim, oransal türev kontrol, oransal integral denetim, oransal integral türev kontrol, homojen ısıtma, heterojen ısıtma



MSc. Thesis

SUMMARY

REAL TIME DIGITAL CONTROL OF AN ELECTRIC FURNACE  
WHICH PERFORM THREE-DIMENSIONAL HEATING

Ali GUNEY

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program  
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Oguzhan CAKIR  
2018, 74 Pages

Nowadays electric ovens are one of the most frequently used devices in both commercial and daily life. Electric ovens have two heating resistances, one on the bottom and the other on the roof. At the same time, the temperature control is usually achieved by taking measurements from a single point in the furnace and by the closed-loop on-off control method. Both single-point measurement and on-off control as a control method cause the temperature in the furnace to deviate significantly from the reference value. In addition, the presence of the heaters only on the top and bottom surfaces of the furnace does not make it possible to homogenize the cooking chamber. In this study, the design, production, testing and analysis of an electric furnace capable of three-dimensional heating were carried out to remove the above-mentioned problems. There is also a heater and temperature sensor on the bottom surface of the electric furnace. The oven cooking chamber is also heated from all surfaces and the oven temperature is measured from each surface by sensors. Thus, it is possible to heat the cooking chamber three-dimensionally homogeneously or heterogeneously. In the realized heater, temperature control is done in real time and digitally. On-off, proportional, proportional integral, proportional derivative and proportional integral derivative methods are used in temperature control. Measurements were taken for a determined reference temperature value and for different heating patterns and these measurements were analyzed. Experimental work carried out has shown that the furnace provides the desired heating distribution with an acceptable error for the set reference value and the selected heating mode.

**Key Words:** Electric furnace, three-dimensional heating, on-off control, proportional control, proportional derivative control, proportional integral control, proportional integral derivative control, homogenous heating, heterogeneous heating

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Açık çevrim kontrol sistemi blok şeması .....	2
Şekil 2. Kapalı çevrim kontrol sistemi blok şeması .....	3
Şekil 3. Oransal denetimli kapalı çevrim kontrol sisteminin blok şeması .....	4
Şekil 4. Herhangi bir çıkış işaretinin zamanla değişim .....	5
Şekil 5. Hata değişimi/kontrol işareti grafiği .....	5
Şekil 6: Herhangi bir çıkış işaretinin zamanla değişim .....	6
Şekil 7. PI denetimli kapalı çevrim blok şeması .....	7
Şekil 8. Herhangi bir çıkış işaretinin zamanla değişim .....	8
Şekil 9. PI denetimli kapalı çevrim blok şeması .....	8
Şekil 10. PID denetimli kapalı çevrim blok şeması .....	10
Şekil 11. Açık-kapalı yöntemiyle ideal sıcaklık kontrolü .....	11
Şekil 12. İdeal açık-kapalı kontrol transfer eğrisi .....	12
Şekil 13. Açık-kapalı yöntemiyle histerisizli sıcaklık kontrolü .....	12
Şekil 14. Açık-Kapalı sistem histerisizli transfer eğrisi .....	13
Şekil 15. Güç elektroniği blok şeması.....	14
Şekil 16. Diyotun p ve n eklem yapısı .....	15
Şekil 17. Diyotun elektriksel sembolü .....	15
Şekil 18. Diyotun karakteristik eğrisi .....	15
Şekil 19. BJT elemanın p ve n eklem yapısı.....	17
Şekil 20. a) n-p-n kanallı BJT elektriksel sembolü b) p-n-p kanallı BJT elektriksel sembolü.....	17
Şekil 21. a) BJT giriş karakteristiği b) Geçiş karakteristiği c) Çıkış karakteristiği .....	18
Şekil 22. BJT en genel transfer karakteristiği .....	18
Şekil 23. a) n kanallı JFET elektriksel sembolü b) p kanallı JFET elektriksel sembolü ...	20
Şekil 24. FET elemanın n ve p eklem yapısı.....	20
Şekil 25. a) FET giriş karakteristiği b) FET çıkış karakteristiği.....	21
Şekil 26. a) n kanallı MOSFET elemanın p ve n eklem yapısı b) p kanallı MOSFET elemanın p ve n eklem yapısı .....	22

Şekil 27. a) Azaltım tipi MOSFET tetikleme şekli b) Artırım tipi MOSFET tetikleme şekli.....	22
Şekil 28. a) n kanallı azaltım tipi MOSFET elektriksel yapısı b) p kanallı azaltım tip MOSFET elektriksel sembolü .....	23
Şekil 29. a) Azaltım tipi MOSFET giriş karakteristiği b) Azaltım tipi MOSFET çıkış karakteristiği .....	23
Şekil 30. a) n kanallı artırım tipi MOSFET elektriksel yapısı b) p kanallı artırım tip MOSFET elektriksel sembolü .....	24
Şekil 31. a) Artırım tipi MOSFET giriş karakteristiği b) Artırım tipi MOSFET çıkış karakteristiği .....	24
Şekil 32. IGBT elemanın eklem yapısı .....	25
Şekil 33. IGBT yapısının elektriksel sembolü .....	26
Şekil 34. Tristör elemanın elektriksel eş değer devresi .....	27
Şekil 35. Tristörün yarı iletken eklem yapısı .....	27
Şekil 36. Triyak elemanın elektriksel devresi .....	28
Şekil 37. Triyak eklem yapısı .....	28
Şekil 38. AC giriş işareti, tetikleme işareti ve çıkış işareti grafikleri.....	29
Şekil 39. Opamp kullanılarak gerçekleştirilen sıfır geçiş devresi .....	30
Şekil 40. Optokuplör kullanılarak gerçekleştirilen sıfır geçiş devresi .....	30
Şekil 41. Optokuplör giriş ve çıkış işaretleri .....	31
Şekil 42. Çıkış Eğrisi.....	32
Şekil 43. Ziegler ve Nichols yönteminde çıkarılan karakteristik grafiği.....	33
Şekil 44. Cohen-Coon karakteristik eğrisi.....	35
Şekil 45. Üç boyutlu ısıtma yapan elektrik fırının blok şekli.....	36
Şekil 46. Elektrik fırının (a) kupası ve (b) gövdesi.....	37
Şekil 47. Üst ve alt panellerin (a) ön ve (b) yan profili.....	38
Şekil 48. Gerçekleştirilen fırının (a) ön ve (b) yan profili.....	38
Şekil 49. Gerçekleştirilen fırının mekanik kısmı.....	39
Şekil 50. ADD kartın şematik gösterimi.....	40
Şekil 51.ADD kartın baskı devre şekli.....	40
Şekil 52. ADD kartı.....	41
Şekil 53. Sıfır geçiş algılama devresi diyagramı.....	42
Şekil 54. Sıfır geçiş algılama devresi baskı çizimi.....	42
Şekil 55. Sıfır geçiş algılama devresi.....	42

Şekil 56. Sürücü devresi şematik diyagramı.....	43
Şekil 57. Sürücü devresi baskı devre şeması.....	43
Şekil 58. Sürücü devresi.....	44
Şekil 59. Kontrol panosu.....	44
Şekil 60. Sistem çıkış işareti.....	46
Şekil 61. Tek panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi.....	48
Şekil 62. Tek panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi .....	49
Şekil 63. İki panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi .....	50
Şekil 64. İki panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi .....	51
Şekil 65. Üç panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi .....	53
Şekil 66. Üç panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi .....	53
Şekil 67. Dört panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi .....	56
Şekil 68. Dört panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi .....	56
Şekil 69. Beş panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi .....	59
Şekil 70. Beş panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi .....	60
Şekil 71. Altı panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi sonuçları.....	63
Şekil 72. Altı panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi .....	64

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. BJT yapısının çalışma şekilleri ve uçlarının tetiklenme durumları.....	19
Tablo 2. Açık çevrim Ziegler Nichols yöntemiyle PID parametrelerin bulunması.....	32
Tablo 3. Kapalı çevrim Ziegler Nichols yöntemiyle parametrelerin belirlenmesi.....	33
Tablo 4. Tyreus-Luyben Metoduyla parametrelerin belirlenmesi.....	34
Tablo 5. Cohen-Coon metoduyla parametrelerin belirlenmesi.....	34
Tablo 6. Ziegler-Nichols tanjant yöntemi ile bulunan PID parametreleri.....	47
Tablo 7. Kalibrasyon işleminden sonra elde edilen PID parametreleri.....	47
Tablo 8. Tek panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	49
Tablo 9. İki panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	51
Tablo 10. İki panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	52
Tablo 11. Üç panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	54
Tablo 12. Üç panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	54
Tablo 13. Üç panel durumu için sol panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	55
Tablo14. Dört panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	57
Tablo 15. Dört panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	57
Tablo 16. Dört panel durumu için sol panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	58
Tablo 17. Dört panel durumu için sağ panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	58
Tablo 18. Beş panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	60
Tablo 19. Beş panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	61
Tablo 20. Beş panel durumu için sol panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	61
Tablo 21. Beş panel durumu için sağ panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	62
Tablo 22. Beş panel durumu için ön panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	62
Tablo 23. Altı panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	64
Tablo 24. Altı panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	65
Tablo 25. Altı panel durumu için sol panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	65
Tablo 26. Altı panel durumu için sağ panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	66

Tablo 27. Altı panel durumu için ön panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	66
Tablo 28. Altı panel durumu için arka panel sıcaklık kontrolü basarım değerleri.....	67



## SEMBOLLER DİZİNİ

ADD	: Analog dijital dönüştürücü
BDAZG	: Birinci dereceden artı zaman gecikmesi
BJT	: İki kutuplu eklem transistör
$C$	: Santigrat
$e$	: Hata
$E$	: Hata
FET	: Alan etkili transistör
$I_B$	: Baz akımı
$I_{BQ}$	: Baz akımının çalışma noktası
$I_C$	: Kolektör akımı
$I_{CQ}$	: Kolektör akımının çalışma noktası
$I_D$	: Drain akımı
$I_{DSS}$	: Drain akımının doyum noktası
$I_E$	: Emitör akımı
IAE	: Hatanın mutlak değerinin toplamı
IGBT	: Yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör
ISE	: Hatanın karesinin toplamı
ITAE	: Hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı toplamı
ITSE	: Hatanın karesinin zaman ağırlıklı toplamı
K	: Sistem kazancı
$K_i$	: İntegral denetim kazancı
$K_p$	: Oransal denetim kazancı
L	: Ölü zaman
$m$	: Toplam kontrol işareti
MOSFET	: Metal oksit yarı iletkenli alan etkili transistör
P	: Oransal
PD	: Oransal türevsel
PI	: Oransal integral
PID	: Oransal Türevsel İntegral

$SiO_2$	: Silisyum dioksit
$T$	: Zaman sabiti
TF	: Transfer fonksiyonu
$U_d$	: Türevsel kontrol sinyali
$U_i$	: İntegral kontrol sinyali
$U_p$	: Oransal kontrol sinyali
$V_{ac}$	: Alternatif gerilim
$V_{BC}$	: Baz kolektör arası gerilim
$V_{BE}$	: Baz emitör arası gerilim
$V_{CE}$	: Kolektör emitör arası gerilim
$V_{CEQ}$	: Kolektör emitör arası gerilim çalışma noktası
$V_{\phi}$	: Çıkış işareti
$V_{DS}$	: Drain source arası gerilim
$V_{GS}$	: Gate source arası gerilim
$V_P$	: Tıkama gerilimi
$V_T$	: MOSFET kanlının tıkama gerilimi
$V_t$	: Çift yönlü iğne darbe işareti
$\beta$	: DC akım kazancı katsayısı
$\Delta$	: Değişim
$^{\circ}$	: Derece



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Elektrik fırınları sanayide ve günlük hayatta çok yaygın kullanılmaktadır ve *birinci dereceden artı zaman gecikmeli* (BDAZG) sistem olarak modellenmektedirler [1], [2]. Bu model doğrultusunda cihazın sıcaklık kontrolün de farklı teknikler kullanılmakla birlikte, *oransal integral türevsel* (PID) denetim, basitliği ve kararlılığı ile öne çıkmaktadır [3] – [5].

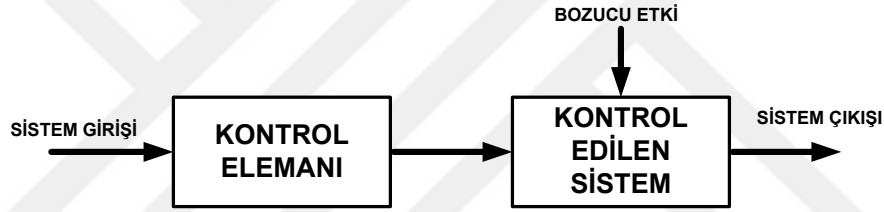
[6]'da televizyon resim tüpü için cam eritme fırını sıcaklık kontrolüne yönelik bulanık mantığın pratik bir uygulaması sunulmuştur. [7]'de endüstriyel bir kok fırınının sıcaklık kontrolü için yeni bir durum uzay yapısı kullanılarak geliştirilmiş bir model tahmin kontrolü önerilmiştir. [8]'de bir televizyon cam fırınının sıcaklık kontrolü için geleneksel çok çevrimli kontrol yönteminin pratik bir uygulaması sunulmuştur. [9]'da kendi kendine ayarlı kontrol sistemlerinin tasarımında kullanılmak üzere sürekli tavlama işlemlerinde ısıtma fırını modeli sunulmuştur. [10]'da oransal integral denetleyicilerin bir güneş fırınına uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar verilmiştir. [11]'de büyük ölçekli ortamlarda istenen sıcaklık bütünlüğünü elde etmek için bir akıllı oransal integral türevsel kontrol stratejisi sunulmuştur. [12]'de model simülasyon teknikleri kullanılarak fırın sıcaklığının hat programlanabilir kontrolünü elde etmek için geliştirilmiş bir prosedürü tartışılmıştır. [13]'de işlem girdisinin hem doygunluğu hem de ilerleme oranı seviyesindeki kısıtlara tabi olan iki sıcaklık değeri arasında bir minimum zaman geçişi elde etme amacı ile yeni bir kısıtlı kontrol stratejisi sunulmuştur. [14]'de termal ve gerilme analizlerine dayanarak farklı kontrol şemaları altında yığın fırınlarının hızlı sıcaklık rampaları araştırılmıştır. [15]'de rejeneratif itici tipi bir yeniden ısıtma fırınındaki bölge sıcaklıklarının ayarlanması sorununa bir çözüm olarak entegre bir kontrol yöntemini sunulmuştur. [16]'da yarı iletken üretimde kullanılan üç bölge endüstriyel difüzyon fırınının sıcaklık kontrolünde orantılı-integral-türev kontrolörlerin ayarlanması için yeni bir frekans döngü-şekillendirme tekniği uygulanmıştır.

Bu çalışmada bir elektrik fırının sayısal denetimi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar ışığında fırının üç boyutlu ısıtma başarımı irdelenmiştir.

## 1.2. Oransal Oransal İntegral ve Oransal Türevsel Denetim Yöntemleri

Tüm dünyada teknolojinin gelişmesiyle insan ve havyan gücüyle yapılan işler yerini makine gücüne bırakmıştır. Bu da hem gündelik işlerimizde hem de sanayi sistemlerinde insanoğlunun işlerini çokça kolaylaştırmıştır. Bu makineleşmenin yaygınlaşmasıyla sistemlerin en doğru ve en hassas şekilde kontrol edilmesi sorunu gün yüzüne çıkmıştır. Bu sebepten son yüzyılda kontrol sistemleri üzerine birçok çalışma yapılmış ve hala çalışmalar yapılmaktadır.

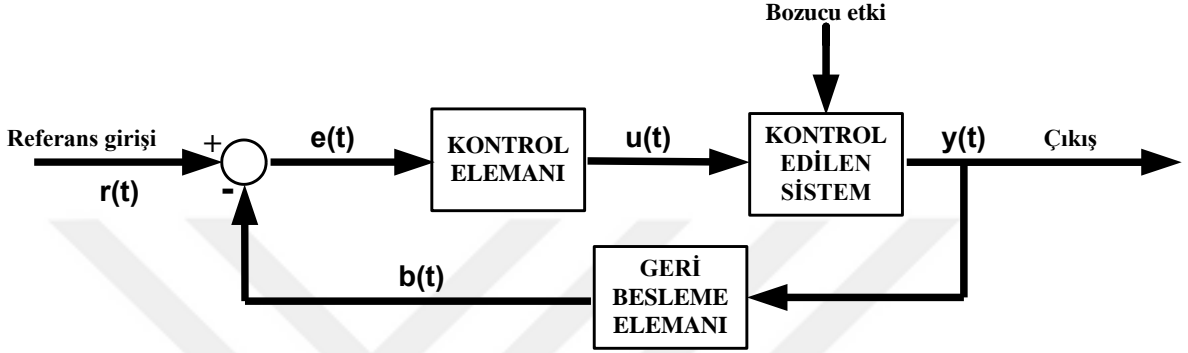
En kapsamlı şekilde kontrol sistemini ele alınacak olursak kontrol sistemi açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol sistemi olarak ikiye ayırabiliriz. Burada *açık sistem kontrol sisteminin* blok şeması Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Açık çevrim kontrol sistemi blok şeması

Şekil 1’de görüldüğü gibi açık çevrim kontrol sisteminde bir kontrol elemanı bir de kontrol edilecek sistem vardır. Burada sistem girişi kontrol elemanına verilir ve kontrol elemanı sistemi bu bilgiye göre kontrol ederek sistem çıkışı oluşturur. Yani açık çevrim kontrol sisteminde sistem girişi direk olarak sistem çıkışını kontrol eder. Sistem çıkışının giriş üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Sistem çıkışı girişle ilişkilidir ancak açık çevrim kontrol sistemlerinde sistem girişi sistemin çıkışından tamamen bağımsızdır. İşte bu şekildeki kontrol sistemlerine açık çevrim kontrol sistemleri denilmektedir. Bu tür sistemlerde giriş çıkıştan bağımsız olduğu için çok fazla sistem hassasiyeti beklenmemelidir. Ayrıcı açık çevrim kontrol sistemi kararsız yapıdaki bir sistemi kararlı bir yapıya dönüştüremez. Bu sebepten bu kontrol sistemi uygulanacak sistemlerin kararlı bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Kısaca açık çevrim kontrol sistemleri kararsız yapıdaki sistemlere uygulanamaz uygulanırsa bile istenen sonuçlar elde edilemez. Açık çevrim kontrol sisteminin bir başka olumsuz yönü ise sisteme dışarıdan gelen bozucu etkilere karşı hiçbir etkisi olmaz. Bu kontrol sistemi olumlu tarafı ise ucuz ve kullanımının kolay olmasıdır.

Kapalı çevrim kontrol sistemleri açık çevrim kontrol sistemlerinde istenilen verimlilik gösteremediği durumlarda kullanılır ve sistemin daha hassas ve daha kararlı sonuçlar elde etmesini sağlar. Bu sebepten kapalı çevrim kontrol sistemleri son yüzyılda üzerinde çokça çalışılan konuların başında gelmektedir. Şekil 2’de *kapalı çevrim kontrol* sisteminin blok şeması gösterilmektedir.



Şekil 2. Kapalı çevrim kontrol sistemi blok şeması

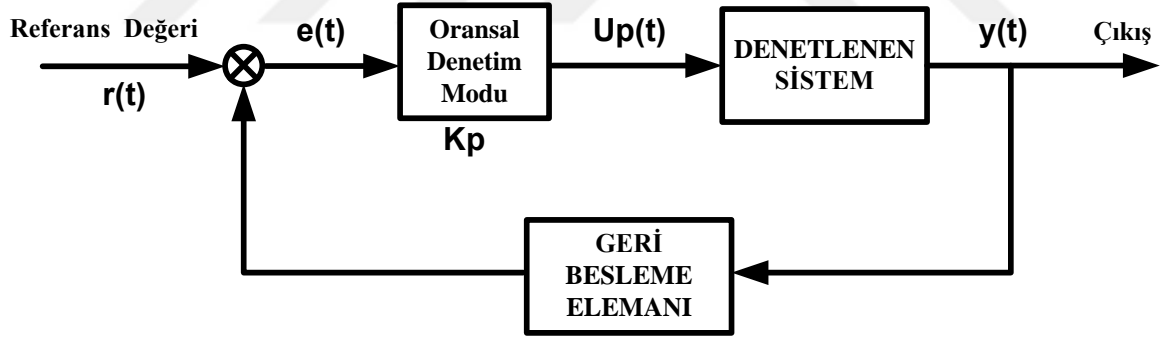
Şekil 2’de görüldüğü gibi kapalı çevrim kontrol sistemlerinde referans girişi, kontrol elemanı, kontrol edilen sistem ve geri besleme elemanı bulunmaktadır. Bu kontrol sisteminde sistem girişine bir referans işareti verilir. Bu referans işaretine göre sistemde bir çıkış bilgisi alınır. Bu çıkış bilgisi geri besleme elemanı yardımıyla referans girişiyle karşılaştırılır ve hata işareti oluşur. Bu hata işareti kontrol elemanı yardımıyla en aza indirgenerek sistemde beklenen kararlı çıkışın oluşması sağlanır. Böylece sistem kararlı bir şekilde çalışması sağlanır. Kısacası bu kontrol sisteminde hem giriş çıkışı etkiler ve hem de geri besleme elemanı sayesinde çıkış girişi etkiler. Bu sayede sistemin çıkış değeri ile referans değeri karşılaştırılarak sistemdeki hata ölçülerek sistemde oluşan hatalar en aza indirgenmesi sağlanır. Böylece sistem, daha hassas ve daha verimli şekilde kontrol edilebilir. Ayrıca dışarıdan gelen bozucu etkiler en aza indirgenir. Bu kontrol sistemi daha çok kararsız sistemlerin kontrollünde kullanılıp, kararsız sistemleri kararlı hale getirir. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinin olumsuz tarafı maliyetlerinin yüksek olması ve sistemde işlemsel yükünün açık çevrim kontrol sistemine göre çok fazla olmasıdır.

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde birçok denetim yöntemi bulunmaktadır. Ama kontrol yöntemi basitliği, kararlılığı ve uygulanabilirliğinden dolayı *oransal integral türevsel* (PID) kontrol sistemi endüstride çokça kullanılan bir kontrol yöntemidir. [16]’da

yarıiletken üretiminde kullanılan üç bölgeli endüstriyel difüzyon fırınlarının sıcaklık kontrolünde uygulanan PID denetleyicinin ayarlaması için frekans çevrimi şekillendirme tekniği önerilmiştir. [17]'de bir elektrik fırınının PID ile sıcaklık kontrolü mikro denetleyici kullanılarak yapılmıştır. [18]'de bir turbo tavlama fırınının sıcaklık kontrolü yapay sinir ağları ve PID kullanılarak gerçekleştirilmiştir. [19]'da bir cam fabrikasındaki rezistif ısıtma fırının denetimi yapay sinir ağları destekli PID ile yapılmıştır.

### 1.2.1. Oransal Denetim Yöntemi

Oransal denetim yöntemi uygulanmış kapalı çevrim kontrol sistemi blok şeması Şekil 3'de görülmektedir. Bu blok şemadan da anlaşılacağı gibi oransal kontrol de geri besleme yardımıyla referans işareti ve çıkış işareti karşılaştırılarak hata işareti oluşmaktadır [20]. Hata işareti oluştuğundan sonra bu hata işaretinin genlik değişimiyle orantısal olarak bir  $U_p(t)$  kontrol sinyali oluşur. Bu kontrol sinyali de denetlenen sistemin kazancı  $K_p$  kontrol edip sistemin denetlenip kontrolü sağlanır [21].



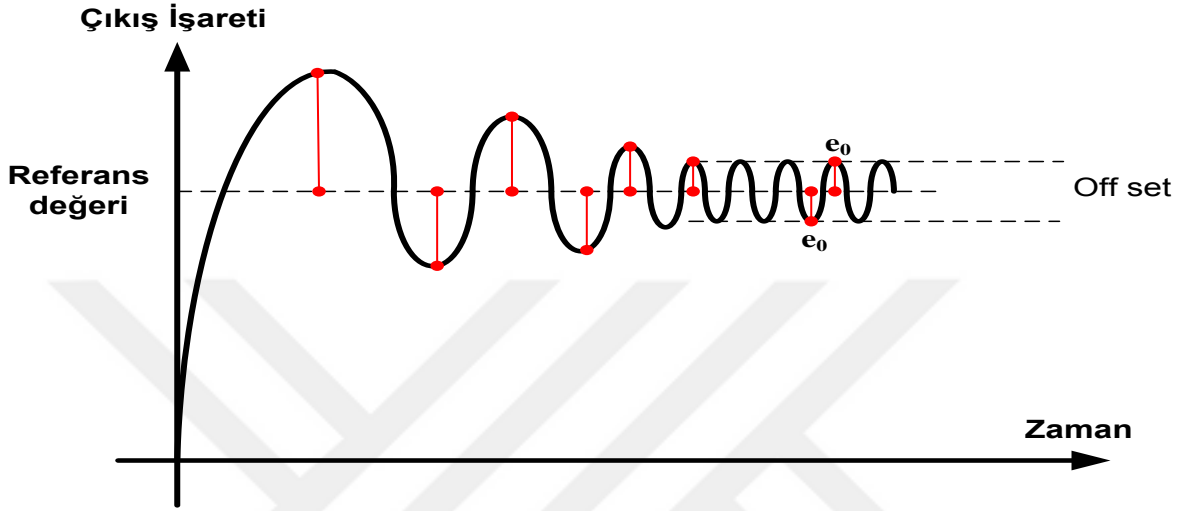
Şekil 3. Oransal denetimli kapalı çevrim kontrol sisteminin blok şeması

Şekil 4'deki çıkış sinyalini incelediğimizde çıkış sinyali referans değeri üzerinde ofset aralığında sapsamalar yapmaktadır. Bu da bir hata sinyali oluşturmaktadır.

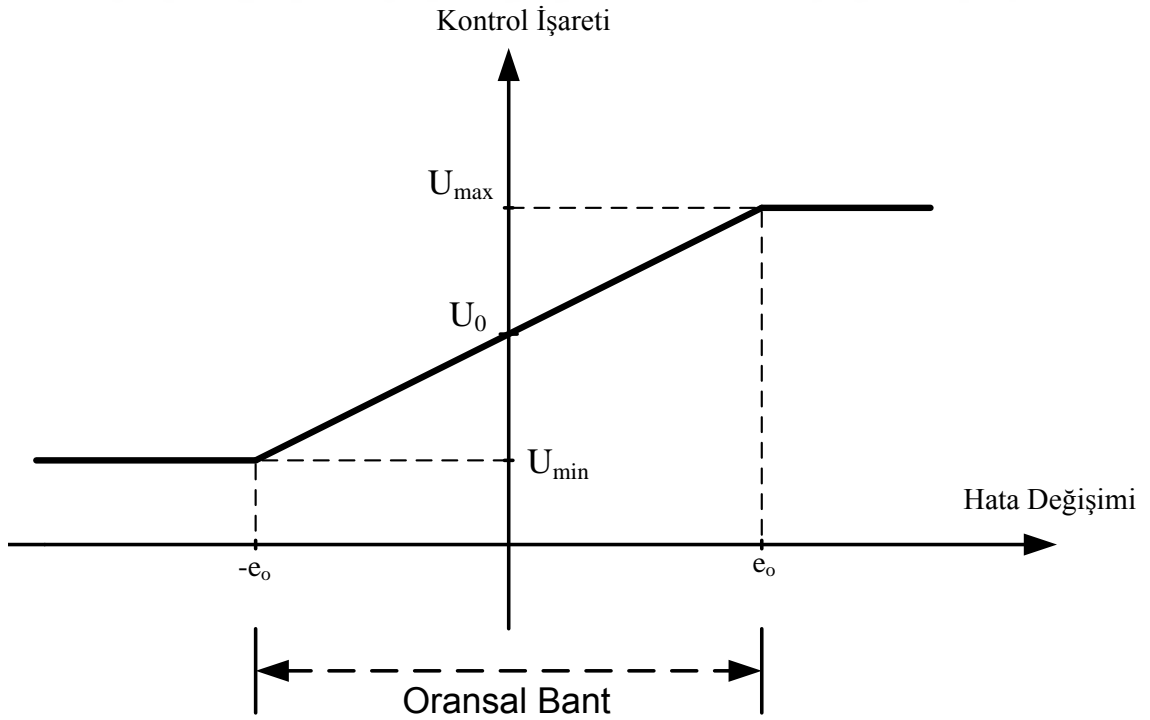
Hata sinyalinin büyük olduğu değerlerde büyük kontrol işaretleri, küçük olduğu değerlerde de küçük kontrol işaretleri üretilmektedir. Şekil 5'de hata değişimiyle orantılı oluşan kontrol işaretinin grafiği görülmektedir.

Şekil 5'deki grafikten anlaşılacağı gibi hata değişiminin büyük olduğu yerlerde büyük kontrol işareti hata işaretinin küçük olduğu yerlerde küçük kontrol işareti üretilerek

sitemin denetlenmesi sağlanır. Böylece hatanın genlik değeriyle orantısal olarak bir kontrol işareti üretilir [22]. Ama hata kontrol işareti belli bir bant aralığında kontrol edilebilmektedir. Bu kontrol aralığına oransal bant denilmektedir. Şekil 5’de bu aralık görülmektedir.



Şekil 4. Herhangi bir çıkış işaretinin zamanla değişim



Şekil 5. Hata değişimi/kontrol işareti grafiği

Şekil 5'deki grafikten (1) numaralı denklem elde edilir.

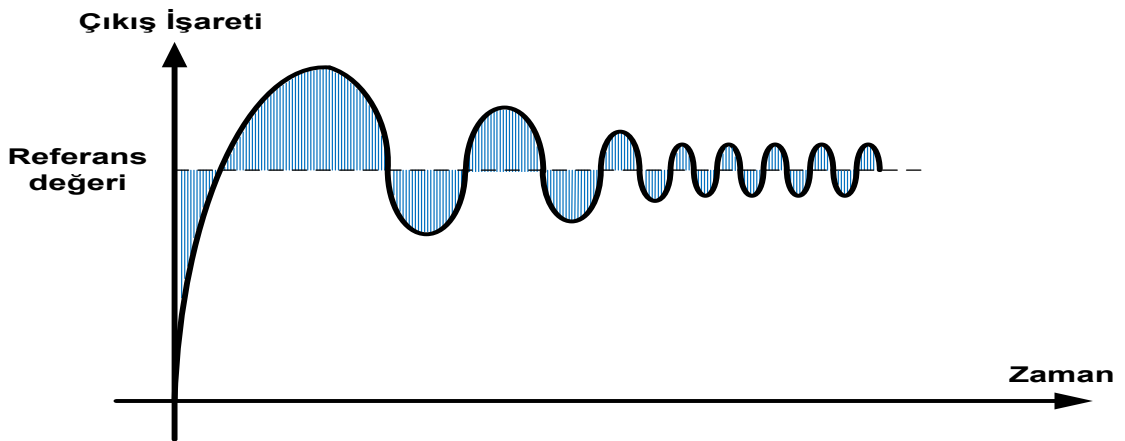
$$K_p = \frac{U_p}{\Delta e} \quad \text{ise} \quad U_p = K_p \cdot \Delta e \quad (1)$$

(1) numaralı denklem ele alındığında, oransal denetim yönteminde hatanın işaretinin genliğiyle orantılı olarak bir kontrol işareti üretilir [23]. Bu işaret kullanılarak sistemin kontrolü sağlanır.

### 1.2.2. Oransal İntegral Denetim Yöntemi

PI denetim yönteminde hem hatanın oransal denetimi ve hem de integral işlevinden doğan bilgisi kullanılıp sistem kontrolü elde edilir [16]. PI denetim yöntemini daha iyi anlamak için önce integral denetim inceleyelim. Şekil 6'da bir hata işareti görülmektedir.

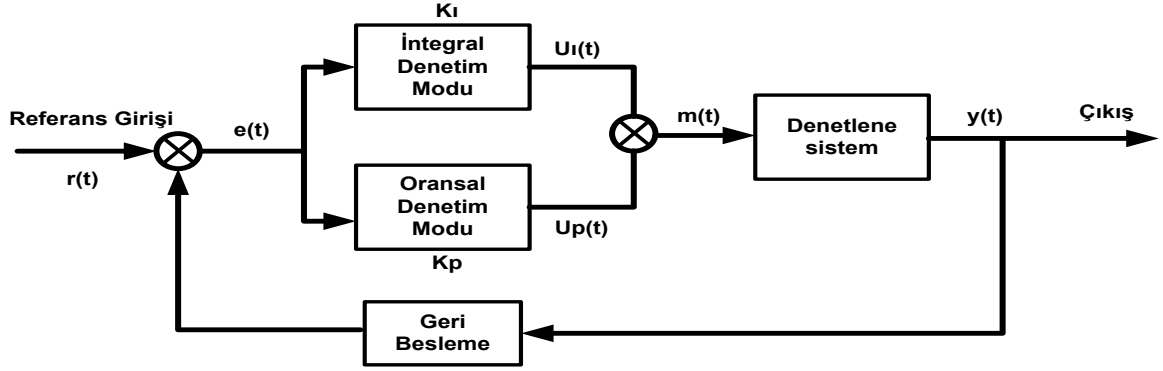
Şekil 6'da çıkış işareti ile referans işareti arasında kalan bölge hata işaretini oluşturur. Bu bölgenin integrali alınarak, oluşturulan bilginin kullanılmasıyla bir kontrol işareti  $U_I(t)$  işareti elde edilir [24]. Bu işaret kullanılarak sistem kontrolü sağlanır. Bu şekilde yapılan kontrol yöntemine *integral yöntemi* adı verilir. (2) numaralı denklemde integral yönteminin matematiksel formülü gösterilmiştir.



Şekil 6. Herhangi bir çıkış işaretinin zamanla değişim

$$U_I(t) = K_I \int e(t) dt \quad (2)$$

Şekil 7’de PI denetimli kapalı çevrim blok şeması görülmektedir.



Şekil 7. PI denetimli kapalı çevrim blok şeması

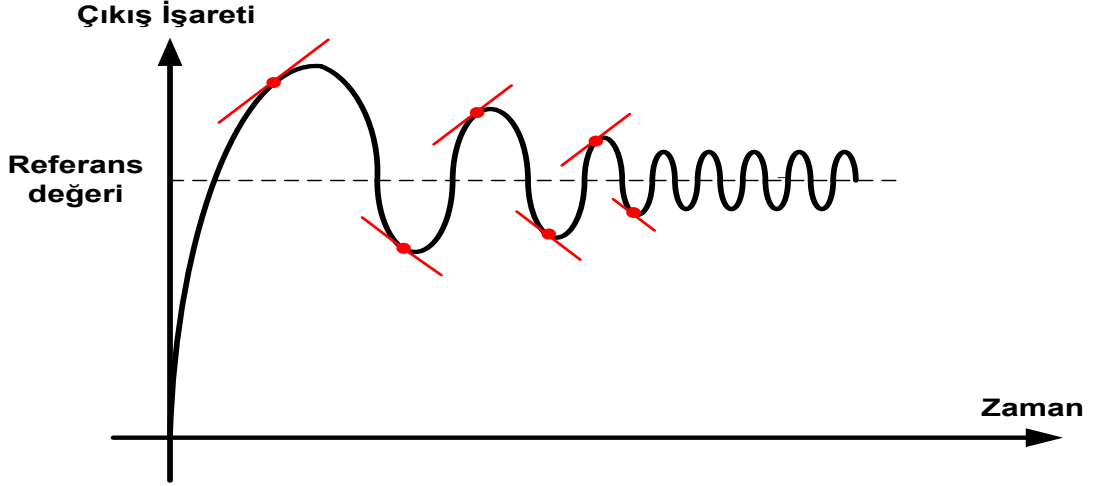
Şekil 7’deki blok şekil incelendiğinde, çıkış işareti ile referans işareti arasında farktan hata işareti elde edilir. Sonra elde edilen hata işareti sırasıyla integral denetim moduna  $U_I(t)$  ve oransal kontrol moduna girip  $U_p(t)$  kontrol işaretleri elde edilir. Ardından bu iki işaret toplanıp,  $m(t)$  işareti elde edilir. Böylece  $m(t)$  işaretiyle de sistem denetlenip, kontrolü sağlanır. PI denetim yönteminin matematiksel formülü (3) numaralı denklemde verilmiştir [25].

$$U_I(t) + U_p(t) = K_I \int e(t)dt + K_p e(t) \quad (3)$$

(3) numaralı formülden anlaşılacağı gibi  $e(t)$  hata işaretinin hem oransal hem de integral ile kontrol edilerek sistem denetlenmesi sağlanıp sistemin karalı hale getirilmesi sağlanır [26], [27].

### 1.2.3. Oransal Türev Denetim Yöntemi

PD denetim yönteminde oransal denetim hem oransal denetim ve hem de türevsel denetim yöntemi kullanılarak, sistem kontrolü sağlanır [28]. PD denetim yöntemini anlayabilmek için öncelikle türevsel denetim yönteminin incelenmesi gerekmektedir [29]. Şekil 8’deki çıkış işaretini inceleyelim.

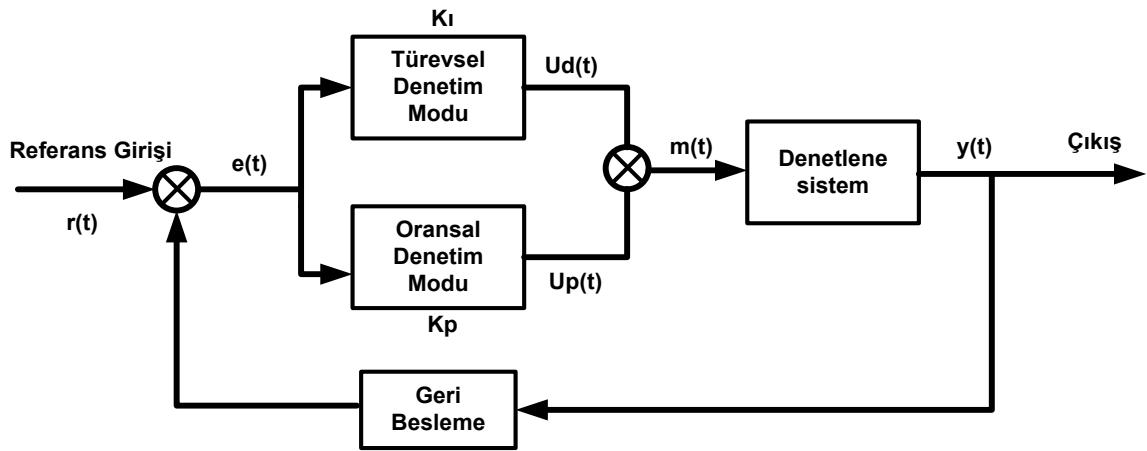


Şekil 8. Herhangi bir çıkış işaretinin zamanla değişim

Şekil 8’de referans değeri ile çıkış işareti arasındaki hata işaretinin her bir  $t$  anındaki eğimleri hesaplanır. Yani anlık değişim sürelerinin bulunmasıyla  $U_d(t)$  kontrol işareti elde edilir. Bu kontrol işaretiyle sistem denetimi yapıp, sistemin karalı bir şekilde kontrol edilir. İşte bu denetim türüne *türevsel kontrol yöntemi* denir [30]. (4) numaralı denklemde türevsel kontrolün matematiksel denklemi verilmektedir [31].

$$U_d(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Şekil 9’da PD denetimli kapalı çevrim blok şeması gösterilmektedir.



Şekil 9. PD denetimli kapalı çevrim blok şeması



Şekil 9'daki blok şeklini incelediğimizde çıkış işareti ile referans işareti arasında farktan hata işareti elde edilir. Daha sonra elde edilen hata işareti sırasıyla türevsel denetim moduna girip,  $U_d(t)$  ve oransal kontrol moduna uygulanıp,  $U_p(t)$  kontrol işaretleri elde edilir. Daha sonra bu iki işaret toplanarak,  $m(t)$  işareti elde edilir. Böylece  $m(t)$  işareti ile sistem denetlenip kontrolü sağlanır. PI denetim yönteminin matematiksel formülü (5)'de verilmiştir.

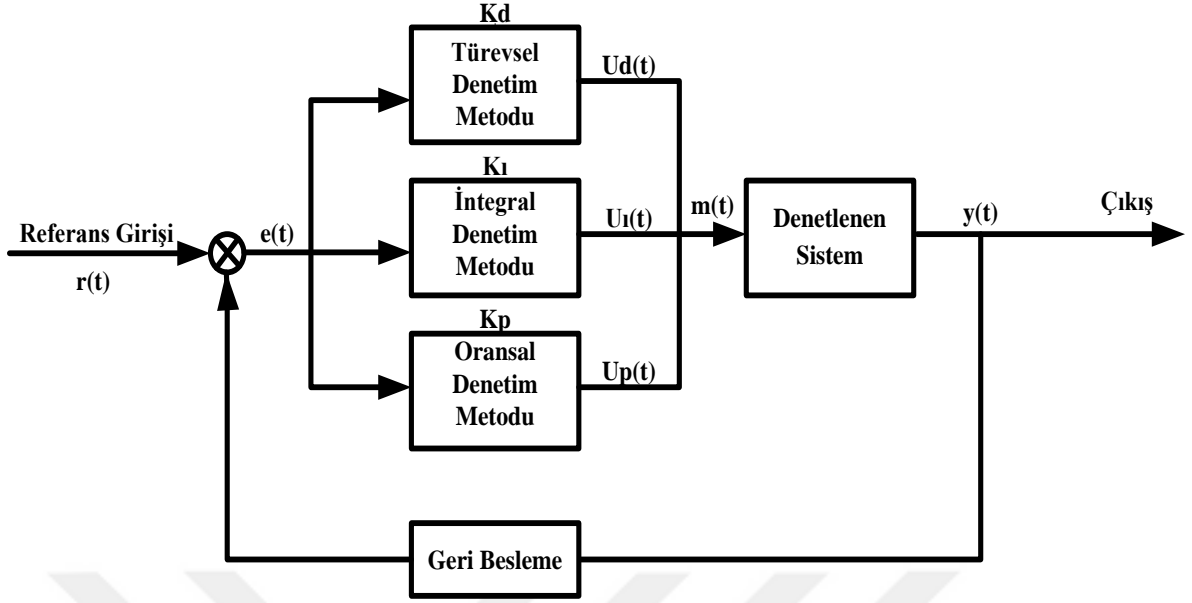
$$U_d(t) + U_p(t) = \frac{de(t)}{dt} + K_p e(t) \quad (5)$$

(5) numaralı formülden de anlaşılacağı gibi  $e(t)$  hata işaretinin hem oransal ve hem de türevsel olarak kontrol edilerek sistem denetlenmesi sağlanarak, sistem karalı hale getirilir.

#### 1.2.4. Oransal İntegral Türev Denetim Yöntemi

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde sistem hassasiyeti kullanım pratikliği gibi nedenlerden dolayı PID denetim yöntemi yaygın kullanılan bir denetim yöntemidir. PID kontrol sistemi genellikle kararsız sistemlerin kontrolünde kullanılır [32]. Bu denetim yönteminde oransal türevsel ve integral yöntemlerinin üçü bir arada kullanılarak elde edilen bir kontrol yöntemidir [33]. Burada integral kısmı sistemde oluşan büyük değişimlerde hata sinyalinin ofsetini en aza indirmek ve ortadan kaldırmak için kullanılır. Türev kısmı ise genelde ani değişimlerde oluşacak hatayı azaltmak için kullanılır. Böylelikle sistemde oluşabilecek durumlara karşı PID yöntemiyle hata istenilen sınırlar içinde tutulur [34]. Şekil 10'da PID denetimli kapalı çevrim blok şeması gösterilmektedir.

Şekil 10'daki blok şemadan da anlaşıldığı gibi çıkış işareti ile referans işareti arasındaki farktan hata işareti elde edilir. Hata işareti türevsel, oransal ve integral denetim yöntemlerinden geçtikten sonra  $U_d(t)$ ,  $U_i(t)$  ve  $U_p(t)$  işaretleri elde edilir. Bu işaretler toplanıp  $m(t)$  işareti bulunur. Elde edilen bu işaretler kullanılarak, sistem denetlenir ve kontrolü sağlanır. PID denetim yönteminin matematiksel formülü (6) numaralı denklemde verilmiştir [35].



Şekil 10. PID denetimli kapalı çevrim blok şeması

$$U_d(t) + U_i(t) + U_p(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt + K_p e(t) \quad (6)$$

(6) numaralı formülün Laplace dönüşümü alınarak (7) numaralı formül elde edilir.

$$U_d(s) + U_i(s) + U_p(s) = K_d \frac{E(s)}{s} + K_i E(s) + K_p E(s) \quad (7)$$

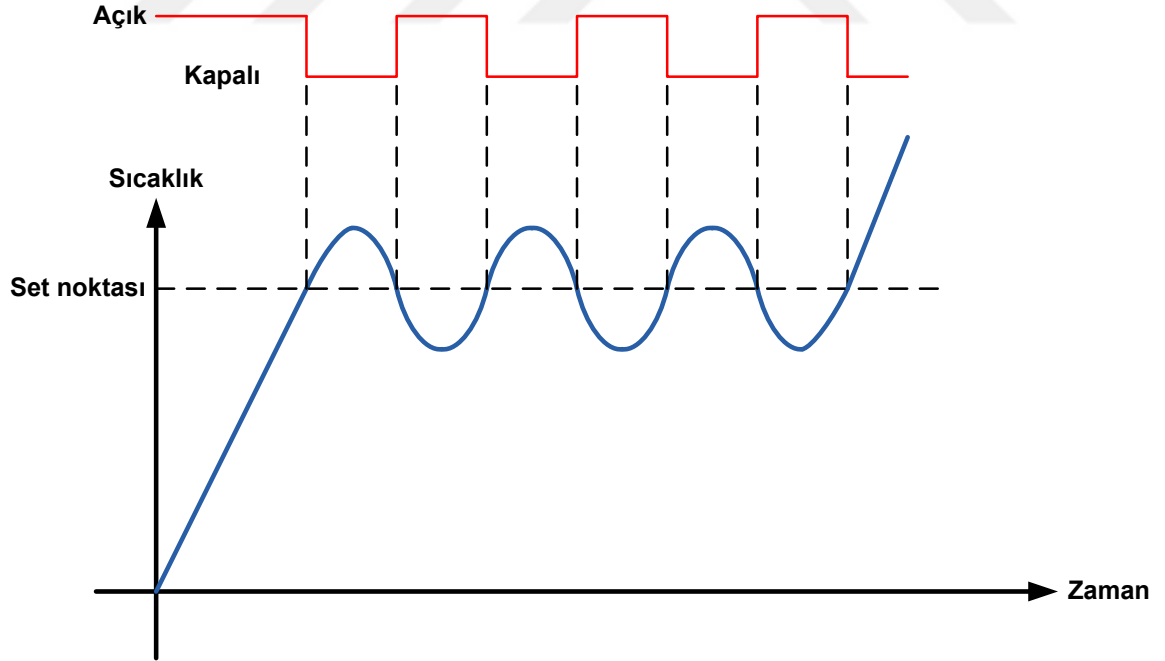
(7) numaralı formül düzenlenerek, PID sistemin transfer fonksiyonu elde edilir. PID denetim sisteminin transfer fonksiyonu (8)'de verilmiştir.

$$TF = \frac{U_d(s) + U_i(s) + U_p(s)}{E(s)} = \frac{K_d}{s} + K_i + K_p \quad (8)$$

Bir sistemin PID ile denetlenip kontrolü sağlanırken (8) numaralı transfer formülü kullanılır [36]. Burada sistem parametreleri  $K_d$ ,  $K_i$ , ve  $K_p$  parametreleri ayarlanır. Böylece sistem hatası en aza indirilerek, kontrol sağlanır [37], [38].

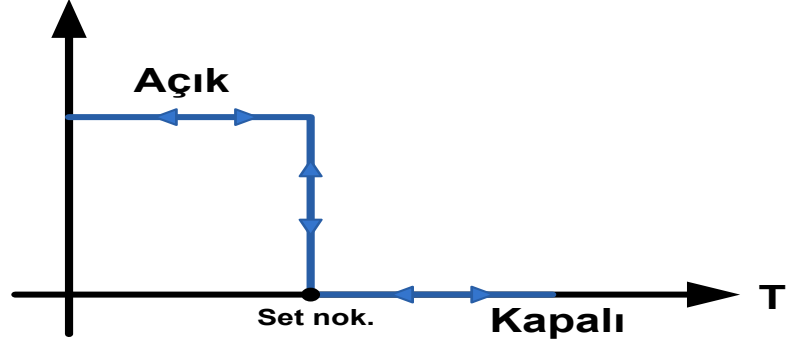
### 1.3. Açık-Kapalı Kontrol

Açık-kapalı kontrol sistemi en basit kontrol yöntemidir ve günümüzde sanayide ve günlük yaşamımızda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır [39]. Bu sistem ısıtıcılarda, klimalarda, fırınlarda, kombilerde ve bunun gibi daha birçok sıklıkla kullandığımız cihazlarda bulunur. Açık-kapalı kontrol yöntemi çalışma prensibi çok basittir. Açık-kapalı kontrol yönteminde çalışılacak sistemin durumuna göre bir set noktası belirlenir. Eğer sistem bu set noktasının altında bir değere sahipse sisteme çalışmaya devam eder yok eğer sistem set noktasından daha büyük bir değer üretirse sistem çalışmayı durdurur ve sistemi set noktasında sabitlemeye çalışır [40]. Açık-kapalı kontrol en iyi ısı kontrol üzerinden anlaşılır. Örnek verecek olursak bir ısı sistem için set noktası 30 °C belirleyelim. Bu değer altında ısıtıcı ısıtmaya devam edecektir. Ama bu değer üstüne çıktımı ısıtma işlemini kesip sistemi set noktasına sabitlemeye çalışacaktır. Şekil 11’de bir sıcaklık işaretinin sinyal grafiği gösterilmiş ve açık kapalı kontrol sistemine göre sistemin ideal açık ve kapalı durumları belirtilmiştir.



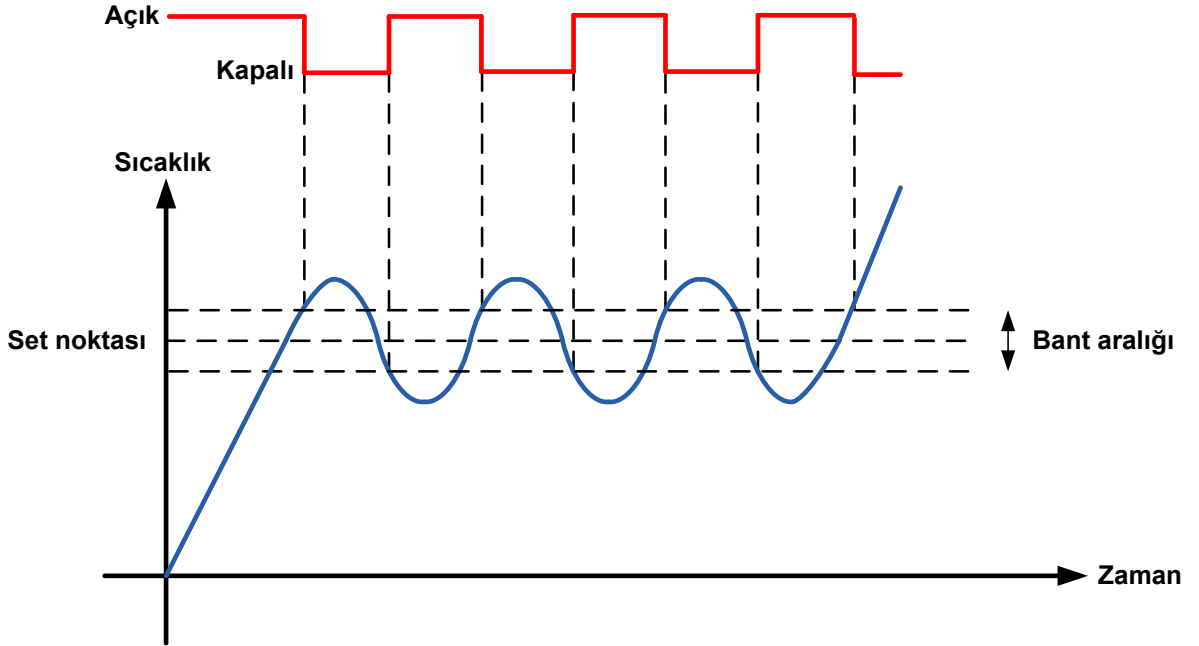
Şekil 11. Açık-kapalı yöntemiyle ideal sıcaklık kontrolü

Şekil 12’de ideal açık kapalı sistemin transfer eğrisi gösterilmektedir.



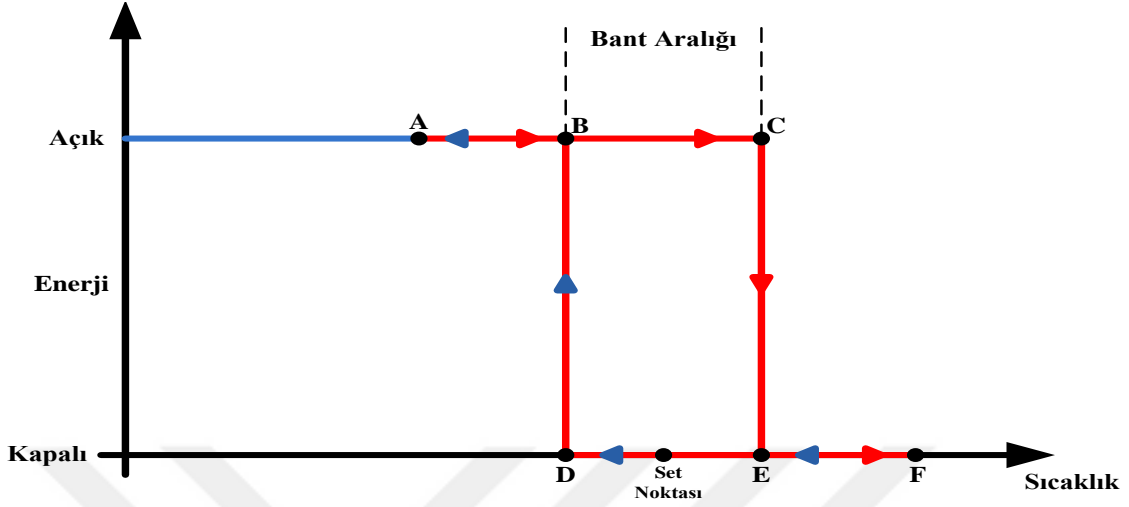
Şekil 12. İdeal açık-kapalı kontrol transfer eğrisi

Şekil 12'deki transfer eğrisinden de görüleceği gibi ideal açık kapalı kontrol sisteminde bir ara değer yoktur. Yani sistem belli bir set noktası da osülasyona girerek sürekli açma ve kapama işlemi yapar. Bu sürekli açma kapama işlemi sırasında kullanılan sistemin ve sistemi oluşturan elemanlarının ömürlerinin azalmasına neden olur. Bu nedenden dolayı sistem set değerinin altında ve üstünde bir bant aralığı veya histerisiz oluşturulup sistemin sürekli aç kapama yapması önlenir [41]. Şekil 13'de bir sıcaklık işaretinin sinyal grafiği gösterilmiş ve açık kapalı kontrol sistemine göre sistemin histerisiz açık ve kapalı durumları belirtilmiştir.



Şekil 13. Açık-kapalı yöntemiyle histerisizli sıcaklık kontrolü

Şekil 14’de histeresizli açık-kapalı sistemin transfer eğrisi gösterilmektedir.

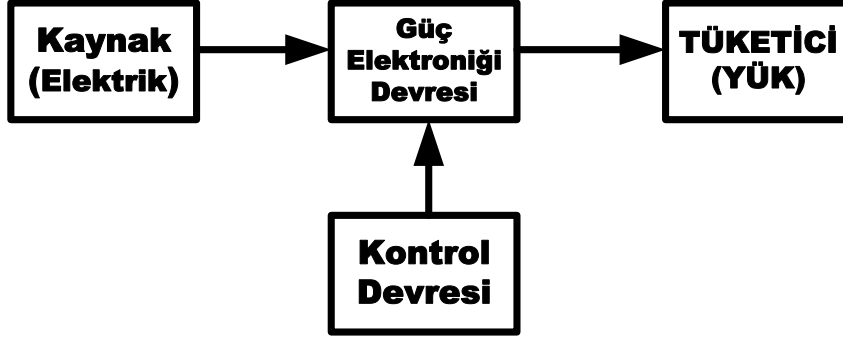


Şekil 14. Açık-kapalı sistem histeresizli transfer eğrisi

Şekil 14’deki transfer eğrisini incelediğimizde sistem açık konum çalışırken sıcaklık artırıldığı zaman sistem karakteristiği kırmızı oku takip eder. Yani A, B, C, E ve F noktalarını takip eder. Sistem kapalı durumdayken sıcaklık düşürülürse sistem karakteristiği mavi oku takip eder. Yani F, E, D, B, A noktalarını takip eder. Buradan da görüleceği gibi sistem ideal karakteristikte ki gibi set noktası etrafında aç-kapa yapmaz. Histeresizli aç-kapa sistemde set noktası altında ve üstünde belirlediğimiz bant aralığı sayesinde sistem osilasyonu engellenir. Böylece sistemin daha doğru çalışması sağlanır ve sistem elemanlarının ömürleri uzatılmış olur. Bu kontrol sistemi sıcaklık, basınç, hız, ivme, konum gibi parametrelerin kontrolünde de kullanılabilir.

#### 1.4. Güç Elektroniği

Dünyada 18. ve 19. Yüzyıllardaki sanayi devrimi ile insan gücünün yerini makine gücü almaya başlamıştır. Bu dünyadaki büyük değişimle makineleşme hızla artmaya başlamıştır. Makineleşmenin hızlı artışıyla sanayide makinelerin daha doğru ve hassas kullanımı önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu sorunun çözümü için güç elektroniği yani elektriğin kontrolünün sağlanması gerektiğinin farkına varılmıştır. Şekil 15’de güç elektroniğinin genel blok şeması gösterilmektedir.



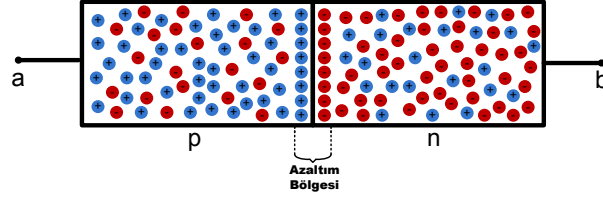
Şekil 15. Güç elektroniği blok şeması

Elektrik kontrolü ilk olarak 1900’lü yıllarda elektron tüplerinin geliştirilmesiyle başlamıştır. Elektron tüplerinin boyutlarının büyük, maliyetlerinin fazla ve hassasiyetlerinin az olması nedeniyle çok verimlik sağlayamamışlardır. 1950’li yıllarda yarı iletken malzemelerin bulunmasıyla güç elektroniği alanında yepyeni bir başlangıç oluşturdu. Yarı iletken malzemelerle diyot transistor gibi elemanlar oluşturularak güç elektroniği sistemlerinin daha verimli çalışması sağlandı. 1960’lara gelindiğinde diyot ve transistorun yüksek güçte verimli olmamasından dolayı tristör geliştirildi. Tristörün bulunması ile yüksek güçlü elektronik sistemlerin daha verimli olarak kontrolü sağlanmıştır. 1980’li yıllara gelindiğinde artık güç elektroniği sistemleri sayısal elektronik ve mikroişlemci tabanlı bir yapı almaya başlamıştır. Böylece güç elektroniği sistemlerinin çok daha hızlı kontrolü sağlanmış ve maliyetleri çok daha uygun hale getirilmiştir. Günümüzde hali hazırda güç elektroniği konusu çok önemli bir araştırma alanı olup, halen bu alanda yeni araştırmalar yapılmaktadır.

## 1.5. Güç Elektroniği Elemanları

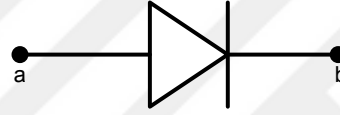
### 1.5.1. Diyot

1950’li yıllarda  $n$  tipi ve  $p$  tipi malzemelerin birleştirilmesiyle diyot yapısı oluşturulmuştur. Sadece çoğunluk taşıyıcısı elektronlar ( $n$  tipi) ve çoğunluk taşıyıcısı delik ( $p$  tipi) olan iki malzeme birleştirilerek diyot elde edilmiştir. Şekil 16’da  $p$  ve  $n$  eklemlerinin birleşimiyle oluşturulmuş diyot yapısı görülmektedir.



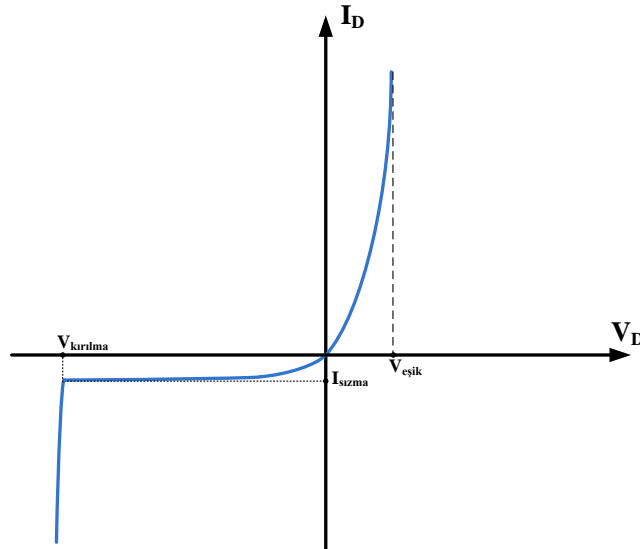
Şekil 16. Diyotun p ve n eklem yapısı

Şekil 16'da görüldüğü gibi  $p$  ve  $n$  yapılarını birleştirildiğinde bir azaltım bölgesi oluşur. Bu azaltım bölgesini  $a$  ve  $b$  uçlarını uygun şekilde kutuplanarak iletme sokulur. Böylece diyot istenildiği zaman iletme sokulup, istenildiği zaman tıkama durumuna alınabilir. Bu sayede elektrik akımının kontrolü yapılmış olunur. Şekil 17'de diyotun elektriksel sembolü verilmiştir.



Şekil 17. Diyotun elektriksel sembolü

Güç elektroniğinde sistem gereksinimlerine göre özel olarak tasarlanmış doğrultucu, kompüter, regülatör, varaktör, PIN, TUNEL, SCHOTTKY ve engel diyotları sanayide kullanılmaktadır. Şekil 18'de bir diyotun en genel karakteristik eğrisi gösterilmektedir



Şekil 18. Diyotun karakteristik eğrisi

Şekil 18'deki diyotun karakteristik eğrisini incelediğimizde gördüğümüz gibi bir diyotu ileri kutupladığımız zaman iletme geçirmek için belir bir eşik geriliminin üzerine çıkarmak gerekmektedir. Bu eşik gerilimi üzerine çıkıldığı anda diyot iletme geçip elektrik akımını iletme geçirir. Gene bu karakteristikten anlaşılacağı gibi ters yönde kutuplandığında çok az miktarda da olsa bir sızma akımı dediğimiz akım akışı gerçekleşir. Gene diyotu ters kutupladığımızda belli bir gerilim seviyesinden sonra diyotta kırılma oluşur ve diyot işlevliliğini yitirip akım akıtmaya başlar. Bu gerilim seviyesine kırılma gerilimi denir. Bir diyotun sızma akımı ve eşik gerilimi sıfıra ne kadar yakınsa ve kırılma gerilimi sonsuza ne kadar yakınsa diyot o kadar ideale yakın olur. Yani ideal diyotun sızma akımı ve eşik gerilimi sıfırdır ve kırılma gerilimi sonsuzdur.

Diyot elemanın sadece akımı iletme ve akımı kesme görevi vardır. Akımın büyüklüğünde bir değişiklik yapamaz. Bu nedenden akım büyüklüğün kontrol eden gene 1950'li yılların başın da transistor elemanı geliştirildi.

### 1.5.2. Transistor

1950 yıllarda yarı iletken malzemelerin bulunmasıyla transistor elemanı geliştirilmiştir. Daha önce ki yıllarda elektron tüpleri kullanımıyla yapılan işler transistor elemanının geliştirilmesiyle çok daha verimli ve uygun maliyetlerde uygulanmaya başlanmıştır. Transistor elemanını ile diyottan farklı olarak akım büyüklüğü arlanabilir. Diyotlarda sadece akım ya iletme sokulur ya da tıkamaya sokulur. Transistor yapısı diyot yapısının gelişmiş bir şeklidir. Transistor BJT, FET, MOSFET ve IGBT olmak üzere dört gruba ayırabiliriz.

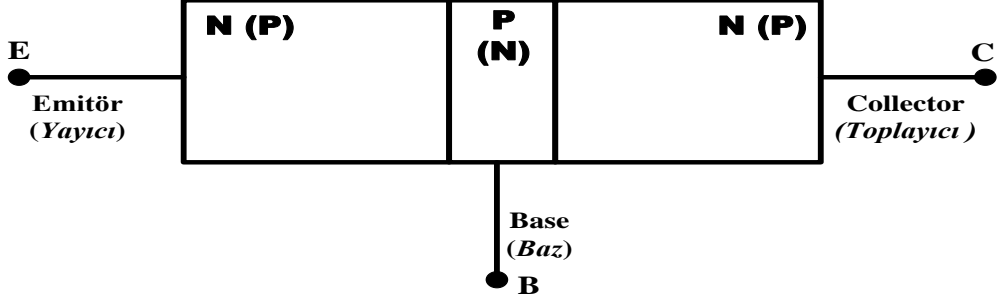
#### 1.5.2.1. BJT

BJT yani eklem transistorları  $p$  ve  $n$  eklemlerinin  $n-p-n$  veya  $p-n-p$  şeklinde eklenerek oluşturulur. Şekil 19'da transistor elemanının  $p$  ve  $n$  eklem yapısı gösterilmektedir.

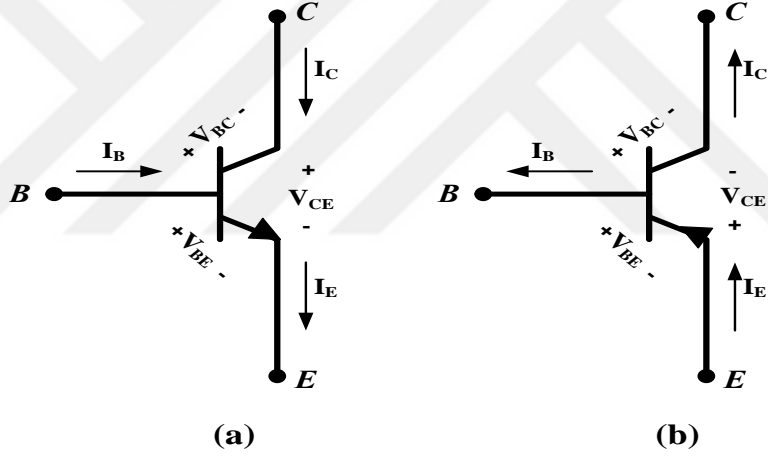
Şekil 19'da görüldüğü gibi transistor yapısının üç ucu vardır. Bu uçlar emetör (*yayıcı*), kollektör (*toplayıcı*) ve baz uçlarıdır. Burada emetör ucundan uygulanan gerilim sayesinde elektronlar harekete geçer. Normal şartlarda elektronlar baz ucundan devresi tamamlaması gerekirken devreyi kollektör ucundan tamamlar ve akımın bir kısmı baz



ucundan giderek akım büyüklüğü ayarlanır. Şekil 20’de BJT elemanın elektriksel sembolü gösterilmektedir.



Şekil 19. BJT elemanın *p* ve *n* eklem yapısı



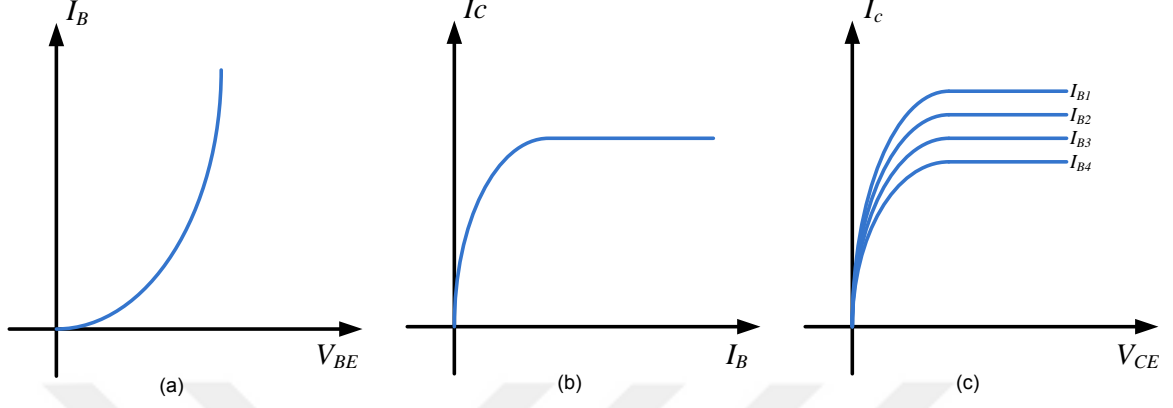
Şekil 20. a) *n-p-n* kanallı BJT elektriksel sembolü  
b) *p-n-p* kanallı BJT elektriksel sembolü

Şekil 20 kullanılarak (9) elde edilir.

$$I_E = I_B + I_C \quad \text{ve} \quad \beta = I_C / I_B \quad \text{ve} \quad 50 \leq \beta \leq 200 \quad (9)$$

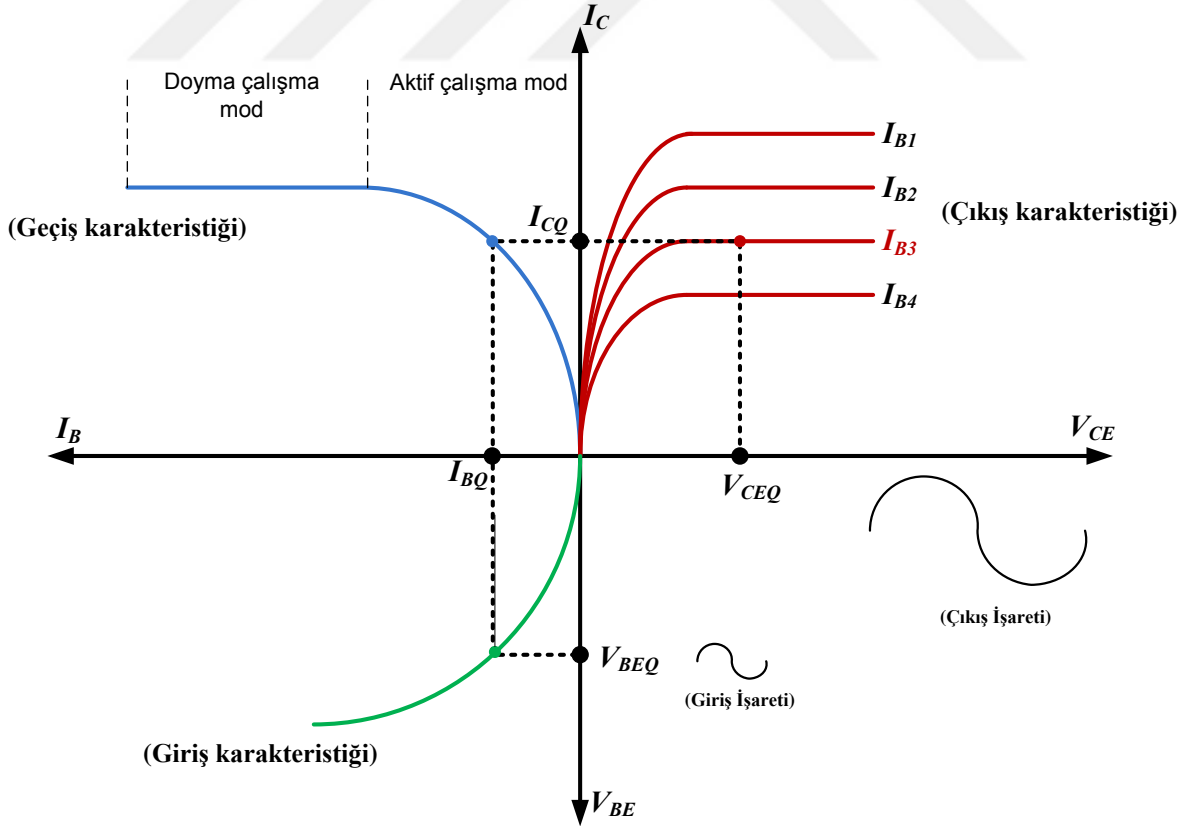
Burada  $I_C$  kollektör ucundan akan akım,  $I_E$  emitörden akan akım,  $I_B$  baz akımından akan akım,  $V_{BC}$  baz-kollektör arası gerilim,  $V_{CE}$  kollektör-emetör arası gerilim,  $V_{BE}$  baz-emetör arası gerilim ve  $\beta$  DC akım kazancı katsayısıdır. Bu katsayı üretici firma tarafından

$p$  ve  $n$  eklemlerinin oranlarına göre ayarlanır. Şekil 21’de BJT elemanın transfer karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 21. a) BJT giriş karakteristiği b) Geçiş karakteristiği c) Çıkış karakteristiği

Şekil 21’deki üç karakteristiği birleştirilerek BJT Şekil 22’de en genel transfer karakteristiği elde edilir.



Şekil 22. BJT en genel transfer karakteristiği

Şekil 22’de BJT yapısının giriş, geçiş, çıkış transfer karakteristikleri toplu olarak gösterilmektedir. Burada  $Q$  noktası BJT’nin çalışma noktasıdır. Burada  $Q$  noktasında BJT yapısı çalıştırıldığında zayıf olan ve kuvvetlendirilmesini istediğimiz giriş işareti devrenin girişine uygulanır. Bu işlemden sonra giriş işaretinin büyüklüğüyle orantılı  $V_{BE}$  değerinde değişim olur. Bu değişimde  $I_{BQ}$  çalışma noktasını değiştirir.  $I_{BQ}$  çalışma noktası da  $\beta$  değerine göre  $I_{CQ}$  çalışma noktasını değiştirir.  $I_{CQ}$  noktası da  $V_{CEQ}$  çalışma noktasını etkileyerek sistemin çıkış işaretini oluşturur. Bu işlem sonunda şekil 22’de de görüldüğü gibi giriş işareti kuvvetlendirilerek çıkış işareti oluşturulur. Bu işlem yapılırken dikkat edilmesi gereken BJT yapısının aktif moda çalıştırılmasıdır. BJT uçlarının tetiklenmesine göre sistemin çalışma modu belirlenir. Tablo 1’de BJT yapısının uçlarının tetiklenme durumları ve çalışma modları gösterilmektedir.

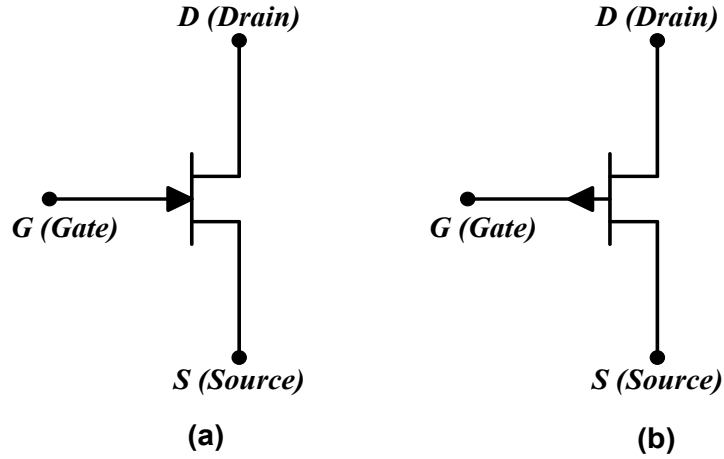
Tablo 1. BJT yapısının çalışma şekilleri ve uçlarının tetiklenme durumları

<b>Çalışma Şekli</b>	<b>B-E Eklemi</b>	<b>B-C Eklemi</b>
Tıkama modu	Ters Kutuplama	Ters Kutuplama
Akit mod	Doğru Kutuplama	Ters Kutuplama
Doyma modu	Doğru Kutuplama	Doğru Kutuplama

Tablo 1’deki gibi BJT uçları tetiklenerek sistem modu belirlenir ve sistem çalışma noktası belirlenerek giriş işareti kuvvetlendirilerek çıkış işareti oluşturulur.

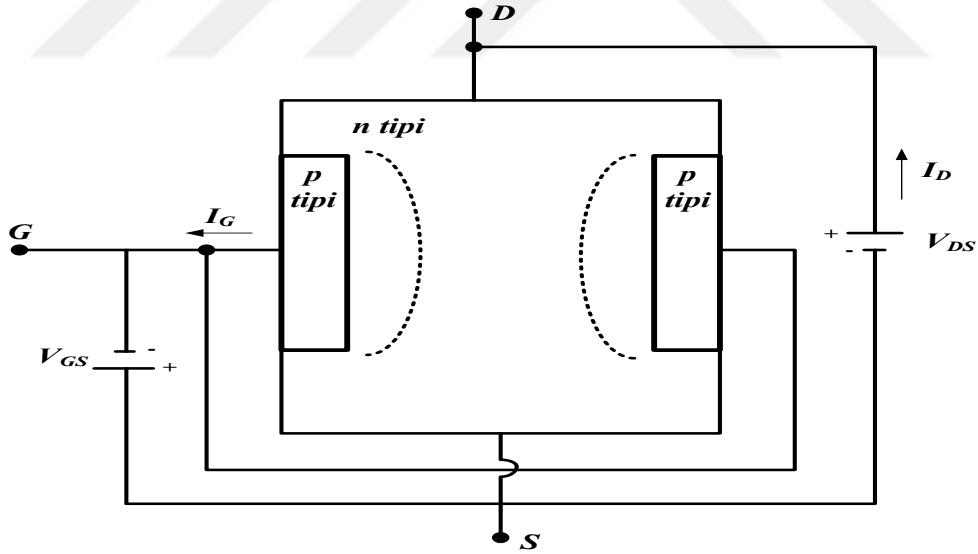
### 1.5.2.2. FET

BJT yapılarının hız verimlilik ve kullanım olanakları bakımından yetersiz olduğu durumlar için FET yapısı geliştirilmiştir. Bu yapıda BJT den farklı olarak bir giriş akımına ihtiyaç duymazlar. Daha hızlı bir yapıya sahiptirler. BJT yapısı akımı akıma çevirirken FET yapısı gerilimi akıma çevirir ve devre yapıları daha sadedir. Şekil 23’de FET yapısının elektriksel sembolü gösterilmektedir.



Şekil 23. a)  $n$  kanallı JFET elektriksel sembolü  
b)  $p$  kanallı JFET elektriksel sembolü

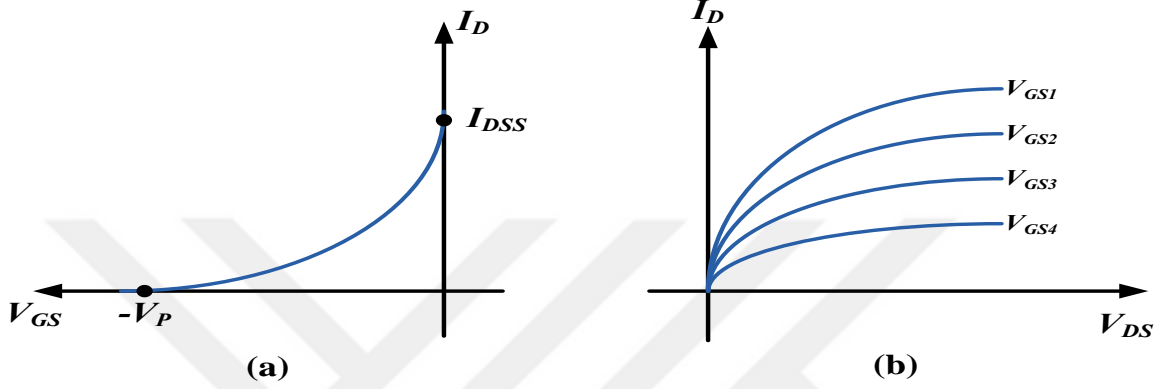
FET yapıları ana gövdede kullanılan yarı iletken cinsine göre adlandırılır. Eğer ana gövde de  $n$  tipi yarı iletken kullanılırsa  $n$  kanallı eğer  $p$  tipi yarı iletken kullanılırsa  $p$  kanallı olarak adlandırılır. Şekil 24’de FET yapısının  $n$  ve  $p$  eklem yapısı gösterilmektedir.



Şekil 24. FET elemanın  $n$  ve  $p$  eklem yapısı

Şekil 24 incelediğimiz de Gate-Source arasına  $-V_{GS}$ , Drain-Source arasına  $+V_{DS}$  uygulanmıştır. Bu gerilimler sonucunda  $I_D$  ve  $I_G$  akımları oluşur. Bu akımların büyüklüğü  $V_{GS}$  büyüklüğü ile kontrol edilir. FET çalışma mantığını ele aldığımızda  $V_{GS}$  – yönde arttırıldığı da kanalda ki serbest elektronlar her iki yan tarafa ortaya doğru iletilir. P

Böylece kanal darlaşır. Kanal direnci büyür.  $I_D$  akımı azalır.  $V_{GS}$  büyüklüğü  $I_D$  akımının sıfır yapan  $-V_P$  kanal tamamen kapanır. Kanal direnci yaklaşık sonsuz olur. Bu  $V_P$  gerilimine tıkama gerilimi denir.  $V_{GS}$  sıfır iken FET elemanından akan en büyük akım değerine  $I_{DSS}$  denir. Bu  $I_{DSS}$  ve  $V_{GS}$  değerleri FET elemanının üretiminden oluşan bilgilerdir. Şekil 25 'de FET elemanının transfer karakteristikleri gösterilmektedir.



Şekil 25. a) FET giriş karakteristiği b) FET çıkış karakteristiği

Şekil 25'deki karakteristiklerden (10) numaralı formül elde edilir.

$$I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_P)^2 \quad (10)$$

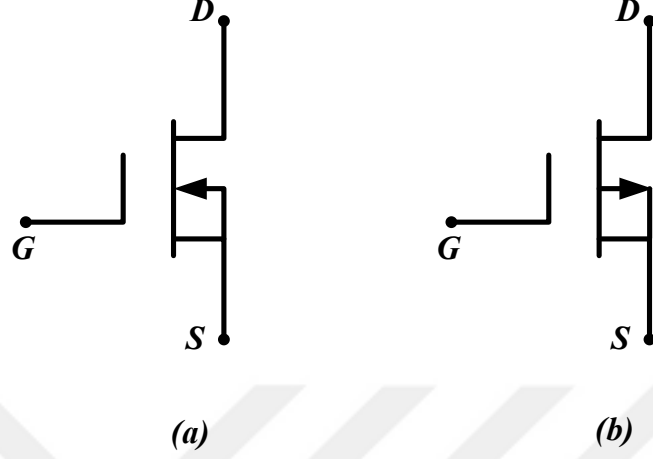
Yukarda ki (10) numaralı formülden FET çıkışındaki  $I_D$  akım büyüklüğü belirlenebilir. Böylelikle gerilim büyüklüğüyle akım kontrolü yapılmış olur.

### 1.5.2.3. MOSFET

MOSFET yapıları FET ve BJT yapılarına göre en önemli avantajı çok daha yüksek giriş direncine sahiptir. Bu sayede sistemdeki Gates kolundan akan  $I_G$  akımının çok düşük hatta yaklaşık sıfırdır. Böylece çok düşük güç harcar. Bu düşük güç harcaması nedeniyle mantık devrelerinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca MOSFET yapıları diğer transistörlerle göre çok daha hızlı çalışır. Bu nedenle anahtarlama devrelerinde de çoğunlukta kullanılır. Şekil 26'da MOSFET yapısının  $p$  ve  $n$  eklem yapısı gösterilmektedir.

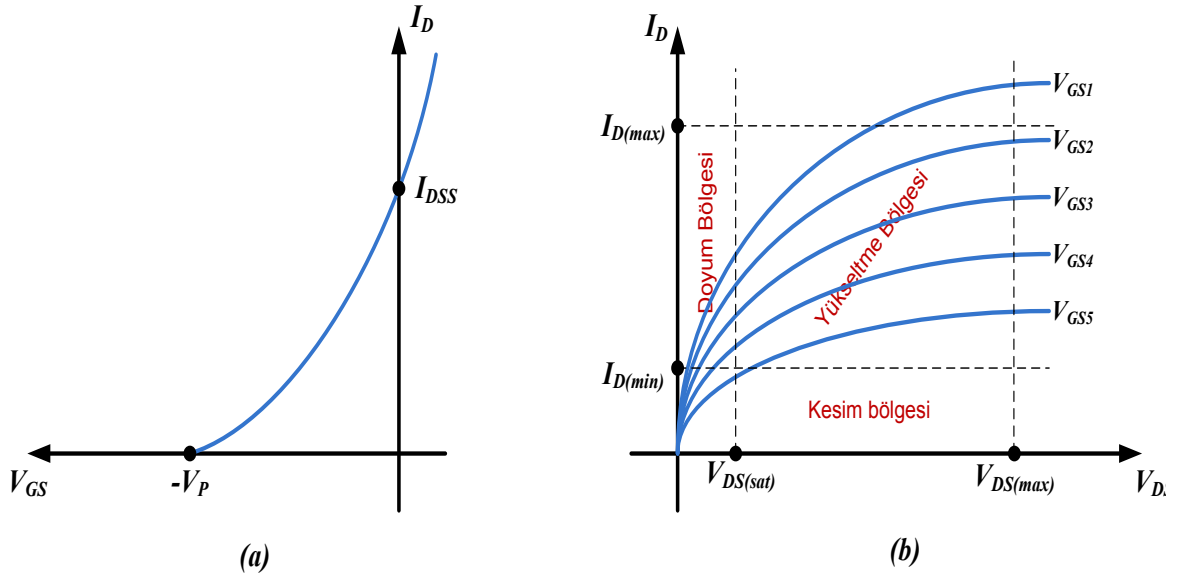


darlaştıracaklardır. Bu durumda kanal direnci artacak ve akan  $I_D$  akımının azalmasına neden olur. Şekil 28’de azaltım tipi MOSFET elektriksel sembol gösterilmektedir.



Şekil 28. a) n kanallı azaltım tipi MOSFET elektriksel yapısı  
b) p kanallı azaltım tip MOSFET elektriksel sembolü

Şekil 29’da azaltım tipi MOSFET giriş ve çıkış karakteristikleri gösterilmektedir.

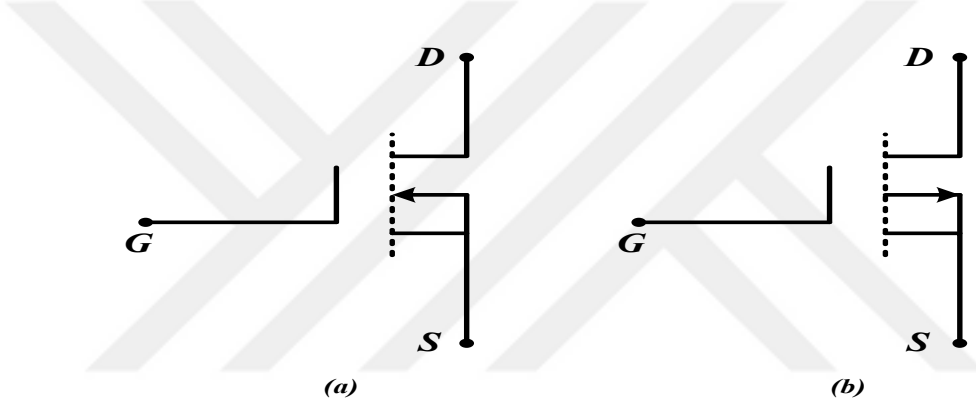


Şekil 29. a) Azaltım tipi MOSFET giriş karakteristiği  
b) Azaltım tipi MOSFET ıkış karakteristiği

Şekil 29’da görüldüğü gibi azaltım tipi MOSFET elemanında Gate koluna ters gerilimli  $V_{GS}$  uygulanıyor. Uygulanan bu değer MOSFET elemanının kanalını ayarlanıp

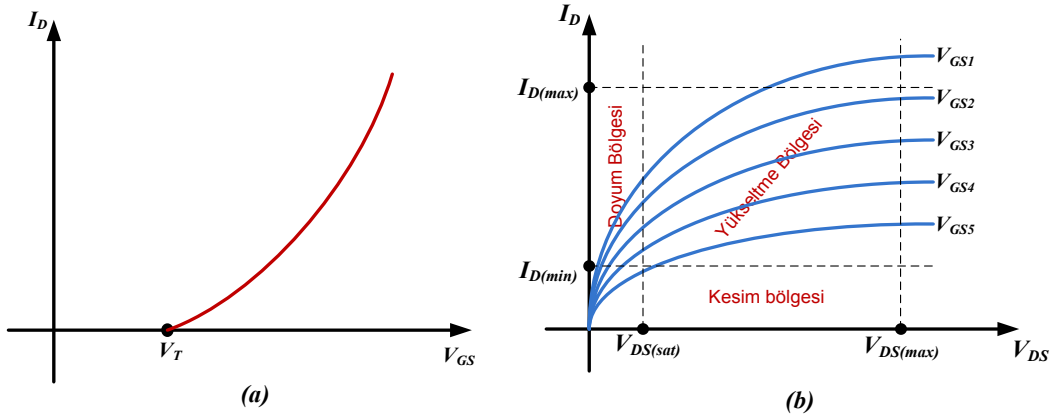
çalışma noktası belirleniyor. Bu çalışma noktasına göre Drain-Source kolları arasında uygulanan  $V_{DS}$  büyüklüğü ile  $I_D$  akım büyüklüğü ayarlanıyor. Burada  $V_{GS}$  değerinin sıfır olduğunda kanal genişliği en fazla olur ve akıtılabileceği akım en fazla olur. Bu değer  $I_{DSS}$  değeri MOSFET üretici firma tarafından ayarlanır.  $I_D$  akımının sıfır olduğu yani kanalın tamamen kapatıldığı değere  $V_P$  değeridir. Bu da aynı şekilde üretici firma tarafından belirlenir.

Şekil 27 b) incelediğimizde artırım tipi MOSFET yapısında doğru yönde kutuplanan  $V_{GS}$  büyüklüğü ile hazırda bulunan kanaldaki elektronlar Gate noktasından yaklaştırılıp kanal genişletilir. Bu durumda kanal direnci azalır ve akan  $I_D$  akımının artmasına neden olur. Şekil 30'da artırım tipi MOSFET elektriksel sembol gösterilmektedir



Şekil 30. a) n kanallı artırım tipi MOSFET elektriksel yapısı  
b) p kanallı artırım tipi MOSFET elektriksel sembolü

Şekil 31'de artırım tipi MOSFET giriş ve çıkış karakteristikleri gösterilmektedir



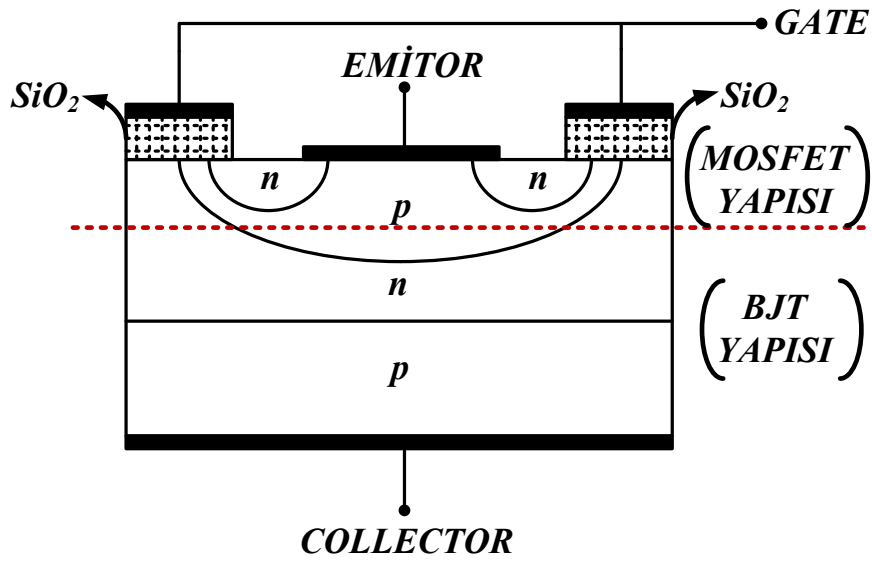
Şekil 31. a) Artırım tipi MOSFET giriş karakteristiği  
b) Artırım tipi MOSFET çıkış karakteristiği



Şekil 30'de görüldüğü gibi azaltım tipi MOSFET elemanında Gate koluna doğru gerilimli  $V_{GS}$  uygulanıyor. Uygulanan bu değer MOSFET elemanının kanalını ayarlanıp çalışma noktası belirleniyor. Bu çalışma noktasına göre Drain-Source kolları arasında uygulanan  $V_{DS}$  büyüklüğü ile  $I_D$  akım büyüklüğü ayarlanıyor.  $I_D$  akımının sıfır olduğu yani kanalın tamamen kapatıldığı değere  $V_T$  değeridir. Bu değer üretici firma tarafından belirlenir.

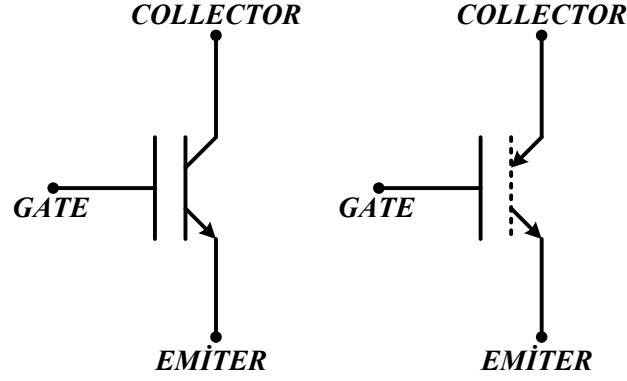
#### 1.5.2.4. IGBT

IGBT yani yalıtılmış kapalı transistor BJT ve MOSFET karışımı özel bir elemandır. BJT avantajı iletimde iç direnci düşük bu nedenle iletimde kayıpları düşüktür. Kötü tarafı ise anahtarlama süresinin fazla olmasıdır. Bu sebeple anahtarlama kayıpları fazladır. MOSFET elemanı ise iletimde iç direnci yüksektir ama çok hızlı anahtarlama özelliğine sahiptir. İşte bu iki yapı birleştirilerek IGBT elemanı oluşturulmuştur. Bu sayede IGBT elemanı hem iletimde iç direnci çok düşük bir yapıya sahip hem de anahtarlama süresi çok kısadır. Böylece iki yapının iyi özellikleri alınarak üstün ve daha verimli bir eleman oluşturuldu. Girişi MOSFET çıkışı BJT elemanı kullanıldı. Kontrol MOSFET elemanına benzer, çalışması BJT yapısı gibidir. Şekil 32'de IGBT elemanının eklem yapısı gösterilmektedir.



Şekil 32. IGBT elemanının eklem yapısı

Şekil 33’de IGBT yapısının elektriksel sembolü gösterilmektedir.



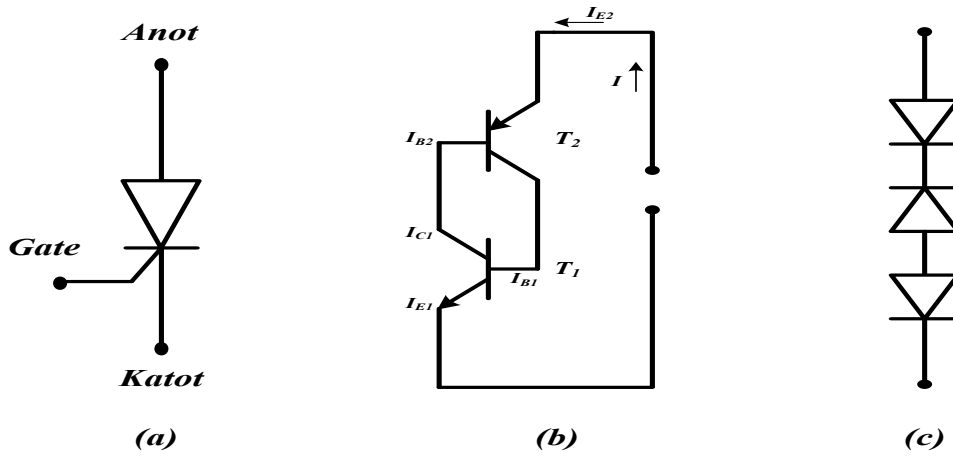
Şekil 33. IGBT yapısının elektriksel sembolü

IGBT elemanı çalışma karakteristiği artırım tipi MOSFET elemanının çalışma karakteristiğinin aynısıdır. IGBT elemanı genellikle yüksek güç uygulamalarında kullanılır. 400 V ve üzeri uygulamalarda MOSFET elemanı yetersiz kaldığı durumlarda kullanılır. IGBT yapısı düşük kayıp hızlı anahtarlanma düşük gürültü gibi avantajlara sahiptir. En fazla güç elektroniği konusunda anahtarlama elemanı olarak kullanılır.

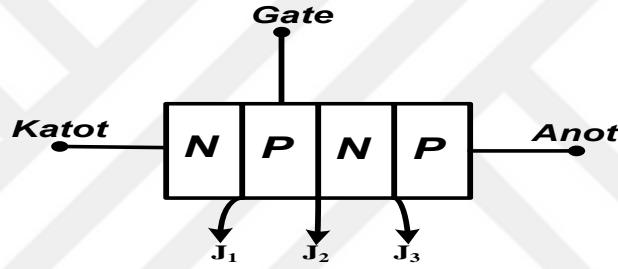
### 1.5.3. Tristör

Tristör elemanı diyot elemanının kontrollü yapısıdır. Dört yarı iletken malzemenin birleşmesiyle oluşan bir devre elemanıdır. Tristörler güç elektroniği konusunda yaygın şekilde anahtarlama elemanı olarak kullanılır. Bunun sebebi ise tristörlerin transistörler gibi bir ara durumu yoktur ya iletimde ya da yalıtımda çalışırlar. Tristörler düşük frekanslarda çalışmak için üretilmemiştir. Yüksek frekanslarda çalıştırıldıklarında sıkıntılar meydana gelebilmektedir. Şekil 34’de tristörün elektriksel devresi gösterilmektedir.

Şekil 34’de de görüldüğü gibi tristör elemanın anot, katot ve gate olmak üzere üç kolu vardır. Diyottan farklı olarak tristör elemanı gate kolu vasıtasıyla kontrollü sağlanabiliyor. Tristör elemanını gate kolundan bir kere tetiklendiği zaman sürekli iletimde çalışır. Tristörü tekrar yalıtıma geçirmek için anot ve katot uçlarından akan akımı sıfır yapmak gerekir. Bunun içinde anat katot uçları kısa devre yapılmalıdır. Böylece tristör tekrar yalıtıma geçebilir. Şekil 35’de tristörün yarı iletken eklem yapısı gösterilmektedir.



Şekil 34. Tristör elemanın elektriksel eş değer devresi



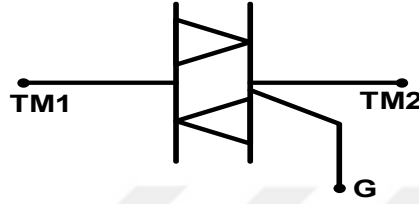
Şekil 35. Tristörün yarı iletken eklem yapısı

Dört yarı iletken malzemenin birleşmesiyle oluşturulan tristör elemanın çalışma karakteristiğini anlayabilmek için şekil 35’de ki yapıyı incelememiz gerekmektedir. Eğer anot ve katot uçlarına gerilim uygulanırsa ilk durumda gate ucu tetiklenmediğinden dolayı tristör tıkamada çalışır. Eğer gate ucu bir kez tetiklenirse sistem iletme geçer ve daha öncede söylediğimiz gibi sistemi tıkamaya sokmak için anot ve katot uçlarını tıkamaya sokmalıyız. Kısaca özetleyecek olursak anot ve katot uçlarına ileri yönde bir  $V$  gerilimi verilirse, birinci ve üçüncü eklemeleri iletim durumuna geçer burada tıkamayı ikinci eklem yapar. İkinci eklemi iletime geçirmek içinde gate ucundan bir tetikleme işareti gönderilir ve tristör iletime geçer.

Buradan anlaşılacağı gibi tristör tek yönde bir anahtarlama elemanı görevi görür. Tristörlerin anahtarlama elemanı olarak tercih edilmesinin en önemli özelliği hızlı anahtarlama ve iç direncinin düşük olması nedeniyle iletim kayıplarının çok düşük olmasıdır.

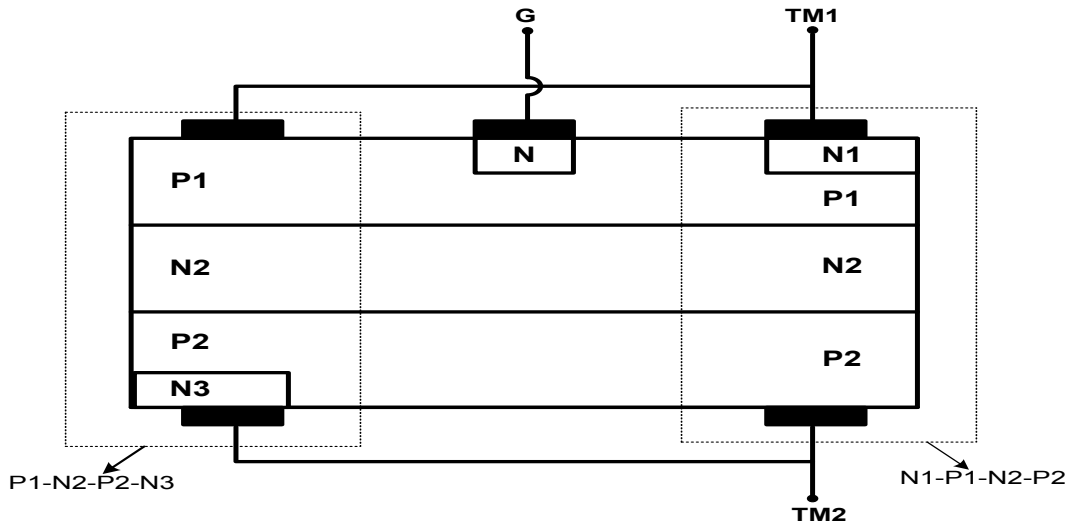
#### 1.5.4. Tiryak

Tiryaklar çift yönlü tristörler olarak da bilinir. Uygulanan pozitif ve negatif gerilimde ilettime geçen iki yönlü anahtar özelliği gösterir. Şekil 36'da görüldüğü gibi temel uç 1, temel uç 2 ve gate uçları olmak üzere 3 kolu vardır. Burada da Tristör elemanın da olduğu gibi tiryakı tetiklemek için gate ucu kullanılır.



Şekil 36. Tiryak elemanın elektriksel devresi

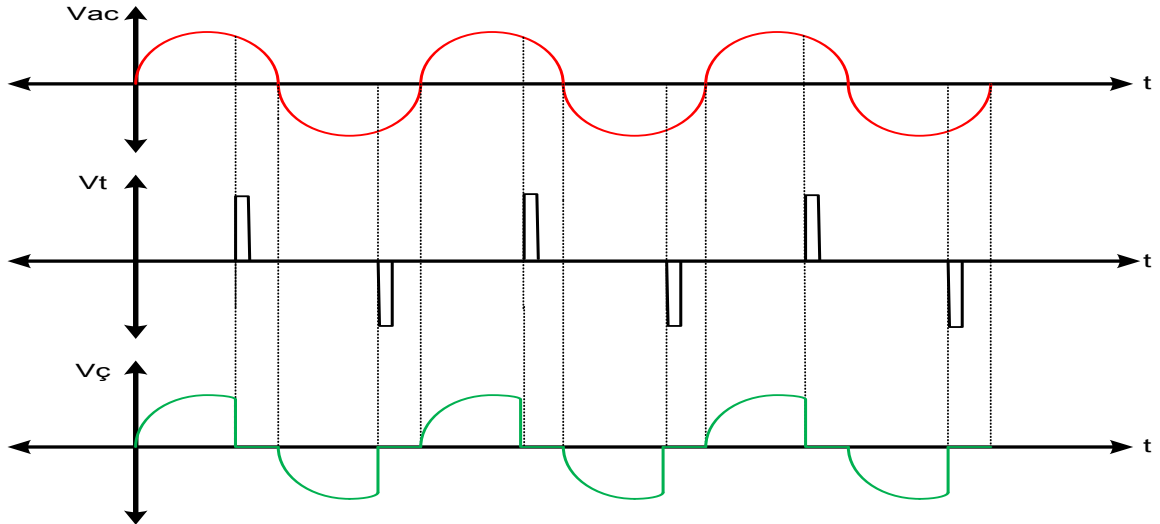
Şekil 36'da görüldüğü gibi tiryak yapısı ters paralel bağlı iki Tristöre eşdeğerdir. Tristör elemanından farklı olarak en büyük avantajı çift yönlü alternansa da yani pozitif ve negatif gerilimlerde tetiklenebilmesidir. Kötü yönü ise iç direnci tristöre göre daha yüksektir ve bu da iletim kayıplarını artırır. Ayrıca tristör kadar yüksek gerilimlere çıkamaz. Yani çalışma gerilimleri daha düşük seviyededir. Şekil 37'de tiryak elemanın eklem yapısı gösterilmektedir.



Şekil 37. Tiryak eklem yapısı

Şekil 37’de görüldüğü gibi tiryak elemanı üç bacaklı birbirine ters paralel bağlı iki Tristör yapısına eşitir. Burada görüldüğü gibi ilk tristörün eklem yapısı  $P1-N2-P2-N3$  yarı iletkenlerinden buna ters bağlı diğer tristör de  $N1-P1-N2-P2$  yarı iletken malzemelerinden oluşmaktadır ve bu yapıyı tetikleyecek gate ucu bulunmaktadır. Tiryakı uyarabilmek için tristörde olduğu gibi gate ucunda bir tetikleme işareti gönderilmelidir. Tıkamaya sokmak içinde yine tristörde olduğu gibi temel uçlar arasından akımı sıfıra çekilmelidir. Burada tristörden farklı olarak tiryak AC gerilimde de tetiklendiği için alternans geçişlerinde tiryak kendini tıkamaya sokar. Tiryak tetiklemek için en genel olarak gate ucuna çift yönlü iğne vuruş işareti gönderilerek tetikleme sağlanır. Şekil 38’i inceleyerek tiryakın AC işaret altında tetiklenmesini daha iyi anlaşılabilir.

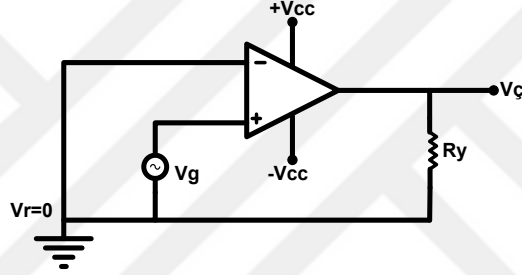
Şekil 38’de görüldüğü  $V_{ac}$  tiryak elemanın uçlarına uygulanan gerilim,  $V_t$  işareti gate ucuna uygulanan çift yönlü iğne darbe işareti ve  $V_{\phi}$  işareti de tiryakın çıkış sinyalini oluşturmaktadır. Buradan görüldüğü gibi girişe uygulanan  $V_{ac}$  sinyali uygulandığı zaman ve gate ucu da  $V_t$  sinyali ile tetiklendiğinde tiryak iletme geçer sistem çıkışını kısa devre yapıp çıkışı sıfırlar. Tiryakı tıkamaya sokabilmek için uçları arasından akan akımı sıfırlamak gerektiğinden bu durumda giriş sinyalinin sıfır noktalarında olur. Yani giriş sinyalinin sıfır noktaların da tiryak uçlarından akan akım sıfır olur ve tiryak tıkamaya geçer ve sistem çıkış verir. Böylece tiryak tetiklenerek istenen sistemlerde kullanılabilir.



Şekil 38. AC giriş işareti, tetikleme işareti ve çıkış işareti grafikleri

### 1.6. Sıfır Geçiş Algılama Devreleri ve Çalışma Prensibi

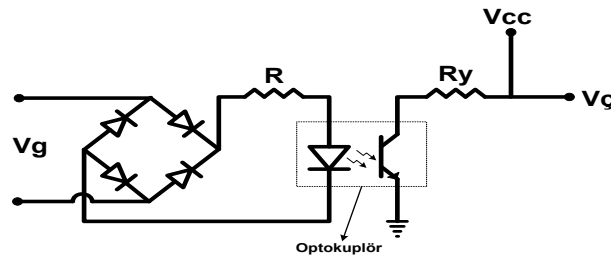
Sıfır geçiş algılama devresi elektronik sistemlerde kullanılan çok kullanışlı bir elektrik devresidir. Bu sistem sayesinde istediğimiz sinyalin sıfır geçiş noktalarını belirleyebiliriz. Böylece işleyeceğimiz sinyal üzerinde rahat uygulama yapabiliriz ve istediğimiz şekilde tetikleme sinyalleri elde edebiliriz. Bu işlem için piyasada kullanılan iki elektronik devre vardır. Bunlardan biri işlemsel yükselteç elemanı kullanılarak yapılan devreler diğeri ise optik çift elamanı kullanılarak yapılan devrelerdir. Şekil 39’da işlemsel yükselteç elemanı kullanılarak gerçekleştirilen sıfır geçiş elemanın elektriksel eş değer devresi görülmektedir.



Şekil 39. Opamp kullanılarak gerçekleştirilen sıfır geçiş devresi

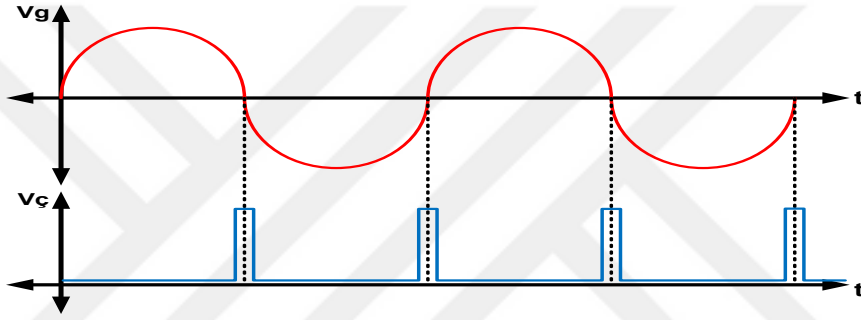
Şekil 39’da gördüğümüz gibi devre işlemsel yükselteç, giriş işareti, çıkış işareti, sıfır referans kullanılmaktadır. Burada işlemsel yükselteç karşılaştırma işlemi yapar. Eğer  $V_g$  işareti  $V_r$  değerine eşit olursa yani sıfıra eşit ise  $R_y$  yük direnci üzerinden akım akar ve sistem çıkış verir.

Bir diğeri sıfır geçiş algılama devresi optokuplör kullanılarak yapılan elektriksel devredir. Şekil 40’da optokuplör kullanılarak elde edilen sıfır geçiş algılama elektriksel devresi gösterilmektedir.



Şekil 40. Optokuplör kullanılarak gerçekleştirilen sıfır geçiş devresi

Şekil 40'da görüldüğü gibi sistem doğrultucu, giriş direnci, optokuplör ve çıkış direncinden oluşmaktadır. Burada ilk olarak  $V_g$  giriş işareti doğrultularak optokuplörün çalışmasına uygun hale getiriliyor. Giriş sinyali doğrultulduktan sonra opto kuplörün yanmaması için bir giriş direnci sisteme bağlanılır. Burada şekilde de görüldüğü gibi optokuplör diyot ve transistör den oluşur. Başlangıçta diyot üzerinde akım aktığı sürece transistör tetiklenmez ve tıkamada çalışır. Bu durumda sistem çıkış vermez. Diyot üzerinden ne zaman akım akışı kesilirse transistörü tetikler. Transistör tetiklendiğinde ilettime geçer ve sistem çıkış verir. Şekil 41'de sıfır geçiş algılama devrelerinin giriş ve çıkış işaretleri gösterilmektedir.



Şekil 41. Optokuplör giriş ve çıkış işaretleri

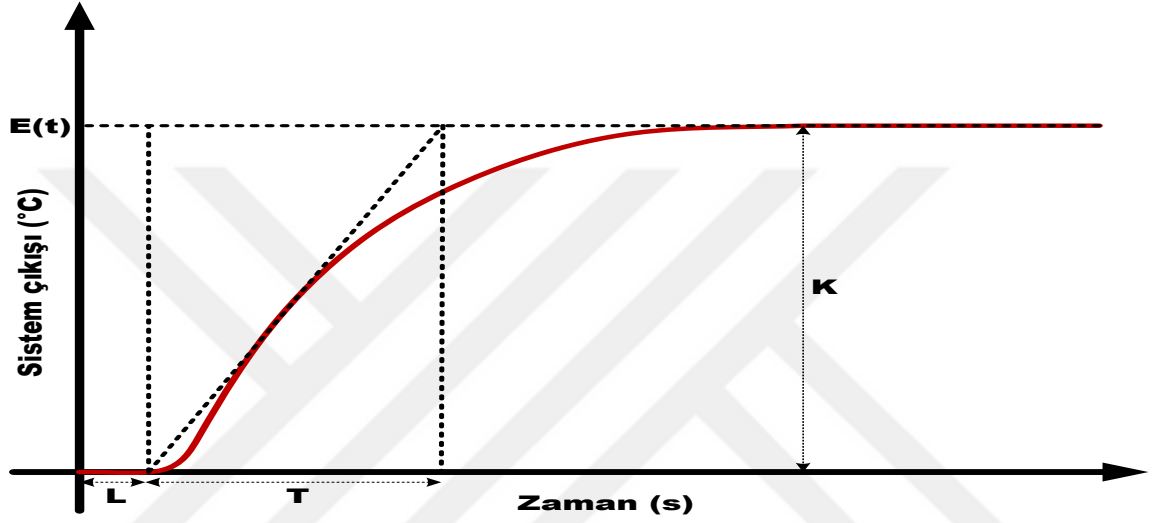
Böylece tam alternans geçişlerinde tetik işareti üretilerek yumuşak anahtarlama yapılmış olunur ve sistem bozucu etkilerden daha az etkilenir ve sistem daha kararlı çalışır.

### 1.7. Oransal İntegral Türevsel Denetleyici Parametrelerinin Belirlenmesi

1930 yıllardan itibaren oransal türevsel ve integral (PID) yöntemi piyasalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu başarı, bu algoritmanın basitliği, sağlamlığı ve geniş uygulanabilirliği gibi birçok iyi özelliğini bulunmaktadır. Bu sistemlerin birçok avantajının olmasına rağmen sistem de kullanılan  $K_p$ ,  $K_I$  ve  $K_D$  değerlerini bulmak oldukça zahmetli ve zaman alan bir iştir. Geçmişten günümüze kadar daha iyi ve daha kabul edilebilir kontrol sistemi cevabı elde etmek için şimdiye kadar birçok yöntem önerilmiştir. Bu kısımda oransal, türevsel ve integral denetleyici parametrelerinin belirlenmesi için önerilen yöntemlerden bahsedilecektir.

### 1.7.1. Açık Çevrim Ziegler-Nichols Metodu

Bu kontrol yönteminde ilk olarak sistem girişine basamak tetik sinyali uygulanıp çıkış eğrisi elde edilir. Bu çıkış eğrisinin en eğimli yerinden teğet çizilir. Bu teğetin kestiği  $x$  noktası ölü zaman ( $L$ ) referans değeri kestiği noktanın  $x$  değeri ile  $L$  değeri arasındaki fark ise zaman sabiti ( $T$ ) verir. Yöntemin uygulanışı Şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 42. Çıkış eğrisi

Elde edilen  $T$  ve  $L$  değerlerini kullanarak Tablo 2’deki PID parametreleri bulunur.

Tablo 2. Açık çevrim Ziegler Nichols yöntemiyle PID parametrelerinin bulunması

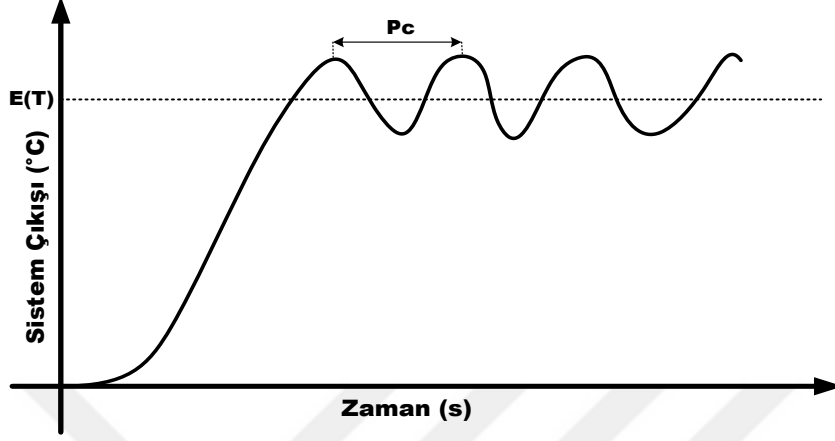
KONTROL	$K_P$	$T_I(I/K_I)$	$K_D(T_D)$
Oransal	$T/L$	-	-
Oransal Türevsel	$0,9T/L$	$L/0,3$	-
Oransal Türevsel İntegral	$1,2T/L$	$2L$	$0,5L$

### 1.7.2. Kapalı Çevrim Ziegler-Nichols Metodu

Bu yöntem, Ziegler ve Nichols tarafından önerilen sürekli salınımlara dayanan bir deneme ve hata ayarlama yöntemidir. PID kontrol cihazlarının ayarlanması için muhtemelen en çok kullanılan ve en çok kullanılan yöntemdir. Ziegler ve Nichols



yönteminde çıkarılan karakteristik grafiğinde elde edilen  $K_c$  sistem kazancı ve  $P_u$  sistem salınım frekansı yardımıyla PID sistem parametreleri Tablo 3'deki gibi elde edilir.



Şekil 43. Ziegler ve Nichols yönteminde çıkarılan karakteristik grafiği

Tablo 3. Kapalı çevrim Ziegler-Nichols metoduyla parametrelerin belirlenmesi

KONTROL	$K_P$	$K_I$	$K_d$
Oransal	$0,50 K_c$	-	-
Oransal integral	$0,45 K_c$	$P_u/1,2$	-
Oransal Türevsel İntegral	$0,60 K_c$	$P_u/2,0$	$P_u/8,0$

Z-N yönteminin avantajı, süreç modelini gerektirmemesidir. Bu tekniğin dezavantajları şunlardır:

- Zaman alıcıdır çünkü bir deneme ve hata prosedürü gerçekleştirilmelidir.
- Bu yöntem, açık döngü kararsız olan işlemler için geçerli değildir.
- Bazı basit süreçler, ölü zaman olmaksızın birinci mertebeden ve ikinci mertebeden süreçler gibi nihai kazançlara sahip değildir.

### 1.7.3. Tyreus–Luyben Metodu

Tyreus-Luyben prosedürü, Ziegler–Nichols yöntemine oldukça benzerdir, ancak son kontrolör ayarları farklıdır. Ayrıca bu yöntem sadece PI ve PID denetleyicileri için ayarları önerir. Nihai kazanç ve süreye dayalı olan bu ayarlar Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Tyreus – Luyben metoduyla parametrelerin belirlenmesi

<b>KONTROL</b>	$K_P$	$K_D$	$K_I$
Oransal İntegral	$K_c/3,2$	$P_u/2,2$	-
Oransal Türevsel İntegral	$K_c/3,2$	$P_u/2,2$	$P_u/6,3$

Z-N yöntemi gibi, bu yöntem zaman alıcıdır ve kararsızlık durumunda sistemi marj etmeye zorlar.

#### 1.7.4. Cohen-Coon Metodu

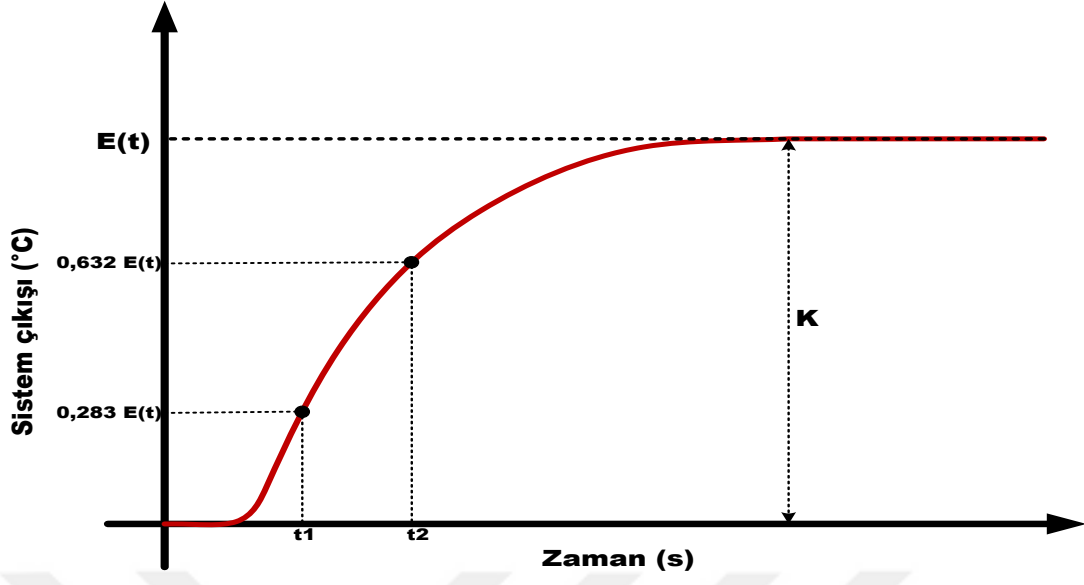
Bu yöntemde ilk olarak sistemin birim basamak cevap eğrisi oluşturulur. Daha sonra sistem çıkışının %28,3'üne ulaştığı zaman ( $t_1$ ) ve %63,2'sine ulaştığı zaman ( $t_2$ ) tespit edilir. Bu değerler kullanılarak aşağıdaki parametreler elde edilir.

$$T_m = (t_1 - t_2)d = t_2 - T_m \quad (11)$$

$T_m$ ,  $d$  ve sistem kazancı  $K_m$  değerleri kullanılarak PID parametreleri elde edilir. Tablo 5'de sistemin PID parametreleri elde edilme şekilleri gösterilmektedir. Şekil 44'de ise karakteristik eğrisi verilmiştir.

Tablo 5. Cohen-Coon metoduyla parametrelerin belirlenmesi

<b>Kontrol</b>	$K_P$	$T_I (I/K_I)$	$K_D (T_D)$
P	$\frac{T_m}{K_m} \times \left(1 + \frac{d}{3T_m}\right)$	-	-
PI	$\frac{T_m}{K_m \times d} \times \left(\frac{9}{10} + \frac{d}{12T_m}\right)$	$d \times \left(\frac{30 + \frac{3d}{T_m}}{9 + \frac{20d}{T_m}}\right)$	-
PD	$\frac{T_m}{K_m \times d} \times \left(\frac{5}{4} + \frac{d}{12T_m}\right)$	-	$d \times \left(\frac{6 - \frac{2d}{T_m}}{22 + \frac{3d}{T_m}}\right)$
PID	$\frac{T_m}{K_m \times d} \times \left(\frac{4}{3} + \frac{d}{4T_m}\right)$	$d \times \left(\frac{32 + \frac{6d}{T_m}}{13 + \frac{8d}{T_m}}\right)$	$d \times \left(\frac{4}{11 + \frac{2d}{T_m}}\right)$

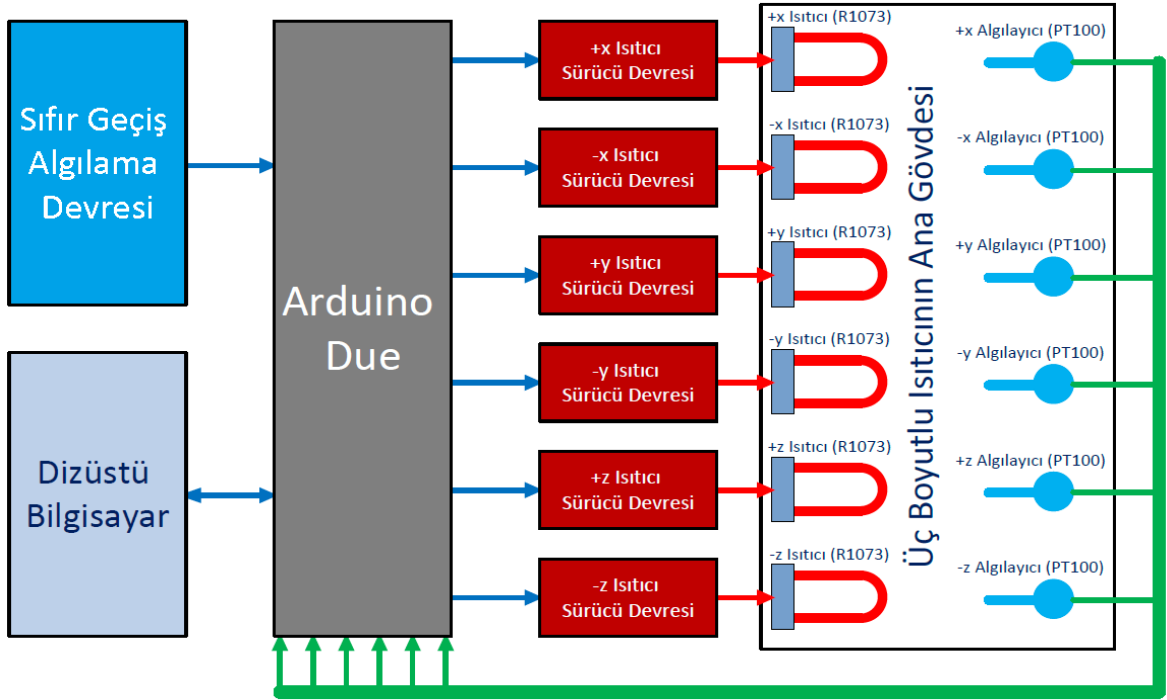


Şekil 44. Cohen-Coon karakteristik eğrisi

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

### 2.1. Giriş

Günümüzde elektrik fırınları hem sanayide hem de günlük hayatımızda yaygın olarak kullanılmaktadır. Piyasada bulunan elektrik fırınları, sadece alt ve üst panellerinde bulunan rezistanslarla iç ısıtmasını sağlamaktadır ve kontrol yöntemi olarak en basit denetim metodu olan açık-kapalı kontrolü kullanılmaktadır. Bu yüksek lisans tezinde üretmiş olduğumuz elektrikli fırının tüm yüzeylerine ısıtıcı rezistanslar yerleştirilmiştir. Bu rezistansların sıcaklık denetimi, gerçekleştirmiş olduğumuz kontrol panosu üzerinden aç-kapa, oransal, oransal integral, oransal türevsel, oransal türevsel integral kontrol yöntemleri kullanılarak sağlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla kullanılan kontrol yöntemleri birbirleri ile kıyaslanmış ve hangi yöntemin bir elektrikli fırınında en verimli şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir. Şekil 45’de gerçekleştirilen elektrik fırının blok şeması görülmektedir.

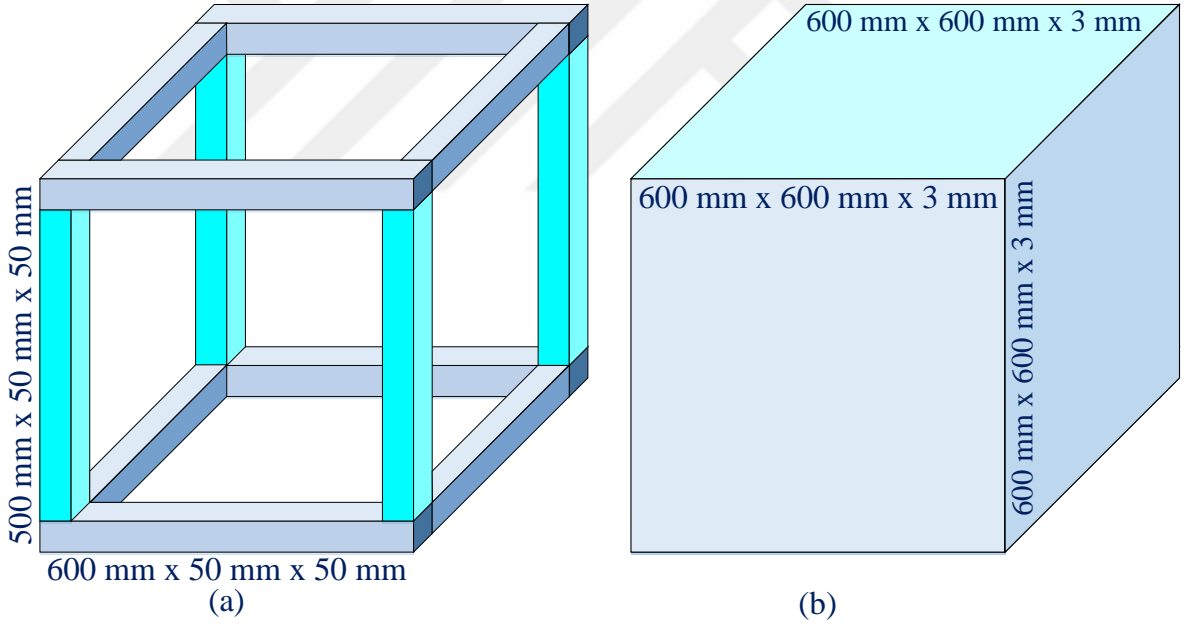


Şekil 45. Üç boyutlu ısıtma yapan elektrik fırının blok şeması

Şekil 45’de görüldüğü gibi üretilen elektrik fırını mekanik, elektriksel ve yazılımsal olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Mekanik kısım, fırının dış ana gövdesi ve bunları içinde bulunduran ısıtıcılar ve algılayıcılardan oluşmaktadır. İkinci bileşen olan elektriksel birimde ise sıfır geçiş algılama ve sürücü devrelerinden bulunmaktadır. Üçüncü ve son birim olan yazılımsal kısım, mikrodenetleyici kartı ve dizüstü bilgisayardan meydana gelmektedir.

## 2.2. Mekanik Kısım

Elektrik fırınının mekanik kısmı üç aşamalı olarak üretilmiştir. İlk aşamada, elektrik fırınının ana gövdesi oluşturulmuştur. Şekil 46’da elektrik fırınının kupası ve gövdesi görülmektedir.

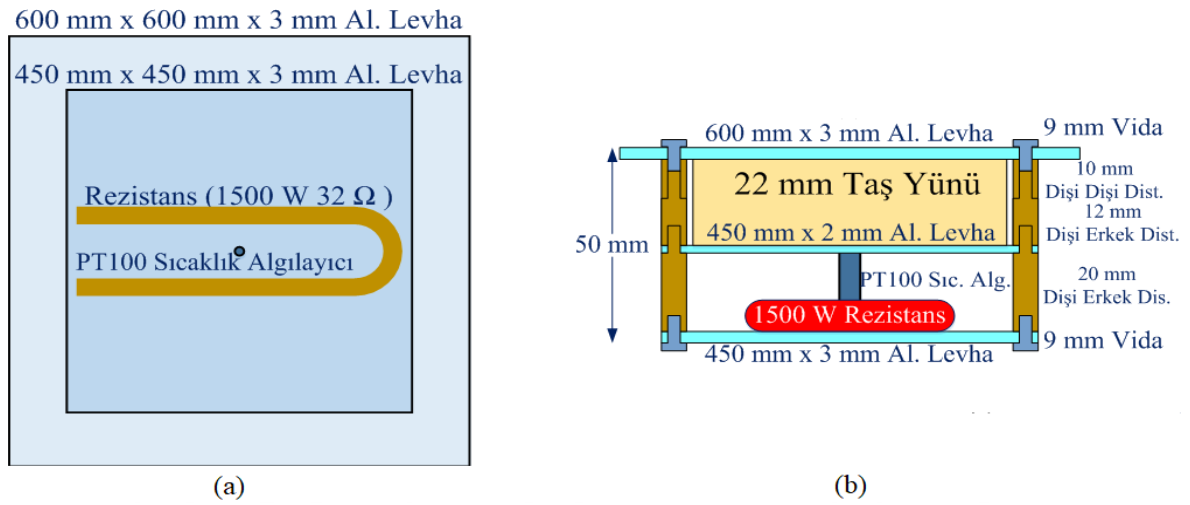


Şekil 46. Elektrik fırınının (a) kupası ve (b) gövdesi

Şekilde görüldüğü gibi fırın 600 mm x 600 mm x 600 mm ebatlarında küp şeklinde üretilmiştir. Fırının kupası dört adet 600 mm x 50 mm x 50 mm ve 12 adet 500 mm x 50 mm x 50 mm alüminyum profilden imal edilmiştir.

Ardından elektrik fırınının panelleri oluşturulmuştur. Şekil 46’da verildiği gibi bu panellerde 600 mm x 600 mm alüminyum levhalar kullanılmıştır. Her panel beş katmandan

oluşmaktadır. En içte rezistansın üretmiş olduğu ısıyı yayan 450 mm x 450 mm x 3 mm boyutlarında alüminyum levha bulunmaktadır. İkinci katmanda, 375 W'lık ısıtıcı ve PT100 sıcaklık algılayıcısı yer almaktadır. Üçüncü katman, 450 mm x 450 mm x 3 mm ölçülerinde alüminyum levha olup, 20 mm'lik bakır distans ile ikinci katmana sabitlenmiştir. Dördüncü katman ısı yalıtımı sağlamak için 22 mm kalınlığında 750 °C sıcaklığa dayanabilen taş yünüyle doldurulmuştur. Fırının dış yüzeyini oluşturan beşinci katmanda ise 600 mm x 600 mm x 3 mm alüminyum levha kullanılmıştır.

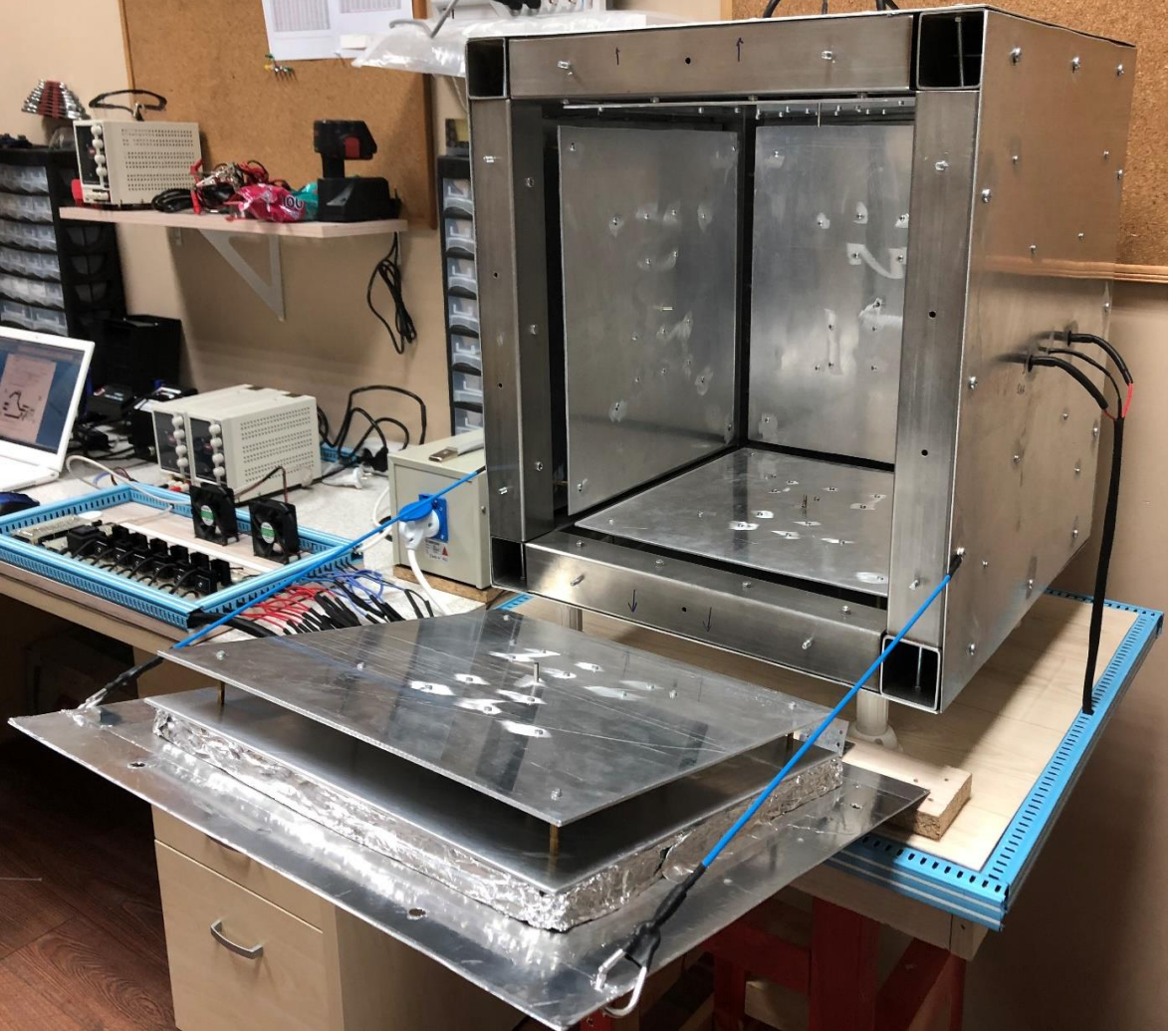


Şekil 47. Üst ve alt panellerin (a) ön ve (b) yan profili



Şekil 48. Üretilen fırın paneli

Şekil 48’de verilen paneller ve kupa birleştirilerek elektrik fırının mekanik kısmı tamamlanmıştır. Şekil 49’da fırının mekanik kısmı görülmektedir.



Şekil 49. Fırının mekanik gövdesi

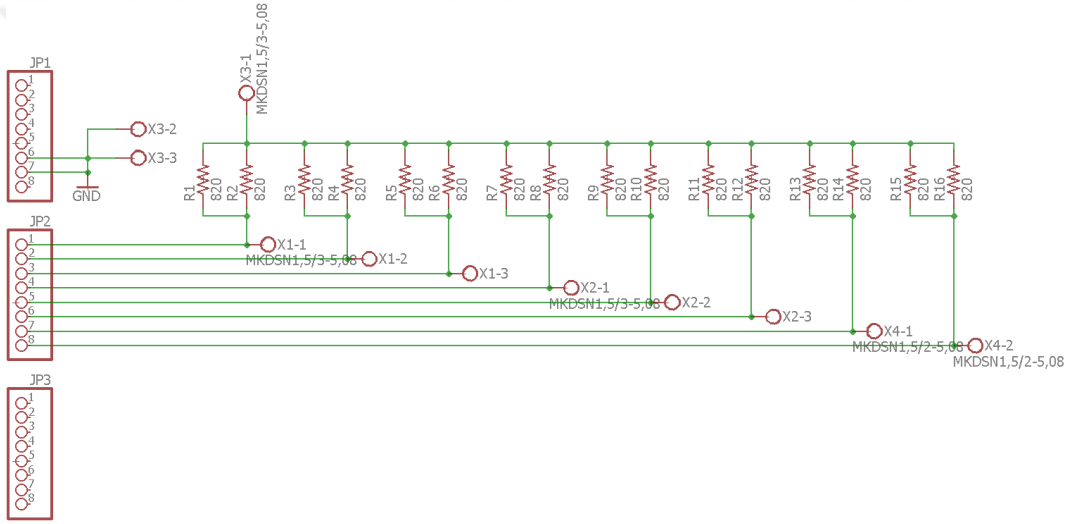
### 2.3. Elektriksel Kısım

Elektriksel kısım, üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi algılayıcılardan alınan analog verileri dijitale çeviren dönüştürücü birimdir. İkincisi kısım, sürücü kartının tetiklemesini sağlayan sıfır geçiş algılama devresidir. Sonuncu birim, ısıtıcı sürücü kartıdır.

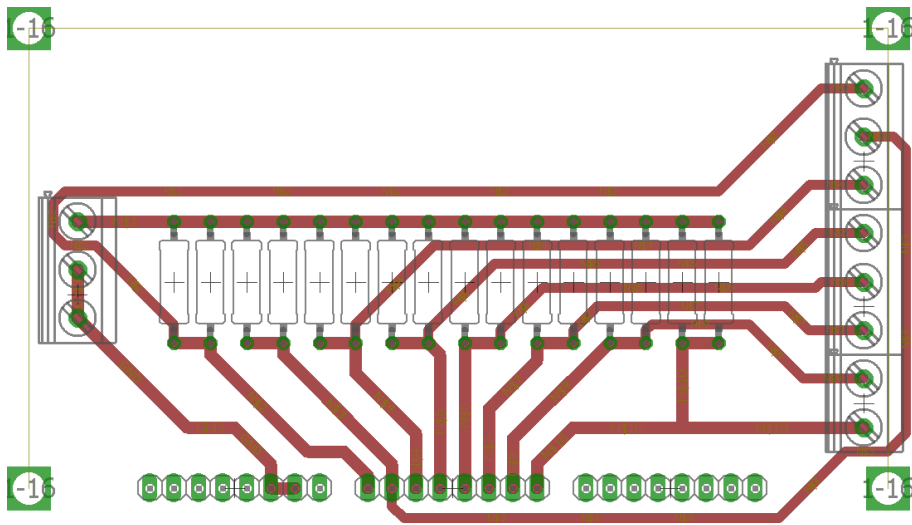


### 2.3.1 Analog Dijital Dönüştürücü Kartı

Analog dijital dönüştürücü (ADD) kartı, kullanılan PT100 algılayıcıları ile okunan analog sıcaklık bilgisini sayısalaya çevirmektedir. Rezistanslardaki sıcaklık değişimi PT100 algılayıcılarında direnç değişimine yol açmaktadır. Bu direnç değişimi, üretilen ADD arayüz kartı ile gerilim değişimine dönüştürülmektedir. Ardında bu gerilim değişimi Arduino Mega mikrodenetleyici kartı ile sayısallaştırılmakta ve dizüstü bilgisayara USB portu üzerinden aktarılmaktadır. Şekil 50’de gerçekleştirilen ADD arayüz kartının şematik diyagramı ve Şekil 51’de de baskı devre çizimi verilmiştir.



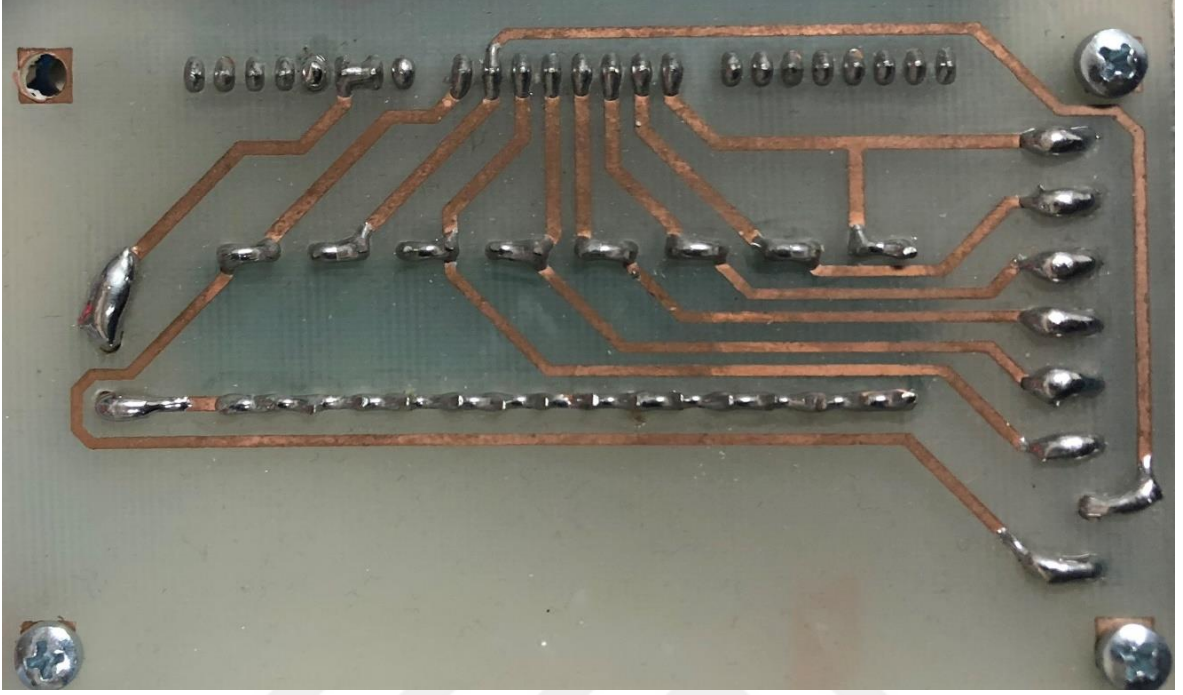
Şekil 50. ADD kartın şematik diyagramı



Şekil 51. ADD kartının baskı devre çizimi



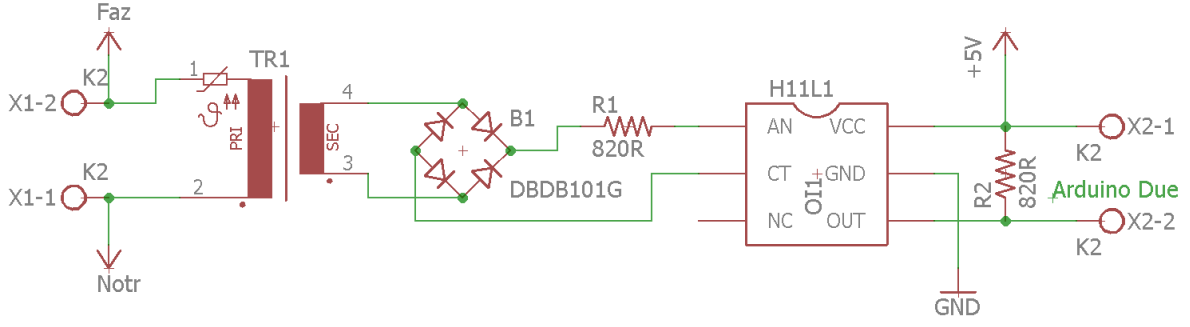
Şekil 52’da üretilen ADD kartı görülmektedir.



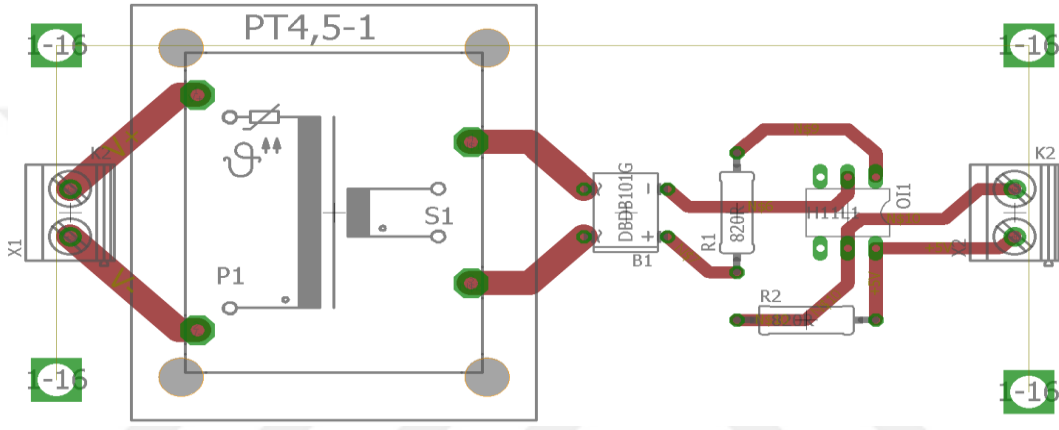
Şekil 52. ADD kartı

### 2.3.2. Sıfır Geçiş Algılama Devresi

Elektrik fırını, her bir yüzeyinde yer alan 1500 W gücündeki altı rezistans ile ısıtılmaktadır. Rezistanslar birlerinden bağımsız olarak 100 ms periyodunda 10 ms adımlarla mikrodenetleyici kartı tarafından üretilen tetikleme sinyalleri ile kontrol edilmektedir. Tetikleme işareti ile şebeke frekansı arasındaki eş zamanlama, sıfır geçiş algılama devresiyle sağlanmaktadır. Sıfır geçiş devresinin şematik diyagramı Şekil 53’de ve baskı devre çizimi de Şekil 54’de verilmiştir. Şebeke gerilimi H11L1 entegresiyle algılanmakta ve H11L1 entegresi için gereken besleme voltajı 12 VAC 2 W transformatör, 1,5 A köprü diyot, LM7805 doğrusal gerilimi regülatörü ve çevre elamanları ile üretilmektedir. Şebeke voltajı ikinci bir transformatör ile 12 VAC’ye indirilip, doğrultulduktan sonra 1 k $\Omega$ ’luk direnç üzerinden entegreye uygulanmaktadır. Entegre her sıfır geçişi için 5 V genlikli ve 500  $\mu$ s genişlikli bir darbe üretmektedir.

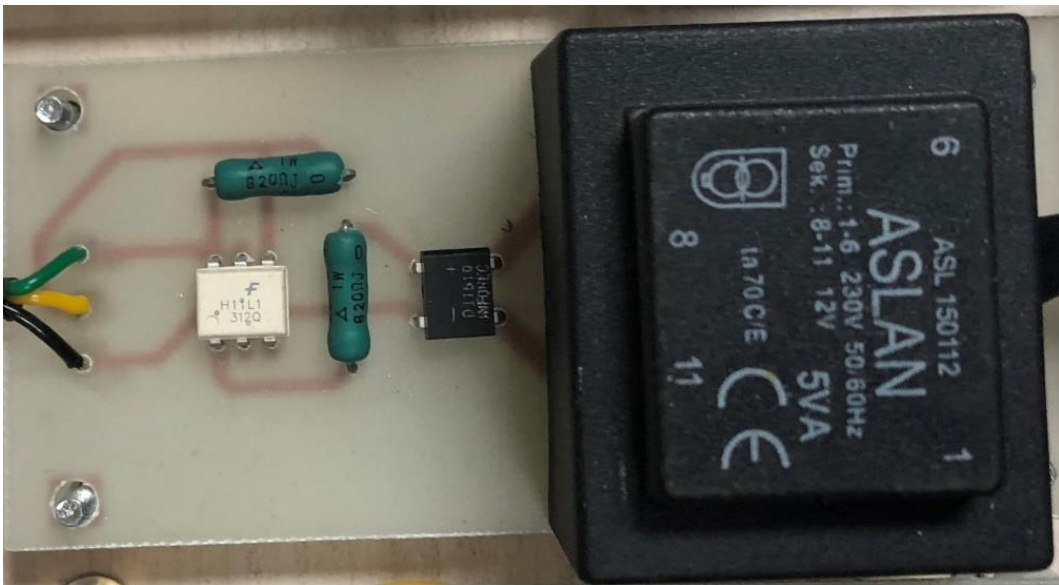


Şekil 53. Sıfır geçiş algılama devresi şematik diyagramı



Şekil 54. Sıfır geçiş algılama devresi baskı çizimi

Şekil 55’de üretilen sıfır geçiş algılama devresi görülmektedir.

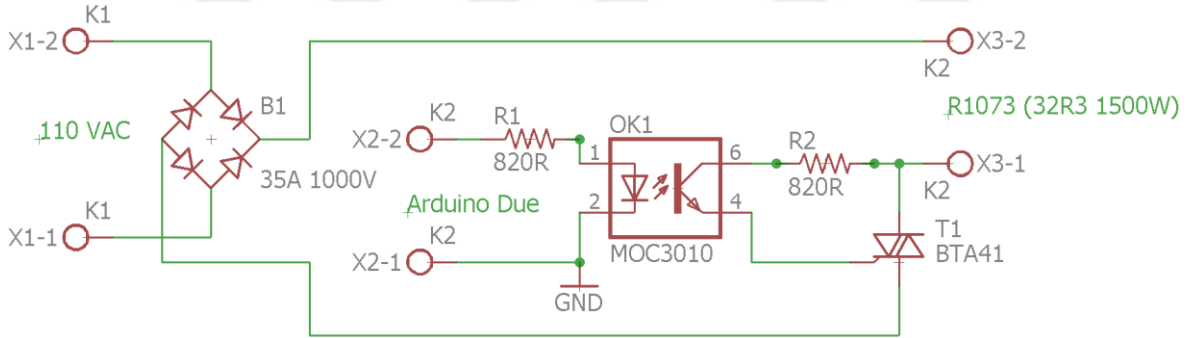


Şekil 55. Sıfır geçiş algılama devresi

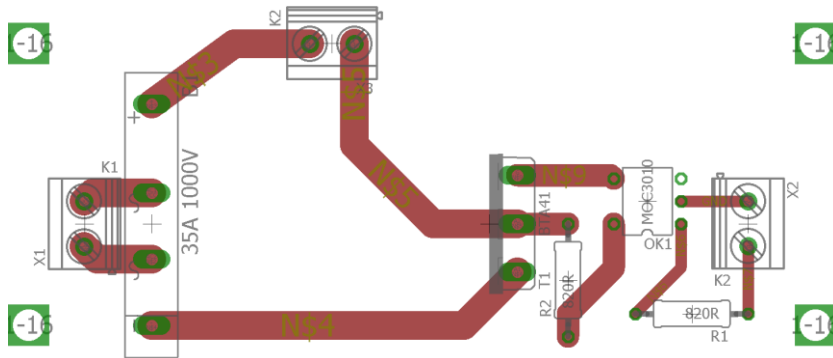
Sıfır geçiş algılama devresi ile tiryak her zaman sıfır geçişlerinde ilettime veya tıkamaya sokulmaktadır. Böylece anahtarlama anındaki rezistans akımı sıfır olmakta ve yumuşak anahtarlama yapılmaktadır. Dolayısıyla fırının çalışması esnasında anlık olarak aşırı akımlar çekilmesinin ve şebeke gerilimi üzerinde gürültü oluşturmasının önüne geçilmektedir.

### 2.3.3. Sürücü Devresi

Gerçekleştirilen sürücü devresi bir adet 35 A 1000 V doğrultucu köprü diyot, MOC3010 optik yalıtımlı tiryak sürücüsü ve BTA41 tiryakından oluşmaktadır. Şebeke gerilim köprü diyot ile doğrultulduktan sonra rezistansın giriş ucuna uygulanmaktadır. Rezistansın çıkış ucu 10 mΩ dinamik dirençli 41 A 600 V'luk tiryakına bağlıdır. Denetleyici kartından gelen tetikleme sinyali MOC3010 optik yalıtımlı tiryak sürücü entegresi üzerinden BTA41'e uygulanmaktadır. Böylece sürücü devresi ısıtıcı rezistansları sürmektedir. Şekil 56'de sürücü devresinin şematik diyagramı ve Şekil 57'de de baskı devre çizimi verilmiştir.

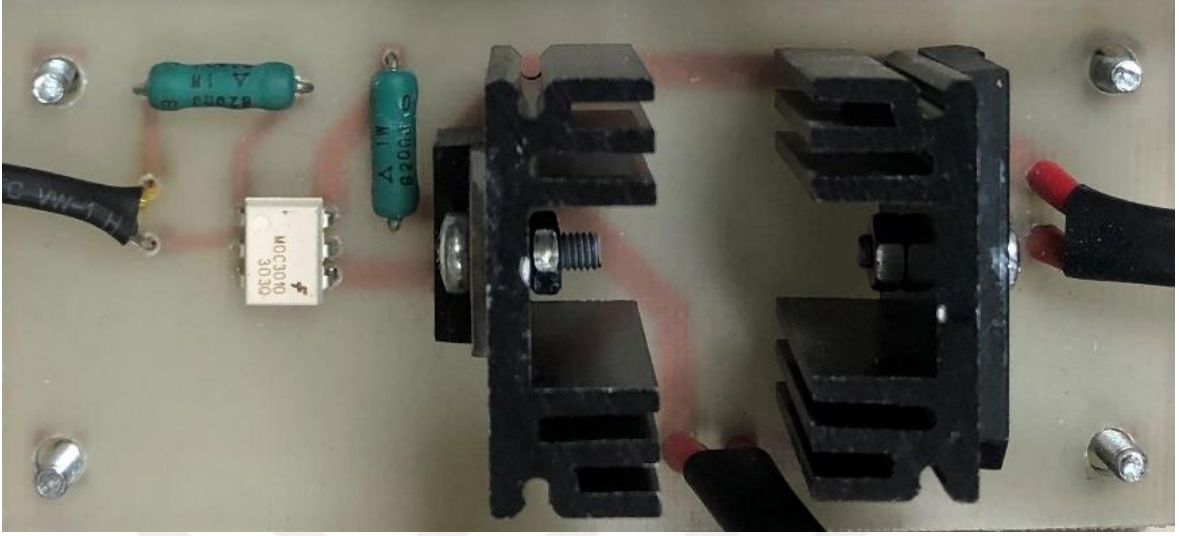


Şekil 56. Sürücü devresi şematik diyagramı



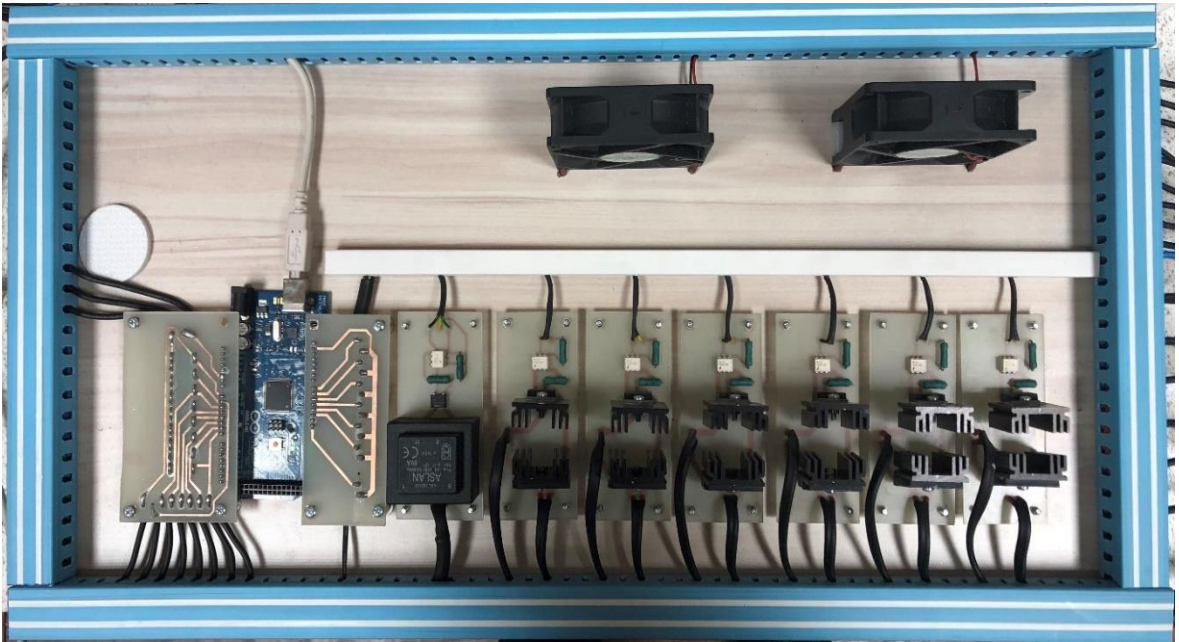
Şekil 57. Sürücü devresi baskı devre şeması

Şekil 58’de gerçekleştirilen sürücü devresi görülmektedir.



Şekil 58. Sürücü devresi

Mikrodenetleyici kartı, ADD kartı, sıfır geçiş algılama devresi ve sürücü kartların birleşmesiyle elektrik fırınının kontrol panosu gerçekleştirilmiştir. Şekil 59’de kontrol panosu görülmektedir.



Şekil 59. Kontrol panosu

## **2.4 Yazılım Birimi**

Yazılım kısmı, dizüstü bilgisayar ve denetleyici kartında bulunan programlardan oluşmaktadır. Bu programlar ile elektrik fırınının sıcaklık denetimi, gerçek zamanlı olarak açık-kapalı, oransal, oransal türevsel, oransal integral ve oransal integral ve türevsel kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### **2.4.1. Kontrol Yazılımı**

Kontrol yazılımı, gerçek zamanlı olarak her bir rezistansın sıcaklık değerini USB portu üzerinden mikrodenetleyici kartında almakta ve belirlenen referans sıcaklıklarla karşılaştırılarak anlık hatayı bulmaktadır. Sıcaklık hatası açık-kapalı, oransal, oransal türevsel, oransal integral ve oransal integral ve türevsel kontrol yöntemlerine giriş olarak uygulanmakta ve her bir rezistans için gereken doluluk boşluk oranları hesaplanmaktadır. Doluluk boşluk oranları %0 ile %100 arasında %1 çözünürlükle bulunmaktadır. Ardında bu değerler denetleyici kartına USB portu üzerinden aktarılmaktadır. Bu işlem saniyede bir gerçekleşmektedir.

### **2.4.2 Denetleyici Yazılımı**

Kontrol kartı, bilgisayar ile kontrol edilen sistem arasında bir veri yakalama kartı işlevi görmektedir. Bilgisayardan alınan doluluk boşluk değerleri ve sıfır algılama devresinin çıkışına göre kontrol sinyallerini oluşturmakta ve sürücü devrelerini tetiklemektedir. Ayrıca rezistans sıcaklıklarını ölçüp, gerçek zamanlı olarak bilgisayara aktarmaktadır.

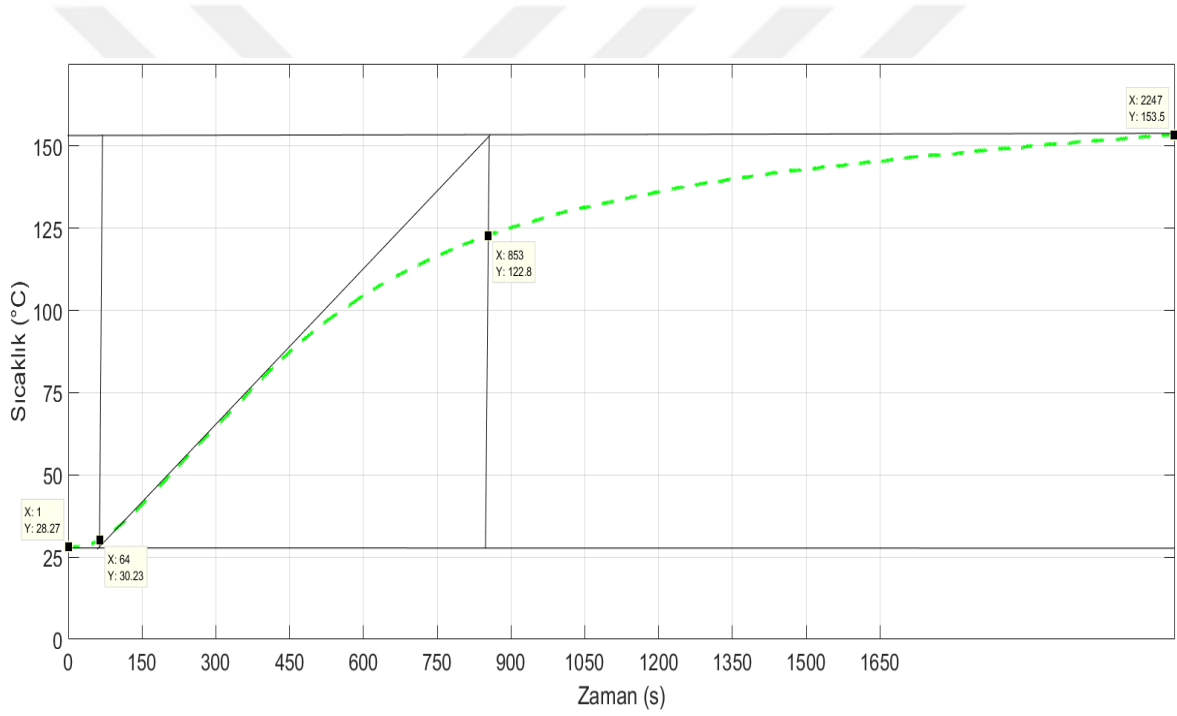
## **2.5. Deneysel Çalışmalar**

Bu kısımda sistem modeli elde edilmiş ve PID parametreleri bulunmuştur. Ayrıca gerçek zamanlı sıcaklık denetim sonuçları verilmiş ve elde edilen veriler irdelenmiştir.

## 2.5.1. Sistem Modellenmesi ve PID Parametrelerinin Belirlenmesi

### 2.5.1.1. Sistemin Modellenmesi

Tasarladığımız elektrik fırını birinci derece artı ölü zaman gecikmeli (*first order plus dead time, FOPDT*) bir sistemdir. Fırının modellenmesinde Ziegler-Nichols basamak cevabı yöntemi kullanılmıştır. Sistem modellemede öncelikle sistem girişine basamak işareti uygulanmıştır. Elde edilen çıkış işaretinden Ziegler-Nichols basamak cevabı yöntemi kullanılarak sistem modeli bulunmuştur. Şekil 60'da sistemin çıkış işareti görülmektedir.



Şekil 60. Sistemin çıkış işareti

Ziegler-Nichols basamak cevabı yöntemi kullanılarak sistemi modellerken aşağıdaki formülden yararlanılır.

$$G(s) = \frac{K * e^{-Ls}}{Ts+1} \quad (12)$$

Şekil 60'daki grafikten  $K = 153,50$ ,  $T = 789$  ve  $L = 64$  değerlerini elde edilmiştir. Bu değerlerden yararlanılarak sistem modeli (13)'de verildiği gibi bulunmuştur.



$$G(s) = \frac{153,3 * e^{-64s}}{789s+1} \quad (13)$$

### 2.5.1.2. PID Parametrelerinin Belirlenmesi

PID parametreleri, açık çevrim Ziegler-Nichols tanjant modeli PID parametre ayarlama yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Bu yöntemde de girişe basamak işareti uygulanıp, Şekil 61'deki sistem çıkışı elde edilmiştir. Bu grafiğinin en eğimli noktasında çizdiğimiz doğruyla  $T$ ,  $L$  ve  $K$  parametreleri bulunmuştur. Bu değerleri Tablo 6'da yerine koyarak PID parametrelerimizi elde ettik. Tablo 6'da verilen PID parametreleri elde edilmiştir.

Tablo 6. Ziegler-Nichols tanjant yöntemi ile bulunan PID parametreleri

<b>Kontrol Yöntemi</b>	$K_P$	$K_I$	$K_D$
Oransal	12,320	-	-
Oransal-İntegral	11.088	0,0047	-
Oransal-İntegral-Türevsel	14,780	0,0079	35

Sistem parametreleri belirlenirken, algılayıcıların ve dönüştürücülerin ölçüm hatalarının ve sistemi etkileyen bozucu sinyalleri göz önüne bulundurulması gerekmektedir. Bu nedenle yukarıdaki bulgulardan yola çıkılarak sistem parametrelerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Böylece elektrik fırının için en uygun PID parametrelerini bulunmuştur. Tablo 7'de kalibre edilmiş PID parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 7. Kalibrasyon işleminden sonra elde edilen PID parametreleri

<b>Kontrol Yöntemi</b>	$K_P$	$K_I$	$K_D$
Oransal	10	-	-
Oransal-İntegral	8	0,002	-
Oransal-İntegral-Türevsel	10	0,002	35

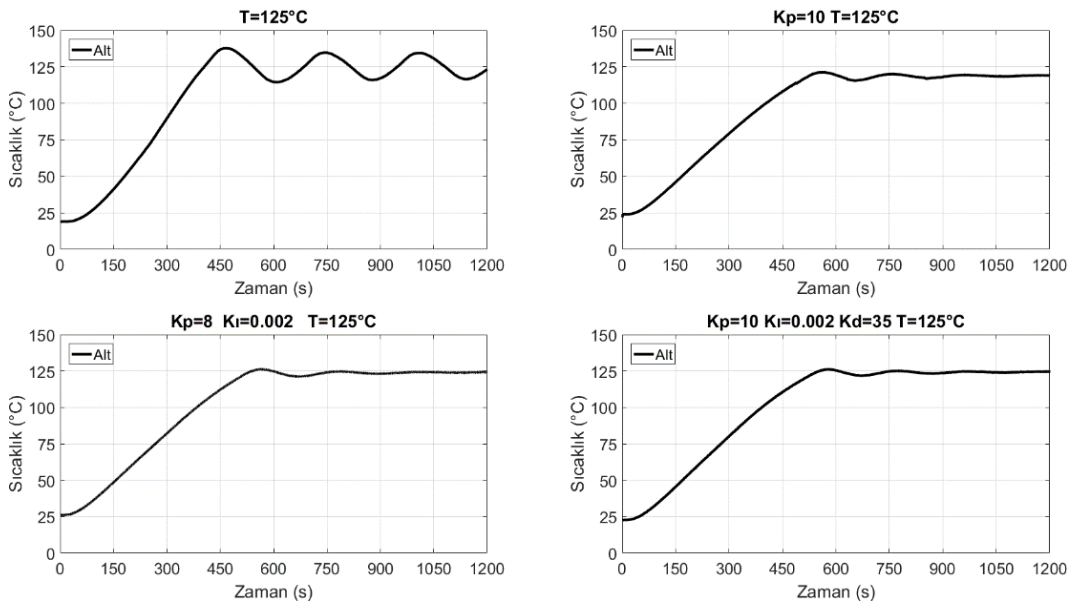
Sonuç olarak açık çevrim Ziegler-Nichols tanjant modeli PID parametre ayarlama yöntemi kullanılarak sıcaklık denetimi için gerekli olan PID parametreleri bulunmuştur.

## 2.5.2. Ölçüm Sonuçları

Bu kısımda verilen ölçüm sonuçlarında referans sıcaklık ( $T$ ) 125 °C, oransal kontrol için  $K_p = 10$ , oransal integral denetim için  $K_p = 8$  ve  $K_i = 0,002$  ve son olarak oransal integral türevsel kontrol için  $K_p = 10$ ,  $K_i = 0,002$  ve  $K_d = 35$  alınmıştır.

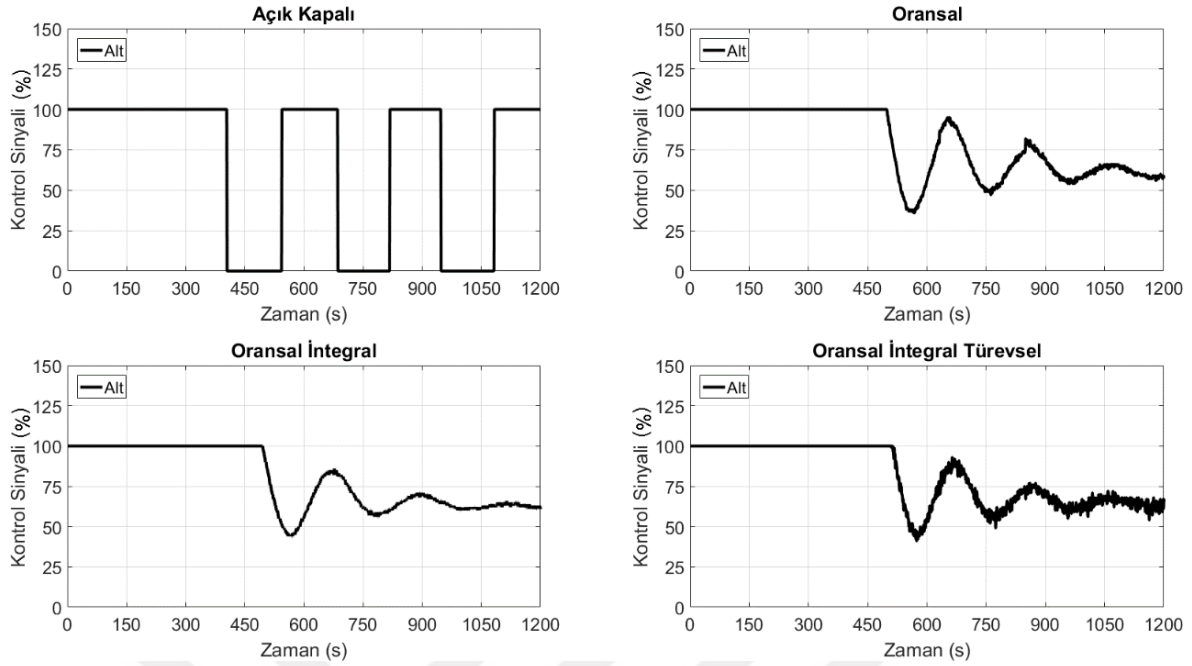
### 2.5.2.1. Tek Panel Sıcaklık Kontrolü

Bu başlık altında verilen ölçüm sonuçlarında yalnızca alt panel enerjilendirilmiş ve dört kontrol yöntemi ile sıcaklık denetimi yapılmıştır. Şekil 61'de alt panelin zamanla sıcaklık değişimi ve Şekil 62'de de kontrol işaretleri görülmektedir. Aç-kapa kontrol uygulandığında panel sıcaklığı referans değer etrafında salınım yapmaktadır. Kontrol yöntemi olarak oransal denetim seçildiğinde panel sıcaklığının referansa yakın ve altında bir değerde kararlı hale geldiği görülmektedir. Ancak bu yöntemde kalıcı durum hatası oluşmaktadır. PI ve PID kontrol yöntemlerinde ise kalıcı durum hatası ortadan kalmaktadır.



Şekil 61. Tek panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi





Şekil 62. Tek panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi

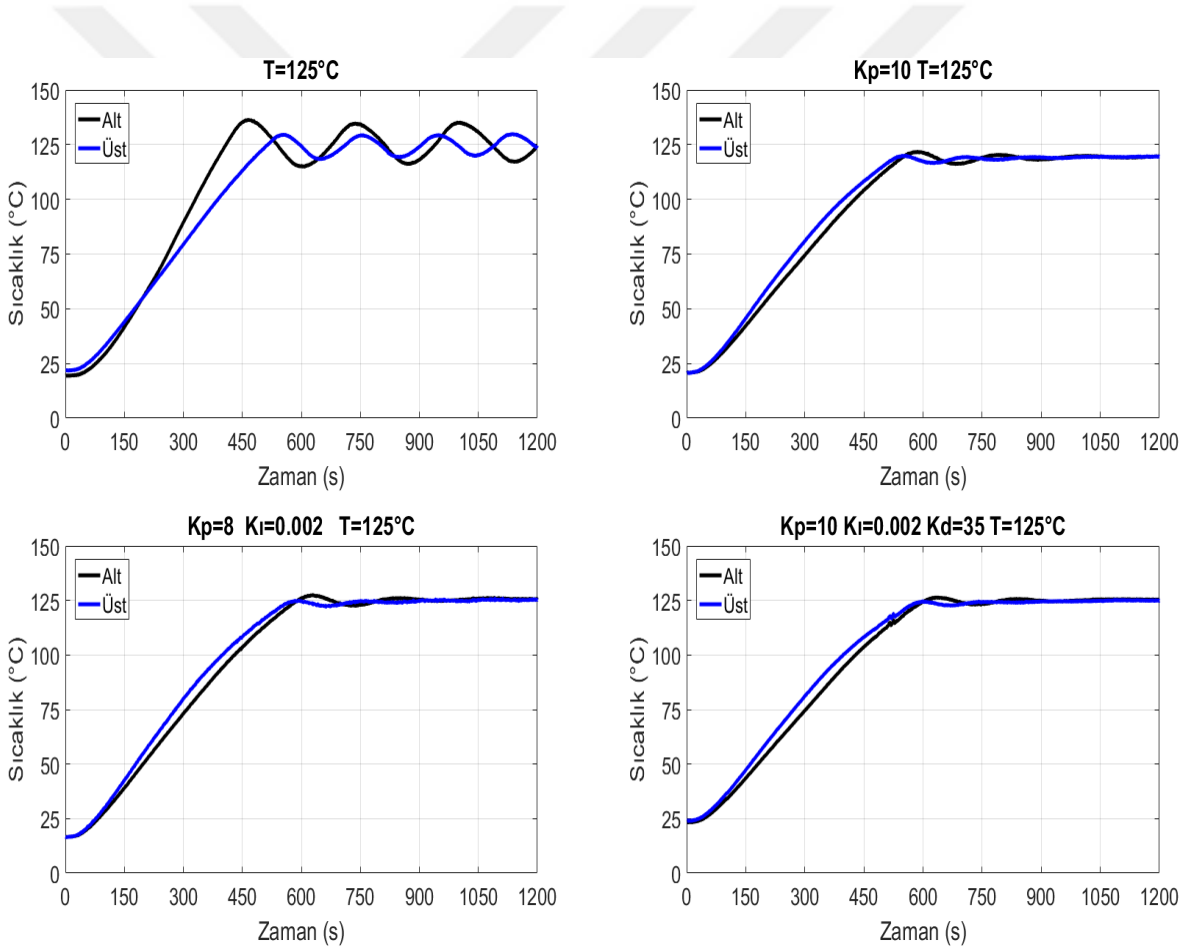
Tablo 8’de dört kontrol yönteminin başarımların değerleri verilmiştir. Her bir kontrol yöntemi için hatanın mutlak değerinin toplamı (*IAE*), hatanın karesinin toplamı (*ISE*), hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı toplamı (*ITAE*) ve hatanın karesinin zaman ağırlıklı toplamı (*ITSE*) başarımların değerleri hesaplanmış ve tabloda verilmiştir. Tablo incelendiğinde tek panel için en iyi sıcaklık kontrolünün PI denetim ile gerçekleştirildiği görülmektedir.

Tablo 8. Tek panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü başarımların değerleri

Parametre	Açık- Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	137,92	121,32	<b>126,10</b>	126,31
Aşma (%)	10,34	-	<b>0,88</b>	1,05
Oturma Süresi	-	1180,00	1161,00	<b>1140,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>466,00</b>	558,00	561,00	577,00
Kalıcı Hata (°C)	-	5,90	0,80	<b>0,50</b>
IAE	3,0692e+04	3,2983e+04	<b>2,7962e+04</b>	2,9050e+04
ISE	2,1337e+06	2,0863e+06	<b>1,9104e+06</b>	2,0679e+06
ITAE	7,5193e+06	8,8170e+06	<b>5,3719e+06</b>	5,4817e+06
ITSE	2.6583e+08	2.9822e+08	<b>2.4606e+08</b>	2.6884e+08

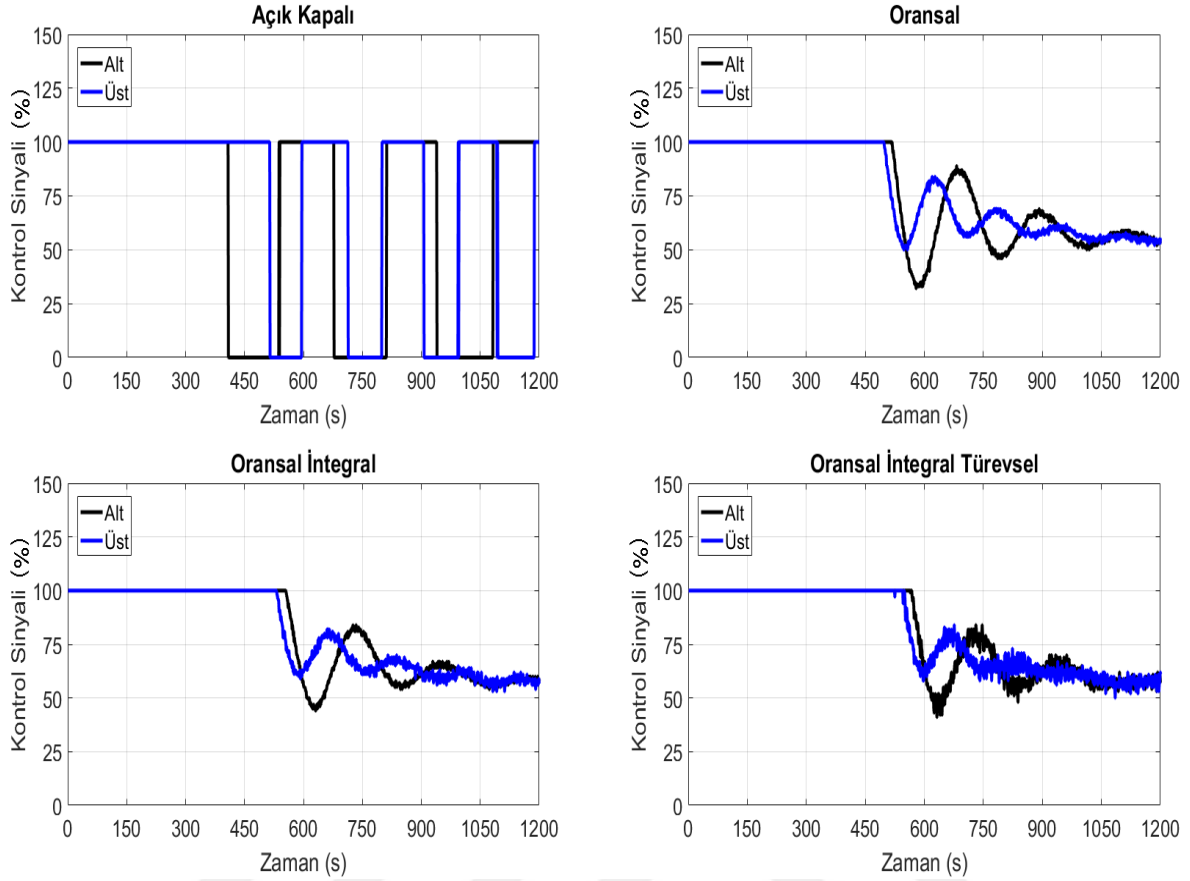
### 2.5.2.2. İki Panel Sıcaklık Kontrolü

Bu kısımda verilen ölçüm sonuçlarında alt panele ilave olarak üst panel de enerjilendirilmiştir. Panellerin sıcaklık denetiminde dört kontrol yöntemi kullanılmıştır. Şekil 63’de panel sıcaklıklarının zamanla değişimi ve Şekil 64’de de denetim sinyalleri görülmektedir. Tek panel durumunda olduğu gibi aç-kapa kontrolde, panel sıcaklığı referans değer etrafında dalgalanmaktadır. Oransal denetimde ise referans değer etrafındaki dalgalanma sönümlenmekte ve panel sıcaklıkları kararlı hale gelmektedir. Ancak oransal denetimde kalıcı durum hatası oluşmaktadır. Son olarak PI ve PID kontrol yöntemleri integral bileşeni sayesinde kalıcı durum hatasının ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 63. İki panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi

Tablo 9 ve Tablo 10’da dört kontrol yönteminin alt ve üst panel sıcaklık kontrollerindeki başarımların değerleri verilmiştir. Tablolar incelendiğinde her iki panel için de en iyi kontrol yönteminin PID denetim olduğu görülmektedir.



Şekil 64. İki panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi

Tablo 9. İki panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü başarımlı değerleri

Parametre	Açık- Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
<b>En Büyük Değer (°C)</b>	136,60	121,74	127,50	<b>126,63</b>
<b>Aşma (%)</b>	9,28	-	2,00	<b>1,31</b>
<b>Oturma Süresi</b>	-	<b>1095,00</b>	1127,00	1104,00
<b>Yükselme Süresi (s)</b>	<b>464,00</b>	574,00	627,00	640,00
<b>Kalıcı Hata (°C)</b>	-	5,70	0,30	<b>0,20</b>
<b>IAE</b>	4,0442e+04	3.4766e+04	3.2650e+04	<b>3.1176e+04</b>
<b>ISE</b>	5,1159e+06	2.3113e+06	2.4591e+06	<b>2.2183e+06</b>
<b>ITAE</b>	7,3778e+06	9.1108e+06	6.4547e+06	<b>6.1806e+06</b>
<b>ITSE</b>	4,6306e+08	3.3977e+08	3.4221e+08	<b>3.1579e+08</b>

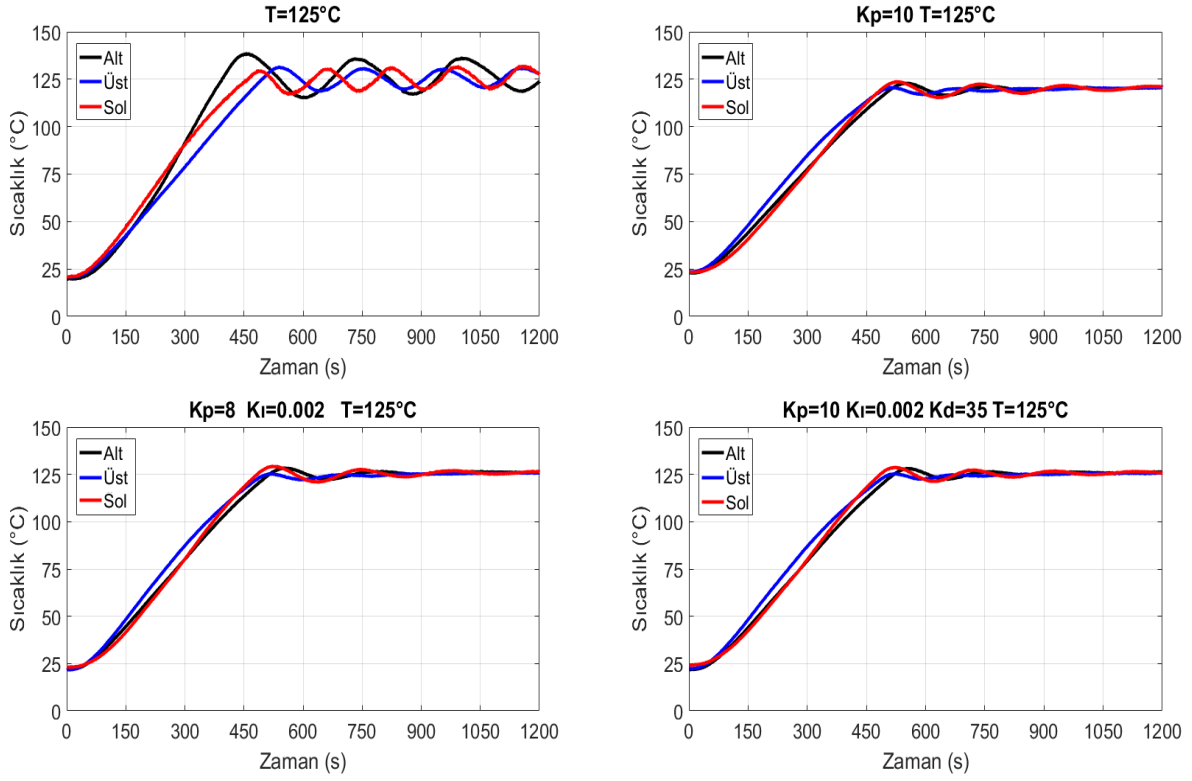
Tablo 10. İki panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık- Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	130,03	120,16	<b>126,22</b>	126.25
Aşma (%)	4,03	-	<b>0,98</b>	1,00
Oturma Süresi	-	1109,00	1144,00	<b>1040,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>555,00</b>	556,00	585,00	601,00
Kalıcı Hata (°C)	-	4,90	0,40	<b>0,30</b>
IAE	3,0522e+04	3,2806e+04	3,0153e+04	<b>2,8820e+04</b>
ISE	2,1285e+06	2,1125e+06	2,2467e+06	<b>1,9977e+06</b>
ITAE	6,6291e+06	8,5556e+06	5,5523e+06	<b>5,4435e+06</b>
ITSE	2,8027e+08	2,9050e+08	2,8759e+08	<b>2,6251e+08</b>

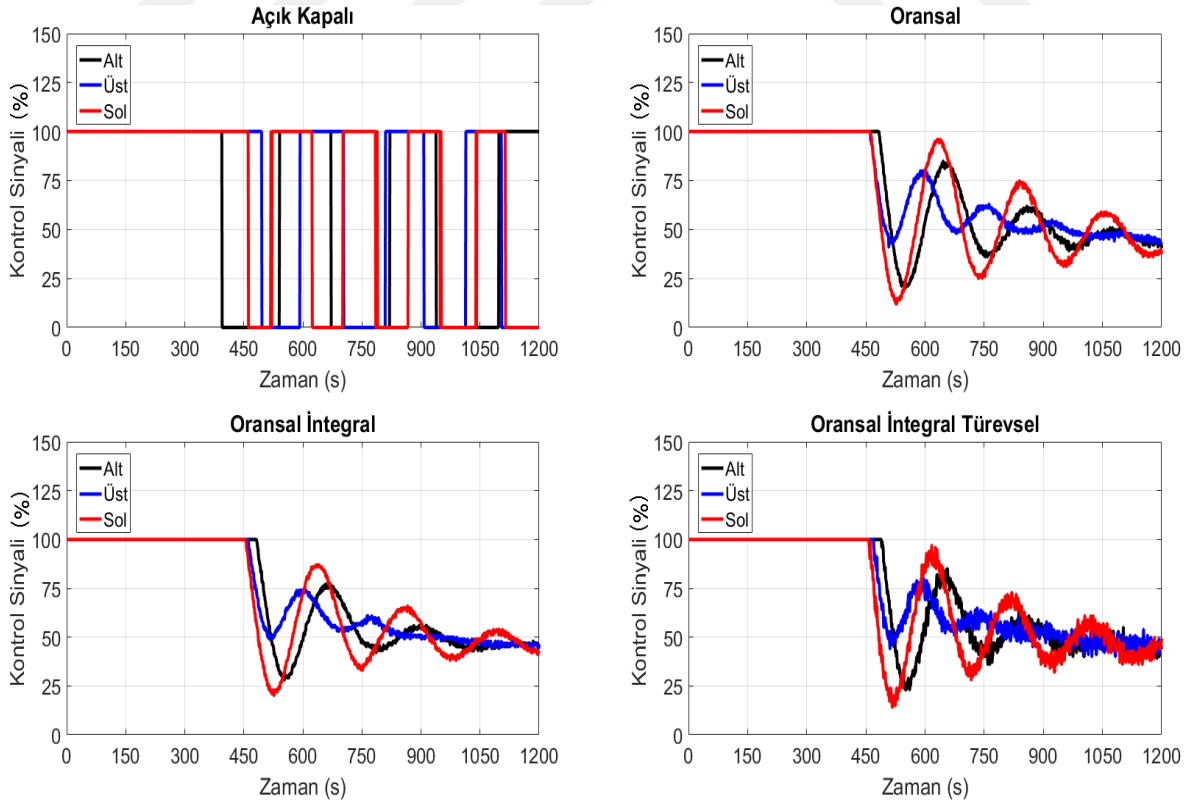
### 2.5.2.3. Üç Panel Sıcaklık Kontrolü

Bu bölümde sunulan ölçüm sonuçlarında alt, üst ve sol panele enerji verilmiş ve panellerin gerçek zamanlı sıcaklık kontrolü yapılmıştır. Şekil 65’de panel sıcaklıklarının değişimi ve Şekil 66’da da kontrol işaretleri verilmiştir. Aç-kapa denetimde panel sıcaklıkları referans değer etrafında dalgalanmaktadır. Oransal denetimde ise referans sıcaklık etrafındaki dalgalanma azalmakta ancak kalıcı durum hatası oluşmaktadır. Bununla birlikte PI ve PID kontrol yöntemleri benzer başarımlar değerlerine sahip olup, kalıcı durum hatası oluşturmamaktadır.

Dört yöntemin başarımlar değerleri Tablo 11, Tablo 12 ve Tablo 13’de özetlenmiştir. Tablo 11’de alt panel için en iyi deneyim yönteminin PI kontrol olduğu görülmektedir. Tablo 12 ve Tablo 13 dikkate alındığında ise üst ve sol panelleri için en iyi başarımlar değerleri PID denetimde elde etmiştir.



Şekil 65. Üç panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi



Şekil 66. Üç panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi

Tablo 11. Üç panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	138,54	122,93	128,51	<b>128,15</b>
Aşma (%)	10,83	-	2,81	<b>2,52</b>
Oturma Süresi	-	<b>1079,00</b>	1150,00	1084,00
Yükselme Süresi (s)	<b>454,00</b>	550,00	553,00	555,00
Kalıcı Hata (°C)	-	4,00	0,70	<b>0.40</b>
IAE	3,0252e+04	3.2498e+04	<b>2.8891e+04</b>	2.9155e+04
ISE	2,0904e+06	2,1548e+06	<b>2,0883e+06</b>	2,1192e+06
ITAE	7,3533e+06	8,0453e+06	<b>5,3967e+06</b>	5,4327e+06
ITSE	3,5877e+08	3,0118e+08	<b>2,6751e+08</b>	2,7448e+08

Tablo 12. Üç panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	131,43	121,19	126,64	<b>126,54</b>
Aşma (%)	4,70	-	1,31	<b>1,30</b>
Oturma Süresi	-	1067,00	1102,00	<b>1063,00</b>
Yükselme Süresi (s)	541,00	517,00	514,00	<b>511,00</b>
Kalıcı Hata (°C)	-	5,15	0,90	<b>0.40</b>
IAE	3,0942e+04	3,0486e+04	2,6458e+04	<b>2,6433e+04</b>
ISE	2,1824e+06	1,9408e+06	1,9049e+06	<b>1,9045e+06</b>
ITAE	6,8203e+06	7,5581e+06	4,4955e+06	<b>4,4698e+06</b>
ITSE	2,8726e+08	2,5299e+08	2,2354e+08	<b>2,2548e+08</b>

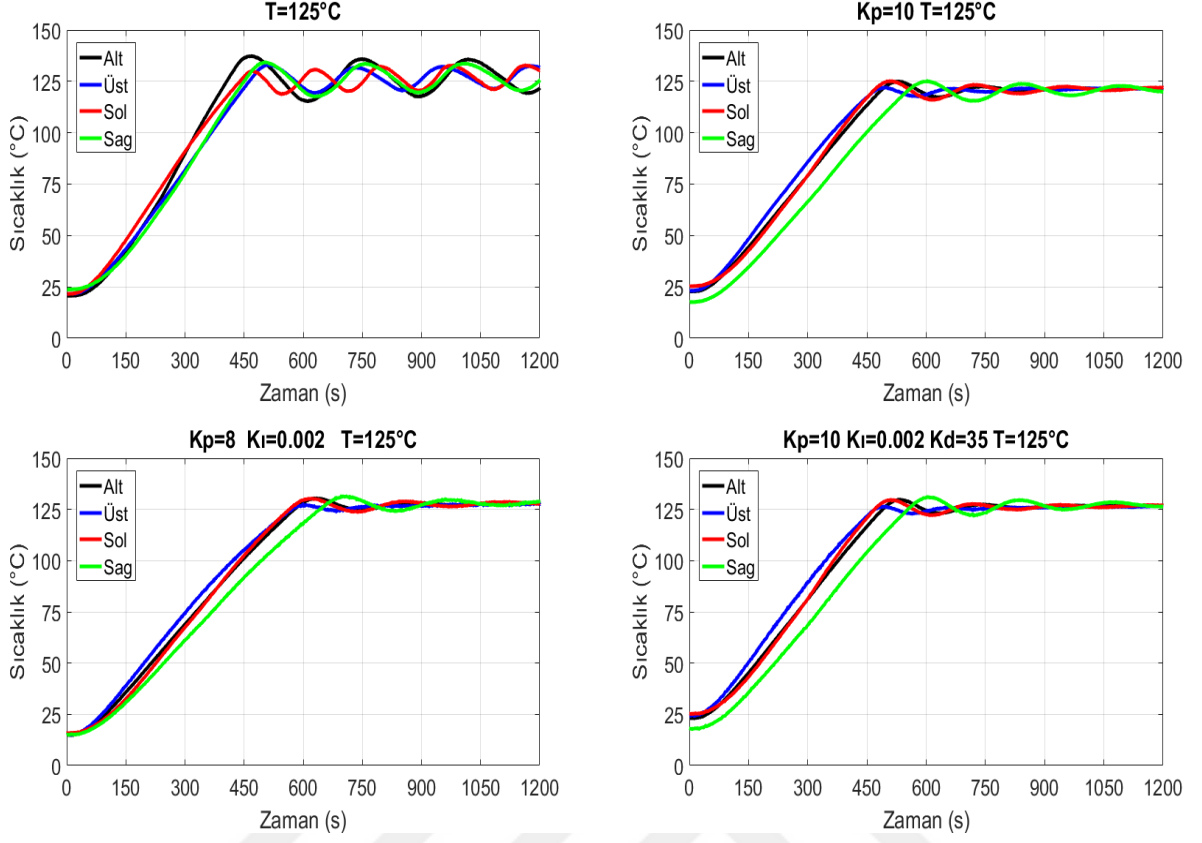
Tablo 13. Üç panel durumu için sol panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	132,10	123,76	129,32	<b>128.86</b>
Aşma (%)	5,68	-	3,46	<b>3.09</b>
Oturma Süresi	-	1128,00	1097,00	<b>1088,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>488,00</b>	526,00	522,00	516,00
Kalıcı Hata (°C)	-	4,40	1,00	<b>0.80</b>
IAE	2,7911e+04	3,2705e+04	2,8896e+04	<b>2,8650e+04</b>
ISE	1,9202e+06	2,2336e+06	2,1306e+06	<b>2,0981e+06</b>
ITAE	6,0280e+06	7,9874e+06	5,3465e+06	<b>5,2622e+06</b>
ITSE	2,5877e+08	3,1178e+08	2,7122e+08	<b>2,6930e+08</b>

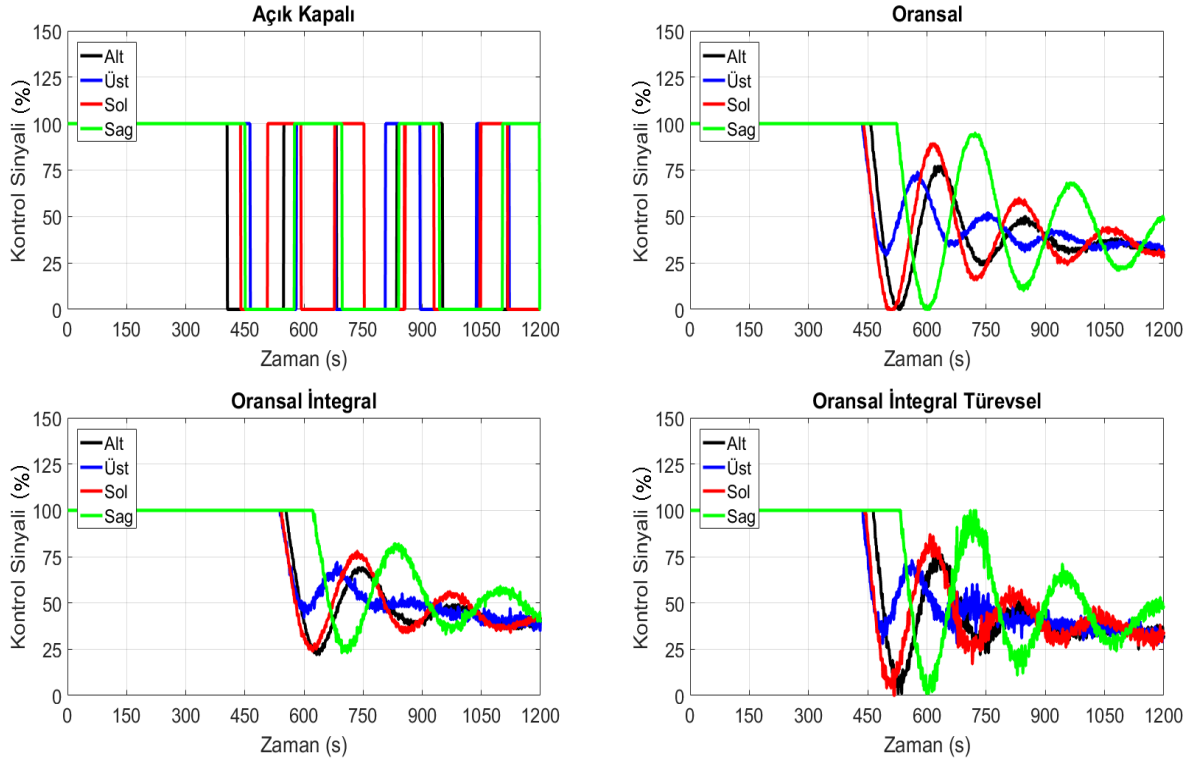
#### 2.5.2.4. Dört Panel Sıcaklık Kontrolü

Bu kısımda alt, üst, sol ve sağ paneller enerjilendirilmiş ve dört kontrol yöntemi kullanılarak gerçek zamanlı sıcaklık denetimi yapılmıştır. Her bir panelin zamana karşı sıcaklık değişimi Şekil 67’de ve panellere uygulanan kontrol sinyalleri de Şekil 68’de verilmiştir. Beklenildiği gibi aç-kapa kontrolde panel sıcaklıkları kararlı hale gelememektedir. Panellerin anlık sıcaklıkları referans değer etrafında salınım yapmaktadır. Oransal denetim aç-kapa kontrole göre daha iyi başarımlar sağlamakla beraber kalıcı durum hatası oluşturmaktadır. İntegral bileşenine sahip PI ve PID kontrol yöntemleri ise kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmakta ve en iyi başarımlar değerlerini vermektedir.

Her panelin sıcaklık değişim eğrilerinden başarımlar kriterleri hesaplanarak Tablo 14, Tablo 15, Tablo 16 ve Tablo 17’de verilmiştir. Tablolar analiz edildiğinde alt, üst, sol ve sağ paneller için PI ve PID kontrol yöntemleri yüksek başarımlar sağlamakla birlikte en iyi denetim yöntemi olarak PID kontrol ön plana çıkmaktadır.



Şekil 67. Dört panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi



Şekil 68. Dört panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi



Tablo 14. Dört panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	137,49	<b>125,11</b>	130,55	129,90
Aşma (%)	9,99	<b>0,09</b>	4,44	3,92
Oturma Süresi	-	1048,00	1116,00	<b>1040,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>455,00</b>	528,00	632,00	534,00
Kalıcı Hata (°C)	-	<b>3,00</b>	3,60	3,30
IAE	3,0272e+04	3,0852e+04	3,5317e+04	<b>2,8560e+04</b>
ISE	2,0752e+06	2,1059e+06	2,6656e+06	<b>2,0341e+06</b>
ITAE	7,3716e+06	7,0214e+06	7,8746e+06	<b>5,5011e+06</b>
ITSE	2,5983e+08	2,8081e+08	3,8776e+08	<b>2,5794e+08</b>

Tablo 15. Dört panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	133,06	122,22	128,62	<b>126,96</b>
Aşma (%)	6,45	-	2,90	<b>1,57</b>
Oturma Süresi	-	1077,00	1082,00	<b>1030,00</b>
Yükselme Süresi (s)	524,00	497,00	606,00	<b>488,00</b>
Kalıcı Hata (°C)	-	4,10	2,20	<b>1,90</b>
IAE	3,0091e+04	2,9080e+04	3,2776e+04	<b>2,5393e+04</b>
ISE	2,0964e+06	1,9122e+06	2,4578e+06	<b>1,7888e+06</b>
ITAE	6,7196e+06	6,6155e+06	6,8223e+06	<b>4,3741e+06</b>
ITSE	2,6904e+08	2,3772e+08	3,3422e+08	<b>2,0581e+08</b>

Tablo 16. Dört panel durumu için sol panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	132,86	<b>125,22</b>	130,41	129,81
Aşma (%)	6,29	<b>0,18</b>	4,33	3,85
Oturma Süresi	-	1026,00	1041,00	<b>1021,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>477,00</b>	505,00	612,00	510,00
Kalıcı Hata (°C)	-	3,80	2,60	<b>2,30</b>
IAE	3,7632e+04	3,0651e+04	3,5650e+04	<b>2,8197e+04</b>
ISE	2,8879e+06	2,0992e+06	2,7515e+06	<b>2,0372e+06</b>
ITAE	7,0599e+06	6,9857e+06	7,8610e+06	<b>5,2970e+06</b>
ITSE	3,5983e+08	2,8139e+08	4,0271e+08	<b>2,5789e+08</b>

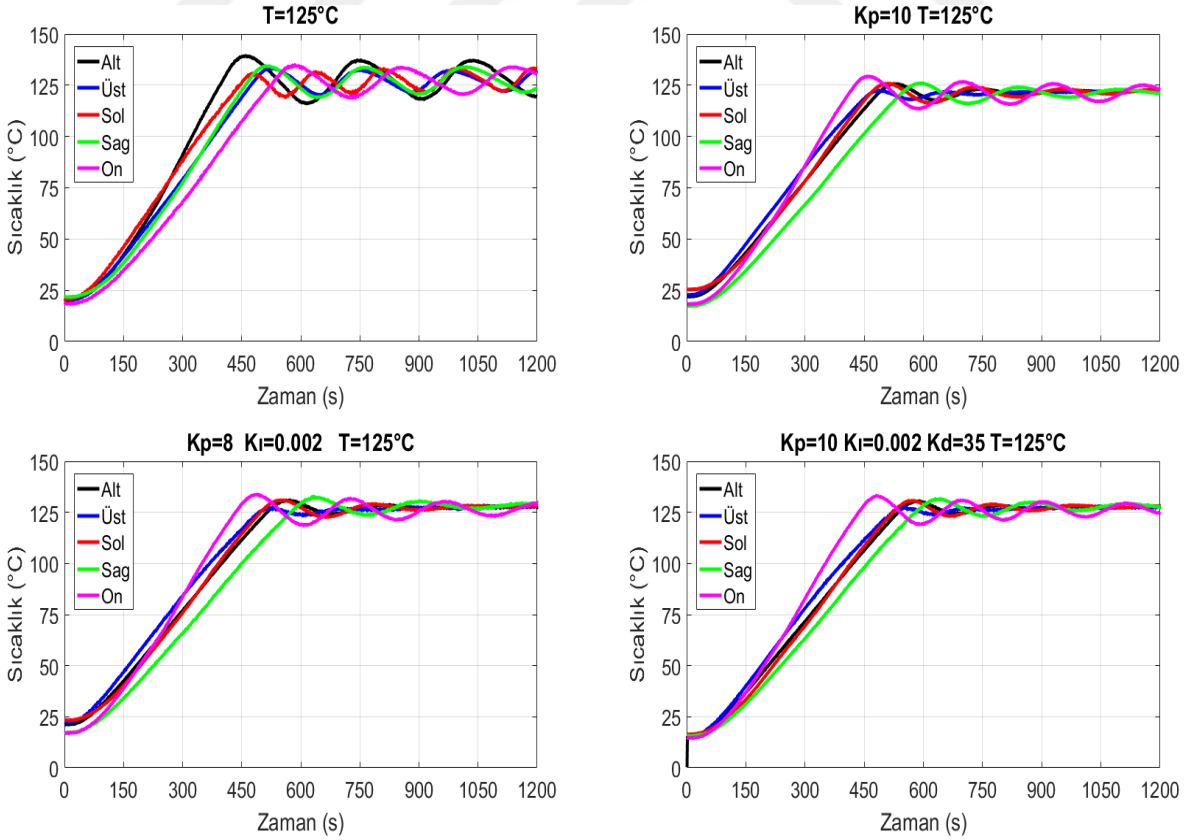
Tablo 17. Dört panel durumu için sağ panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	134,37	<b>125,25</b>	131,52	131,06
Aşma (%)	7,49	<b>0,20</b>	5,22	4,85
Oturma Süresi	-	1128,00	1164,00	<b>1092,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>583,00</b>	599,00	700,00	605,00
Kalıcı Hata (°C)	-	<b>2,90</b>	3,40	3,20
IAE	4,0934e+04	3,6848e+04	3,9542e+04	<b>3,4456e+04</b>
ISE	3,1613e+06	2,7084e+06	3,0347e+06	<b>2,6032e+06</b>
ITAE	7,1157e+06	<b>5,2970e+06</b>	9,5167e+06	7,4380e+06
ITSE	3,8630e+08	4,1388e+08	4,9336e+08	<b>3,7751e+08</b>

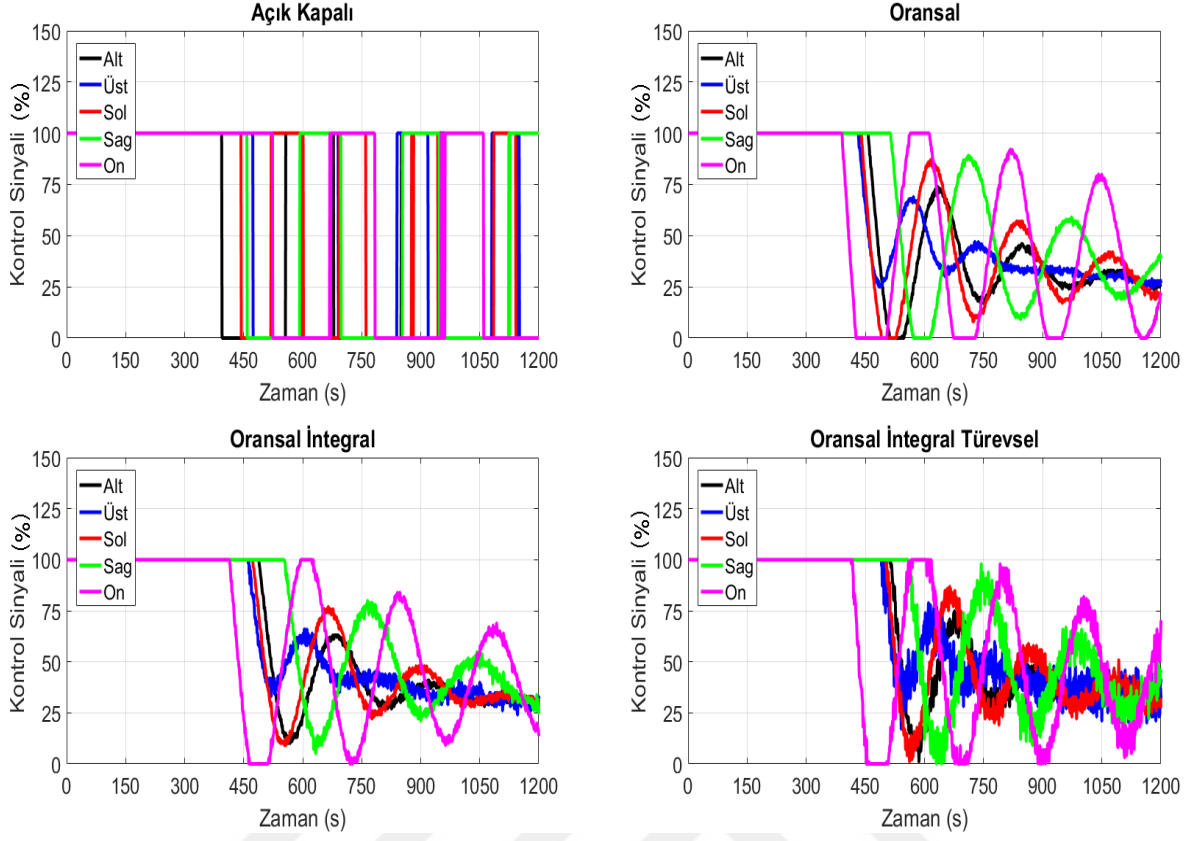
### 2.5.2.5. Beş Panel Sıcaklık Kontrolü

Bu kısımda fırının beş paneline güç uygulanmış ve her panel için ayrı ayrı sıcaklık denetimi yapılmıştır. Panel sıcaklıklarının değişimi Şekil 69 ve kontrol sinyalleri Şekil 70’de verilmiştir. Uygulanan kontrol yöntemleri içerisinde aç-kapa denetim kararlı duruma geçememektedir. Bu yöntemde panel sıcaklıkları referans değer etrafında dalgalanmaktadır. P, PI ve PID denetim yöntemleri ise kararlı duruma geçmektedir. Beş panel birbirleri üzerinde bozucu etkiye yol açmaktadır. Panellerin bu etkisi oransal denetimdeki kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmış ancak PI ve PID denetim yöntemlerinde az da olsa kalıcı durum hatasına yol açmıştır.

Panellerin sıcaklık değişim grafikleri kullanılarak elde edilen başarımlar Tablo 18, Tablo 19, Tablo 20, Tablo 21 ve Tablo 22’de sunulmuştur. Her panel için oransal denetim tabanlı yöntemler aç-kapa denetimden daha iyi sonuç vermiştir. Tablolar irdelendiğinde beş panelin gerçek zamanlı sıcaklık denetimi için iyi yöntemin oransal kontrol olduğu görülmektedir.



Şekil 69. Beş panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi



Şekil 70. Beş panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi

Tablo 18. Beş panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	139,37	<b>125,73</b>	130,94	130,68
Aşma (%)	11,49	<b>0,58</b>	4,52	4,54
Oturma Süresi	-	1044,00	1032,00	1037,00
Yükselme Süresi (s)	<b>461,00</b>	527,00	566,00	582,00
Kalıcı Hata (°C)	-	3,00	2,30	<b>1,90</b>
IAE	3.0494e+04	<b>3.0857e+04</b>	3.1009e+04	3.3688e+04
ISE	3.0786e+06	<b>2.1532e+06</b>	2.2077e+06	2.5519e+06
ITAE	7.6084e+06	6.7872e+06	<b>6.6148e+06</b>	7.2107e+06
ITSE	3.6320e+08	<b>2.8670e+08</b>	2.9621e+08	3.5397e+08

Tablo 19. Beş panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	133,35	122,67	128,58	<b>128,45</b>
Aşma (%)	6,68	-	2,86	<b>2,76</b>
Oturma Süresi	-	<b>1053,00</b>	1055,00	1093,00
Yükselme Süresi (s)	523,00	<b>484,00</b>	514,00	550,00
Kalıcı Hata (°C)	-	3,10	2,00	<b>1,90</b>
IAE	3,1032e+04	2,8887e+04	<b>2,7910e+04</b>	3,1010e+04
ISE	2,2077e+06	<b>1,9404e+06</b>	1,9704e+06	2,3430e+06
ITAE	6,8559e+06	6,3165e+06	<b>5,4320e+06</b>	6,1459e+06
ITSE	2,8876e+08	<b>2,3977e+08</b>	2,4216e+08	3,0083e+08

Tablo 20. Beş panel durumu için sol panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	133,28	<b>125,78</b>	131,03	130,09
Aşma (%)	6,62	<b>0,62</b>	4,82	4,07
Oturma Süresi	-	1117,00	1099,00	<b>1064,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>475,00</b>	591,00	633,00	637,00
Kalıcı Hata (°C)	-	2,90	<b>2,80</b>	2,90
IAE	4,8322e+04	<b>3,0542e+04</b>	3,0990e+04	3,4136e+04
ISE	4,9674e+06	<b>2,1212e+06</b>	2,2367e+06	2,6459e+06
ITAE	6,1594e+06	<b>6,7593e+06</b>	6,5223e+06	7,2377e+06
ITSE	4,6320e+08	<b>2,8528e+08</b>	3,0255e+08	3,7213e+08

Tablo 21. Beş panel durumu için sağ panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	134,61	<b>125,99</b>	132,92	131,68
Aşma (%)	7,69	<b>0,79</b>	6,34	5,34
Oturma Süresi	-	1100,00	1080,00	<b>1038,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>483,00</b>	507,00	546,00	569,00
Kalıcı Hata (°C)	-	3,60	2,70	<b>2,60</b>
IAE	3,1900e+04	<b>3,6255e+04</b>	3,6458e+04	3,7415e+04
ISE	3,2805e+06	<b>2,6951e+06</b>	2,7393e+06	2,8980e+06
ITAE	7,3224e+06	<b>7,2378e+06</b>	8,4658e+06	8,5755e+06
ITSE	5,0686e+08	<b>4,0560e+08</b>	4,1566e+08	4,4532e+08

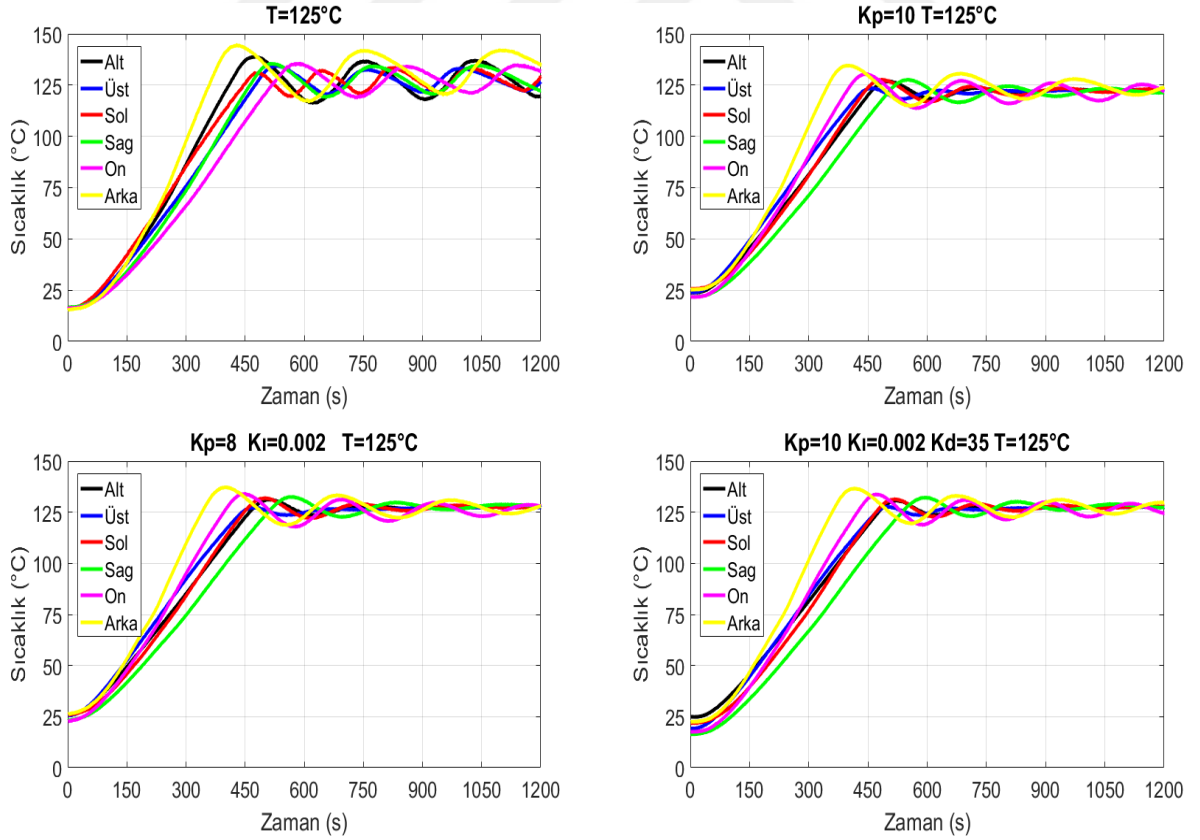
Tablo 22. Beş panel durumu için ön panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	135,02	<b>129,43</b>	133,81	133,18
Aşma (%)	8,02	<b>3,54</b>	7,05	6,54
Oturma Süresi	-	1114,00	1135,00	<b>1094,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>414,00</b>	459,00	486,00	485,00
Kalıcı Hata (°C)	-	3,60	<b>2,90</b>	3,00
IAE	3,5840e+04	<b>3,0039e+04</b>	3,0040e+04	3,0426e+04
ISE	2,6319e+06	<b>2,1953e+06</b>	2,2624e+06	2,3591e+06
ITAE	8,7651e+06	6,5110e+06	6,0602e+06	<b>6,0037e+06</b>
ITSE	3,9112e+08	<b>2,7086e+08</b>	2,7534e+08	2,8536e+08

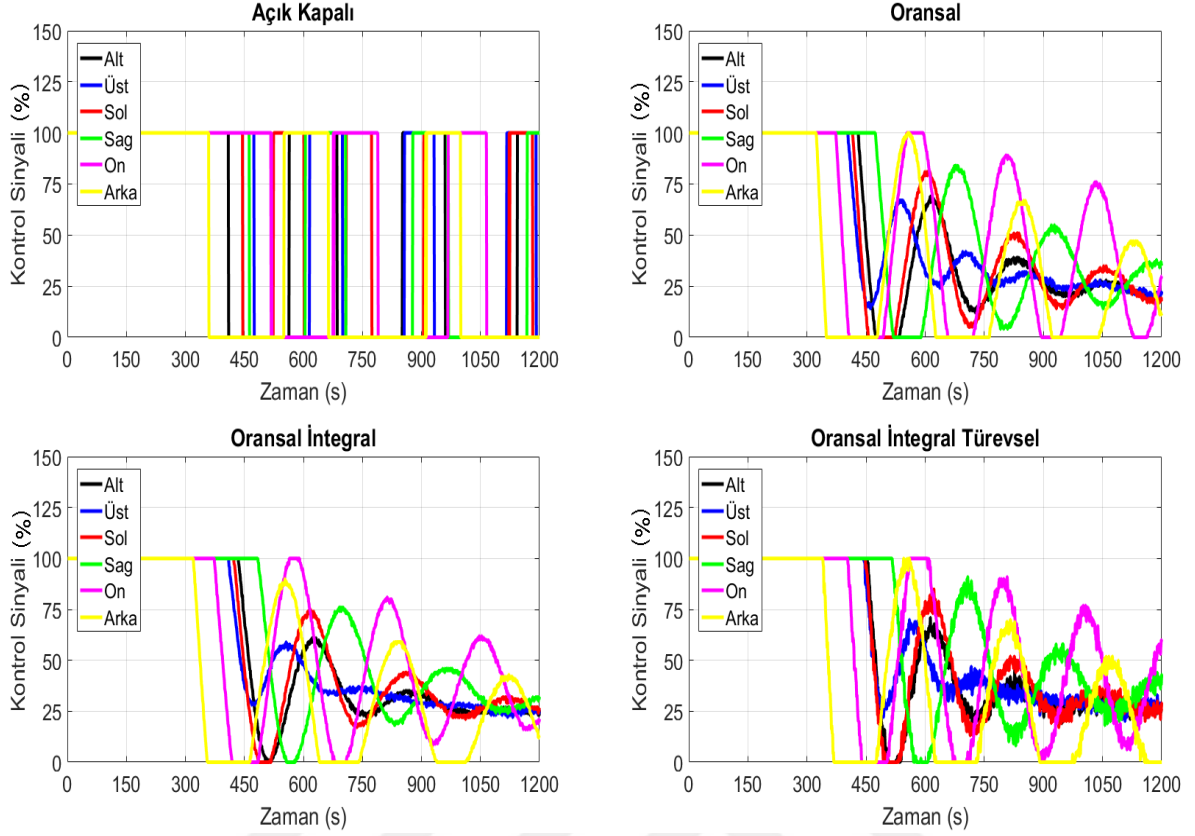
### 2.5.2.6. Altı Panel Sıcaklık Kontrolü

Bu başlık altında tüm panellere güç uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçları ve başarımların değerleri özetlenmiştir. Panel sıcaklıklarının zamana karşı değişimi Şekil 71’de ve uygulanan kontrol sinyalleri de Şekil 72’de verilmiştir. Aç-kapa denetiminde panel sıcaklıkları referans değer etrafında dalgalanmaktadır. Panellerin birbirleri üzerindeki bozucu etkisi nedeniyle P, PI ve PID denetim yöntemlerinde de dalgalanmanın zamanla azaldığı ancak tamamen sönümlenmediği görülmektedir. Şekil 71’de oransal denetim yöntemlerinin benzer başarımla sahip olduğu görülmekle beraber PI denetim en iyi kontrol yöntemi olarak öne çıkmaktadır.

Altı panelden alınan sıcaklık değişimleri kullanılarak Tablo 23, Tablo 24, Tablo 25, Tablo 26, Tablo 27 ve Tablo 28’de verilen başarımların değerleri hesaplanmıştır. Altı panel içinde en iyi başarımların değerleri PI denetim yöntemi ile elde edilmiştir. Bununla birlikte P ve PID denetleyici başarımlarının da PI denetleyici başarımlarına yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 71. Altı panel için sıcaklık işaretinin zamanla değişimi



Şekil 72. Altı panel için kontrol sinyalinin zamanla değişimi

Tablo 23. Altı panel durumu için alt panel sıcaklık kontrolü başarımlı değerleri

Parametre	Açık- Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
<b>En Büyük Değer (°C)</b>	138,91	<b>126,99</b>	131,27	130,75
<b>Aşma (%)</b>	11,13	1,59	9,82	4,60
<b>Oturma Süresi</b>	-	1020,00	1004,00	<b>919,00</b>
<b>Yükselme Süresi (s)</b>	<b>473,00</b>	498,00	506,00	522,00
<b>Kalıcı Hata (°C)</b>	-	<b>2,60</b>	3,30	2,70
<b>IAE</b>	3,1996e+04	2,8984e+04	<b>2,7203e+04</b>	2,8537e+04
<b>ISE</b>	2,2825e+06	2,0157e+06	<b>1,8322e+06</b>	1,9902e+06
<b>ITAE</b>	7,8833e+06	6,0228e+06	<b>5,5218e+06</b>	5,7475e+06
<b>ITSE</b>	2,9224e+08	2,5685e+08	<b>2,2585e+08</b>	2,5401e+08



Tablo 24. Altı panel durumu için üst panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	134,53	123,50	<b>127,93</b>	128,03
Aşma (%)	7,62	-	<b>2,34</b>	2,42
Oturma Süresi	-	1009,00	1070,00	<b>933,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>430,00</b>	461,00	468,00	500,00
Kalıcı Hata (°C)	-	2,80	2,50	<b>2,30</b>
IAE	3,2658e+04	2,7088e+04	<b>2,4742e+04</b>	2,8204e+04
ISE	2,4168e+06	1,8289e+06	<b>1,6807e+06</b>	2,0640e+06
ITAE	7,2316e+06	5,5517e+06	<b>4,5801e+06</b>	5,3888e+06
ITSE	3,2182e+08	2,1503e+08	<b>1,8911e+08</b>	2,4848e+08

Tablo 25. Altı panel durumu için sol panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	133,61	<b>127,65</b>	131,96	131,40
Aşma (%)	6,89	<b>2,12</b>	5,57	5,12
Oturma Süresi	-	1013,00	1110,00	<b>981,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>481,00</b>	551,00	563,00	595,00
Kalıcı Hata (°C)	-	<b>2,90</b>	3,80	3,10
IAE	2,9775e+04	2,9173e+04	<b>2,7778e+04</b>	3,0480e+04
ISE	2,1670e+06	2,0466e+06	<b>1,9270e+06</b>	2,2517e+06
ITAE	6,3709e+06	6,1150e+06	<b>5,5799e+06</b>	6,1927e+06
ITSE	2,9224e+08	2,6407e+08	<b>2,4003e+08</b>	2,9591e+08

Tablo 26. Altı panel durumu için sağ panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	135,60	<b>127,74</b>	132,50	132,23
Aşma (%)	8,48	<b>2,19</b>	6,00	5,78
Oturma Süresi	-	1099,00	1072,00	<b>1011,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>480,00</b>	490,00	496,00	515,00
Kalıcı Hata (°C)	-	3,00	2,50	<b>2,10</b>
IAE	3,4023e+04	3,3256e+04	<b>3,1516e+04</b>	3,5343e+04
ISE	2,5469e+06	2,4053e+06	<b>2,2247e+06</b>	2,7103e+06
ITAE	7,9529e+06	<b>6,1927e+06</b>	6,8882e+06	7,8286e+06
ITSE	3,5017e+08	3,4486e+08	<b>3,0876e+08</b>	3,9546e+08

Tablo 27. Altı panel durumu için ön panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	135,74	<b>130,41</b>	134,10	133,77
Aşma (%)	8,59	<b>4,33</b>	7,28	7,02
Oturma Süresi	-	1127,00	1059,00	<b>1035,00</b>
Yükselme Süresi (s)	<b>319,00</b>	398,00	400,00	414,00
Kalıcı Hata (°C)	-	3,70	2,90	<b>2,40</b>
IAE	3,6852e+04	2,8278e+04	<b>2,6286e+04</b>	2,9326e+04
ISE	2,7646e+06	2,0001e+06	<b>1,8236e+06</b>	2,2110e+06
ITAE	9,0875e+06	6,0208e+06	<b>5,1984e+06</b>	5,7797e+06
ITSE	4,1501e+08	2,3901e+08	<b>2,0493e+08</b>	2,6367e+08

Tablo 28. Altı panel durumu için arka panel sıcaklık kontrolü başarımlar değerleri

Parametre	Açık-Kapalı	Oransal	Oransal İntegral	Oransal İntegral Türevsel
En Büyük Değer (°C)	144,64	<b>134,63</b>	137,30	136,66
Aşma (%)	15,71	<b>7,70</b>	9,84	9,33
Oturma Süresi	-	<b>1117,00</b>	1180,00	1150,00
Yükselme Süresi (s)	<b>426,00</b>	440,00	451,00	472,00
Kalıcı Hata (°C)	-	3,20	<b>2,70</b>	2,80
IAE	3,3119e+04	<b>2,5391e+04</b>	2,3941e+04	2,6122e+04
ISE	2,2607e+06	1,7298e+06	<b>1,5759e+06</b>	1,8375e+06
ITAE	9,6133e+06	5,2312e+06	<b>4,7773e+06</b>	5,2500e+06
ITSE	3,1271e+08	2,6367e+08	<b>1,6457e+08</b>	2,0071e+08

### 3. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tezinde üç boyutlu ısıtma yapan bir elektrik fırınının tasarımı, üretimi, testi ve kontrolü yapılmıştır. Bu tez kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır:

- Fırının açık-kapalı denetiminde hazne sıcaklığının istenen referans değer etrafında tutulduğu ancak sistemin ölü zamanı ve gecikmesi nedeniyle sıcaklığın referans değer etrafında dalgalandığı tespit edilmiştir.
- Açık-kapalı denetim ile fırın hem homojen ve hem de heterojen ısıtma şekillerinde çalıştırılmıştır.
- Oransal denetim kullanılarak referans değer etrafındaki sıcaklık dalgalanması azaltılmıştır. Ancak sistemde kalıcı durum hatası oluşmuştur.
- Oransal integral denetleyici ile sıcaklık kontrolünde integral bileşeni kalıcı hatayı ortadan kaldırmış ve anlık sıcaklığın referans değer üzerine oturması sağlanmıştır.
- Oransal türev denetleyici ile sıcaklık geçişlerinin daha yumuşak olması sağlanmıştır. Türev bileşenin sistemin tepkisini önceden kestirmekte ve kontrol sinyalini referans değeri sağlayacak şekilde güncellemektedir. Ancak bu denetleyici türünde integral bileşeni olmadığı için yine kalıcı durum hatası oluşmaktadır.
- Oransal integral türev denetleyici en iyi sıcaklık kontrolünü sağlamaktadır. Denetleyici oransal bileşeni ile kontrol sinyaline anlık algılayıcı verilerine göre müdahale etmektedir. İntegral bileşeni ile kontrol işleminin başından itibaren tüm geçmiş dikkate alınmakta ve kontrol sinyali güncellenmektedir. Ayrıca kalıcı durum hatası ortadan kaldırılmaktadır. Türev bileşeni sistemin gelecek davranışı hakkında bilgi vermektedir. Bu bileşen ile kontrol sinyali fırın sıcaklığının olası değerine göre kontrol sinyaline etki etmektedir.
- Uygulanan dört kontrol yönteminde de tek veya birbirine uzak panellerde istenen sıcaklık kontrolünün sağlandığı görülmüştür. Ancak komşu paneller birbirleri bozucu etki oluşturmakta ve referans değerden sapmalara yol açmaktadır. Bu durum dört kontrol yönteminde de her panelin bağımsız olarak denetlenmesinde kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, bu yüksek lisans çalışmasında üç boyutlu ısıtma yapan bir elektrik fırınının gerçek zamanlı sayısal kontrolü yapılmıştır. Fırının hazne sıcaklığı açık-kapalı, oransal, oransal integral, oransal türev ve oransal integral türev denetleyici ile kontrol edilmiş ve bu yöntemler birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla elde edilen bulguların teorik sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



#### 4. ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezinde, üç boyutlu ısıtma yapan bir elektrik fırınının gerçek zamanlı sayısal kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu alanda çalışan araştırmacılara yol göstermek ve elde edilen sonuçları daha da ileri taşımak amacıyla sıcaklık denetimine yönelik başlıca öneriler şunlardır:

- Bu tezde, fırının üretimi tamamen temel el aletleri kullanılarak yapılmıştır. Bu nedenle fırının kupasında ve panellerinde üretim toleransları meydana gelmiştir. Bu toleranslar altı panelin birebir aynı çalışmamasına yol açmıştır. Bu durumu ortadan kaldırmak için fırının üretimince bilgisayarlı numerik kontrol makinesi kullanımı toleransları en aza indirecek ve tüm panellerin hemen hemen aynı tepkileri vermesi sağlanabilir.
- Panellerde 1500 W gücünde ısıtıcı rezistanslar kullanılmıştır. Bu rezistanslar yerine panel ısıtıcıların kullanımı daha homojen ısıtma sağlanabilir.
- Fırın sıcaklığının algılanmasında metal kılıflı PT100 algılayıcıları kullanılmıştır. Bu algılayıcılar yerine kılıfsız seramik PT100 algılayıcılarının kullanımı ile daha hızlı sıcaklık algılama ve buna bağlı olarak daha uygun kontrol sinyallerinin üretilebilir.
- Fırının sıcaklık kontrolünde her panel birbirinde bağımsız düşünülmüştür. Ancak panelleri birbirlerine bozucu etki oluşturmaktadır. Sıcaklık denetimini tüm panelleri bir bütün olarak ele alacak kontrol yöntemlerinin kullanılması daha başarılı sonuçlar elde edilebilir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Walendziuk, W., Parallel Implementation of the Three-Dimensional Temperature Distribution Field in a Floor with Electrical Heating System, Proceedings International Conference on Parallel Computing in Electrical Engineering, Ağustos 2000, Trios-Rivieres, 1, 208-212.
2. Illes, B., Krammer, O., Harsanyi, G., Illyefavi-Vitez, Z. ve Szabo, A., 3D Investigations of the Internal Convection Coefficient and Homogeneity in Reflow Ovens, International Spring Seminar on Electronics Technology, Mayıs 2007, Cluj-Napoca, 30, 320-325.
3. Allan, S. M., Fall, M. L., Kiley, E. M., Kopyt, P., Shulman, H. S. ve Yakovlev, V. V., Modeling of Hybrid Heat Radiation and Microwave High Temperature Processing of Limestone, IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, Haziran 2012, Montreal, 1, 1-3.
4. Sahyoun, S., Nelson, C., Djouadi, S. ve Kuruganti, T., Control and Room Temperature Optimization of Energy Efficient Buildings, IEEE International Conference on Control Applications, Ekim 2012, Dubrovnik, 1, 962-967.
5. Roongprasert, K., Phasukkit, P., Airphaiboon, S., Pintavirooj, C., Thongpance, N. ve Sanpanich, A., Heat Transfer Efficiency Analysis of Infant Radiant Warmer by 3D Finite Element Method, Biomedical Engineering International Conference, Aralık 2012, Ubon Ratchathani, 5, 1-4.
6. Moon, U. ve Lee, K. Y., Hybrid Algorithm with Fuzzy System and Conventional PI Control for the Temperature Control of TV Glass Furnace, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 11, 4 (2003) 548 – 554.
7. Zhang, R., Xue, A. ve Gao, F., Temperature Control of Industrial Coke Furnace Using Novel State Space Model Predictive Control, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10, 4 (2017) 2084 – 2092.
8. Moon, U., A Practical Multiloop Controller Design for Temperature Control of a TV Glass Furnace, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 15, 6 (2007) 1137 – 1142.
9. Yoshitani, N. ve Hasegawa, A., Model-Based Control of Strip Temperature for the Heating Furnace in Continuous Annealing, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 6, 2 (1998) 146 – 156.
10. Berenguel, M., Camacho, E. F., Garcia-Martin, F. J. ve Rubio, F. R., Temperature Control of a Solar Furnace, IEEE Control Systems, 19, 1 (1999) 8-24.

11. Shen, L., He, J., Yang, C., Gui, W. ve Xu, H., Temperature Uniformity Control of Large-Scale Vertical Quench Furnaces for Aluminum Alloy Thermal Treatment, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 24, 1 (2016) 24 – 39.
12. Revankar, G. N. ve Yardi, A. R., On Line Programmable Control of Furnace Temperature, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, 23, 3 (1976) 296 – 301.
13. Beschi, M., Visioli, A., Berenguel, M. ve Yebra, L. J., Constrained Temperature Control of a Solar Furnace, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 20, 5 (2012) 1263 – 1274.
14. Fan, Y. ve Qiu, T., Analyses of Thermal Stresses and Control Schemes for Fast Temperature Ramps of Batch Furnaces, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 10, 4 (1997) 433 – 437.
15. Liao, Y., She, J. ve Wu, M., Integrated Hybrid-PSO and Fuzzy-NN Decoupling Control for Temperature of Reheating Furnace, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56, 7 (2009) 2704 – 2714.
16. Grassi, E. ve Tsakalis, K., PID Controller Tuning by Frequency Loop-Shaping Application to Diffusion Furnace Temperature Control, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 8, 5 (2000) 842 – 847.
17. Bolat, E., Erkan, K. ve Postalcioglu, S., Experimental Autotuning PID Control of Temperature Using Microcontroller, The International Conference on Computer as a Tool, Mayıs 2005, Belgrade, 1, 266-269.
18. Lin, H., Wei, L. ve Zikun, N., Development of PID Neural Network Control System for Temperature of Resistance Furnace, International Forum on Information Technology and Applications, Mayıs 2009, Chengdu, 3, 205-208.
19. Aeenmehr, A., Yazdizadeh, A. ve Ghazizadeh, M., Neuro-PID Control of an Industrial Furnace Temperature, IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, Ekim 2009, Kuala Lumpur, 2, 768-772.
20. Zrudsky, D. ve Webb, J., Proportional AC Power Control with Zero-Fire Capability, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 40, 4 (1993) 453-458.
21. Reenstra, A., Solid-State Proportional Temperature Controller, IEEE Transactions on Industry Applications, 9, 1 (1973) 58-62.
22. Stanbury, A., A Linear Proportional Temperature Controller, Journal of Scientific Instruments, 42, 11 (1965) 822-823.
23. Weiss, M., Sobolewski, J. ve Kreager, P., A Temperature Monitor and Proportional Direct Current Controller, Medical & Biological Engineering, 8, 2 (1970) 213-215.



24. Kim, H., Kim C. ve Yoon B., Automatic Body Temperature Control System for Small Animal Studies Using Dual Mode PI Control, Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Kasım 1998, Hong Kong, 4, 1967-1969.
25. Moon, U. ve Lee, K., Temperature Control of Glass Melting Furnace with Fuzzy Logic and Conventional PI Control, Proceedings of the 2000 American Control Conference, Haziran 2000, Chicago, 4, 2720-2724.
26. Hensel, B., Vasyutynskyy, V., Ploennigs, J. ve Kabitzsch, K., An Adaptive PI Controller for Room Temperature Control with Level-Crossing Sampling, Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control, Ekim 2012, Cardiff, 1, 197-204.
27. Baloch, M., Saad, N., Ismail, I., Baloch, T. ve Hanif, N., Design and Analysis of Pi-Fuzzy Controller for Temperature Control System, 2010 Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation, Mayıs 2010, Bornea, 1, 378-383.
28. Ye, J., Zhao, W. ve Zhao, Y., Temperature Control of Electric Heating Dryers Using Hybrid Control with the Immune and PD, 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Ekim 2006, Dalian, 2, 6257-6260.
29. Threesinghawong, N., Sanposh, P., Chinthaned, N. ve Srinophakun, P., Temperature Control of Koji Process by Using Fuzzy PD Controller, 2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Ağustos 2008, Krabi, 2, 669-672.
30. Dong, Z., MLP Compensated PD Power-Level Control for Modulator High Temperature Gas-Cooled Reactors, Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, Eylül 2014, Nanjing, 33, 6931-6936.
31. Dong Z., Output Feedback PD Power-Level Control for Modular High Temperature Gas-Cooled Reactors, The 26th Chinese Control and Decision Conference, Mayıs 2014, Changsha, 26, 4811-4816.
32. Bolat, E., Erkan, K. ve Postalcioglu, S., Experimental Autotuning PID Control of Temperature Using Microcontroller, The International Conference on Computer as a Tool, Mayıs 2005, Belgrade, 1, 266-269.
33. Lin, H., Wei, L. ve Zikun, N., Development of PID Neural Network Control System for Temperature of Resistance Furnace, International Forum on Information Technology and Applications, Mayıs 2009, Chengdu, 3, 205-208.
34. Aeenmehr, A., Yazdizadeh, A. ve Ghazizadeh, M., Neuro-PID Control of an Industrial Furnace Temperature, Symposium on Industrial Electronics & Applications, Ekim 2009, Kuala Lumpur, 2, 768-772.

35. Jie S., Zhengwei L. ve Xiaojiang M., The Application of Fuzzy-PID Control in Heating Furnace Control, International Conference on E-Learning E-Business Enterprise Information Systems and E-Government, Aralık 2009, Hong Kong, 1, 237-240.
36. Junming, X., Haiming, Z., Lingyun, J. ve Rui, Z., Based on Fuzzy - PID Self-Tuning Temperature Control System of the Furnace, International Conference on Electric Information and Control Engineering, Nisan 2011, Wuhan, 1, 1203-1206.
37. Yanmei, W., Yanzhu, Z. ve Baoyu, W., The Control Research of PID in Heating-Furnace System, International Conference on Business Management and Electronic Information, Mayıs 2009, Guangzhou, 3, 260-263.
38. Hambali, N., Janin, Z., Samsudin, N. ve Ishak, A., Process Controllability for air Temperature Oven System Using Open-Loop Reformulated Tangent Method, IEEE International Conference on Smart Instrumentation Measurement and Applications, Kasım 2000, Kuala Lumpur, 1, 1-6.
39. Chesof, A., Panaudomsup, S. ve Cheypoca, T., Evaluation of Explicit Model Predictive Temperature Control for On-Off Air Conditioner, 17th International Conference on Control Automation and Systems, Ekim 2017, Jeju, 1, 621-624.
40. Sutcliffe, H., The Principle of Reversed Lag Applied to On-Off Temperature Control, Proceedings of the IEE Part B Electronic and Communication Engineering, Mart 1960, Belgrade, 107, 209-215.
41. Roots, W. ve Woods, J., On-Off Control of Thermal Processes, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, 16, 2 (1969) 136-146.

## ÖZGEÇMİŞ

01.10.1992 tarihinde Trabzon'da doğdu. Lise öğrenimini Tevfik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2015 yılında bu bölümden Elektrik-Elektronik Mühendisi unvanıyla dereceyle mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı ve yüksek lisansa devam etmektedir. Lisans eğitimim ve devam etmekte olan yüksek lisans eğitimim süresinde kontrol sistemleri, sayısal kontrol, yenilenebilir enerji sistemleri ve mikrodenetleyiciler üzerinde çalışmalar yapmış olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler**

1. **Güney A.**, Çakır O., "Bir Elektrik Fırınının Oransal İntegral Türevsel Denetleyici ile Gerçek Zamanlı Kontrolü", Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, KOCAELİ, TÜRKİYE, 12-13 Mayıs 2017, vol.2, no.1, pp.1-2
2. Çakır O., Yazgan A., Çakır Ö., **Güney A.**, "Sanayi Tipi Mutfak Eşyaları İçin Üç Boyutlu Sıcaklık Ölçüm Kayıt ve Analiz Sistemi", Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, KOCAELİ, TÜRKİYE, 12-13 Mayıs 2017, vol.2, no.1, pp.1-2
3. **Güney A.**, Çakır O., Tekin S., "Investigation of the Effect of Proportional Controller Parameters on System Performance in Numerical Control of an Electric Furnace", International Technological Sciences and Design Symposium, GİRESUN, TÜRKİYE, 28-30 Haziran 2018, Kabul Edildi
4. **Güney A.**, Çakır O., Tekin S., "Real-Time Digital Temperature Control of an Electric Furnace with On-Off Control Method", International Technological Sciences and Design Symposium, GİRESUN, TÜRKİYE, 28-30 Haziran 2018, Kabul Edildi
5. Tekin S., Çakır O., **Güney A.**, "Design and Simulation of Balanced Load Distribution Controller for Low Voltage Building Connection Boxes", International Technological Sciences and Design Symposium, GİRESUN, TÜRKİYE, 28-30 Haziran 2018, Kabul Edildi