



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YÜKSEK HASSASİYETTE SICAKLIK
KONTROLÜ ve RUBİDYUM ATOMİK GAZI
KÜVETİ SICAKLIK KARARLILIĞININ
LAZER FREKANS KARARLILIĞINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜCEL DENİZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Nazmi EKREN

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

İSTANBUL, 2019



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YÜKSEK HASSASİYETTE SICAKLIK
KONTROLÜ ve RUBİDYUM ATOMİK GAZI
KÜVETİ SICAKLIK KARARLILIĞININ
LAZER FREKANS KARARLILIĞINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜCEL DENİZ
(523116002)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Nazmi EKREN

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

İSTANBUL, 2019

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Yücel DENİZ'in "Yüksek Hassasiyette Sıcaklık Kontrolü ve Rubidyum Atomik Gaz Sıcaklık Kararlılığının Lazer Frekans Kararlılığına Etkisinin Araştırılması" başlıklı TEZ çalışması, 17/07/2019 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Üyesi Nazmi EKREN (Danışman)

Marmara Üniversitesi(İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Ulvi BAŞPINAR (Üye)

Marmara Üniversitesi(İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Hakan YILMAZER (Üye)

Yıldız Teknik Üniversitesi(İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27.08.2019 tarih ve 2019/16-04 sayılı kararı ile Yücel DENİZ'in Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Bülent EKİCİ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana bilgi ve tecrübelerini aktaran, çalışmam boyunca bana rehberlik eden tez hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Nazmi EKREN'e ve Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA'ya şükranlarımı sunarım. Deney aşamasında, lazer sistemlerinin kurulması ve verilerin alınması konusundaki katkılarından dolayı Dr. Ersoy ŞAHİN'e ve kontrol yazılımı geliştirilmesi konusundaki katkıları için Yük. Müh. Adem GEDİK'e çok teşekkür ederim. Eğitimime devam etmem için beni teşvik eden ve bu tezin yazım aşamasında desteğini esirgemeyen abim Dr. Etem DENİZ ve eşim Gülten DENİZ'e ayrıca teşekkür ederim.

Yücel DENİZ

Temmuz 2019

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
SEMBOLLER	VIII
KISALTMALAR	IX
ŞEKİL LİSTESİ	X
TABLO LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bilgiler ve Literatür.....	2
1.1.1. Isıtıcı Sistemleri.....	3
1.1.1.1. Bant Isıtıcılar	4
1.1.1.2. Kartuş Isıtıcılar	4
1.1.1.3. Döküm Isıtıcılar.....	5
1.1.1.4. Bobin Isıtıcılar	6
1.1.1.5. Seramik Isıtıcılar	6
1.1.1.6. Seramik Bobin Isıtıcılar.....	7
1.1.1.7. Kızıl Ötesi Isıtıcılar	7
1.1.1.8. Kızıl Ötesi Kuvars Isıtıcılar.....	8
1.1.1.9. Kapton Isıtıcılar	8

1.1.1.10. Mikatermik Isıtıcılar	9
1.1.1.11. Boru Tipi Isıtıcılar	9
1.1.1.12. Su Isıtıcı Bobinler	10
1.1.2. Termistör ve Sensör İncelemeleri.....	11
1.1.3. Sıcaklık Kontrol Sistemlerinin Araştırılması	12
1.1.3.1. Aç-Kapat Kontrol Sistemleri	12
1.1.3.2. PID Kontrol Sistemleri	13
1.1.4. PID Kontrol	13
1.2. Lazer Sistemleri Sıcaklık Kontrol Araştırmaları	15
2. LAZER SİSTEMİ VE FREKANS KARARLILIĞI	17
3. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI	20
3.1. Kontrol Sistemleri	20
3.1.1. Devre Tasarımı	20
3.1.2. Mikrodenetleyici.....	21
3.1.3. PWM Kontrol Devresi.....	22
3.1.4. Termal Sistem Tasarımı.....	22
3.1.5. Film Isıtıcı	23
3.1.6. NTC Sıcaklık Sensörü	24
3.2. Geliştirilen Sistemler	27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	31
4.1. Geliştirilen Kontrol Sistemi İncelemesi	31
4.1.1. PID Katsayılarının Belirlenmesi Esnasındaki Verilerin İncelenmesi.....	32
4.1.1.1. PI Denemeleri	32

4.1.2. Geliştirilen Sistem PI Değerlendirmesi	35
4.1.2.1. PI Kontrolör Altındaki Sistem Davranışı İncelemeleri	36
4.2. Frekans Kararlılığı Deney İncelemeleri	39
5. SONUÇLAR.....	47
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

YÜKSEK HASSASİYETTE SICAKLIK KONTROLÜ ve RUBİDYUM ATOMİK GAZI KÜVETİ SICAKLIK KARARLILIĞININ LAZER FREKANS KARARLILIĞINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Bu çalışmada, yüksek hassasiyette sıcaklık kontrolü sağlayan devreler ve lazer sistemleri incelendi. İlk olarak, planlanan sistemin yüksek hassasiyette kararlı olarak çalışabilmesi için hangi metotların kullanıldığı incelendi. İkinci olarak, bu metotlar ile birlikte kullanılan devre yapıları incelendi. Sonrasında ise kendi sistemimiz için gerekli malzemeler belirlenerek sistem kurulumunun nasıl yapılacağı tasarlandı. Sistem kurulumu yapıldıktan sonra rubidyum atomik gazı küvet sıcaklık kararlılığının lazer frekans kararlılığı üzerine etkilerinin incelendiği ölçümler yapıldı.

Çalışma sonucunda, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde gerçekleşmiş, uzunluk ve boyutsal ölçümlerinde kullanılan $\lambda = 780\text{nm}$ dalga boyu standartlarının ^{87}Rb küvet sıcaklık kararlık değeri 16 saat süresince ölçülmüş ve tepeden tepeye $1\text{m}^\circ\text{C}$ değiştiği gözlemlendi. Yapılan frekans kararlığı ölçümleri ile ulusal dalga boyu standartları frekans kararlığı 1s ile 16 saat zaman aralığında $5.5 \times 10^{-12}\tau^{-1/2}$ olarak belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Yüksek hassasiyette sıcaklık kontrolü, mK sıcaklık kontrolü, PID kontrollü sıcaklık devresi, Rubidyum gazı küvet sıcaklık kontrolü, kâğıt ısıtıcı, ısıtma sistemleri, PID kontrol, lazer sistemleri, lazer kararlılığı, lazer frekans kararlılığı

ABSTRACT

HIGH PRECISION TEMPERATURE CONTROL AND INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RUBIDIUM ATOMIC GAS CUVETTE TEMPERATURE STABILITY ON LASER FREQUENCY STABILITY

In this study, circuits that provide high precision temperature control and laser systems are examined. Firstly, the methods, which are used, for the stability of the planned system with high precision are examined. Secondly, the circuit structures used with these methods were examined. Afterwards, the materials required for our own system were determined and the system installation was designed. After the system was installed, the effects of rubidium atomic gas on laser frequency stability were measured.

In the result of this study, $\lambda = 780\text{nm}$ national wavelength standards used in length and dimensional measurement was realized at TUBITAK National Metrology Institute, the temperature stability of ^{87}Rb cell temperature control of national wavelength standards were measured during to 16 hours and it were observed $1\text{m}^\circ\text{C}$ peak to peak. With frequency stabilization measurements the frequency stabilization value of national wavelength standards was defined $5.5 \times 10^{-12}\tau^{-1/2}$ integration times 1s to 16 hours.

Keywords: High precision temperature control, mK temperature control, PID controlled temperature circuit, Rubidium gas cuvette temperature control, paper heater, heating systems, PID control, laser systems, laser stability, laser frequency stability

SEMBOLLER

AC	: Alternatif Akım
cm	: Santimetre
DC	: Doğru Akım
in²	: İnç kare
K_d	: Türev Kontrolör Katsayısı
K_i	: İntegral Kontrolör Katsayısı
K_p	: Oransal Kontrolör Katsayısı
mK	: Mili Kelvin (K)
μK	: Mikro Kelvin (K)
t	: Zaman (s)
s	: Saniye
°C	: Santigrat Derece
m°C	: Mili Santigrat Derece
W	: Watt

KISALTMALAR

1 PPS : Saniyede 1 puls

ADC : Analog Dijital Dönüştürücü

AFS : Atomik Frekans Standartları

BIPM : Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (Bureau International des Poids et Mesures)

DAC : Dijital Analog Dönüştürücü

HFD : Hızlı Fotodedektör

NTC : Sıcaklık Sensörü Termistör

PID : Oransal İntegral Türevsel

PI : Oransal İntegral

PWM : Pulse With Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)

RF : Radyo Frekans

RB : Rubidyum

TÜBİTAK : Türkiye Bilimsel ve Araştırma Kurumu

UME : Ulusal Metroloji Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Günlük kullanım endüstriyel fırın ve tank ısıtıcı örnekleri.....	1
Şekil 1.2	Hassas sıcaklık kontrol sistemleri	2
Şekil 1.3	Bant ısıtıcılar	4
Şekil 1.4	Kartuş ısıtıcılar	5
Şekil 1.5	Döküm ısıtıcılar	5
Şekil 1.6	Bobin ısıtıcılar	6
Şekil 1.7	Seramik ısıtıcılar	6
Şekil 1.8	Seramik bobin ısıtıcılar	7
Şekil 1.9	Kızıl ötesi ısıtıcılar	7
Şekil 1.10	Kızıl ötesi kuvars ısıtıcılar	8
Şekil 1.11	Kapton ısıtıcılar	8
Şekil 1.12	Mika ısıtıcılar	9
Şekil 1.13	Boru ısıtıcılar	10
Şekil 1.14	Su ısıtıcı bobinler	10
Şekil 1.15	PID kontrol sistemi	14
Şekil 1.16	PID sıcaklık kontrol deneysel sonuç eğrisi	16
Şekil 1.17	PID kontrollü sıcaklık kararlılık verisi	16
Şekil 2.1	Lazerin frekans kilitlenmesinin temel yapısı	17
Şekil 2.2	Lazer frekans ölçüm sistemi, TÜBİTAK UME	18
Şekil 3.1	PID ve termal sistem genel blok diyagramı	20
Şekil 3.2	Kontrol devresi genel şematiği.....	22
Şekil 3.3	RB hücre fiziksel paket genel yapısı ve görseli	23
Şekil 3.4	Film ısıtıcı	23
Şekil 3.5	NTC termistör	24

Şekil 3.6	NTC termistör -40°C ile 125°C arası direnç grafiği	26
Şekil 3.7	NTC termistör 0°C ile 50°C arası direnç grafiği.....	26
Şekil 3.8	Çalışır durumdaki sıcaklık kontrol devresi	28
Şekil 3.9	Lazer sistemi şematik deney düzeneği	29
Şekil 3.10	Çalışır durumdaki lazer sistemleri	30
Şekil 3.11	Lazer sistemleri ve kilitleme cihazları	30
Şekil 4.1	Lazer sistemi ve PI sıcaklık kontrol üniteleri.....	31
Şekil 4.2	Sisteme farklı P değerleri verildiğinde oluşan kapalı çevrim cevabı.....	33
Şekil 4.3	P=25 iken farklı I değerleri verildiğinde oluşan sistem cevabı (1/2).....	34
Şekil 4.4	P=25 iken farklı I değerleri verildiğinde oluşan sistem cevabı (2/2).....	34
Şekil 4.5	İdeal sistem ile kontrol sistemimizin grafiksel kıyaslaması.....	35
Şekil 4.6	PI kontrolsüz sıcaklık kararlılık verisi (27 saat)	36
Şekil 4.7	PI Kontrollü sıcaklık kararlılık verisi (11 saat).....	37
Şekil 4.8	Kapalı çevrim sıcaklık kararlılık verisi (22 saat)	38
Şekil 4.9	Kapalı çevrim sıcaklık kararlılık verisi (83 saat)	39
Şekil 4.10	Lazer 1 ve Lazer 2 sistemi PI kontrollü sıcaklık ve frekans verileri.....	40
Şekil 4.11	Lazer 1 PI kontrolsüz ve Lazer 2 PI kontrollü sıcaklık ve frekans verileri ..	41
Şekil 4.12	Lazer 1 PI kontrollü ve Lazer 2 PI kontrolsüz sıcaklık ve frekans verileri ..	41
Şekil 4.13	Lazer 1 ve Lazer 2 PI kontrolsüz sıcaklık ve frekans verileri.....	42
Şekil 4.14	Lazer sistemi PI kontrollü ve PI kontrolsüz sıcaklık verileri.....	42
Şekil 4.15	Lazer sistemi PI kontrollü ve PI kontrolsüz frekans verileri.....	43
Şekil 4.16	Lazer sistemi PI kontrollü ve PI kontrolsüz frekans kararlılık verileri.....	46
Şekil 4.17	Lazer sistemi PI kontrollü ve PI kontrolsüz frekans kararlılık verileri.....	46

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Genel ısıtıcı türleri	4
Tablo 1.2 Termistör ve diğer sensör genel karşılaştırma tablosu	11
Tablo 1.3 PID katsayıları değişiminin kontrol sistemine etkisi.....	15
Tablo 3.1 NTC termistör üretici sıcaklık direnç tablosu	25
Tablo 4.1 Sıcaklık kontrol sistemi PI kontrolsüz ve PI kontrollü kararlılık verileri	39
Tablo 4.2 Lazer sistemi frekans kararlılığı ölçüm tablosu (1/2).....	44
Tablo 4.3 Lazer sistemi frekans kararlılığı ölçüm tablosu (2/2).....	45



1. GİRİŞ

Sıcaklık kontrolü bireysel hayatta veya endüstriyel hayatta birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Sıcaklık kontrolü sistemleri ayrıca uzay teknolojileri, sağlık ve tıp uygulamalarında, akıllı bina sistemlerinde ve otomotiv sektöründe de kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın, 1. ve 2. bölümünde genel literatür taraması, 3. bölümünde kontrol sistemi devre tasarımı, 4. bölümünde yapılan deneyler ve incelemeleri, 5. bölümünde ise sonuçlar verilecektir.

Buna ilişkin örnekleri inceleyecek olursak, endüstriyel kullanımlarda fırın istenen sıcaklık değerini $30\pm 1^{\circ}\text{C}$ kararlılık ile sabit tutulabilmektedir. Endüstride özel amaçlı kullanım yerleri olan tank ısıtıcılar ise $50\pm 1^{\circ}\text{C}$ ile sistemi kararlı tutabilmektedir. İlgili sistemlerin örnek görsellerine Şekil 1.1’de yer verilmektedir.

Endüstride, askeri ve üst düzey teknoloji ürünlerinde ise istenen sıcaklık kararlılık değerleri uygulamalara göre $m^{\circ}\text{C}$ (mili santigrat derece) düzeylerine kadar inmektedir.



Şekil 1.1 Günlük kullanım endüstriyel fırın ve tank ısıtıcı örnekleri

Bu sistemlere örnek verilirse, su ile ısıtma-soğutma yapan sistemlerde sıcaklık kararlılık değeri $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ değerine kadar düşebilmektedir [9]. Lazer sistemleri için özel olarak üretilen sıcaklık kontrol sistemlerinde ise sıcaklık kararlılık değeri $< 0.002^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar düşürülebilmektedir [4,10]. Üst düzey teknolojilerde ve yüksek hassasiyetin önemli olduğu alanlarda sıcaklık kararlılığına önem verilmektedir. Yüksek hassasiyette ve kararlılıkta sıcaklık kontrolü yapan sistemlerin örnekleri Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 Hassas sıcaklık kontrol sistemleri

Bu şekilde birçok sistem mevcuttur ve sıcaklık kontrolünün bu tür sistemlerin kararlılığı üzerindeki etkisi yadsınamaz düzeyde yüksektir. Sıcaklık kontrolünün olmadığı sistemlerde sistemin çalışma kararlılığından bahsedilemez, dolayısıyla bu tür sistemlerin askeri ve sivil teknolojilerde yüksek kararlılık ihtiyacı olan uygulamalarda kullanılması bir zorunluluk olarak görülmektedir.

Sıcaklık kararlılığı ile sistemin daha uzun süre kararlı ve doğru çalışması sağlanmaktadır. Bu kararlı yapılar sayesinde referans sistemleri geliştirilerek ölçüm teknolojileri başta olmak üzere, üretim teknolojilerinde ve takip sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, endüstri ve askeri amaçlı kullanılmakta olan Lazer Sistemlerinde kullanılan Rubidyum Atomik Gazı Küveti için gerekli olan sıcaklık kontrol üniteleri tasarlanmıştır. Tasarlanan sıcaklık kontrol sistemi kararlılık değerinde $<0.001^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar hassasiyette kontrol sağlamaktadır.

Bu çalışmada ayrıca sıcaklık kontrolünün lazer frekans kararlılığı üzerine etkileri de gözlemlenmiştir.

1.1. Genel Bilgiler ve Literatür

Sıcaklık kontrollü sistemler günlük hayatımızda gelişmiş teknolojilerde farklı amaçlar için kullanılmaktadır. İhtiyaca göre sürekli farklı sistemler geliştirilmektedir. Hassas sıcaklık kontrol sistemleri ise genellikle yüksek kararlılığın ihtiyaç olduğu bilimsel çalışmalar, uzay teknolojileri veya askeri alanlarda kullanılmaktadır. Bu sistemler için farklı ısıtıcı sistemleri ve farklı algoritma yapıları kullanılabilir. Bu çalışmada

hassas sıcaklık kontrolü için hangi ısıtıcı türlerinin kullanılabileceği ve sıcaklık kontrolü için hangi algoritmaların uygun olduğu konusunda araştırma yapılmıştır.

Bu çalışmada yapılan hassas sıcaklık kontrolü lazer sistemi için önemlidir. Bir lazerin frekansını kararlı hale getirmek için kullanılan hata sinyali dış ortamdaki sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir ve bu durum lazerin frekans kararlılığını düşürmektedir. Örneğin dış ortamdaki sıcaklığın sürekli artması veya azalması hata sinyalinde de değişime sebep olur. Bu durum lazer kavite boyunu etkileyerek lazer frekansının da sıcaklık değişimin olduğu yöne doğru sürüklenmesine neden olmaktadır. Aynı şekilde dış ortamdaki sıcaklık değişimleri hata sinyalinin de dalgalanmasına bu durumda lazer frekansında dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu etkilerden kurtulmak için ancak ^{87}Rb atomlarının hücre sıcaklığının kararlı bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir.

Bu amaçla endüstride kullanılmakta olan yüksek hassasiyette sıcaklık kontrolüne imkân veren ısıtıcılar araştırılmıştır. Ayrıca RB atomik gazının kullanıldığı lazer sistemleri hakkında da genel bilgi verilmiştir.

Literatür araştırmasında;

- Isıtıcı Sistemleri
- Termistör ve Sensörler
- Sıcaklık Kontrol Sistemleri
- Lazer Sistemleri ve Frekans Kararlılığı

olmak üzere dört alan üzerine yoğunlaşmıştır.

1.1.1. Isıtıcı Sistemleri

Endüstriyel ve askeri amaçlı birçok ısıtıcı sistem kullanılmaktadır. Bu ısıtıcı sistemleri çok farklı amaçlar için kullanılabilmektedir. Örneğin endüstride sıvı, gaz veya metal malzemelerin sıcaklığının istenilen dereceye getirilmesi için kullanılmaktadır. Bilimsel amaçlı ise farklı kullanım alanları olabilmektedir. Bilimsel çalışmalarda ısıtıcı sistemler genellikle istenilen ortamın, yüzeyin, sıvının, metalin veya atomların sıcaklık kararlılığının sağlanması amacıyla kullanılmaktadır.

Bu çalışma için gerekli olan sıcaklık hassasiyetini elde edebilen belli başlı ısıtıcı türleri mevcuttur. Bu ısıtıcı türleri Tablo 1.1’de gösterilmektedir.

Tablo 1.1 Genel ısıtıcı türleri

• Bant Isıtıcılar	• Kızıl Ötesi Isıtıcılar
• Kartuş Isıtıcılar	• Kızıl Ötesi Kuvars Isıtıcılar
• Döküm Isıtıcılar	• Kapton Isıtıcılar
• Bobin Isıtıcılar	• Mikatermik Isıtıcılar
• Seramik Isıtıcılar	• Boru Tipi Isıtıcılar
• Seramik Bobin Isıtıcılar	• Su Isıtıcı Bobinler

Bölümün devamında bu ısıtıcı türleri hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

1.1.1.1. Bant Isıtıcılar

Bant ısıtıcılar genellikle dairesel yüzeyler uygun çözümlerdir. Farklı türleri mevcuttur bunlar; mika, seramik ve mineral olarak bulunabilirler. Isıtıcı hücreleri istikrarlı ve düzgün ısı dağılımı için yalıtkan malzemesinin içine yerleştirilmelidir. Belirli orana kadar esneme özelliğine sahiptirler ve enerji verimlilikleri yüksektir. 800°C'ye kadar çalışabilirler ve enerji yoğunlukları 120W/in²'ye kadar çıkabilmektedir. Bant ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.3'te yer verilmektedir.



Şekil 1.3 Bant ısıtıcılar [7]

1.1.1.2. Kartuş Isıtıcılar

Bu ısıtıcı tipi nikel-krom ısı tellerinin silindirik metal kılıf içerisine yerleştirilmesi şeklinde üretilir. Kartuş tipi ısıtıcılar özel yapıları nedeniyle genellikle zorlu endüstriyel şartlarda kullanılırlar. Genellikle plastik işleme, enjeksiyon kalıpları, etiketleme ve ısı merdanesi gibi işlemler için kullanılırlar. Yüksek verimlilik ve çalışma sıcaklığına sahiptirler. 880°C'ye kadar çalışabilirler ve enerji yoğunlukları 200W/in²'ye kadar çıkabilmektedir. Kartuş ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.4'te yer verilmektedir.



Şekil 1.4 Kartuş ısıtıcılar [7]

1.1.1.3. Döküm Isıtıcılar

Döküm ısıtıcı tipleri genellikle havayı, sıvıları ve diğer bileşenleri ısıtmak için, genellikle yemek endüstrisinde, plastik işlemede, yarı iletken endüstrisinde ve tekstil endüstrisinde kullanılmaktadır. Standart ve özel üretimleri mevcuttur. Uzun yıllar kullanıma uygundur. Üretim malzemesine göre 370°C ve 760 °C'ye kadar kullanılabilir. Enerji yoğunlukları 60W/in²'ye kadar çıkabilmektedir. Döküm ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.5'te yer verilmiştir.



Şekil 1.5 Döküm ısıtıcılar [7]

1.1.1.4. Bobin Isıtıcılar

Bobin ısıtıcı tipleri genellikle sargılı kablodan meydana gelirler. Küçük boyutlarda yüksek performansa sahiptirler. Farklı tipleri bulunabilir; dikdörtgen, kare veya dairesel. Üzerlerine ısıçift montajlanarak kolaylıkla kullanılabilirler. Genellikle nikel veya paslanmaz çelikten üretilmektedirler. 815°C'ye kadar kullanılabilir ve enerji yoğunluğu 40W/in²'ye kadar çıkabilmektedir. Bobin ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.6'da yer verilmektedir.



Şekil 1.6 Bobin ısıtıcılar [7]

1.1.1.5. Seramik Isıtıcılar

Seramik ısıtıcı türü fiziksel olarak sağlam, yüksek ısıtıcı gücüne sahip ve uzun ömürlüdür. Farklı tipleri mevcuttur ve istenilen uygulamaya göre özel olarak da üretimi yapılabilmektedir. Genel kullanım yerleri ise baskı, saunalar, boya kurutma ve yüksek sıcaklık fırınlarıdır. 300°C'den 700°C'ye kadar kullanılabilirler ve enerji yoğunlukları 6W/in² ile 40W/in² arasında değişebilmektedir. Seramik ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.7'de yer verilmektedir.



Şekil 1.7 Seramik ısıtıcılar [7]

1.1.1.6. Seramik Bobin Isıtıcılar

Bu tip ısıtıcılar genellikle hava veya sıvı ısıtmaları için kullanılırlar. Yapısı seramik başlık bölgesi ve nikel krom direnç telinden oluşmaktadır. Bu seramik blok yapısı ihtiyaç duyulması halinde istenildiği kadar uzatılabilir. Bu yapılar genellikle sıcak hava tankları, elektrikli kaynatıcılar ve sıcak hava kurutucularında kullanılmaktadır. 100°C'den 700°C'ye kadar kullanılabilirler ve enerji yoğunlukları 50W/in² ile 120W/in² arasında değişebilmektedir. Seramik bobin ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.8'de yer verilmektedir.



Şekil 1.8 Seramik bobin ısıtıcılar [7]

1.1.1.7. Kızıl Ötesi Isıtıcılar

Kızıl ötesi ısıtıcılar genellikle büyük boyutlu ısıtmalar için tercih edilirler. Bu ısıtıcının bir diğer ismi ise kızıl ötesi plaka olarak geçmektedir. Uygulama alanına göre ısı yayma bölgesi değişebilmektedir. Isıtıcı gövde, seramik kızılötesi, kuvars veya kuvars-halojen yapıdan oluşabilmektedir. Isıtıcı genel olarak birden fazla parçadan meydana gelmektedir ve bu parçalar kolaylıkla değiştirilebilir. Kızıl ötesi ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.9'da yer verilmektedir.



Şekil 1.9 Kızıl ötesi ısıtıcılar [7]

1.1.1.8. Kızıl Ötesi Kuvars Isıtıcılar

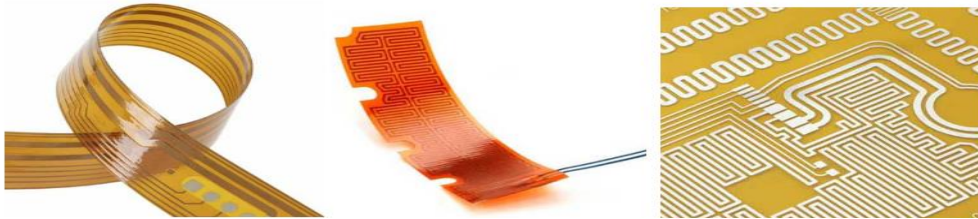
Bu ısıtıcı türü direnç teli ve yarı saydam kuvars tüpten meydana gelmektedir. Kuvars camın içerisindeki tel önce camı sonrasında dış bölgeyi ısıtır. Kızıl ötesi ısıtma özelliğinden dolayı hızlı ısıtma ve bölgesel ısıtmada etkili olarak kullanılmaktadır. Genellikle termal şekillendirme ve kurutma işlemlerinde kullanılmaktadır. 300°C'den 800°C'ye kadar kullanılabilir. Kızıl ötesi kuvars ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.10'da yer verilmektedir.



Şekil 1.10 Kızıl ötesi kuvars ısıtıcılar [7]

1.1.1.9. Kapton Isıtıcılar

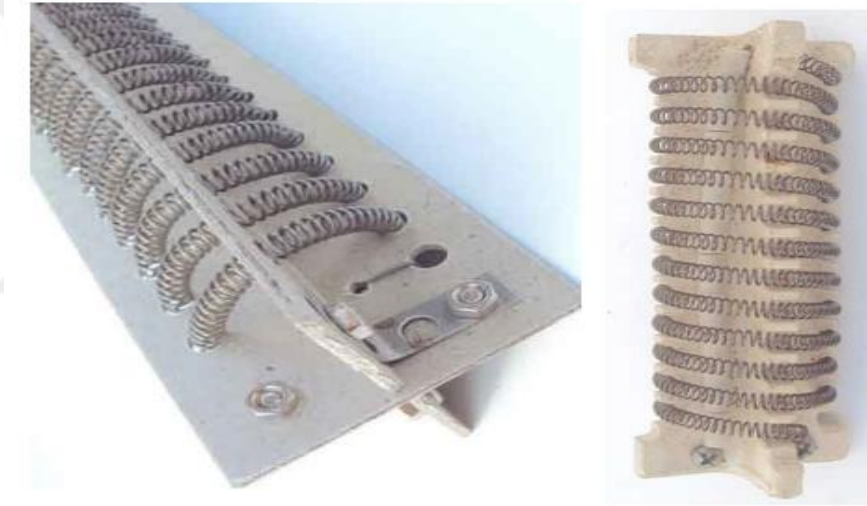
Kapton ısıtıcıların diğer bir adı ise poliimid olarak geçmektedir. Kapton, DuPont firması tarafından üretilen bir malzemedir. İki katman kapton arasına ince şerit şeklinde ısıtıcı malzeme yerleştirilmesi prensibi ile üretilmektedir. Isıtıcı malzeme direnci yüksek bir devrenin kimyasal olarak inceltilmesi ile üretilir. Kapton filmleri birbirine teflon ya da akrilik yapıştırıcı ile sabitlenirler. Kapton ile ısıtıcı malzeme arasında bulunan izolasyon malzemesi yarı-transparan, çok ince ve çok esnektir. Bu teknik özelliklerinden dolayı kapton ısıtıcılar çoğunlukla uzay, askeri uçak endüstrisi, yarıiletken üretimi, sağlık sektörü ve yemek sektöründe kullanılmaktadır. Bu ısıtıcılar ayrıca yüksek kararlı sistemlerde sıcaklık kontrolü amacıyla kullanılabilirler. -195°C ile 232°C arasındaki sıcaklıklarda kullanılabilirler. Çalışma voltajları 1-480V arasındadır ve enerji yoğunlukları 200W/in²'ye kadar çıkabilmektedir. Kapton ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.11'de yer verilmektedir.



Şekil 1.11 Kapton ısıtıcılar [7]

1.1.1.10. Mikatermik Isıtıcılar

Bu ısıtıcı türünde mika malzemesi yalıtkan olarak kullanılmaktadır. Gövde malzemesi genellikle çelik ve paslanmaz çeliktir. Mika malzemesi elektriksel olarak yalıtkan ama ısıl olarak yüksek iletim kabiliyetine sahiptir. İhtiyaca göre farklı tiplerde üretilmektedir. Isıtıcı hücre olarak genelde nikel-krom tel kullanılmaktadır. Mika ısıtıcıların bazı avantajları şunlardır; yüksek elektriksel yalıtkanlık, hızlı ısınma süresi, yüksek termal iletkenlik ve yüksek enerji yoğunluğudur. Genellikle kullanım alanları sıkmalı ekstrüzyon kalıpları, lehim potaları, kalıp ısıtma ve şişirme kalıpları gibi alanlarda kullanılır. 760°C'ye kadar kullanılabilir ve enerji yoğunluğu 140W/in²'ye kadar olabilir. Mika ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.12'de yer verilmektedir.



Şekil 1.12 Mika ısıtıcılar [7]

1.1.1.11. Boru Tipi Isıtıcılar

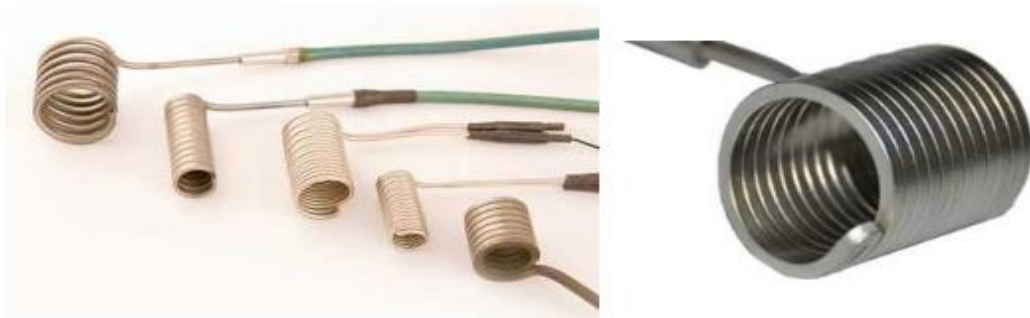
Boru tipi ısıtıcılar genellikle hava, sıvı, gaz ve katı malzeme ısıtmak için kullanılırlar. Bu ısıtıcılar ilgili ortamı ısıtmak için 3 farklı yol kullanabilir bunlar, iletken ile ısıtma, konveksiyonla ısıtma ve radyant ısıtmadır. Sarmal direnç teli ve metal dış kılıftan meydana gelir. Tel genellikle nikel-kromdan oluşur. Alaşımli direnç teli magnezyum oksit ile doldurulmuş metal kılıfın ortasına yerleştirilir ve böylece magnezyum oksitin yalıtkan olmasından faydalanılarak metal kılıf yüzeyine düzgün ısı dağılımı sağlanır. Esnektir ve kolay şekil alabilir. 480 V'a kadar kullanılabilirler. Boru tipi ısıtıcı örnek görsellerine Şekil 1.13'de yer verilmektedir.



Şekil 1.13 Boru ısıtıcılar [7]

1.1.1.12. Su Isıtıcı Bobinler

Su ısıtıcı bobinler uygulama alanlarına göre birçok farklı şekilde olabilir. Örneğin şişirme kalıplarında ve extrüzyon hatlarında, plastik işleme süreçlerinde ısıtıcı başlık olarak kullanılmaktadırlar. 650°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilirler. Su ısıtıcı bobin örnek görsellerine Şekil 1.14'te yer verilmektedir.



Şekil 1.14 Su ısıtıcı bobinler [7]

Bu bölümde birçok ısıtıcı türü inceledik ve bunların içerisinde bu proje çalışması için en uygun olan Kapton ısıtıcıları olduğuna kadar verdik. Kapton ısıtıcı seçmemizdeki ana etkenler ise, esnek yapıya sahip olması, çok ince film şeklinde olması ve yüksek

verimliliğidir. Bunların yanında fiziksel olarak sistemimize montajının kolaylığı da en büyük etkenlerden birisidir.

1.1.2. Termistör ve Sensör İncelemeleri

Sıcaklık kontrol sistemlerinde birçok termistör ve sensör kullanılmaktadır. En yaygın olanları, termistör, direnç sıcaklık detektörü (resistance temperature detectors –RTD) ve entegre tipi sensörlerdir, LM335 ve AD590 gibi [14]. Her sensörün kullanılan sisteme göre avantajları ve dezavantajları vardır. Sensörlerin genel parametreleri Tablo 1.2’de verilmektedir.

Tablo 1.2 Termistör ve diğer sensör genel karşılaştırma tablosu [14]

Parametre	Termistör	RTD	LM335	AD592
Sıcaklık Aralığı	Merkez sıcaklığın $\sim 50^{\circ}\text{C}$ civarında	-260°C ile $+850^{\circ}\text{C}$	-40°C ile $+100^{\circ}\text{C}$	-20°C ile $+105^{\circ}\text{C}$
Maliyet	Aşırı yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek
Zaman Sabiti	6-14 saniye	1-7 saniye	1-3 saniye	2-60 saniye
Kararlılık	0.0009°C	$\sim 0.05^{\circ}\text{C}$	$\sim 0.01^{\circ}\text{C}$	$\sim 0.01^{\circ}\text{C}$
Avantajları	Dayanıklı	En iyi tepkime süresi	Orta derece pahalı	Orta derece pahalı
	Uzun ömürlü	Doğrusal çıkış	Doğrusal çıkış	Doğrusal çıkış
	Tek nokta sıcaklığını ölçmek için en iyisi	En geniş çalışma sıcaklık aralığı		
	Küçük boyut	Geniş sıcaklık ölçümü için en iyisi		
	Düşük Maliyet			
	Çok hassas			
Dezavantajları	Doğrusal olmayan çıkış	Pahalı	Sınırlı sıcaklık aralığı	En yavaş tepkime süresi
	Sınırlı sıcaklık aralığı	Düşük hassasiyet	Düşük hassasiyet	Sınırlı sıcaklık aralığı
	Yavaş tepkime süresi		Büyük boyut	Düşük hassasiyet
				Büyük boyut

Sıcaklık Aralığı: Bir sensör tipinin kullanılabileceği yaklaşık toplam sıcaklık aralığıdır. Bazı sensörler belirli bir sıcaklık aralığında diğerlerinden daha iyi çalışır [14].

Zaman Sabiti: Bir sıcaklık değerinden diğerine geçmek için gereken yaklaşık süredir. Bu, saniye cinsinden, bir termistörün ilk okumadan sonuncuya kadar sıcaklık farkının %63.2'sine ulaşması için geçen zamandır [14].

Kararlılık: Bir kontrol cihazının, sensörün sıcaklık geri beslemesine dayanarak sabit bir sıcaklık sağlama yeteneğidir [14].

Hassasiyet: Sıcaklıktaki değişime verilen tepki derecesidir [14].

1.1.3. Sıcaklık Kontrol Sistemlerinin Araştırılması

- Sıcaklık kontrol sistemlerin araştırılması.
- Bahse konu sistemlerin hangi yöntemler kullanılarak çalıştığının belirlenmesi.
- Kendi sistemlerimizin hangi yöntem ile kurulmasına karar verilmesi.

Mevcut sıcaklık kontrol sistemleri incelendiğinde karşımıza iki adet yapı çıkmaktadır. Bunlar aç-kapat kontrol sistemleri ve PID kontrol sistemleridir [5]. Bu bölümde her iki kontrol sistemi hakkında detaylı bilgi verilecek ve tez çalışması için hangi sistemin uygun olduğuna karar verilecektir.

1.1.3.1. Aç-Kapat Kontrol Sistemleri

Aç-Kapat kontrol sistemleri pahalı sistemler değildir ancak sadece çıkış sisteminde aç-kapat ihtiyacı varsa kullanılır [5]. Örneğin, bir ısıtıcının kaynama noktası 110°C olarak ayarlandıysa bu sistemin sıcaklığı 109°C'ye düştüğünde kontrol ünitesi sisteme aç sinyali gönderir. Bu sinyal bir ısıtıcıyı ya da valfi açarak sistemin sıcaklığını yine kaynama noktasına çıkarır. Sıcaklık ayarlanan set değerine ulaştığında ise kontrol ünitesi sisteme kapat sinyali gönderir.

Bu tip kontrol sistemleri genelde ev ısıtıcı sistemlerinin termostatında kullanılır ve genel olarak bazı limitleri vardır. Sistem genel olarak set değerinin 1 derece altında yeniden ısıtmaya elverişlidir ve ortam sıcaklığı set değerinin 1 derece altına inene kadar kontrol sistemi yeniden devreye girmez.

Bu kontrol sistemleri sıcaklık kontrolünün çok kritik olmadığı sistemler-ortamlar için uygun olabilir ama tüm uygulamalar için uygun değildirler.

Aç-Kapat sistemleri genel olarak verimsiz sistemlerdir çünkü gelen sinyale göre sistem ya tam açık olacaktır ya da tamamen kapalı olacaktır. Bu durum sürekli aç-kapat gereken durumlarda sistemin ömrü açısından sorun teşkil edecektir [5].

Bu tür sistemler genel olarak yüksek hassasiyette kontrol gerektirmeyen ve sıcaklık değişimi yavaş olan yerlerde tercih edilmektedir.

1.1.3.2. PID Kontrol Sistemleri

Daha gelişmiş bir sistem olarak dijital sıcaklık kontrol sistemleri birden çok çıkışlı ve programlanabilir olarak karşımıza çıkmaktadır. Genellikle sistemde bir panel bulunur ve bu panel aracılığıyla sistem kolaylıkla kontrol edilebilir. Bu gelişmiş kontrol sistemleri daha doğru ve kararlı kontrol için oransal-integral-türevsel (PID) hesaplama yöntemini kullanırlar ve istenen çıkış değerini hesaplayıp ihtiyaç duyulan sıcaklık değeri elde edilir.

Bu sistemler istenilen sıcaklık değerine gelene kadar kontrol sinyalinin tamamen açık kalmasını sağlarlar, sıcaklık değeri set değerinin üzerine çıktıktan sonra PID kontrol devreye girer ve kontrol sinyalinin bir süre kapanmasını sağlar, sistem set değerinin belirli seviye altına indiğinde PID kontrol tekrar sistemin sıcaklık kontrol sinyalinin istenilen yüzde değerinde açılmasını sağlar. Bu şekilde PID kontrol aracılığı ile sistemin istenilen set değerine gelmesi için aktif bir yüzdesel güç kontrolü yapılır [5].

Sistem darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile kontrol edilir ve sistemde genellikle mosfet veya tristör kullanılır.

İncelemesi yapılan sıcaklık kontrol sistemlerinde genel olarak aç-kapat kontrol sistemi ve PID kontrol sistemi kullanıldığı görülmüştür.

1.1.4. PID Kontrol

PID kontrol sistemi endüstride en çok kullanılan kontrol sistemlerinin başında gelir. PID kontrol sistemi, istenilen set değeri ile ölçülen değer arasındaki hata değerini hesaplar ve bu hata değerini minimuma indirmek için sistemi çalıştırır [3].

PID kontrol sisteminde P, I, D değerleri aşağıdaki gibi açıklanabilir;

- Oransal İşlev (P) : Mevcut hata sinyaline bağlıdır ve anlık olarak sisteme tepki verir. Hata sinyalinin büyüklüğüne bağlı olarak kontrol sağlar.
- İntegral (I) : Geçmiş hataların toplamından oluşur. Sistemin kararlı durum hatasını sıfıra indirmek için çalışır.
- Türev (D) : Sistemin gelecek hatalarını öngörmesi üzerine hesaplama yapar ve bu öngörü ile sistemin istenilen set değerinde kararlı olmasını sağlamaya çalışır.

PID kontrol sisteminin zamana bağlı fonksiyonu şu şekildedir;

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.1)$$

Burada;

$u(t)$: Kontrol

$e(t)$: Hata

K_p : Oransal Kazanç

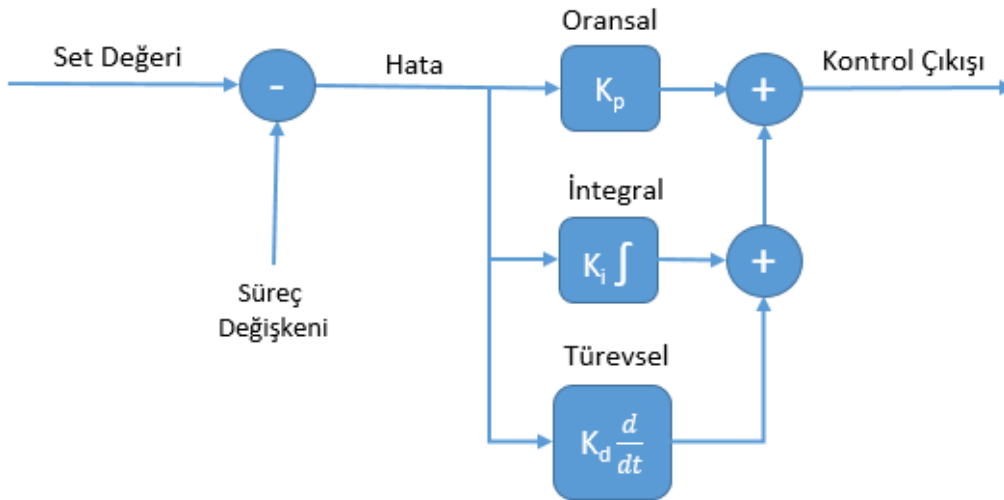
K_i : İntegral Kazanç

K_d : Türevsel Kazanç

$e(t) = r(t) - y(t)$

olarak gösterilmektedir.

PID kontrol sistemi genel blok şeması Şekil 1.15’de gösterilmektedir.



Şekil 1.15 PID kontrol sistemi

K_p , K_i , K_d katsayılarının sistemin geçici rejim ve kalıcı durum davranışları üzerindeki etkileri Tablo 1.3’de verilmiştir.

Tablo 1.3 PID katsayıları değişiminin kontrol sistemine etkisi

Parametre	K_p	K_i	K_d
Yükselme Zamanı	Azaltır	Azaltır	Küçük Azalış
Aşım	Artırır	Artırır	Azaltır
Oturma Zamanı	Az Değiştirir	Artırır	Azaltır
Kararlı Durum Hatası	Azaltır	Ortadan Kaldırır	Etki Etmez
Kararlılık	İndirgenir	İndirgenir	K_d küçük olduğu durumda geliştirir

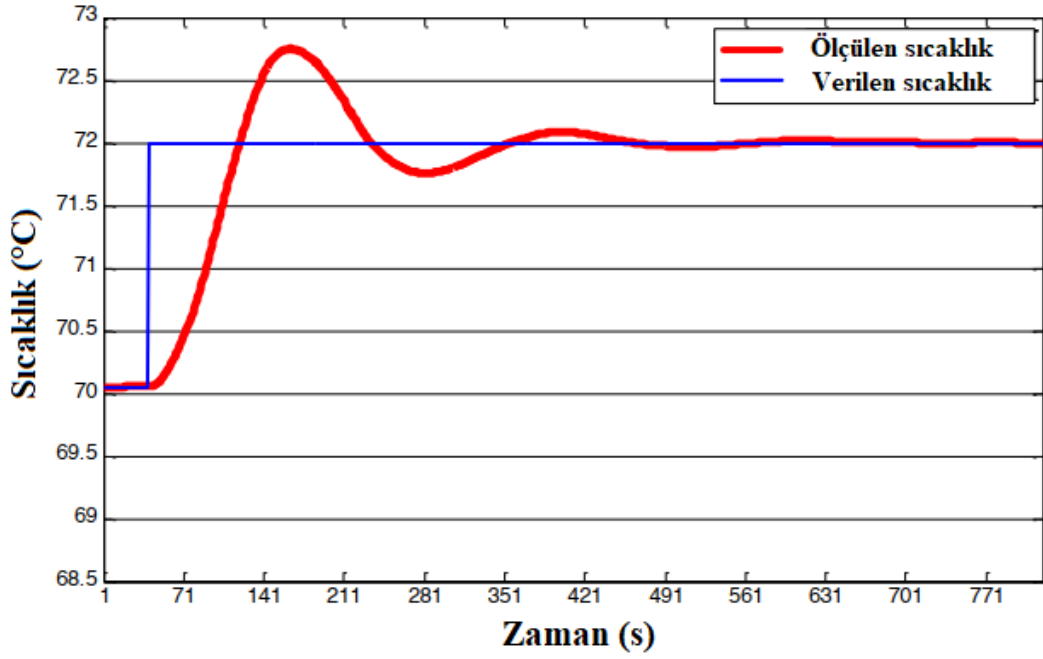
1.2. Lazer Sistemleri Sıcaklık Kontrol Araştırmaları

Literatürde lazer sistemlerinin sıcaklık kontrolü için; istenilen hassasiyete göre farklı olarak değişik kontrol sistemlerinin tasarımı bulunmaktadır. Lazer sistemlerinde sıcaklık kontrolleri çoğunlukla analog ya da dijital PID kontrol sistemi ile yapılmaktadır.

Hindistan uzay araştırmaları organizasyonunun yapmış olduğu Rubidyum frekans standardı tasarım doğrulama modelinin gösterilmesi çalışmasında, RB hücre ve lamba bölgesi sıcaklık kararlılığı 0.1°C ’den daha iyi olarak belirlenmiştir [1].

Çin’de Chang üniversitesi tarafından yapılan başka bir çalışma olan Rubidyum atomik saat frekans-sıcaklık geliştirmesi çalışmasında, dijital kontrollü PID ve PT1000 sensörü kullanılarak yapılan çalışmada, sıcaklık kararlılığı 0.01°C civarında sağlanmıştır [16].

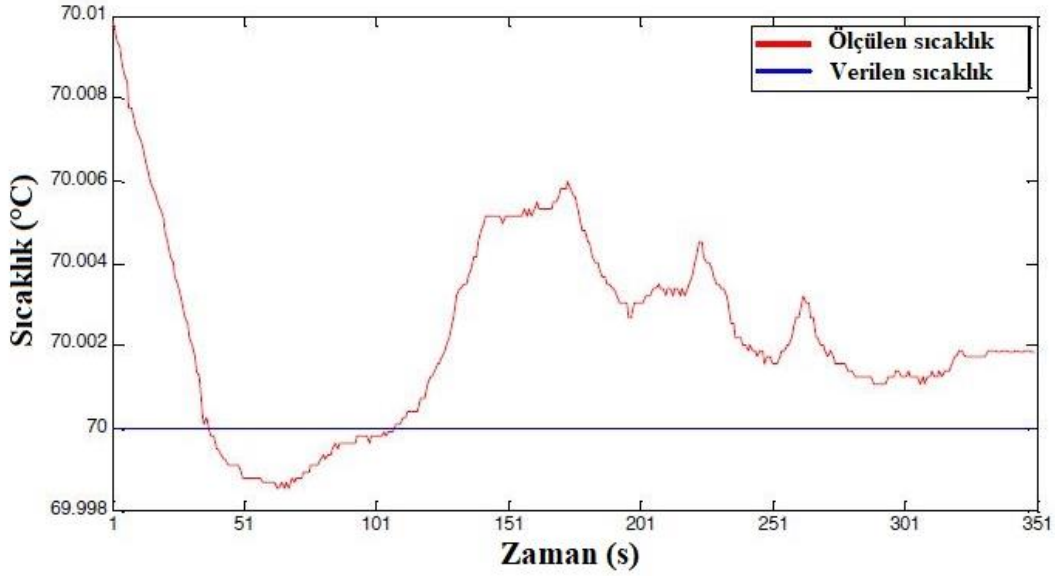
Ximan Teknoloji Üniversitesi ve Fujian Üniversitesi tarafından yapılan başka bir çalışmada ise PID algoritması ve NTC termistör kullanılarak $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ kararlılığa ulaşılmıştır [4]. Bu çalışmaya ait PID sıcaklık kontrol grafiği incelemesi Şekil 1.16’da gösterilmektedir.



Şekil 1.16 PID sıcaklık kontrol deneysel sonuç eğrisi [4]

Şekil 1.16'da görüldüğü üzere PID algoritması ile sistemin sıcaklığı istenilen set değeri çevresine yaklaşık 10-12 dakika sonra gelmektedir.

PID kontrolü sonucunda sistem sıcaklığı kararlı hale gelmektedir. Şekil 1.17'de sistemin sıcaklık kararlılığı gösteren grafiğe yer verilmiştir. Sistemin sıcaklık kararlılığı $\pm 0.01^\circ\text{C}$ değişime uğramaktadır.



Şekil 1.17 PID kontrollü sıcaklık kararlılık verisi [4]

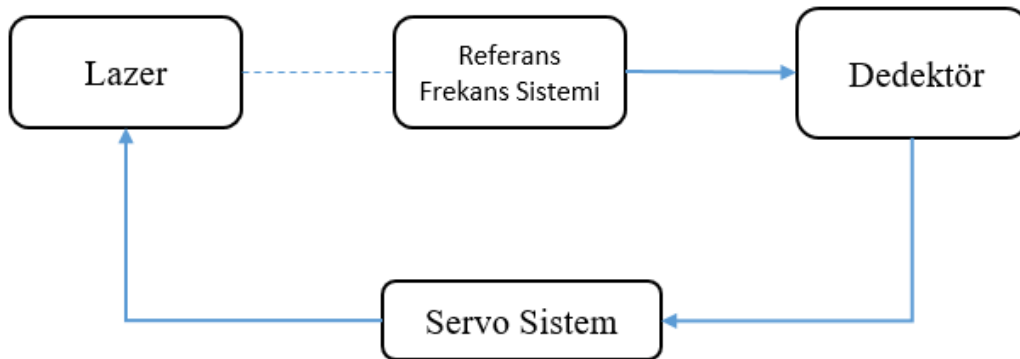
2. LAZER SİSTEMİ VE FREKANS KARARLILIĞI

Bilindiği gibi lazerler bilim ve teknolojinin birçok alanında kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları endüstri, bilimsel araştırmalar, haberleşme, tıp, bilgisayar, iletişim teknolojileri, navigasyon sistemleri, uzay teknolojileri, askeri savunma sistemleri ve metroloji gibi alanlardır. Teknolojinin gelişmesi ile lazer sistemlerinin bu teknolojik gelişmedeki katkısı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Lazer sistemleri günümüzde artık sadece ışık kaynağı olarak düşünülmemektedir. Lazer sistemlerinin kullanım alanlarından bir tanesi de yüksek frekans kararlılığına sahip lazerler ile uzunluk ve dalga boyu ölçümleridir [17].

Lazer kelimesi “Uyarılmış Radyasyon Emisyonu Yoluyla Işığın Şiddetlendirilmesi” (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) kelimelerinin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır.

Lazerin bulunuş süreci 1917’de Albert Einstein’ın ve diğer bilim adamlarının çalışmalarına dayanmaktadır. Charles H. Townes, Nicolay Basov ve Aleksandr Prokhorov isimli fizikçiler, 1964 yılında Nobel Fizik Ödülünü en eski lazer prototiplerinin geliştirilmesinden ötürü almışlardır. Theodore Maiman, 1960 yılında ilk çalışan lazeri geliştirdi ve bu cihaza lazer ismini verdi. İlk kez C. H. Townes tarafından 1953 yılında mikrodalga üzerine bir düzenek geliştirildi ve buna maser adını verdi. 1960 yılında ise T. H. Maiman lazeri geliştirdi [17].

Bir lazer sisteminin frekansını kararlı hale getirmek için, lazerin merkez frekansı ile bir başka sistemden alınan ve referans olarak frekans ile karşılaştırmak gerekmektedir. Şekil 2.1’de lazerin frekans kararlılığının temel kavramlara gösterilmektedir.



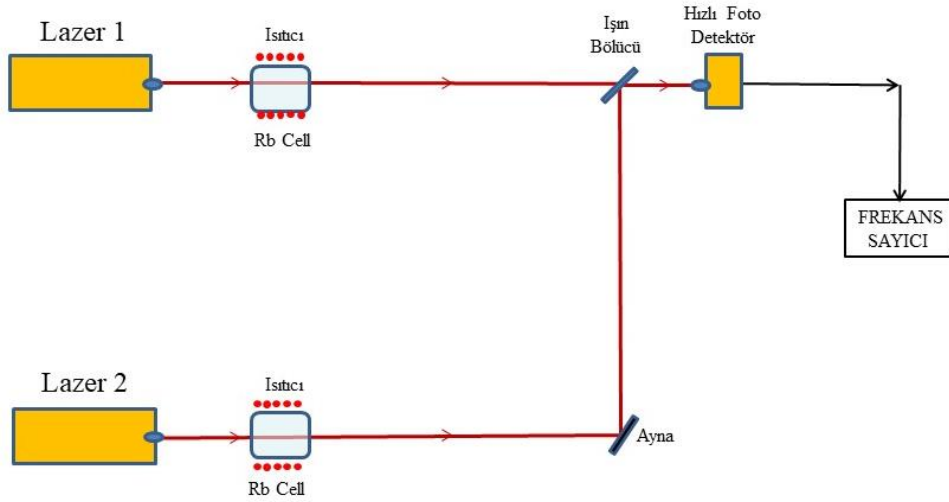
Şekil 2.1 Lazerin frekans kilitlenmesinin temel yapısı

Lazer çıkışının bir kısmı referans bir frekansla karşılaştırılır, lazer ve referans frekans arasındaki hata sinyali elektriksel bir sinyale dönüştürülür ve lazere geri beslenir [18].

Lazer frekansının kararlılığından bahsetmeden önce atomik frekans standartlarından (AFS) bahsetmekte fayda vardır. AFS'ler dış etkilerden çok az etkilenen atomik geçişlere kilitlenmiş yüksek kalitede osilatörlerdir. Mikrodalga zaman ve frekans standartlarında kuvars osilatörün frekansı sentezleyici kullanılarak atom veya moleküllerin mikrodalga enerji geçişlerine ayarlanır ve kilitlenir. Bu kilitleme osilatörün frekans doğruluk ve kararlılığının 10^3 - 10^4 kat iyileşmesini sağlar. Osilatör frekansına bölücü vasıtasıyla 1 Hz'e düşürülerek 1PPS (saniyede 1 puls) üretilir ve sinyaller atomik saatlerin oluşturulmasında kullanılır [18].

Optik frekans standartlarında ise lazer osilatör olarak kullanılır ve frekansı atom veya moleküllerin uygun enerji geçişine kilitlenir [18].

TÜBİTAK UME'de frekans kararlılığı ölçümü için kurulmuş olan lazer sisteminin genel blok yapısı Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Sistemin çalışma yapısı ve öneminden bölümün devamında bahsedilecektir.



Şekil 2.2 Lazer frekans ölçüm sistemi, TÜBİTAK UME

Uzunluk ve boyutsal ölçümleri frekansı kararlı hale getirilmiş, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu'nun (Bureau International des Poids et Mesures - BIPM) tanımı doğrultusunda gerçekleştirilmiş uzunluk dalga boyu standartları ile interferometrik yöntem kullanılarak gerçekleştirilmektedir [11]. Lazerlerin frekansı serbest osilasyon yapar, hassas

uzunluk ve boyutsal ölçümlemlerini gerçeklemler için bu halleriyle kullanılamamaktadırlar. Lazerlerin frekansı çeşitli yöntemler kullanılarak kararlı hale getirilmektedir [12].

TÜBİTAK UME’de kurulmuş 780 nm dalga boyunda çalışan taşınabilir ulusal uzunluk dalga boyu standardı; ^{87}Rb atomlarının d/f enerji geçişine kilitlenerek frekansı kararlı hale getirilmiştir. Lazer frekans kararlılığı oluşumunu gerçeklemler için, lazer ışınımı sıcaklık kontrollü cam küvet içerisinde yer alan ^{87}Rb atomları ile etkileşime sokulmuş ve etkileşim sonucunda absorpsiyon sinyali Doppler – altı soğrum spektroskopi [13] yöntemi kullanılarak fotodedektör üzerinden algılanmıştır. Algılanan sinyal (hata sinyali) uzunluk dalga boyu standardının frekansını kararlı hale getirmekte kullanılmıştır.

Lazerin frekansını kararlı hale getirmekte kullanılan hata sinyalinin dış ortamdaki sıcaklık değışiminden etkilenmesi, lazer frekans kararlılığını bozucu yönde etki gösterir. Örneğın dış ortamdaki sürekli artan veya azalan sıcaklık değışimi, hata sinyalinin de aynı yönde değışimine sebep olur bu da lazer frekansının aynı yönde sürüklenmesine neden olmaktadır. Yine dış ortamdaki sıcaklık dalgalanmaları, hata sinyalinin de dalgalanmasını gerçekler buda lazer frekansında dalgalanmalara neden olur. Bu her iki etkiden kurtulmak ancak ^{87}Rb atomlarının sıcaklık kontrolünün yapılması ile mümkün olur.

TÜBİTAK UME’de kurulmuş olan iki adet ulusal uzunluk dalga boyu standardının sıcaklık kontrolü PID kontrol döngü yöntemi kullanılarak gerçeklenmiştir. Bu yöntem ile BIPM’in tanımı doğrultusunda uzunluk standartlarını gerçeklemler için ^{87}Rb küvet sıcaklıkları: $\sim 23.335^\circ\text{C}$ ’de kararlı hale getirilmiştir.

3. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

3.1. Kontrol Sistemleri

Bu çalışmada, yüksek hassasiyet ve kararlılıkta bir kontrol gerekli olduğundan dolayı PI kontrol kullanıldı.

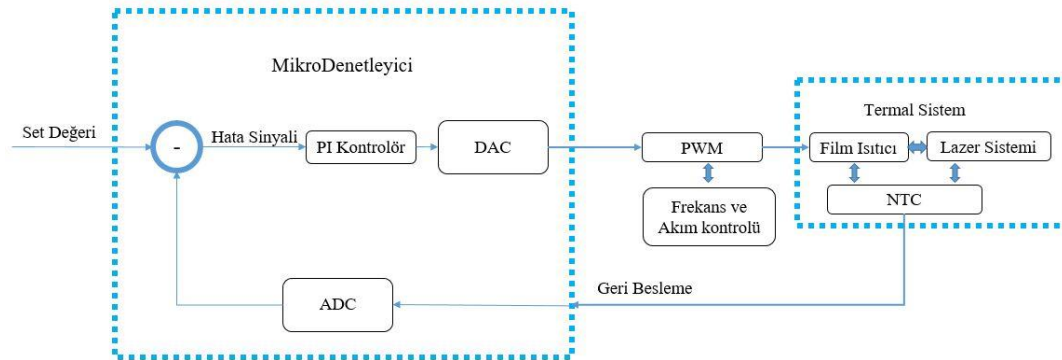
Termistör ve sensör bilgilerin değerlendirmesi sonucunda ve yapmış olduğumuz çalışmanın fiziksel paket özellikleri de göz önünde bulundurulduğunda çalışmamızda NTC tipi sensör kullanılmasına karar verilmiştir. NTC tipi sensörün kararlılık değerinin yüksek olması ve çok hassas okuma değerlerine sahip olması seçimizdeki en önemli etkindir.

3.1.1. Devre Tasarımı

Sıcaklık kontrol sisteminin temel prensibi, NTC'nin sıcaklığı kontrol edilmesi istenen bölgeye yerleştirilmesi ve bu bölgenin sıcaklık değerinin gerçek zamanlı olarak ölçülerek kontrol altında tutulmasıdır. Isıtıcı sistem için film ısıtıcı kullanılmaktadır ve sistemin istenilen bölgesi bu ısıtıcı ile kaplanarak gerekli ısıtma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Sıcaklık kontrol sistemi döngüsünü genel olarak ifade edilirse; ADC örnekleme ile mikrodenetleyici ile sıcaklık verisinin gerçek zamanlı olarak ölçülmesinden sonra, PID algoritması, DAC ve PWM kontrol devresi katlarından geçerek, film ısıtıcıya iletilecek akımın gerçek zamanlı olarak kontrol edilmesi olarak ifade edebiliriz.

Çalışmada kullanılan sıcaklık kontrol sistemi diyagramı genel olarak Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Sistem genel olarak NTC üzerinden geri besleme olarak gelen anlık sinyal



Şekil 3.1 PID ve termal sistem genel blok diyagramı

üzerine kurulu olarak çalışmaktadır. Bu kontrol sistemi sayesinde, istenilen bölgenin sıcaklığı kararlı şekilde 1-2 mK seviyelerinde tutulmaktadır. Sistem içerisindeki yapıların detayları aşağıda verilmektedir.

Araştırmamızda sıcaklık kontrolü sistemi için öngörülen malzeme ihtiyaç listesi aşağıdaki gibidir;

- Mikrodenetleyici geliştirme kartı
- Film ısıtıcı
- 5V, 15V switch mode güç kaynağı, 75W
- Sıcaklık sensörü termistör (NTC)
- Entegreler ve bazı pasif elektronik komponentler

3.1.2. Mikrodenetleyici

Bu çalışmada mikrodenetleyici kart olarak Aduc847 kartı kullanılmıştır. Bu kartın uygulama alanlarını ve genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

Uygulama alanları;

- Akıllı sensör uygulamaları
- Ölçme ve kontrol sistemleri (Teraziler, endüstriyel kontrol cihazları vb.)
- Yüksek hassasiyette analog bilgi toplama işleme
- Düşük güç tüketimi gerektiren, pille çalışan taşınabilir cihazlar (el terminalleri, data logger, biyomedikal cihazlar vb.)

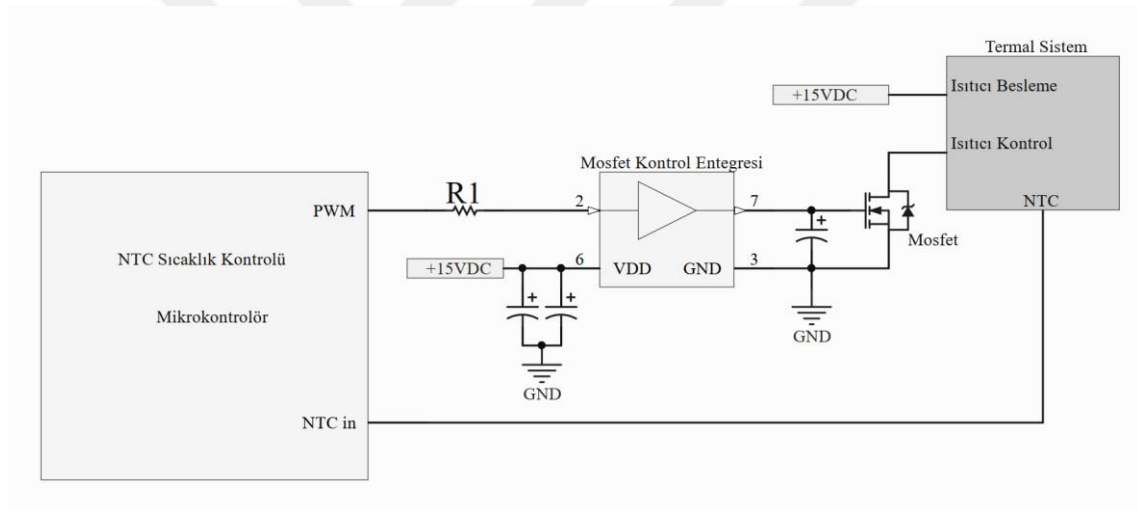
Genel özellikleri;

- Yüksek doğrulukta – yüksek hızda, çok kanallı A/D ve D/A dönüşümleri
- Endüstri standardı 8051 mikrokontrolör mimari yapısı
- Program ve veri hafızalarının devre üzerinde (in-circuit) programlanabilme özelliği
- Düşük maliyetli geliştirme kitleri ve yazılımları sayesinde hızlı ürün geliştirme
- 12 bitten 24 bite kadar çözünürlük, 5Hz'den 400KSPS'ye varan hız
- 62KB'a varan program belleği, 4KB'a varan Flash/EEPROM Data belleği
- 8052: 8 bit, endüstriyel alanlarda 20MIPS'e kadar işlemci hızı

Mikrodenetleyici geliştirme kartı ile sistem üzerinden sıcaklık sensörü (NTC) ile sistemin mevcut sıcaklık değeri okunacaktır. Bu okunan değer PID oransal-integral-türevsel denetleyicisi algoritması ile gerekli hesaplamalar yapılarak sistemin ihtiyacı olan Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) üretilecektir ve bu kare dalga sistemin ısıtıcısının sürekli olarak kontrolünü sağlayacaktır. Bu işlemler sonucunda sistemin sıcaklığının istenilen değerde ve kararlı olması sağlanacaktır.

3.1.3. PWM Kontrol Devresi

PWM kontrol devresinin amacı mikrodenetleyicinin DAC çıkışından gelen sinyali devre üzerindeki mosfet sürücü entegresi üzerinden mosfetin gate ayağına ileterek mosfetin bu kontrol sinyali ile ısıtıcı sisteminin güç beslemesinin sürekli bir şekilde kontrol edilmesinin sağlanmasıdır. Kontrol devresi genel şematiği Şekil 3.2’de verilmektedir.

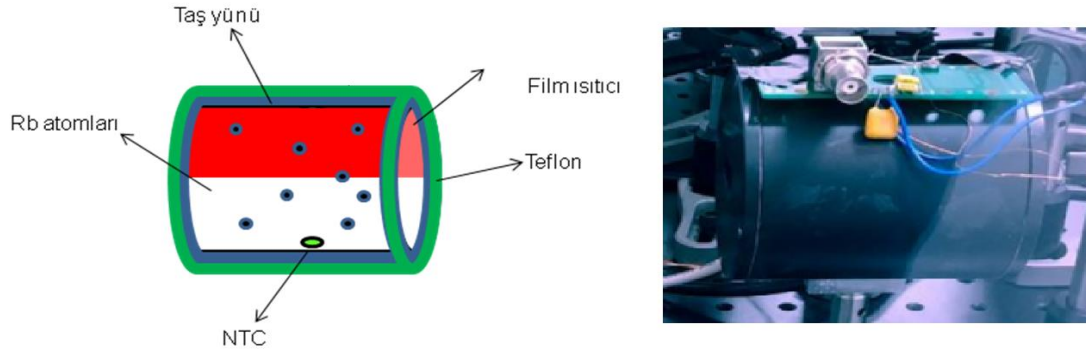


Şekil 3.2 Kontrol devresi genel şematiği

3.1.4. Termal Sistem Tasarımı

Silindirik geometriye sahip cam hücre içerisinde yer alan ^{87}Rb atomlarının [1,2] sıcaklık kontrolünü gerçeklemek için, cam hücrenin yüzeyinin yarısını saracak biçimde ısıtıcı film ile kaplanmıştır. Cam hücrenin boş yüzeyine yerleştirilmiş NTC ile yapının sıcaklık ölçümü yapılarak PID algoritması için gerekli olan sıcaklık verisi alınmaktadır. Cam hücrenin film ısıtıcı ile kaplanmış yüzeyi 1 cm kalınlığında sıcaklık izolasyon malzemesi (taş yünü) ile kaplanmıştır. Bu yapıya sahip cam hücre et kalınlığı 1 cm olan, silindirik

geometriye sahip teflon içerisine yerleştirilmiştir. Termal sistem genel paket yapısı Şekil 3.3'te detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3 RB hücre fiziksel paket genel yapısı ve görseli

3.1.5. Film Isıtıcı

Çalışmamızda esnek film tipi ısıtıcı kullanılmıştır, Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Bu ısıtıcının tercih edilmesindeki en önemli gerekçe esnek olmasıdır. Esnekliği sayesinde yüzeye iyi temas sağlar ve arada hava tabakası kalmasını engeller, böylelikle yüksek verimlilik elde edilir. Isıtıcı kütleden oluşmadığından dolayı üzerine gelen enerjiyi verimli bir şekilde ilgili bölgeye aktarır ve böylelikle hassas sıcaklık kontrolü sağlanmış olur.

Isıtıcının teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

- 200 °C'ye kadar kullanılabilir
- Katmanlı folyo yapısına sahiptir
- Maksimum 250 mikron kalınlığa sahiptir
- Tercihe göre 2.5, 5 ve 10 Watt/cm² gibi güçlerde mevcuttur
- AC 115-230 Volt ya da DC 10-28 Volt ile çalışan tipleri vardır.



Şekil 3.4 Film ısıtıcı [6]

3.1.6. NTC Sıcaklık Sensörü

Ortamdaki ısı değişimini algılamak için kullanılan sensörlere termistör denir. Bu çalışmamızda NTC termistör kullanılmıştır. NTC termistör ortam sıcaklığı arttığında direnci düşen ve ortam sıcaklığı azaldığında direnci artan bir sensör türüdür.

Bu tip sensörler genellikle sıcaklık ölçümünde ve sistem kontrolünde kullanılır ayrıca medikal uygulamalarda hastanın izlenmesi içinde kullanılabilir. Bunun yanında uzay uygulamaları ve bazı gaz ya da sıvıların sıcaklıklarının takip edilmesi için de kullanılabilir.

Çalışmamızda Şekil 3.5'te gösterilmiş olan 25°C'de 2252ohm dirence sahip NTC termistör kullanılmıştır. Kullanılan NTC, Betatherm Sensors firmasının 2.2K3A1A model numarasına sahip termistördür [8].

NTC termistörünün teknik özelliklerini inceleyecek olursak,

- Hızlı tepki zamanı (tipik olarak 1 sn.)
- Kanıtlanmış kararlılık ve güvenilirlik
- -80°C ile +150°C arasında çalışabilirlik

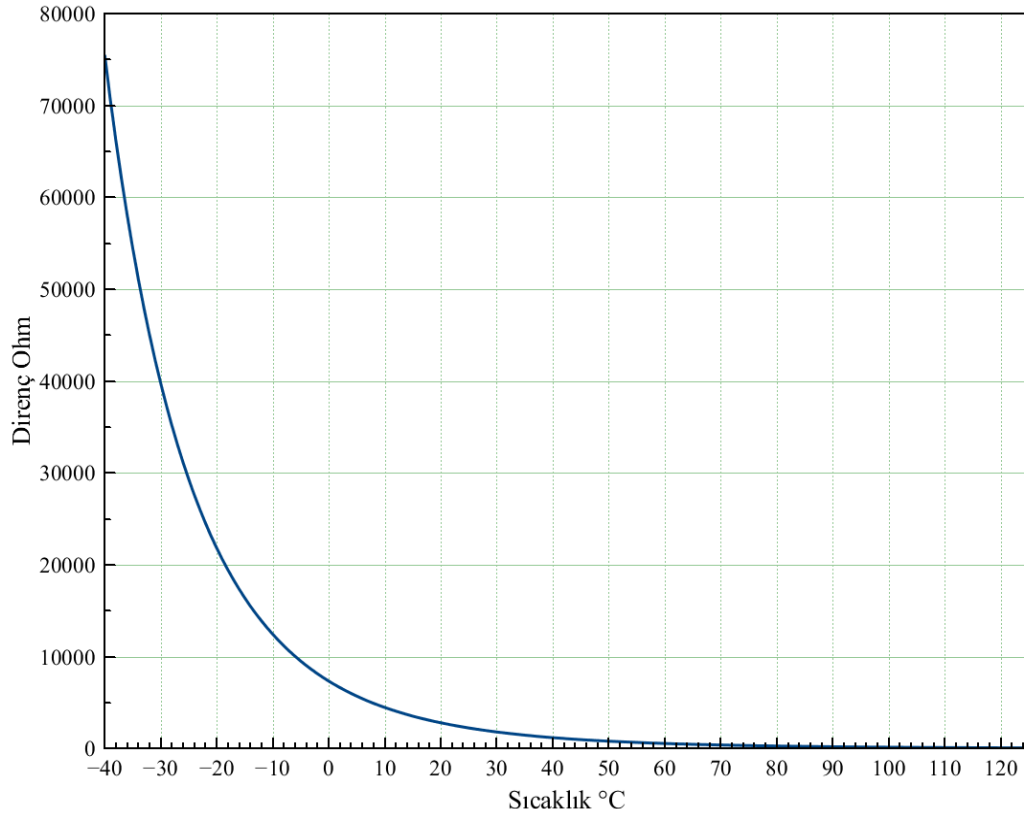


Şekil 3.5 NTC termistör

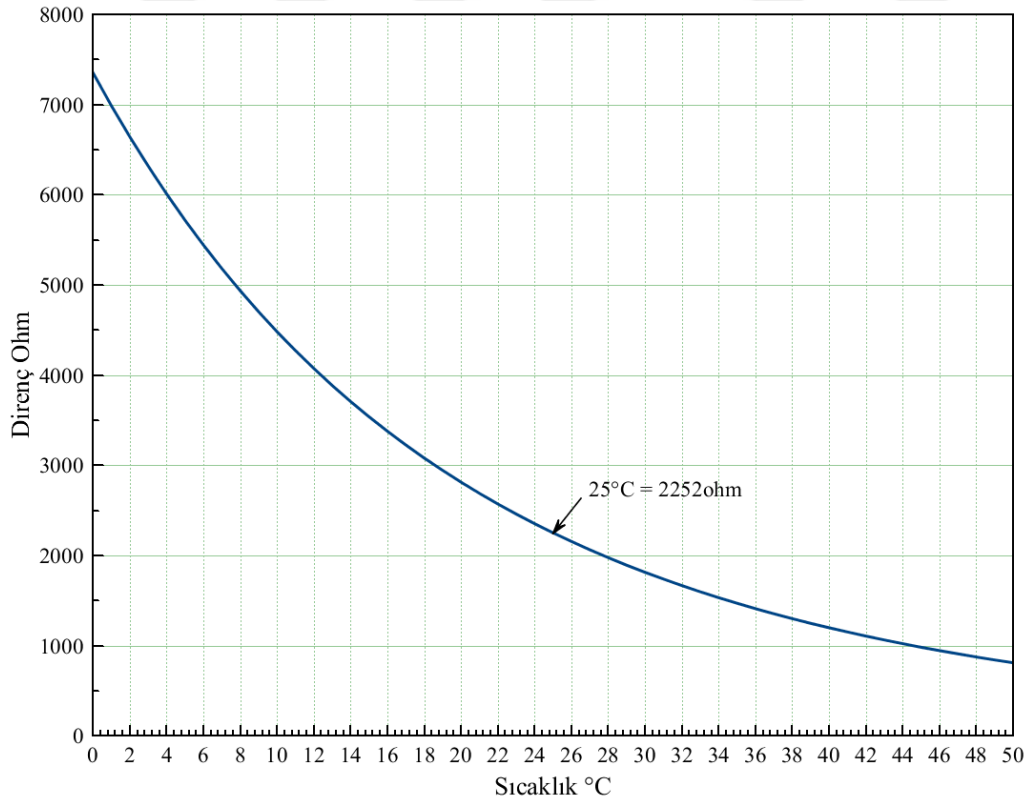
Termistörün sıcaklık direnç değişimini gösteren değerler Tablo 3.1.'de ve Şekil 3.6 ile Şekil 3.7'de detaylı olarak gösterilmektedir. Bu tablo ve grafiklerde görüldüğü üzere NTC termistör -40°C ile +125°C arasında sıcaklık okuması yapabilmektedir.

Tablo 3.1 NTC termistör üretici sıcaklık direnç tablosu [6]

Sıcaklık (°C)	Direnç (Ω)	Sıcaklık (°C)	Direnç (Ω)	Sıcaklık (°C)	Direnç (Ω)	Sıcaklık (°C)	Direnç (Ω)
-40	75491	1	6988	42	1107	84	249
-39	70663	2	6644	43	1064	85	241
-38	66173	3	6318	44	1023	86	234
-37	61996	4	6010	45	983	87	226
-36	58109	5	5719	46	946	88	220
-35	54489	6	5444	47	910	89	213
-34	51118	7	5183	48	875	90	206
-33	47975	8	4937	49	842	91	200
-32	45045	9	4703	50	811	92	194
-31	42312	10	4482	51	781	93	188
-30	39761	11	4273	52	752	94	183
-29	37380	12	4075	53	724	95	177
-28	35156	13	3886	54	698	96	172
-27	33077	14	3708	55	672	97	167
-26	31134	15	3539	56	648	98	162
-25	29317	16	3378	57	624	99	157
-24	27617	17	3226	58	602	100	153
-23	26026	18	3081	59	581	101	149
-22	24536	19	2944	60	560	102	144
-21	23140	20	2814	61	540	103	140
-20	21832	21	2690	62	521	104	136
-19	20606	22	2572	63	503	105	132
-18	19456	23	2460	64	486	106	129
-17	18377	24	2353	65	469	107	125
-16	17364	25	2252	66	453	108	122
-15	16413	26	2156	67	437	109	118
-14	15520	27	2064	68	422	110	115
-13	14681	28	1977	69	408	111	112
-12	13892	29	1893	70	394	112	109
-11	13150	30	1814	71	381	113	106
-10	12452	31	1739	72	369	114	103
-9	11795	32	1667	73	356	115	100
-8	11177	33	1598	74	345	116	98
-7	10595	34	1533	75	333	117	95
-6	10046	35	1471	76	322	118	92
-5	9529	36	1411	77	312	119	90
-4	9042	37	1354	78	302	120	88
-3	8582	38	1300	79	292	121	85
-2	8148	39	1248	80	283	122	83
-1	7739	40	1199	81	274	123	81
0	7353	41	1152	82	265	124	79
				83	257	125	77



Şekil 3.6 NTC termistör -40°C ile 125°C arası direnç grafiği



Şekil 3.7 NTC termistör 0°C ile 50°C arası direnç grafiği

NTC üzerinden okunan direnç değerinin sıcaklık olarak hesaplanabilmesi için Steinhart-hart denklemi kullanılmaktadır. Denklem, termistör sıcaklıklarını kolayca ve daha kesin bir şekilde modellemek için basit bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Steinhart-Hart denklemi bir termistörün sıcaklığın fonksiyonu olarak gerçek direncini daha yüksek hassasiyetle hesaplamaktadır [15]. Sıcaklık aralığı ne kadar dar olursa direnç hesaplaması o kadar doğru olmaktadır.

Steinhart-Hart Denklemi:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (2.2)$$

Burada:

T: Kelvin cinsinden sıcaklık (K, Kelvin = Santigrat + 273.15),

R: T sıcaklığındaki direnç değeri (ohm),

A, B, C: Termistörün katsayılarıdır.

Termistörün katsayıları genellikle üretici tarafından verilmektedir. Verilmediği durumlarda termistör için kalibrasyon yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada kullanılan NTC termistörün katsayı değerleri aşağıdaki gibidir.

$$A = 1.471388 \times 10^{-3}$$

$$B = 2.376138 \times 10^{-4}$$

$$C = 1.051058 \times 10^{-7}$$

Bu değerler NTC'nin 0°C, 25°C ve 70°C kalibre edilmesi ile bulunmuş katsayılardır.

3.2. Geliştirilen Sistemler

Bu bölümde, geliştirilen sıcaklık kontrol sistemi ve lazer frekans kararlılığının ölçümü için kurulan deney düzeneği hakkında bilgilendirme yapılacaktır. Ayrıca sistemlerin çalışır durumdaki görsellerine de yer verilecektir.



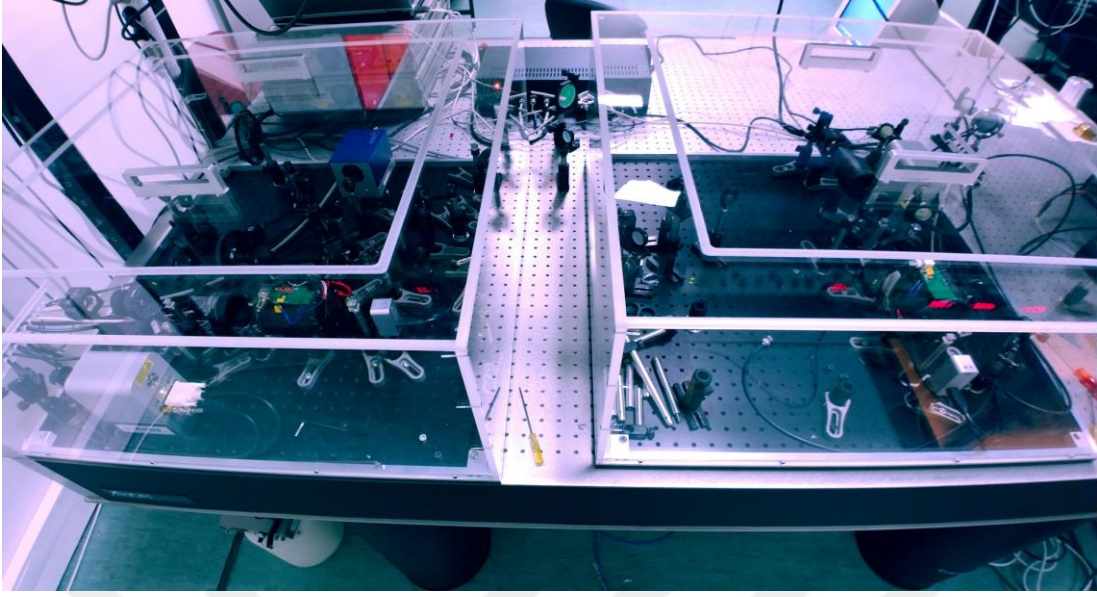
Şekil 3.8 Çalışır durumdaki sıcaklık kontrol devresi

Geliştirilen sıcaklık kontrol sisteminin mikrodenetleyici, güç ve lazer sistemleri ile olan bağlantılarını Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu kartlar tek bir güç kaynağından beslenmektedir. Sıcaklık kontrol sistemine dış müdahalenin engellenmesi amacıyla kapalı kutu içerisine yerleştirilmişlerdir. Çalışan sistem çok hassas ölçüm yaptığından dolayı elektrik şebekesinden güç kaynağına gelen AC besleme içinde ayrıca gürültü filtresi kullanılmıştır. Sistemimizde çalışan iki adet lazer olduğundan dolayı iki adet sıcaklık kontrol kartı üretilmiştir.

Lazer dalga boyu standartlarının ^{87}Rb atomik gaz sıcaklık kontrol ünitelerinin sıcaklık kontrol kararlılığı ve dalga boyu standartlarının frekans kararlılığı üzerindeki etkilerinin ölçülmesi ve belirlenmesi amacı ile Şekil 3.9’da yer alan ölçüm düzeneği kurulmuştur.

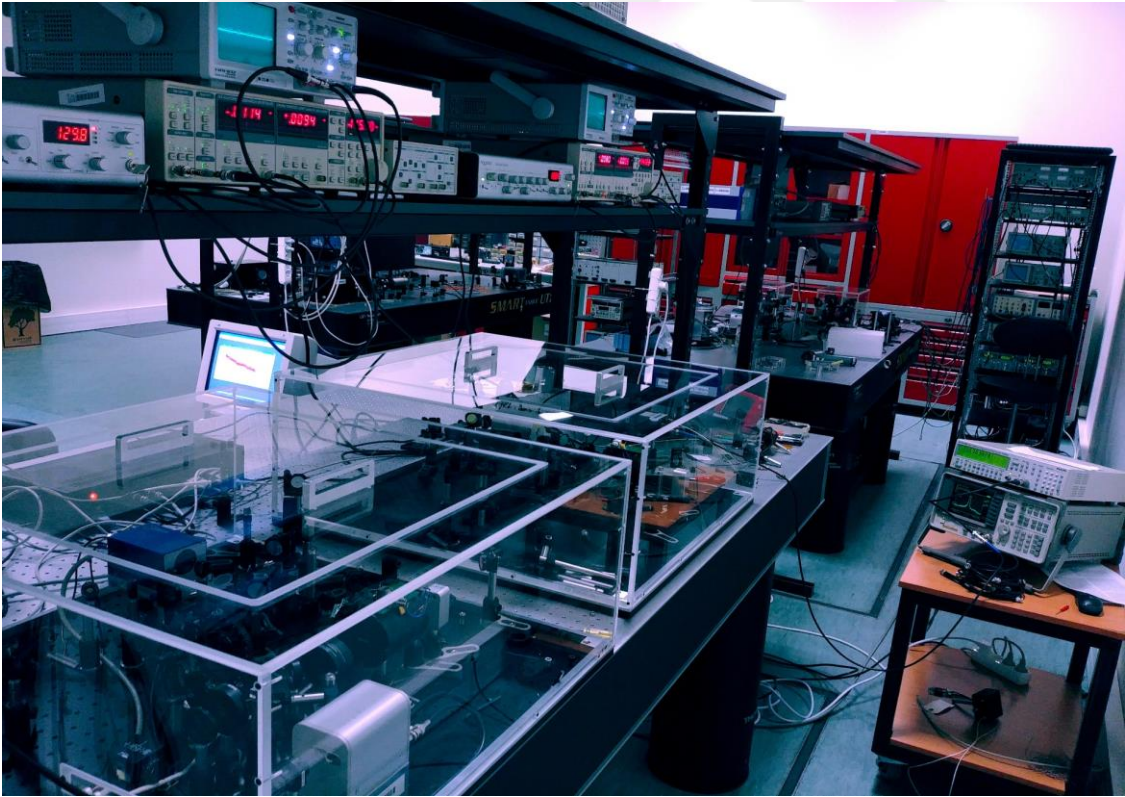
Şekil 3.9 Lazer sistemi şematik deney düzeneği

29



Şekil 3.10 Çalışır durumdaki lazer sistemleri

Lazer sistemi genel olarak sıcaklık kontrol sistemi, kilitleme sistemleri, osiloskoplar, sinyal sayıcı multimetre ve spektrum analizörden oluşmaktadır Şekil 3.11’de tüm sistem gösterilmektedir.



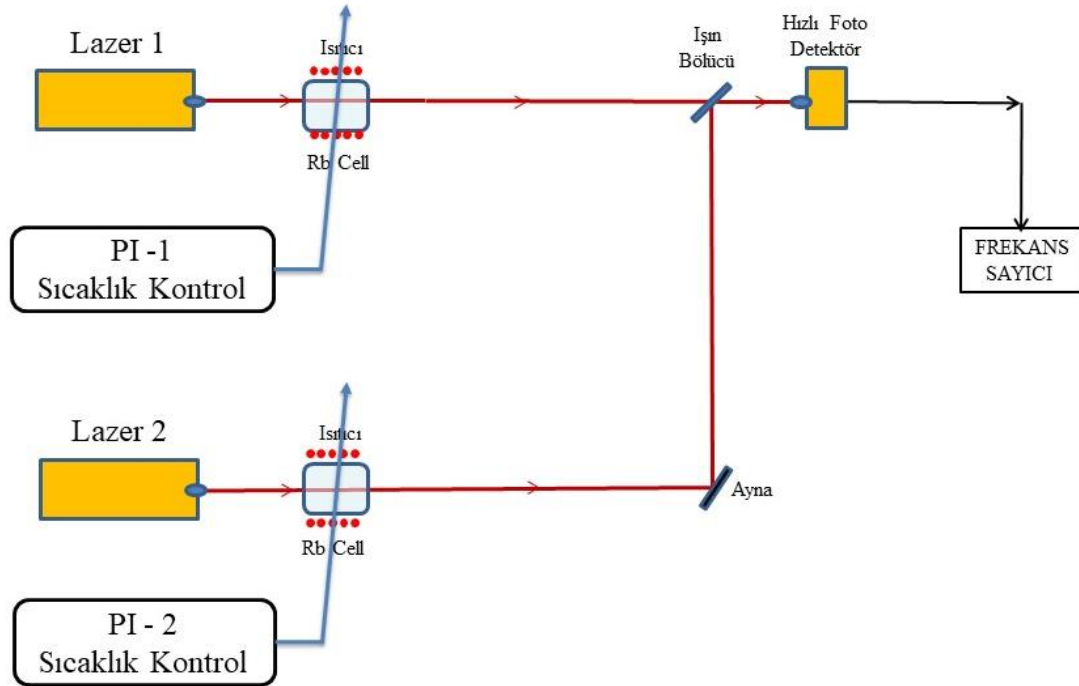
Şekil 3.11 Lazer sistemleri ve kilitleme cihazları

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde gerçekleştirilen PI kontrol sisteminin yapısı anlatılarak, lazer sistemi sıcaklık kontrolü için en uygun PI değerlerinin tespiti için yapılan deney sonuçları verilecektir. Bulunan PI parametreleri ise lazer sisteminin sıcaklık kontrol sonuçları ve frekans kararlılığı sonuçları incelenmiştir.

4.1. Geliştirilen Kontrol Sistemi İncelemesi

Geliştirilen PI kontrol sistemi Lazer 1 ve Lazer 2 sisteminin sıcaklık kontrolünü Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bağlanarak gerçekleştirmektedir. Burada her iki Lazer sistemi içinde ayrı ayrı kontrolcüler mevcuttur. Bunun nedeni iki sistemin istenildiği durumlarda farklı sıcaklıklarda çalıştırılabilmesi ve iki sistemin ayrı ayrı sıcaklık kontrolünün sağlanabilmesidir.



Şekil 4.1 Lazer sistemi ve PI sıcaklık kontrol üniteleri

Geliştirmiş olduğumuz sıcaklık kontrol sistemi PID algoritması kullanarak sıcaklık kararlılığını sağlamaktadır. Burada kullanılan NTC termistör üzerinden okunan direnç değeri Steinhart-Hart Denklemi ile santigrat cinsinden sıcaklığa çevrilmektedir.

Bu sistemde direnç okuma yüksek çözünürlüğe sahip multimetreler ile gerçekleştirilmektedir. Bu multimetreler yüz binde bir hassasiyete kadar direnç değerini +01. ve +02. (+01.556937kOHM, +02.508360kOHM) şeklinde okuyabilmektedir.

4.1.1. PID Katsayılarının Belirlenmesi Esnasındaki Verilerin İncelenmesi

Sıcaklık kontrol sistemi gerçekleştirmesinden sonra sistemin çalışması ve optimize edilmesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu veriler ışığında sistemin en kararlı şekilde çalışması sağlanmıştır.

4.1.1.1. PI Denemeleri

Sistemin optimizasyonu esnasında sadece P-I değerleri kullanılmıştır. Bu incelemelerin sonucunda sistemin kararlı şekilde çalışması için gerekli olan P-I değerleri belirlenmiştir.

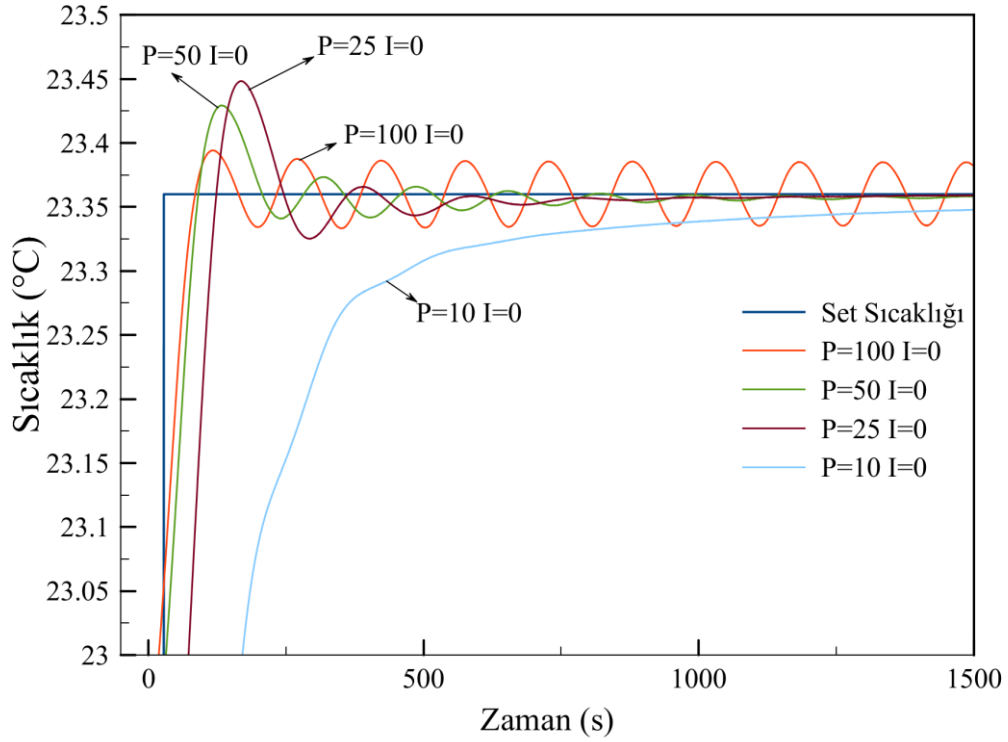
P değeri için; P=100, P=50, P=25 ve P=10 (I=0 iken) incelemeleri yapılmıştır.

I değeri için; I=4.5, I=3.5, I=2.5, I=2 ve I=2.1 (P=25 iken) incelemeleri yapılmıştır.

Bu bölümde bu denemeler detaylı olarak incelenecektir.

P Denemeleri

İlk denememizde, P değeri için; P=100, P=50, P=25 ve P=10 (I=0 iken) verileri incelenmiştir. Bu incelemenin verileri Şekil 4.2’de verilmektedir. Sistemin genel P incelemesi yapıldığında küçük P değerleri için sistem set sıcaklığına ulaşamamaktadır. P değeri yavaş yavaş artırıldığında set değeri çevresinde farklı seviyelerde sönümlenen ve sönümlenmeyen osilasyonlar görülmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda sistemimiz için en ideal P değerinin P=25 olduğuna karar verilmiştir.

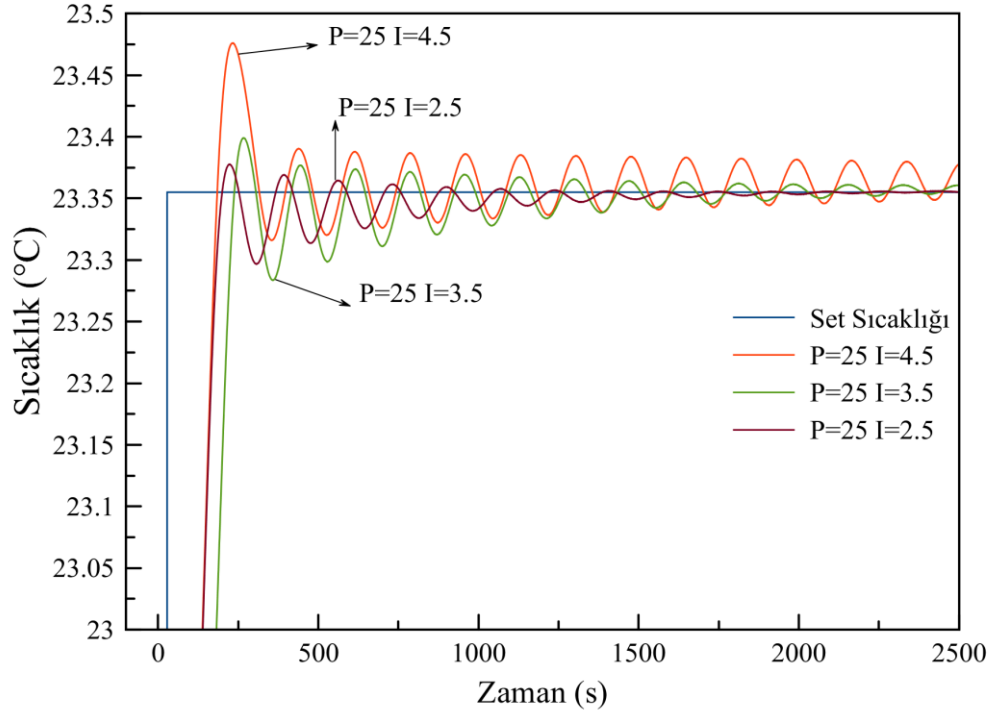


Şekil 4.2 Sisteme farklı P değerleri verildiğinde oluşan kapalı çevrim cevabı

PI Denemeleri

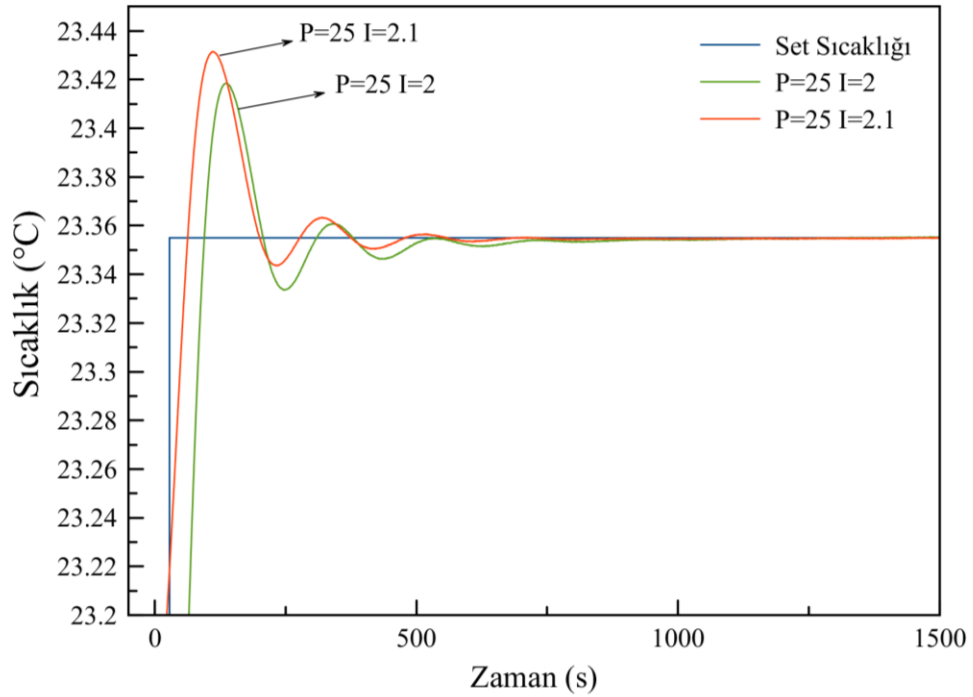
Sistem için uygun olan P değeri belirlendikten sonra I değeri için incelemeler yapılmıştır. I değeri için; $I=4.5$, $I=3.5$, $I=2.5$, $I=2$ ve $I=2.1$ ($P=25$ iken) verileri incelenmiştir. Yüksek I değerleri sistemde sürekli osilasyona neden olmaktadır ve sistemin kararlı hale gelme süresini artırmaktadır. Sistem yüksek I değerlerinde kararlı hale gelse bile kararlılık değeri yeterince küçük olmamaktadır. Bu nedenden dolayı I değeri optimizasyonu için farklı denemeler yapılmıştır, Şekil 4.3'te ilk deneme verileri gösterilmektedir.

Denemelerden görüldüğü üzere sistemin I değeri düşürüldükçe sistemin daha kısa sürede kararlı duruma geldiği görülmektedir.



Şekil 4.4 P=25 iken farklı I değerleri verildiğinde oluşan sistem cevabı (1/2)

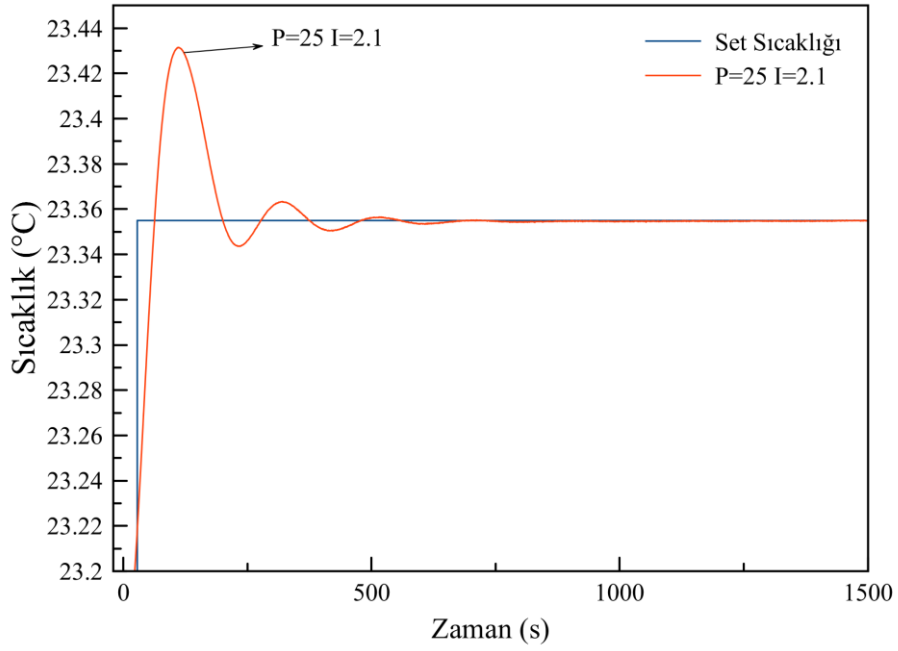
Sistemimiz için ideal I değeri, $I=2.1$ olarak belirlenmiştir, Şekil 4.4'te sistemin yaklaşık 15 dakika içinde kararlı duruma geldiği görülmektedir.



Şekil 4.3 P=25 iken farklı I değerleri verildiğinde oluşan sistem cevabı (2/2)

PI Sonuç İncelemesi

Yapılan denemeler ile sıcaklık kontrol sistemini istemiş olduğumuz sürede kararlı hale getirdik. İdeal set sıcaklığı ile sıcaklık kontrol sisteminin PI kontrollü kıyaslaması Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5 İdeal sistem ile kontrol sistemimizin grafiksel kıyaslaması

Bu çalışmada kullanılan PID örnekleme hızı, 5 Hz çalışma frekansına sahiptir. Katsayıları $K_p = 25.0$ ve $K_i = 2.1$ olarak belirlenmiştir. Sistemimizde, K_d kullanılmamıştır.

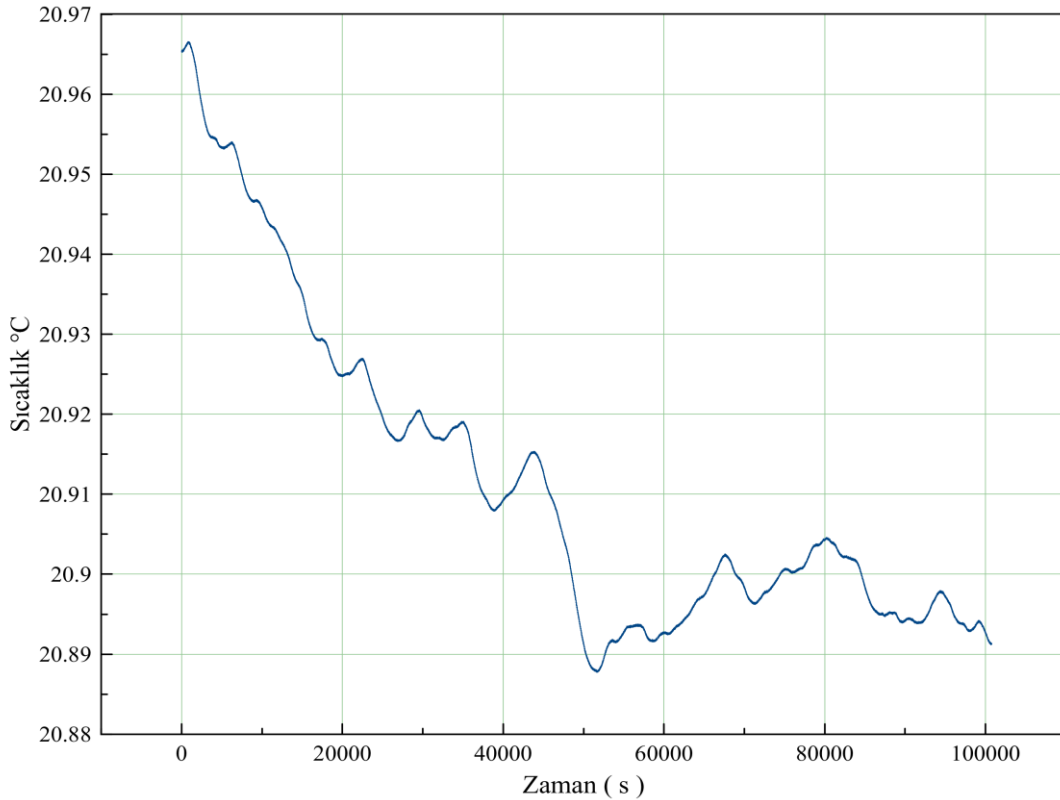
4.1.2. Geliştirilen Sistem PI Değerlendirmesi

Sıcaklık kontrol sisteminin ideal durum ile sistemin PI parametresi ile optimize edilmesi sonucunda elde edilen değerin karşılaştırması Şekil 4.5'te yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda görüldüğü üzere sıcaklık kontrol sistemi istenilen set değerinde kararlı bir şekilde çalışmaktadır. Sonraki bölümlerde bu kararlılık değerleri üzerine detaylı incelemeler yapılacaktır.

4.1.2.1. PI Kontrolör Altındaki Sistem Davranışı İncelemeleri

PI Kontrolsüz Sistem İncelemesi

Sıcaklık kontrol sisteminin amacı ilgili yapının sıcaklık kararlılığını en üst düzeyde tutmaktır. İlk olarak PI kontrolsüz incelemesi yapılmıştır. Bu durumda sistemin sıcaklığı herhangi bir kontrol altında değildir ve dış ortam sıcaklık değişimi ile sistemin sıcaklık değişiminin nasıl etkilendiği gözlemlenmiştir, Şekil 4.6’da 27 saat boyunca alınan veride sıcaklığın dış ortam sıcaklığı ile birlikte değişimi görülmektedir. Sistemin sıcaklığının PI kontrolsüz durumunda 27 saatte yaklaşık 100m°C değişmektedir. Bu değişim lazer sistemlerinde frekans kararlılığını bozduğu için istenmemektedir.



Şekil 4.6 PI kontrolsüz sıcaklık kararlılık verisi (27 saat)

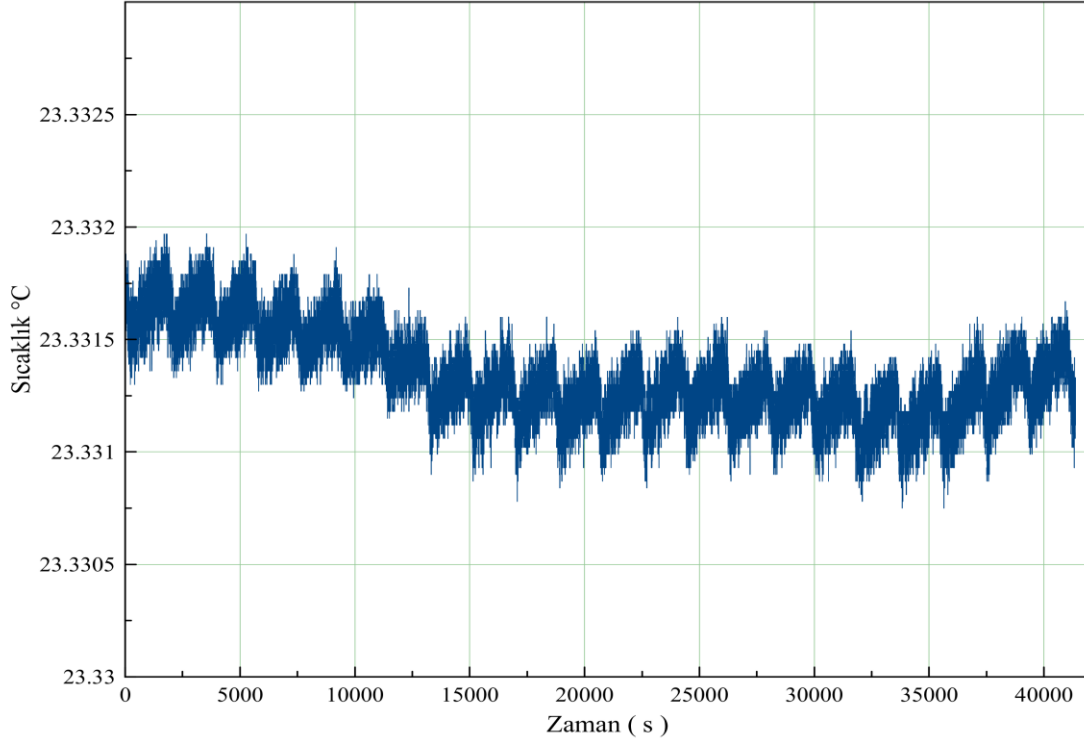
PI Kontrollü Sistem İncelemesi

PI kontrolün sistem üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için sırasıyla 11,22 ve 83 saatlik çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda bu çalışmalara ilişkin sonuçlar verilmiştir.

Bu veriler göstermektedir ki geliştirilen sistem kısa ve uzun vadede yüksek kararlılıkta sıcaklık kontrolü sağlamaktadır.

İlk uygulamada PI katsayıları $P=25$ ve $I=2.1$ olarak sistem 11 saat süreyle çalıştırılmıştır, Şekil 4.7’de bu çalışmaya ilişkin grafik görülmektedir.

Sistem kararlı halde 23.331°C ile 23.332°C arasında değişim yapmaktadır, sıcaklık kararlılığı $\sim 0.001^{\circ}\text{C}$ ’dir.

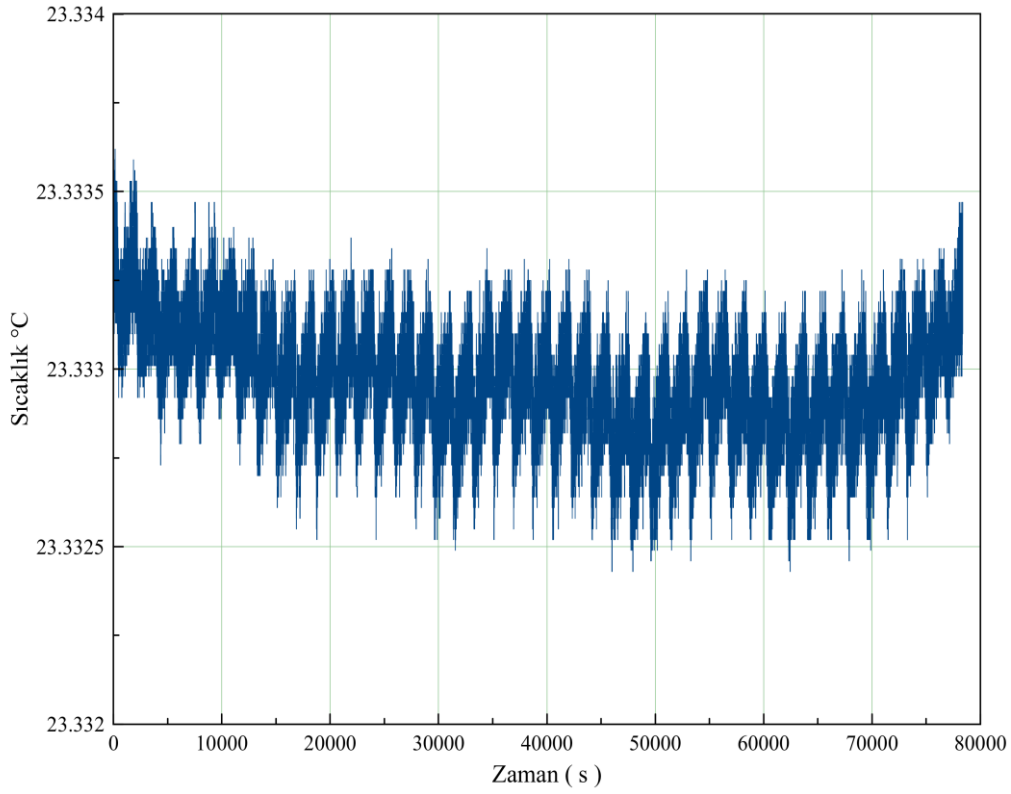


Şekil 4.7 PI Kontrollü sıcaklık kararlılık verisi (11 saat)

İlk uygulama sonucunda PI kontrolü ile birlikte lazer sisteminin ^{87}RB atomlarının bulunduğu hücrenin sıcaklığı için hedeflenen $2\text{m}^{\circ}\text{C}$ altındaki sıcaklık kararlılığına ulaşılmıştır ve bu durum lazer sisteminin frekans kararlılığı ölçümleri için uygundur.

İkinci uygulamada PI katsayıları $P=25$ ve $I=2.1$ olarak sistem 22 saat süreyle çalıştırılmıştır, Şekil 4.7’de bu çalışmaya ilişkin grafik görülmektedir.

Sistem kararlı halde 23.3325°C ile 23.3335°C arasında değişim yapmaktadır, sıcaklık kararlılığı $\sim 0.001^{\circ}\text{C}$ ’dir.

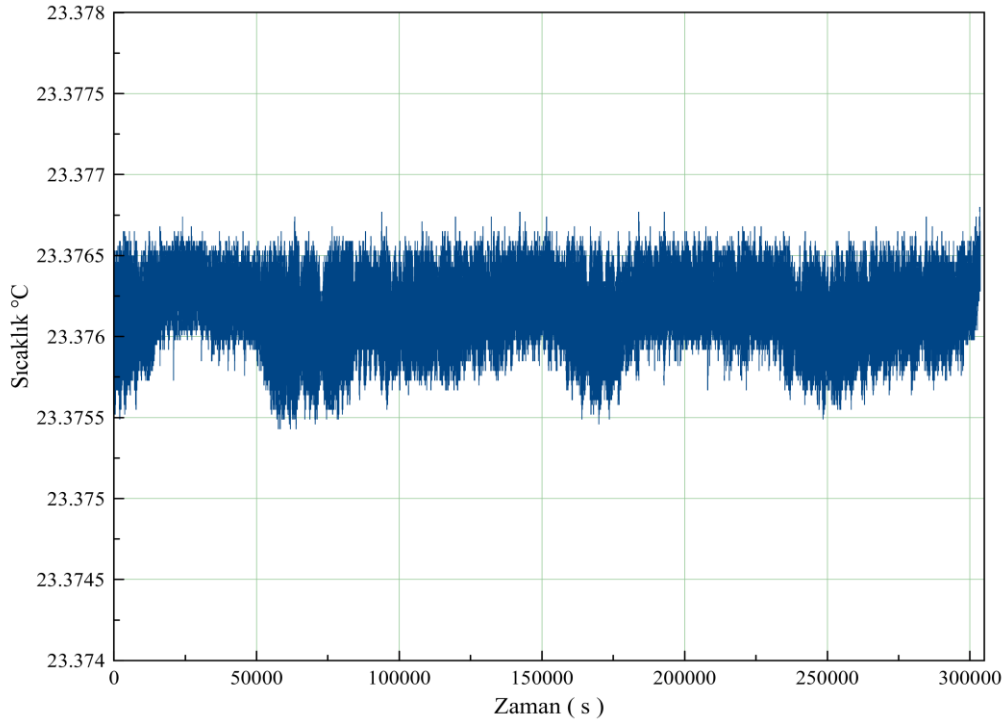


Şekil 4.8 Kapalı çevrim sıcaklık kararlılık verisi (22 saat)

İkinci uygulama sonucunda PI kontrolü ile birlikte lazer sisteminin ^{87}RB atomlarının bulunduğu hücrenin sıcaklığı 22 saat boyunca hedeflenen $2\text{m}^\circ\text{C}$ altındaki sıcaklık kararlılığından daha iyi kararlılıkta tutulmuştur ve bu durum lazer sisteminin frekans kararlılığı ölçümleri için uygundur.

Üçüncü uygulamada PI katsayıları $P=25$ ve $I=2.1$ olarak sistem 83 saat süreyle çalıştırılmıştır, Şekil 4.9’da bu çalışmaya ilişkin grafik görülmektedir.

23.3755°C ile 23.3765°C arasında değişim yapmaktadır, sıcaklık kararlılığı $\sim 0.001^\circ\text{C}$ ’dir.



Şekil 4.9 Kapalı çevrim sıcaklık kararlılık verisi (83 saat)

Üçüncü uygulama sonucunda PI kontrolü ile birlikte lazer sisteminin ^{87}RB atomlarının bulunduğu hücrenin sıcaklığı 83 saat boyunca $1\text{m}^\circ\text{C}$ sıcaklık kararlılığında tutulmuştur ve bu durum lazer sisteminin frekans kararlılığı ölçümleri için uygundur.

Sistemin PI kontrolsüz ve PI kontrollü kararlılık verileri Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1 Sıcaklık kontrol sistemi PI kontrolsüz ve PI kontrollü kararlılık verileri

Çevrim Durumu	Veri Süresi	Sıcaklık Kararlılığı
PI Kontrolsüz	27 Saat	$\sim 100\text{m}^\circ\text{C}$
PI Kontrollü	11 Saat	$\sim 1\text{m}^\circ\text{C}$
PI Kontrollü	22 Saat	$\sim 1\text{m}^\circ\text{C}$
PI Kontrollü	83 Saat	$\sim 1\text{m}^\circ\text{C}$

Gerçekleştirilen kontrol sistemi lazer sisteminin sıcaklık kararlılığı kontrolünü $\sim 1\text{m}^\circ\text{C}$ sıcaklık değişimleri ile kontrol ettiği görülmüştür. Bu sıcaklık kararlılığı değişimi lazer sisteminin frekans kararlılığı çalışması için uygundur.

4.2. Frekans Kararlılığı Deney İncelemeleri

Araştırmalar ve yapılan çalışmalar ile yüksek hassasiyette ve kararlılıkta çalışan bir sıcaklık kontrol sistemi tasarımı ve üretimi yapılmıştır.

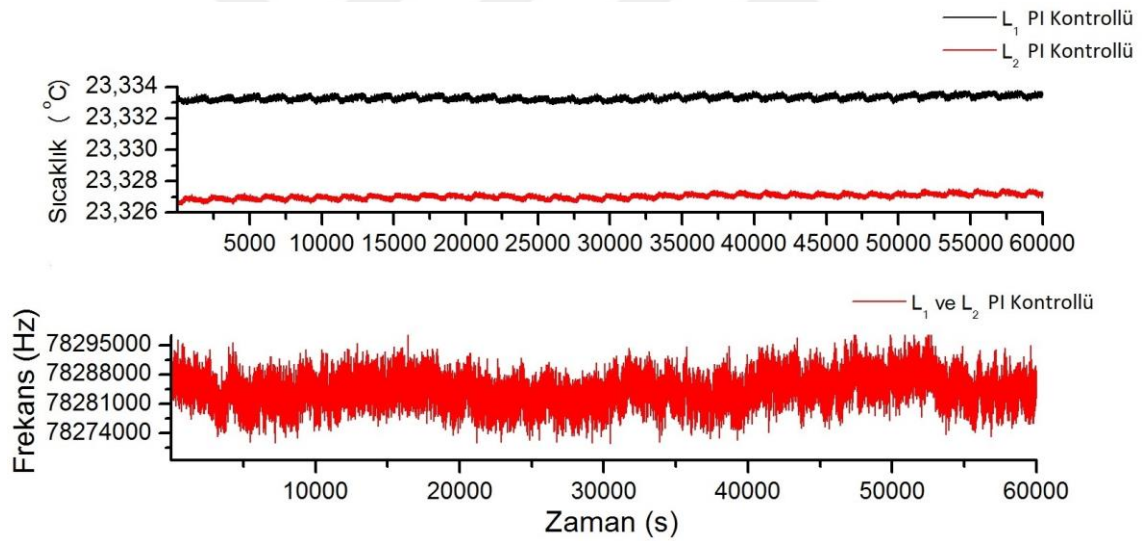
Lazer sistemleri ile birlikte kullanılmakta olan Rb atomik gaz hücrelerinin istenilen sıcaklıkta ve kararlılıkta tutulması sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında sıcaklık kararlılığının lazer frekans kararlılığına etkisi incelenmiş olup sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir.

Frekans kararlılığı incelemeleri 4 farklı sıcaklık kontrolü ile yapılmıştır.

Bunlar;

- Lazer 1 ve lazer 2 PI kontrollü
- Lazer 1 PI kontrolsüz ve lazer 2 PI kontrollü
- Lazer 1 PI kontrollü ve lazer 2 PI kontrolsüz
- Lazer 1 ve lazer 2 PI kontrolsüz.

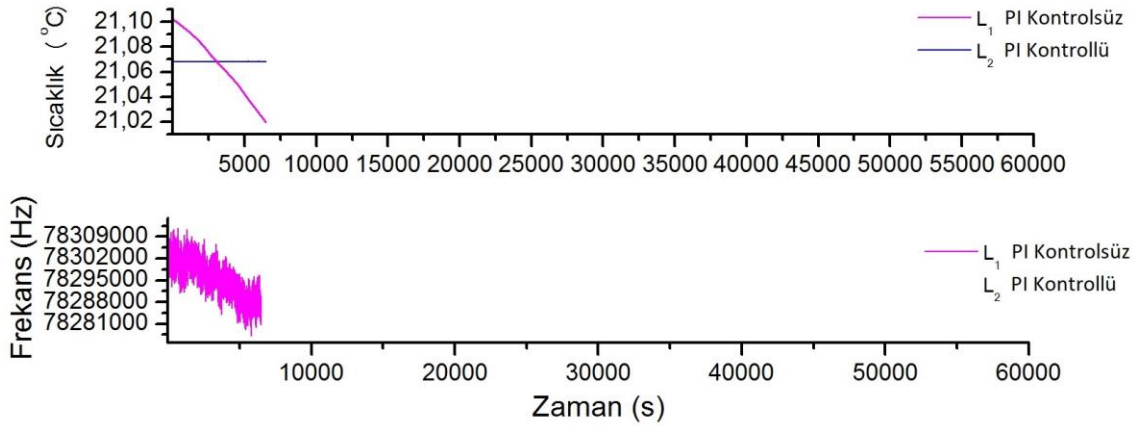
İlk deneyde Lazer 1 ve Lazer 2 sisteminin sıcaklık ve frekans verileri PI kontrolü varken incelenmiştir Şekil 4.10'da deney esnasında alınan verileri gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Lazer 1 ve Lazer 2 sistemi PI kontrollü sıcaklık ve frekans verileri

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere Lazer 1 ve Lazer 2 sıcaklık kontrolü olduğu durumda dalga boyu standartları arasındaki fark frekansında herhangi bir kayma gözlenmemektedir.

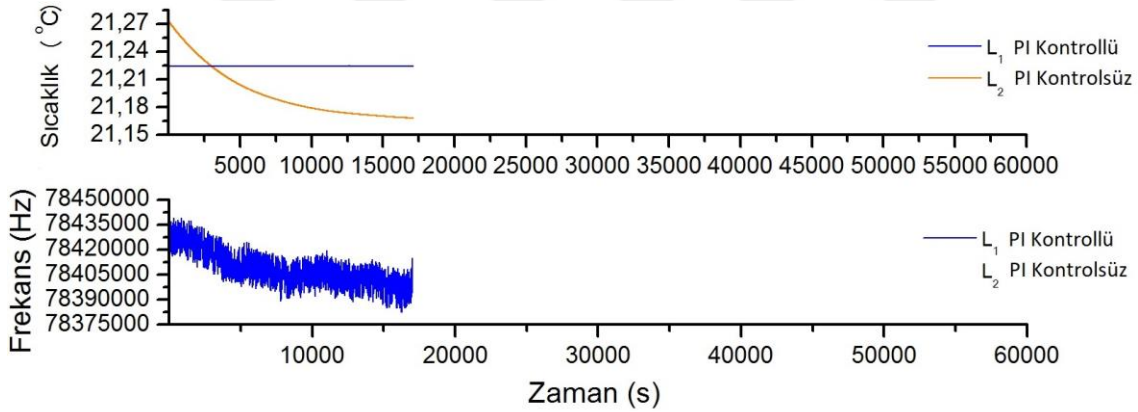
İkinci deneyde Lazer 1 sistemi PI kontrolsüz ve Lazer 2 sistemi PI kontrollü olarak sıcaklık ve frekans verileri incelenmiştir Şekil 4.11'de deney esnasında alınan verileri gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Lazer 1 PI kontrolsüz ve Lazer 2 PI kontrollü sıcaklık ve frekans verileri

Lazer 1 sıcaklık kontrolü olmadığı ve lazer 2 sıcaklık kontrolünün olduğu durumda ise Lazer 1'in ^{87}Rb atomik gazının hücre sıcaklığındaki $\approx 100\text{m}^\circ\text{C}$ sıcaklık değişiminin fark frekansında $\approx 30\text{kHz}$ 'lik bir frekans kaymasına neden olduğu görülmektedir.

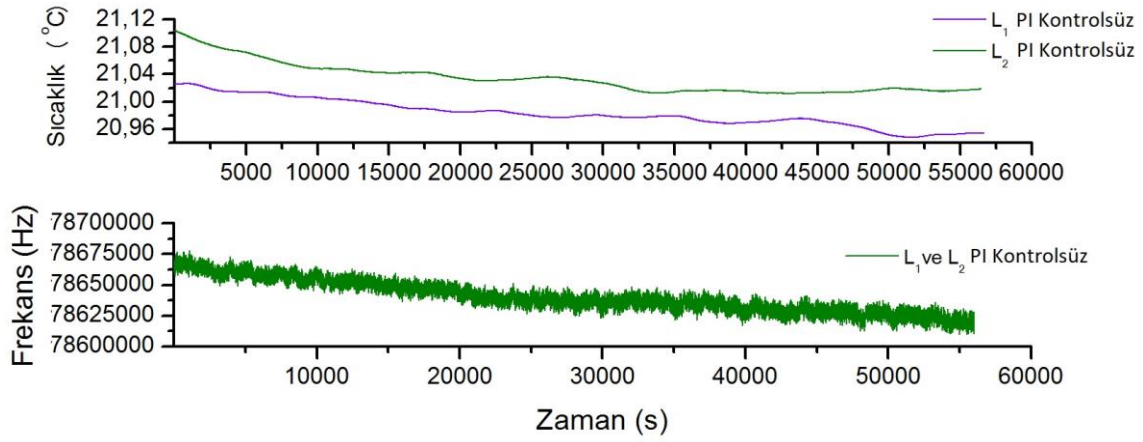
Üçüncü deneyde Lazer 1 sistemi PI kontrollü ve Lazer 2 sistemi PI kontrolsüz olarak sıcaklık ve frekans verileri incelenmiştir Şekil 4.12'de deney esnasında alınan verileri gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Lazer 1 PI kontrollü ve Lazer 2 PI kontrolsüz sıcaklık ve frekans verileri

Lazer 2 sıcaklık kontrolü olmadığı ve lazer 1 sıcaklık kontrolünün olduğu durumda ise Lazer 2'in ^{87}Rb atomik gazının hücre sıcaklığındaki $\approx 100\text{m}^\circ\text{C}$ sıcaklık değişiminin fark frekansında $\approx 30\text{kHz}$ 'lik bir frekans kaymasına neden olduğu görülmektedir.

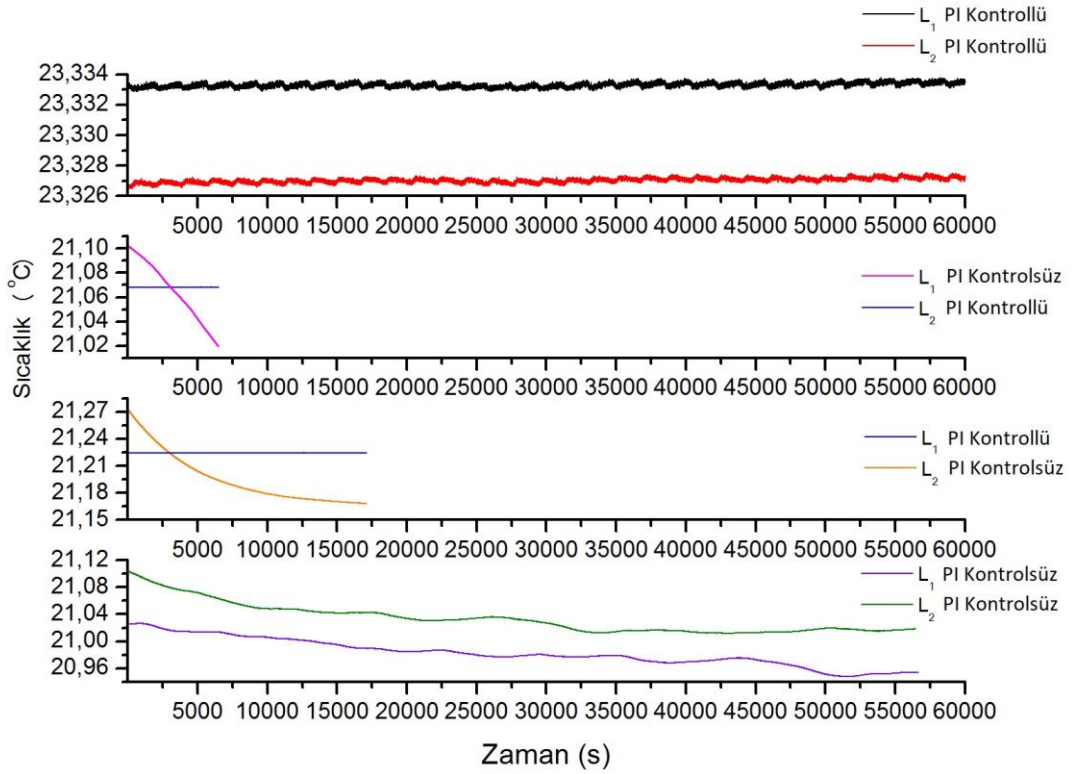
Dördüncü deneyde Lazer 1 ve Lazer 2 sistemi PI kontrolsüz olarak sıcaklık ve frekans verileri incelenmiştir Şekil 4.13'de deney esnasında alınan verileri gösterilmektedir.



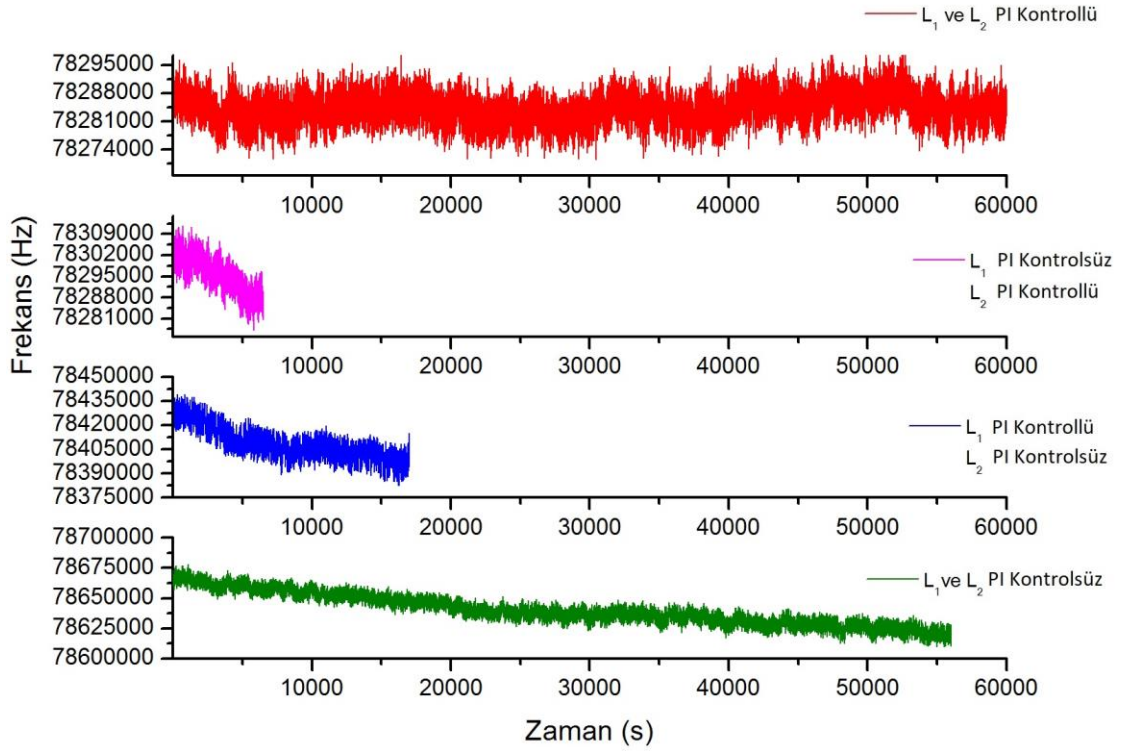
Şekil 4.13 Lazer 1 ve Lazer 2 PI kontrolsüz sıcaklık ve frekans verileri

Lazer 1 ve lazer 2'nin sıcaklık kontrolü olmadığı durumda lazer 1 ve lazer 2 ^{87}Rb atomik gazının hücre sıcaklığındaki $\approx 100\text{m}^\circ\text{C}$ sıcaklık değişiminin fark frekansında $\approx 60\text{kHz}$ 'lik bir frekans kaymasına neden olduğu görülmektedir

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de dalga boyu standartlarının fark frekansı değişiminin, ^{87}Rb atomlarının sıcaklık kontrollerinin var olduğu (PI kontrollü) ve var olmadığı (PI kontrolsüz) durumdaki zaman ile değişimleri toplu olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Lazer sistemi PI kontrollü ve PI kontrolsüz sıcaklık verileri



Şekil 4.15 Lazer sistemi PI kontrollü ve PI kontrolsüz frekans verileri

Grafikten görüldüğü üzere ulusal dalga boyu standartlarının ^{87}Rb atomik gaz sıcaklık kontrolcülerinin PI kontrollü durumunda tepeden tepeye sıcak değişimi $\approx 1\text{m}^\circ\text{C}$ değerindedir.

Şekil 4.15'teki frekans verileri sonucunda sistemin farklı çalışma yapılarındaki elde edilen kararlılıkları hesaplamıştır. Bu hesaplama sistemdeki lazerin fark frekansının sistemin mutlak frekansına bölünmesi ile bulunmaktadır.

$$\text{Frekans Kararlılığı} = \text{Fark Frekansı} / \text{Mutlak Lazer Frekansı}$$

Bu çalışmadaki sistemlerde kullanılan lazerlerin mutlak frekansı $384.227.982.000.000\text{Hz}$ 'dir.

Örnek bir hesaplama yaparsak:

$$\text{Frekans Kararlılığı} = 2.104 \text{ Hz} / 384.227.982.000.000 \text{ Hz} = 5,47592\text{E-12}$$

Bu hesaplamalar sistemin 4 farklı sıcaklık kontrol yapısı için ayrı ayrı hesaplanmıştır ve Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Lazer sistemi frekans kararlılığı ölçüm tablosu (1/2)

Zaman (s)	L1 ve L2 PI Kontrollü		L1 ve L2 PI Kontrolsüz	
	Fark Frekansı (Hz)	Frekans Kararlılığı	Fark Frekansı (Hz)	Frekans Kararlılığı
1	2104	5,47592E-12	2183	5,68152E-12
10	1291	3,35998E-12	1556	4,04968E-12
20	1250	3,25328E-12	1592	4,14337E-12
50	1162	3,02425E-12	1401	3,64627E-12
100	1119	2,91233E-12	1264	3,28971E-12
200	1114	2,89932E-12	1338	3,48231E-12
500	1060	2,75878E-12	1473	3,83366E-12
1000	1103	2,87069E-12	1172	3,05027E-12
1500	1008	2,62344E-12	1361	3,54217E-12
2000	964	2,50893E-12	1619	4,21364E-12
2500	1065	2,77179E-12	1816	4,72636E-12
3000	1188	3,09191E-12	2027	5,27551E-12
4000	1136	2,95658E-12	2578	6,70956E-12
7000	1118	2,90973E-12	4162	1,08321E-11
9000	1148	2,98781E-12	5247	1,3656E-11
10000	1243	3,23506E-12	6104	1,58864E-11

Tablo 4.3 Lazer sistemi frekans kararlılığı ölçüm tablosu (2/2)

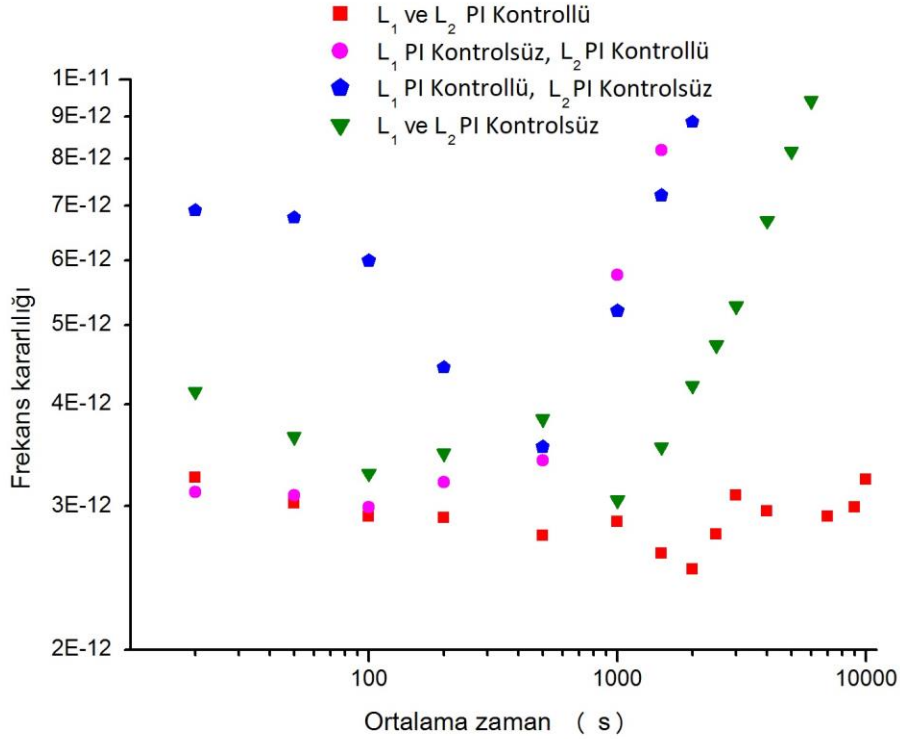
Zaman (s)	L1 PI Kontrolsüz L2 PI Kontrollü		L1 PI Kontrollü, L2 PI Kontrolsüz	
	Fark Frekansı (Hz)	Frekans Kararlılığı	Fark Frekansı (Hz)	Frekans Kararlılığı
1	2253	5,86371E-12	2341	6,09274E-12
10	1350	3,51354E-12	2336	6,07972E-12
20	1199	3,12054E-12	2655	6,90996E-12
50	1187	3,08931E-12	2600	6,76682E-12
100	1148	2,98781E-12	2303	5,99384E-12
200	1232	3,20643E-12	1704	4,43487E-12
500	1311	3,41204E-12	1362	3,54477E-12
1000	2213	5,7596E-12	1998	5,20004E-12
1500	3144	8,18264E-12	2768	7,20406E-12
2000			3408	8,86973E-12
2500			4276	1,11288E-11
3000			4954	1,28934E-11
4000			5962	1,55168E-11

Frekans kararlılığın ^{87}Rb atomik gaz küvetinin sıcaklık kontrolü ile olan ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.16’da gösterilmektedir. Burada, sıcaklık kontrolü ve lazer frekans kararlılığı verileri kısaca yorumlanırsa;

Frekans kararlılığı:

- Lazer 1 veya Lazer 2’nin ^{87}Rb atomik gaz küvetinin sıcaklık kontrolü olmadığı durumda ortalama 1000 saniye maksimum kararlılık değerinden düşmeye başlamaktadır.
- Lazer 1’in ^{87}Rb atomik gaz küvetinin sıcaklık kontrolü olmadığı ve Lazer 2’nin ^{87}Rb atomik gaz küvetinin sıcaklık kontrolü olduğu durumda ortalama 1000 saniye maksimum kararlılık değerinden düşmeye başlamaktadır.
- Lazer 1’in ^{87}Rb atomik gaz küvetinin sıcaklık kontrolü olduğu ve Lazer 2’nin ^{87}Rb atomik gaz küvetinin sıcaklık kontrolü olmadığı durumda ortalama 1000 saniye maksimum kararlılık değerinden düşmeye başlamaktadır.

- Lazer 1 ve Lazer 2'in ^{87}Rb atomik gaz küvetinin sıcaklık kontrolü olduğu durumda alınan ölçüm boyunca frekans kararlılığında değişim olmamaktadır.



Şekil 4.16 Lazer sistemi PI kontrollü ve PI kontrolsüz frekans kararlılık verileri

Ulusal dalga boyu standartlarının ^{87}Rb atomik gaz sıcaklık kontrolcülerinin frekans kararlılığı üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil 4.16'daki grafik 60ks (16 saat) süresince standartlar arasındaki fark frekansı kayıt edilmiş verinin Allan varyans istatistiği [14] kullanılarak hesaplanmış, standartların frekans kararlılığı değerlerini ifade eden grafik. Dalga boyu standartlarının ^{87}Rb atomik gaz sıcaklık kontrolcülerinin var olduğu durumda frekans kararlılığı uzun süre değişmezken, var olmadığı durumda 1000 s ortalama zaman sonra değişmeye (bozulmaya) başlamaktadır. Sıcaklık kontrolcülerinin çalıştığı durumda frekans kararlılığı ölçümleri ile ulusal dalga boyu standartları frekans kararlılığı 1s ile 16 saat zaman aralığında $5.5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada; TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde BIPM'in tanımı doğrultusunda gerçekleştirilmiş ulusal dalga boyu standartlarının, ^{87}Rb küvet sıcaklık kontrol devre tasarımının nasıl gerçekleştirildiği, elde edilmiş sıcaklık kararlılığı ölçüm sonuçları ve sıcaklık kararlılığının standartlarının frekansına nasıl etki ettiği anlatılmıştır. Ölçümler sonucunda sıcaklık kontrolcülerinin tepeden tepeye sıcak değişimi ≈ 1 mK olduğu gözlenmiştir. Bu denli iyi sıcaklık kontrolcüler ile ulusal dalga boyu standartlarının ulaştığı frekans karalılık değeri $5.5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ olarak ölçülmüştür.

Yapılan çalışmada elde edilen sıcaklık kontrol sistemi ve bu sistemin kullanıldığı lazer kararlılık deneyleri sonuçları oldukça başarılı olmuştur. Bu çalışma sonucunda sıcaklık kontrol sistemi mevcut ticari sistemlerin $<0.002^\circ\text{C}$ 'ye kadar olan kararlılık seviyesini $<0.001^\circ\text{C}$ 'ye kadar iyileştirilmektedir. Bu durum piyasadaki muadillerine göre oldukça iyi bir sonuçtur. Sıcaklık kontrol sisteminin yüksek kararlılık seviyesi sayesinde lazer sistemleri frekans kararlılık deneylerinde oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yine aynı şekilde mevcutta bulunan muadil lazer sistemlerinden 10 ile 100 kat daha yüksek frekans kararlılığı elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Bikash Ghosal, Sarathi Mandal, Satish Nandanwar, S. S. Raghuwanshi, Savita Singh, R. K. Bahl, A. Banik, K. S. Dasgupta, G. M. Saxena, Demonstration of Design Verification Model of Rubidium Frequency Standard, Indian Space Research Organization, 2012
- [2] S Micalizio, C E Calosso, A Godone and F Levi, Metrological characterization of the pulsed RB clock with optical detection, Istituto Nazionale di Ricerra Metrologica, S.425-436, Metrologia 49(2012)
- [3] <http://engineering.ju.edu.jo/Laboratories/07-PID%20Controller.pdf> (ET:01.06.2019)
- [4] Dan Xie, Xuefeng Chang, Xiayun Shu, Li Li, Jian Wang, Lifang Mei and Yangxue Liu, High Precision Temperature Control System for an Oven-Controlled Crystal Oscillator, The Open Automation and Control System Journal, s. 1690-1697,7-2015.
- [5] <https://www.yokogawa.com/in/library/resources/media-publications/how-to-select-the-right-temperature-controller-for-your-application/> (ET: 18.05.2019)
- [6] <https://www.omega.com/en-us/industrial-heaters/flexible-heaters/khr-khlv-kh/p/KH-108-5-230V> (ET: 20.05.2019)
- [7] <http://www.panshineheater.com/> (ET:29.05.2019)
- [8] <https://www.omega.com/en-us/industrial-heaters/c/flexible-heaters> (ET:29.05.2019)
- [9] <http://www.labo.com.tr/h-serisi> (ET:01.06.2019)
- [10] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=3512&pn=TED4015 (ET:01.06.2019)
- [11] Laser frequency Stabilization Techniques,
http://budker.berkeley.edu/Physics250/Physics250_Las_Stab.PDF
- [12] CIPM Recommendation 2 (CI-2015): Updates to the list of standard frequencies
<http://www.bipm.org/jsp/en/CIPMRecommendations.jsp> (ET:25.05.2019)

- [13] Demtröder, W., Laser Spectroscopy (Second Enlarged Edition). Berlin, Springer (1996)
- [14] RILEY, W.J., "Handbook of Frequency Stability Analysis", NIST Special Publication 1065 <http://www.crya.unam.mx/radiolab/recursos/Allan/NIST-1065.pdf> (ET: 20.05.2019)
- [15] <https://www.teamwavelength.com/thermistor-basics/> (ET:21.06.2019)
- [16] QU Ba-yi, MENG Qiang and SONG Huan-sheng, Improvement of Rubidium Clock's Frequency-temperature Characteristic, School of Information Engineering Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, China, International Journal of Control and Automation Vol. 9, s.385-396, No. 7-2016
- [17] Erdoğan, C., Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2004
- [18] Çelik, M., Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2000

ÖZGEÇMİŞ

Yücel DENİZ, 1988 yılı Kocaeli doğumludur. İlk, orta ve lise eğitimini Kocaeli’nde tamamladı. 2006 yılında İzmit Mimar Sinan Lisesi’nden mezun oldu. 2006 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü’nü 2011 yılında bitirdi. 2016 yılında Marmara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2013-2017 yılları arasında M&T Displays firmasında ARGE Mühendisi olarak çalıştı. 2017 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü’nde Araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Elektronik devre tasarımı ve lazer sistemleri üzerine çalışmaktadır.

