



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BİR CAM YÜZEY ARKASINDAKİ CİSMİN SICAKLIĞININ ÖLÇÜMÜ İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ KULLANAN SENSÖR TABANLI BİR ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI

MUHAMMED YUSUF APAYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

İSTANBUL, 2020



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BİR CAM YÜZEY ARKASINDAKİ CİSMİN SICAKLIĞININ ÖLÇÜMÜ İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ KULLANAN SENSÖR TABANLI BİR ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI

MUHAMMED YUSUF APAYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

İSTANBUL, 2020



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BİR CAM YÜZEY ARKASINDAKİ CİSMİN SICAKLIĞININ ÖLÇÜMÜ İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ KULLANAN SENSÖR TABANLI BİR ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI

MUHAMMED YUSUF APAYDIN

523117025

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

İSTANBUL, 2020

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans öğrencisi Muhammed Yusuf APAYDIN'ın “Bir Cam Yüzey Arkasındaki Cismın Sıcaklığının Ölçümü İçin Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanan Sensör Tabanlı Bir Ölçüm Sistemi Tasarımı” başlıklı tez çalışması, 24 Mayıs 2020 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA (Danışman)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Hayrdar BAYAR (Üye)

Yıldız Teknik Üniversitesi (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararı ile Muhammed Yusuf APAYDIN'ın Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Bülent EKİCİ

ÖNSÖZ

Bilim, teknoloji ve mühendisliğin çeşitli alanlarında, sahip olunan bilgi birikiminin derinliğini arttırarak bireysel gelişime ve sektörel rekabet gücünün yükseltilmesine destek olmak, çeşitli alanlarda yenilikçi çalışmalar yaparak literatüre katkı sağlamak amacıyla dahil olduğum Marmara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı eğitimimin, bu tez çalışması ile sonuna gelmiş bulunmaktayım.

Programa dahil olduğum ilk günden tez çalışmamı tamamladığım bugüne kadar, mevcut mühendislik disiplini dahilindeki farklı durum ve problemler için yerine getirilen araştırma ve geliştirme faaliyetlerime öncülük eden, bana karşı desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, kıymetli hocam Prof. Dr. A. Fevzi BABA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca program kapsamında kıymetli bilgi ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen üniversite hocalarıma bana kattıkları ve kazandırdıkları adına, mevcut tez çalışması kapsamında en başından bugüne kadar sürekli olarak beraber çalıştığım Arçelik A.Ş. Merkez AR-GE Sensör Teknolojileri Yöneticiliği'ne ve çok değerli çalışanlarına yardımlarından ve desteklerinden ötürü, teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, beni yetiştiren ve bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, en değerli varlığım konumundaki aileme sonsuz teşekkürlerimi iletir, her şey için minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Haziran 2020

Muhammed Yusuf Apaydın

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
YENİLİK BEYANI.....	x
SEMBOLLER	xi
KISALTMALAR	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
TABLO LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Literatür Özeti.....	3
1.2.1. Akademik yayın literatürü	3
1.2.2. Patent literatürü.....	8
1.2.2.1. Birinci patent çalışması	8
1.2.2.2. İkinci patent çalışması	9
1.2.2.3. Üçüncü patent çalışması	10
1.2.2.4. Dördüncü patent çalışması.....	11
1.2.2.5. Beşinci patent çalışması.....	11
1.2.2.6. Altıncı patent çalışması	12
1.2.2.7. Yedinci patent çalışması.....	12
2. MEVCUT SICAKLIK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ ve ÇALIŞMA PRENSİPLERİ ...	14
2.1. Temaslı Sıcaklık Ölçüm Yöntemleri	14
2.1.1. Ölçümün tarihsel gelişimi ve ölçüm teorisi.....	15
2.1.2. Ölçüm yöntemleri ve mevcut uygulamalar	16
2.1.2.1. Genişleme tipli termometreler	17
2.1.2.2. Termistörler	18
2.1.2.3. Direnç termometreleri.....	18
2.1.2.4. Isıl çiftler (Termokupl, Termoeleman).....	19
2.1.2.5. Yarı iletken ve entegre sıcaklık sensörleri.....	20
Silisyum diyot.....	20
Sıcaklık duyarlı entegreler.....	20
2.2. Temassız Sıcaklık Ölçümün Temelleri	21
2.2.1. Ölçümün tarihsel gelişimi ve ölçüm teorisi.....	21

2.2.1.1. Elektromanyetik spektrum ve uzak kızılötesi radyasyon	25
Radyo dalgaları.....	28
Mikrodalga	28
Kızılötesi ışıma.....	28
Uzak kızılötesi radyasyon.....	29
Görünür ışık.....	30
Morötesi ışıma.....	30
X ışınları	30
Gama ışınları	30
2.2.1.2. Termopil teorisi	31
Termopil özellikleri.....	31
Kullanım alanları	32
Termopil temelli algılayıcılar	32
2.2.1.3. Konu ile ilgili bilinen kuramlar	35
Termoelektrik	35
Seebeck Etkisi	35
Isıl güç	37
Siyah cisim ışıması	38
Planck Kanunu.....	40
Wien'in Yerinden Olma Yasası.....	41
Stefan-Boltzmann Kanunu	42
Siyah olmayan cisimlerin ışıması	44
2.2.2. Ölçüm yöntemleri ve mevcut uygulamalar	45
2.2.2.1. Kızılötesi dedektörler	48
Termal dedektörler	48
Termopiller	49
Pnömatik dedektörler.....	49
Piroelektrik dedektörler	50
Bolometreler	50
Foton dedektörleri	50
3. ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI.....	52
3.1. Tasarımda Dikkate Alınacak Kriterler	52
3.1.1. Camların optik karakteristikleri.....	53
3.1.2. Emisivite problemi, termal emisyon ve soğurganlık kavramları.....	53
3.1.2.1. Emisivite problemi	54
Emisivite.....	54

Yarım küre emisivitesi	54
Spektral yarım küre emisivitesi	54
Yönlü emisivite	55
Spektral yönlü emisivitesi	55
3.1.2.2. Termal emisyon ve soğurganlık.....	56
Termal emisyon	56
Soğurganlık.....	57
3.1.3. Görüş alanı.....	58
3.1.3.1. Dönüşümler	59
3.1.3.2. Makineler için görünüm	60
3.1.4. Ölçüm mesafesi	60
3.1.5. Atmosferik koşullar	61
3.1.6. Elektriksel gürültü	61
3.1.7. Diğer etkiler.....	62
3.2. Standart Sensör Testleri ve Sensör Seçimi	62
3.3. Elektronik Tasarım	67
3.3.1. Temel gereksinimler	67
3.3.1.1. Enstrümantasyon kuvvetlendiricileri.....	68
3.3.1.2. Analog filtreler	70
3.4. Mekanik Tasarım.....	75
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	77
4.1. Veri Toplama Setinin ve Deney Planının Oluşturulması	77
4.2. Deneylerin Yapılması ve Veri Setlerinin Oluşturulması.....	82
4.2.1. Termopil sensör gruplarının değerlendirilmesi	82
4.2.2. Sensör sistemi kılıf malzemelerinin değerlendirilmesi	83
4.2.3. Cisimlerin ısınma karakteristiklerinin değerlendirilmesi	84
4.2.4. Cisimlerin yüzey parlaklıklarının değerlendirilmesi	86
6. VERİLERİN ANALİZİ.....	88
6.1. Algoritma Geliştirme ve Optimizasyon Çalışmaları	88
6.1.1. Gürültü filtreleme ve ölçüm doğruluğunun artırılması.....	89
6.1.1.1. Kalman filtresi	96
6.1.2. Yüzey parlaklık ölçümü ve emisivite kompanzasyonu	98
6.1.3. Sensör grubu bileşenleri öz sıcaklık kompanzasyonu	103
6.1.4. Cam yüzey sıcaklık kompanzasyonu.....	107
6.1.5. Sistem modelleme çalışmaları	110
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	119

KAYNAKLAR.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	126



ÖZET

Geçmişte yapılan çalışmalar sayesinde mutlak sıfır koşulları haricindeki ortamlarda bulunan madde ya da cisimlerde meydana gelen reaksiyonlar sonucu, farklı dalga boylarında ışımların oluştuğu fark edilmiştir. Reaksiyonlar sonucu oluşan bu ışımlardan biri olan kızılötesi ışımdan geçmişten günümüze iletişim, ısınma, gece görüşü, mesafe ölçümü gibi farklı amaçlarla yararlanılmıştır. İlerleyen teknoloji ve gelişen üretim yöntemleri sayesinde, kızılötesi ışımların algılanması amacıyla tasarlanan sensörlerde de son yıllarda teknik anlamda hayli mesafe kat edilmiştir. Maliyetlerinin azalmasına rağmen kabiliyetlerinin artması sebebiyle kızılötesi sensörler hareket, mesafe ya da sıcaklık ölçümü gibi amaçlarla pek çok sektörde kullanılmaya başlanmıştır. Sensörlerin kullanım alanlarının farklılaşması ve artması bu alanda emisivite, gürültüden etkilenme, geçirgenlik gibi farklı problemlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ortaya çıkan bu teknik problemlerin çözümü, algılama yöntemlerinin yaygınlaşmasının önündeki bir problem olarak ayrıca önem kazanmıştır. Mevcut problemlerden emisivite; cisimlerin yaptıkları ışımların, cisimlerin malzeme yapısından ve fiziksel formundan kaynaklı olarak, sensörler tarafından siyah cisim ışımlarındaki gibi standart olarak algılanamamasını belirtmektedir. Geçirgenlik problemi, bir cismin oluşturduğu ışımanın bir cam yüzey tarafından kısmi olarak geçirilirken kısmi olarak soğurulması ya da yansıtılması durumunu ifade etmektedir. Son olarak gürültüden etkilenme problemi ise ışımanın sensörler tarafından algılanması esnasında anlık ya da sürekli olarak oluşabilecek elektriksel, optik ya da çevresel bozucu etkileri tanımlamaktadır. Yapılacak çalışmada, kızılötesi bir sıcaklık sensörü aracılığıyla gerçekleştirilecek ölçümler için ortaya çıkabilecek bu problemlerin etkilerinin, makine öğrenmesi yöntemleri ile en aza indirgenmesi amaçlanacaktır. Bu kapsamda çalışmalar; literatür taraması ile başlatılarak deney seti için gerekli sensör bileşenlerinin ön testlerin sonucuna göre belirlenmesi ve ilgili deney setinin oluşturulması ile devam ettirilecektir. Deney seti, gerekli olan ölçüm ve filtreleme algoritmaları da kullanılarak oluşturulduktan sonra, başlangıçta saptanan problemlerin çözülebilmesi amacıyla veri toplama çalışmalarına başlanacaktır. Veri toplama işlemleri tamamlandıktan sonra sürece, veri analizi ve son prototip için makine öğrenmesi tabanlı algoritma geliştirme çalışmaları ile devam edilecektir. Bu esnada, son prototip için yapılması düşünülen mekanik kılıf ve ara yüz tasarımları ile elektronik kart tasarımları gerçekleştirilecektir. Test, doğrulama ve

iyileştirme çalışmaları sonrasında prototipe son hali verilerek çalışmalar tamamlanacaktır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, belirli dalga boyundaki sinyaller için geçirgenlik sağlayan bir cam yüzeyin arkasında uygun bir mesafede bulunan cismin yüzey sıcaklığının, temassız olarak ölçümlenebilmesi amacıyla bir ölçüm sistemi tasarlanmış, tasarlanan ölçüm sisteminin eğitim ve algoritma çalışmaları, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak yürütülmüştür. Bu süreç kapsamında çeşitli koşullar altında yapılan test, analiz ve doğrulama çalışmalarıyla, geliştirilen ölçüm sistemine ait performans değerlendirilmeleri sonucunda, gerekli optimizasyon ve iyileştirme işlemleri de gerçekleştirilerek ölçüm sistemi tasarımı tamamlanmıştır.

ABSTRACT

Owing to the studies conducted in the past, it has been noticed that as a result of reactions occurring in substances or objects in environments other than absolute zero conditions, irradiations of different wavelengths are formed. Infrared radiation, which is one of these radiations as a result of reactions, has been utilized for different purposes such as communication, heating, night vision and distance measurement. Thanks to advancing technology and developing production methods, sensors designed for the detection of infrared rays have achieved considerable technical progress in recent years. Infrared sensors have been used in many sectors for movement, distance or temperature measurement due to their ability to increase despite their reduced costs. The differentiation of the application areas of the sensors has led to different problems such as emissivity, noise impact and permeability. Emissivity of these problems; It states that the irradiation of objects cannot be perceived as standard by sensors due to the material structure and physical form of the objects, as in black body irradiation. The problem of permeability refers to the fact that the radiation generated by an object is partially absorbed or reflected by a glass surface while it is partially passed through. Finally, the problem of being affected by noise describes the electrical, optical or environmental disturbance effects that may occur instantaneously or continuously during the detection of radiation by sensors. In this study, it is aimed to minimize the effects of these problems that may arise for measurements to be realized by infrared temperature sensor by means of machine learning methods. In this context; will be carried on with the literature search by determining the required sensor components for the test set according to the results of the pre-tests and creating the related test set. After the experimental set has been formed by using the required measurement and filtering algorithms, data collection studies will be started in order to solve the problems identified initially. As long as the data collection process is completed, the machine learning-based algorithm development work for data analysis and final prototype will be continued. In the meantime, mechanical sheath and interface designs and electronic card designs will be realized for the last prototype. After the test and improvement works, the prototype will be finalized and the studies will be completed.

As a result of the studies, a measurement system was designed in order to measure the

surface temperature of the object located at a suitable distance behind a glass surface that provides transmittance for certain wavelengths without contact, and the training and algorithm studies of the designed measurement system were carried out using machine learning methods. Within the scope of this process, as a result of the evaluation of the performance of the developed measurement system with the tests, analysis and verification studies carried out under various conditions, the necessary optimization and improvement processes were also completed and the measurement system design was completed.



YENİLİK BEYANI

Yapılacak çalışmalar sonucu ortaya çıkarılacak prototip, literatürde ve piyasada karşılaşılan diğer ürünlerden farklı bir şekilde, diğer ürünlerde mevcut olan yüksek seviyelerdeki ölçüm hatalarından arındırılmış olarak daha yüksek hassasiyet ve doğrulukta ölçüm yapabilecektir. Bu amaçla, geçmişteki çalışmalarda göz ardı edilen bazı durumların ve kesin olarak giderilemeyen bazı problemlerin yeniden ele alınması sağlanacaktır. Örneğin, farklı cisimlerin sıcaklıklarının doğru bir şekilde algılanabilmesi amacıyla birçok deney gerçekleştirilecek ve bu deneylerin verileri analiz edilerek cisimlerin yapısal veya fiziksel özellikleri ile ısı karakteristikleri arasında bir korelasyon kurularak, cisimlere ait farklı modeller oluşturulmaya çalışılacaktır. Bu modeller ve toplanan deney verileri ile de makine öğrenmesi tabanlı bir algoritma geliştirilerek sensör sistemine ait ana algoritmaya eklenecektir. Bu sayede cisimlerden kaynaklı hatalar en aza indirgenerek, eğitimi tamamlamış bir sensör sistemi ile daha doğru ölçüm sonuçlarının elde edilmesi sağlanacaktır. Bunun dışında diğer çalışmalardan farklı olarak cisimlerin yaptıkları ısımların, başta cam yüzeyin etkisi olmak üzere diğer manyetik, elektriksel ya da çevresel etkiler sebebiyle kayba uğratarak sensöre ulaşması probleminin yine makine öğrenmesi temelli yöntemlerle giderilmesi amaçlanacaktır. Bunlara ek olarak yine diğer çalışmalardan farklı olarak, sensör sisteminin, elektriksel ya da manyetik açıdan gürültülü bir ortama konumlandırılması ihtimaline karşı donanımsal ve yazılımsal filtreleme çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bütün bunların sonucunda, cam yüzey, gürültülü ortam ya da farklı cisimler gibi kızılötesi ışıının algılanmasının standart uygulamalarda oldukça zorlaştığı durumlar için de önceki çalışmalara göre, daha hassas olarak algılama yaparak daha doğru değerler üretebilen bir sensör sistemi elde edilmiş olacaktır.

Yapılacak çalışmanın sonundaki ürünün test ve doğrulama işlemleri tamamlandığında prototip ölçüm sistemi, gerçekleştirilen ölçümlerde hassasiyet ve doğruluk bakımından en uygun değerleri üreten görev algoritması ile birlikte benzer uygulamalara göre oldukça uygun maliyetlerle elde edilerek, gerçek zamanlı olarak kullanılabilir halde olacaktır. Son olarak yapılan çalışmanın, gelecekte daha da yaygınlaşması düşünülen benzer ölçüm teknolojilerine ve literatüre hem teorik hem de pratik olarak belirli bir seviyede katkı sunacağı da tahmin edilmektedir.

SEMBOLLER

°C	: Celcius Derece
°K	: Kelvin Derece
°F	: Fahrenayt Derece
°Rø	: Rømer Derece
°R	: Réaumur Derece
°N	: Newton Derece
°De	: Delisle Derece
V	: Voltaj
W	: Watt
R	: Rezistans (Ω)
L	: Endüktans (H)
C	: Kapasitans (F)
dB	: Desibel
Hz	: Hertz
TP	: Planck
eV	: Elektronvolt
S	: Entropi ($J.K^{-1}.mol^{-1}$)
Å	: Ångström
R²	: Determinasyon Katsayısı
h	: Planck Sabiti ($6,626069.10^{-34} J.s$)
f	: Frekans (Hz)
λ	: Dalga Boyu (m)
c	: Işık Hızı ($299792458 m/s$)
k	: Boltzmann Sabiti ($1.380649 \times 10^{-23} J.K^{-1}$)
E	: Foton Enerjisi (eV)
π	: Pi Sayısı ($3,14159265359$)
ϵ	: Emisivite Katsayısı
σ	: Stefan-Boltzmann Sabiti ($5,670373.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)
β	: NTC'ler için Beta Değeri
$\int$	: İntegral
J	: Joule

KISALTMALAR

NTC	: Negative Temperature Coefficient (Sıcaklık ile Direnci Azalan Termistör)
PTC	: Positive Temperature Coefficient (Sıcaklık ile Direnci Artan Termistör)
PIN	: P-Type Layer, Intrinsic Layer, N-Type Layer (P-I-N Diyot)
TED	: Transferred Electron Device (Aktarılan Elektron Cihazı)
MRI	: Magnetic Resonance Imaging (Manyetik Rezonans Görüntüleme)
IMPATT	: Impact Ionisation Avalanche Transit Time (Darbe İyonizasyon Çığ Geçiş Süresi)
InGaAs	: Indium Gallium Arsenide (İndiyum Galyum Arsenid)
IR	: Infrared (Kızılötesi)
UV	: Ultraviolet (Ultraviyole)
ADC	: Analog Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
ksps	: Kilo Sample Per Second (Saniyede Alınan 1000 Örnek Sayısı)
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor (Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken)
IC	: Integrated Circuit (Entegre Devre)
EMK	: Elektromotor Kuvvet (Electromotive Force)
EMS	: Electromagnetic Spectrum (Elektromanyetik Spektrum)
CIE	: International Commission on Illumination (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
SI	: International System of Units (Uluslararası Ölçüm Sistemi)
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing And Materials (Amerikan Test ve Malzeme Birliği)
FOV	: Field of View (Görüş Açısı)
MEMS	: Microelectromechanical Systems (Mikro Elektro Mekanik Sistemler)
DNA	: Deoxyribonucleic Acid (Deoksiribonükleik Asit)
NPN	: N-Type, P-Type, N-Type (N-P-N Transistör)
PNP	: P-Type, N-Type, P-Type (P-N-P Transistör)
BJT	: Bipolar Junction Transistor (Çift Birleşim Yüzeyli Transistör)

FET	: Field Effect Transistor (Alan Etkili Transistör)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör)
PC	: Polycarbonate (Polikarbonat)
Al	: Aluminum (Alüminyum)
LUT	: Look Up Table (Doğruluk Tablosu)
MLP	: Multi Layer Perceptron (Çok Katmanlı Algılayıcı)
YSA	: Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)
ME	: Mean Error (Ortalama Hata)
MPE	: Mean Percentage Error (Ortalama Yüzde Hata)
MAE	: Mean Absolute Error (Ortalama Mutlak Hata)
MAPE	: Mean Absolute Percentage Error (Ortalama Mutlak Yüzde Hata)
MSE	: Mean Squared Error (Ortalama Kare Hata)
RMSE	: Root Mean Square Error (Kök Ortalama Kare Hata)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Patente bahsedilen pişirme sistemi	9
Şekil 2. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm	10
Şekil 3. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm	11
Şekil 4. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm	12
Şekil 5. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm	12
Şekil 6. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm	13
Şekil 7. İlk sıcaklık ölçüm aracı olarak bilinen termoskop	15
Şekil 8. Sırasıyla; sıvı genişlemeli, gaz genişlemeli ve bimetalik tip termometre	18
Şekil 9. Sırasıyla; PTC ve NTC termistörleri.....	18
Şekil 10. Endüstriyel tip direnç termometresi.....	19
Şekil 11. Yaygın olarak kullanılan K tip bir termokupl	20
Şekil 12. Yaygın olarak kullanılan LM35 kodlu entegre sıcaklık sensörü.....	21
Şekil 13. Herschel'e göre görünür ışık ve ısıma ısının spektral dağılımları [27]	22
Şekil 14. Samuel P. Langley'in bolometresi [29].....	24
Şekil 15. Elektromanyetik spektrum. 1: X ışınları; 2: Morötesi; 3: Görünür ışık; 4: Kızılötesi; 5: Mikrodalga; 6: Radyo dalgaları.....	27
Şekil 16. Termopil sensör tasarımlarının temel gösterimi.....	33
Şekil 17. Termopil doğrusal dizisi için imalat aşamaları	34
Şekil 18. Termokupl çalışma prensibi.....	35
Şekil 19. Basit bir termokuplın gösterimi	36
Şekil 20. Siyah cisim radyasyon eğrisinin zirvesi sıcaklık azaldıkça, daha düşük yoğunluklara ve daha uzun dalga boylarına doğru hareket etmektedir.	39
Şekil 21. Çeşitli mutlak sıcaklıklar için Planck yasasına göre siyah cisme ait spektral radyant yayılımı. 1: Spektral radyant yayılımı ($W/cm^2 \cdot 10^3 (\mu m)$); 2: Dalga boyu (μm). 41	
Şekil 22. Spektral radyant yayılımı ($W/cm^2 (\mu m)$); 2: Dalga boyu (μm).....	42
Şekil 23. Üç tip radyatörün spektral radyant yayılımı. 1: Spektral radyant yayılımı; 2: Dalga boyu; 3: Siyah cisim; 4: Seçici radyatör; 5: Gri gövde.....	45
Şekil 24. Genel termografik ölçüm durumunun şematik bir temsili. 1: Çevre; 2: Nesne; 3: Atmosfer; 4: Kamera	46
Şekil 25. Piksel sayısına göre termopil sensörler	49
Şekil 26. Uygulamada kullanılan cama ait optik geçirgenlik karakteristiği	53
Şekil 27. Çeşitli tiplerde optik filtreler	56
Şekil 28. Termal enerji yayılımına göre emisivite değerleri	57
Şekil 29. Bazı malzemelere ait emisivite değerleri	58
Şekil 30. Görüş alanı yatay, dikey veya çapraz olarak ölçülebilir.....	59
Şekil 31. Görüş alanının gösterimi.....	60
Şekil 32. Standart sensör testleri için oluşturulmuş deney seti.....	63
Şekil 33. Termopil grubu için gerçekleştirilen standart sensör testlerine ait akış şeması	64
Şekil 34. Sensör seçimi amacıyla yapılan standart sensör testlerine ait ölçüm sonuçları	65

Şekil 35. Sensör geçirgenlik seviyeleri.....	66
Şekil 36. Enstrümantasyon kuvvetlendirici devresi genel gösterimi.....	68
Şekil 37. Enstrümantasyon kuvvetlendirici devresi gösterimi	69
Şekil 38. Çift birleşim yüzeyli transistör yardımıyla kuvvetlendirici çıkış akımının arttırılması.....	69
Şekil 39. Aynı sinyalin çeşitli aktif filtreler için frekans tepkileri	71
Şekil 40. Aynı sinyalin standart alçak geçiren filtreler için frekans tepkileri.....	71
Şekil 41. Pasif alçak geçiren filtre devresi gösterimi	72
Şekil 42. Sallen-Key tipinde ikinci dereceden aktif filtre devresi	72
Şekil 43. Termopil sensör grubunun iç yapısına ait genel gösterim.....	73
Şekil 44. Sensör sistemi devre kartının son versiyonuna ait blok diyagramı	74
Şekil 45. Sensör grubu kılıf yapısı için hazırlanan teknik çizimler.....	76
Şekil 46. Veri toplama sistemi genel blok diyagramı.....	79
Şekil 47. Veri toplama deneyleri akış diyagramı	81
Şekil 48. Düşük sıcaklık seviyesi ve düşük ısıtma gücü için sensör tepkileri.....	82
Şekil 49. Yüksek sıcaklık seviyesi ve yüksek ısıtma gücü için sensör tepkileri	83
Şekil 50. Farklı sensör kılıf tipleri için yüksek sıcaklık ve yüksek ısıtma gücü seviyelerindeki sensör tepkileri	84
Şekil 51. Cisimlerin ısınma eğrileri için düşük sıcaklık ve düşük ısıtma gücü seviyelerindeki Sensör 1 tepkileri.....	85
Şekil 52. Cisimlerin ısınma eğrileri için düşük sıcaklık ve düşük ısıtma gücü seviyelerindeki Sensör 2 tepkileri.....	85
Şekil 53. Farklı yüzeysel özelliklere sahip cisimler için soğuma eğrilerine ait parlaklık ölçümleri	87
Şekil 54. Sensör sistemine ait algoritma akış diyagramı	88
Şekil 55. Karşılaştırma grafiği genel görünümü.....	90
Şekil 56. Minimum sıcaklık aşaması için karşılaştırma grafiği.....	91
Şekil 57. Isınma aşaması için karşılaştırma grafiği	92
Şekil 58. Maksimum sıcaklık aşaması için karşılaştırma grafiği	93
Şekil 59. Soğuma aşaması için karşılaştırma grafiği	94
Şekil 60. Kalman filtresi akış diyagramı	97
Şekil 61. Uygulama özelindeki Kalman filtresi akış diyagramı	98
Şekil 62. Farklı yüzeysel özelliklere sahip cisimlerin yüzey parlaklık seviyeleri.....	99
Şekil 63. Referans sıcaklığa yaklaşabilmek amacıyla parlaklık seviyelerine göre doğrultulmuş sıcaklık ölçümleri	102
Şekil 64. Sensör grubu bileşenlerine ait öz sıcaklık kompanzasyonu akış diyagramı .	104
Şekil 65. Termopil sensör devre kartları çıktılarına ait işlenmemiş ölçüm verileri	106
Şekil 66. Referans sıcaklığa yaklaşabilmek amacıyla öz sıcaklık kompanzasyonları yapılmış devre kartlarına ait sıcaklık ölçümleri	107
Şekil 67. Sıcaklığı ölçümlenecek cismin bulunduğu sistemdeki cisim, cam yüzey ve sensör grubunun konumlarına dair genel bir gösterim	108
Şekil 68. Sensör 1 kullanılarak düşük sıcaklıklar için gerçekleştirilen çoklu lineer	

regresyon analizi.....	109
Şekil 69. Sensör 1 kullanılarak yüksek sıcaklıklar için gerçekleştirilen çoklu lineer regresyon analizi.....	110
Şekil 70. Geliştirilen ölçüm algoritmasına eklenecek yapay sinir ağının girdi ve çıktıları	111
Şekil 71. Farklı nöron sayılarıyla eğitilen iki katmanlı yapay sinir ağı tarafından, düşük sıcaklıklara ait veri seti için üretilen veriler	114
Şekil 72. Farklı nöron sayılarıyla eğitilen iki katmanlı yapay sinir ağı tarafından, yüksek sıcaklıklara ait veri seti için üretilen veriler	115
Şekil 73. Sensör sistemi için geliştirilen ve tamamlanan test işlemlerine göre uygunluğu kesinleşmiş olan yapay sinir ağının genel gösterimi	116
Şekil 74. YSA tarafından eğitilerek oluşturulan modelin, eğitimdeki verilerden farklı olarak test amacıyla hazırlanan, düşük sıcaklıklara ait birinci veri seti için performansı	116
Şekil 75. YSA tarafından eğitilerek oluşturulan modelin, eğitimdeki verilerden farklı olarak test amacıyla hazırlanan, düşük sıcaklıklara ait ikinci veri seti için performansı	117
Şekil 76. YSA tarafından eğitilerek oluşturulan modelin, eğitimdeki verilerden farklı olarak test amacıyla hazırlanan, yüksek sıcaklıklara ait birinci veri seti için performansı	117
Şekil 77. YSA tarafından eğitilerek oluşturulan modelin, eğitimdeki verilerden farklı olarak test amacıyla hazırlanan, yüksek sıcaklıklara ait ikinci veri seti için performansı	118

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. İncelenen patentlere ait genel bilgiler	8
Tablo 2. Sıcaklık skala karşılaştırması [25]	14
Tablo 3. Elektromanyetik spektrum kategorileri [30]	27
Tablo 4. ISO 20473'e göre kızılötesi dalga kategorileri [31].....	29
Tablo 5. CIE'ye göre kızılötesi dalga kategorileri [31].....	30
Tablo 6. Sensör seçim işlemleri kapsamında yapılması planlanan deneylerin listesi	63
Tablo 7. Sensörlerin nesne ölçüm ve sensör çalışma sıcaklık aralıkları	67
Tablo 8. Veri toplama işlemleri kapsamında yapılması planlanan deneylerin listesi.....	80
Tablo 9. Emisivite ve filtreleme aşaması sonucunda gerçekleştirilen tahmini sıcaklık değerlerine ait performans değerlendirmeleri.....	102
Tablo 10. Düşük sıcaklıklara ait veri setleriyle farklı nöron sayıları için eğitilen yapay sinir ağları tarafından üretilen sıcaklık verilerinin, referans sıcaklık verilerine göre, farklı hata metrikleri ile hesaplanan hata değerleri	113
Tablo 11. Yüksek sıcaklıklara ait veri setleriyle farklı nöron sayıları için eğitilen yapay sinir ağları tarafından üretilen sıcaklık verilerinin, referans sıcaklık verilerine göre, farklı hata metrikleri ile hesaplanan hata değerleri	113
Tablo 12. Farklı nöron sayılarıyla eğitilen iki katmanlı yapay sinir ağının, düşük ve yüksek sıcaklıklara ait iki veri setine göre ürettiği sıcaklık verilerinin, referans sıcaklık verilerine karşı, farklı hata metrikleri ile hesaplanan hata değerleri	115
Tablo 13. Her katmanında sekiz nöron bulunan iki katmanlı yapay sinir ağının, düşük ve yüksek sıcaklıklara ait farklı veri setleri için ürettiği sıcaklık verilerinin, referans sıcaklık verilerine göre, farklı hata metrikleri ile hesaplanan hata değerleri.....	118

1. GİRİŞ

Günümüz sistemlerinde dahili ya da harici olarak belirli bir hedef cisim için sıcaklık ölçüm işleminin gerçekleştirilmesi gerektiği durumlarda, her zaman algılanacak cisme yapılacak temasa izin verilmediğinden, halen temassız ölçüm sistemleri üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Bu kapsamda çoğunlukla uygulamaya özel bir şekilde geliştirilen ölçüm yöntemlerinin, kullanım senaryosu değiştirildiğinde yeterli ölçüm doğruluğunu sağlayamamasından kaynaklı olarak, günümüzde dahi farklı koşullar altında benzer doğruluklarda ölçüm yapabilecek genel bir temassız ölçüm sisteminin bulunduğunu söylemek oldukça zordur. Farklı kaynaklarda mevcut olarak standart halde bulunan ölçüm sistemlerinin ise, tez çalışması kapsamında ortaya çıkarılacak ölçüm sisteminin kullanılacağı senaryoya; sıcaklık algılama işleminin elektriksel ya da elektromanyetik açıdan kirli olan ortamlarda gerçekleştirilecek olması, algılanacak cisimlerin, geçirgenliğinin kızılötesi sinyaller için uygun olmayan bir cam yüzey arkasında bulunması ve bu cam yüzeyin kullanım tipine göre farklı sıcaklıklara ulaşacak olması, sensörün çekirdek kısmının anlık olarak kendi sıcaklığından etkilenmesi, sensör çekirdeğinin geleneksel yöntemlerle algılanamayacak kadar küçük seviyede potansiyel fark üretmesi, sensör üzerindeki lens grubunun kısıtlı bir görüş açısına sahip olması, sıcaklığı algılanacak cismin kızılötesi ışıınım için uygun yüzey matlığına sahip olmaması ve diğer atmosferik etkiler gibi değişken problemler barındırması sebebiyle uygun olmamasından dolayı, entegre edilecek sistemin genel kullanım amacına uygun olarak, belirli doğruluklarda ölçüm yapabilen bir sensör sistemin geliştirilmesi gerekmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Ölçüm sisteminin entegre edileceği uygulamada, ölçüm işleminin gerçekleştirilebilmesi için, potansiyel olarak sıralanan problemlerden en az şekilde etkilenecek bir sensör sistemi tasarımının yapılması gerekmektedir. Yürütülecek tez çalışmasında da bahsedilen bu problemlere odaklanılıp, makine öğrenmesi yöntemleri temel alınarak çözümler üretilmeye çalışacaktır. Bu kapsamda ortaya çıkan problemlerden elektriksel ve manyetik gürültülerin giderilmesi amacıyla, donanımsal ve yazılımsal filtre uygulamaları gerçekleştirilecektir. Donanımsal olarak, gürültü problemlerine uygun aktif ya da pasif filtre tasarımlarının yapılması hedeflenirken, yazılımsal olarak Kalman ya da Medyan gibi filtreleme uygulamalarının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ortaya çıkan

problemlerden geçirgenlik ve emisivite ile ilgili olanlarının giderilebilmesi amacıyla ise öncelikle, gerekli araştırmalar ve ön testler yapıp bileşen seçimleri gerçekleştirilecek sonra, bir deney seti oluşturularak deneysel çalışmalar yapılarak veri toplanacak, daha sonra ise makine öğrenmesi yöntemlerinden en uygun olanının belirlenebilmesi amacıyla testler yürütölüp, en uygun olanı belirlendikten sonra tasarlanacak sistem için uygun algoritmanın geliştirilmesi hedeflenecektir. Bu öğrenme ve görev algoritmaları içerisinde bahsedilen sıcaklık temelli problemlerin de kompanzasyonunun gerçekleştirilmesi hedeflenecektir. Öğrenme ve görev algoritmaları yüklenen sistemler test edilip doğrulanarak iyileştirme ve dokümantasyon çalışmalarına geçilecektir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra tez çalışması sonlandırılarak ortaya, benzer cisimler için belirli hassasiyette ölçümler yapabilecek bir sensör sistemi prototipi ortaya çıkarılmış olacaktır. Ayrıca çalışma kapsamında, ortaya çıkarılan prototipin geliştirilmesi amacıyla, daha öncesinde gerçekleştirilen test ve deneylerin verileri kullanılarak bir cisim modelleme işlemi gerçekleştirilmesi ve bu işlem sonuçlarının, prototip üzerinde cisim türünün seçiminin yapılabileceği basit eklentilerin oluşturulmasında kullanılması hedeflenecektir. Bu sayede son prototip tarafından, farklı yapısal veya fiziksel özelliklere sahip cisimler için de belirli toleranslarda ölçüm çıktılarının üretilebilmesi sağlanmış olacaktır.

Sonuç olarak, çalışmalar kapsamındaki temel amaç, geçirgenlik karakteristiği önceden bilinen bir cam yüzeyin arkasında algılama mesafesine uygun olarak konumlanmış bir cismin sıcaklığının, cismin kızılötesi ışıınımdan kaynaklanan sinyaller aracılığıyla, bir kızılötesi sensör kullanılarak temassız olarak belirli tolerans değlerlerinde algılanma işleminin gerçekleştirilmesidir. Yapılacak çalışma sonunda test ve doğrulama işlemleri tamamlandığında prototip ölçüm sistemi, gerçekleştirilen ölçümlerde en uygun değeri üreten görev algoritması ile birlikte, gerçek zamanlı olarak kullanılabilir halde olacaktır. Buna ek olarak yapılan çalışmanın, ülkemizde benzer alanlarda faaliyet gösteren firmalar ile paylaşılması durumunda, firmaların yapacakları çalışmalara ön hazırlık olması ya da destek sağlaması potansiyeli de bulunmaktadır. Bu kapsamda, ilerleyen süreçte çalışmayı gerçekleştiren kişiler tarafından, konu ile ilgili olarak, muhtemel projeler için firmalara aktif olarak destek de sağlanabilecektir. Ayrıca yapılan çalışmanın, gelecekte daha da yaygınlaşması düşünölen benzer ölçüm teknolojilerine ve literatüre hem teorik hem de pratik olarak belirli bir seviyede katkı sunacağı da tahmin edilmektedir.

1.2. Literatür Özeti

Geçmişten günümüze sıcaklık algılama teknolojileri anlamında yürütülen çalışmalar sayesinde bugün literatürde, farklı ölçüm yöntemleri için pek çok kaynak bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılacak olan yöntemler ile ilgili olan kaynaklar dikkate alındığında uygulanan ölçüm yöntemleri, doğrudan sıcaklığın algılanması yerine sıcaklığa bağlı olarak değişen diğer parametreler üzerinden sıcaklığın algılanması tarafına yoğunlaşmıştır. İlgili sebepten ötürü, yapılan araştırmalar çoğunlukla sıcaklık tarafından etkilenecek değişen parametreler özelinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda bu tez çalışması için uygulama özelinde benzer aşamalar barındırdığı düşünülerek; indüksiyonlu ocak sistemleri, indüksiyonlu ocak sistemlerinde kullanılabilecek sıcaklık ölçüm yöntemleri, temassız sıcaklık ölçüm sistemleri ve diğer ölçüm uygulamalarına yönelik literatürde bulunan çalışmalar incelenmiştir.

1.2.1. Akademik yayın literatürü

Günümüz ölçüm teknolojilerinde, sıcaklık ölçüm işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için farklı pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlere; termokupllar, ısı ile direnci değişen NTC, PTC gibi malzemeler ve temassız ölçüm sağlayan kızılötesi sensörler örnek olarak verilebilmektedir [1, 2]. Bunlara ek olarak sıcaklık ölçüm işleminin gerçekleştirilebilmesi amacıyla geçmişte, hedeften yayılan farklı dalga boylarındaki sinyallerin algılanmasını sağlayan çok dalga boylu sıcaklık sensörleri ve termal kameralar gibi kızılötesi görüntüleme sistemleri önerilmiştir [3, 4, 5].

Tez çalışmasına konu problemlerin ve odaklanılacak çözümlerin, pişirme cihazı üzerindeki bir pişirme kabının sıcaklığının algılanmasına benzer olması sebebiyle daha çok bu konu üzerine literatür araştırmaları yapılmıştır. Bu konuda yapılan araştırmalara dair aşağıdakiler söylenebilir.

Geçmişte, indüksiyonlu pişirme cihazlarında cihaz üzerinde bulunan pişirme kabının içerisindeki maddenin sıcaklığının algılanabilmesi amacıyla pek çok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerden biri, pişirme kabında bulunan maddenin içerisine bırakılabilen bir sıcaklık sensörünün geliştirilmesini kapsamaktadır [6]. Diğer yöntem, pişirme cihazının üzerindeki bir kısma, bir kızılötesi sensor yerleştirilmesidir [7]. Bir diğer yöntem ise pişirme kabı sıcaklığının pişirme yüzeyi sıcaklığına eşit olduğu

varsayılarak, pişirme yüzeyi altına yerleştirilen bir termistör ile sıcaklığın algılanmasıdır [8]. Bahsedilen bu yöntemlerin bazı sakıncaları bulunmaktadır. Bunlardan ilk olarak önerilen yöntem olan madde içerisine yerleştirilecek demonte bir sensör kullanımının sakıncaları, sensörün her kullanım için montaj zorluğu oluşturması ve doğru yerleştirilememesi durumunda yanlış ölçüm yapabilmesi ihtimalleridir. Diğer yöntem olan pişirme cihazının üzerindeki bir kısma kızılötesi bir sensör yerleştirilmesinin sakıncası ise sıcaklıktan kaynaklı olarak oluşabilecek buhar ya da sıvı teması gibi durumlarda sensörün doğru ölçüm gerçekleştirememesidir. Son yöntemin sakıncası ise pişirme cihazı üzerinde bulunan pişirme kabının içindeki maddenin sıcaklığının, pişirme yüzeyi sıcaklığı ile arasında tahmin edilebilir bir ilişki bulundurmamasıdır.

Imaz ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen uygulamada, pişirme sisteminin tasarımı sebebiyle, sistem için yapılacak sıcaklık ölçümünün temassız bir yöntem olan ve bu tarz problemlerde sıklıkla kullanılan termopil sensörlerle gerçekleştirilmesi gerektiği bildirilmiş ayrıca ölçüm işleminin gerçekleştirilmesinin, pişirme kabının sıcaklığının doğru tespit edilebilmesi için yeterli olmadığından bahsedilmiştir. Çalışmada, pişirme kabının sıcaklığının doğru tespit edilebilmesi için yapılacak olan sıcaklık tahmini işleminin, sistemin matematiksel modeli oluşturularak buna dayandırılması sağlanmıştır. Simülasyon sonuçları, matematiksel modelin doğruluğunu desteklemek için deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır [9].

Imaz ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ev tipi induksiyon ocaklarında sıcaklık ölçümü için kızılötesi (IR) termometri sisteminin teorik analizi ve tasarımı, uygulama sonuçları ile birlikte sunulmaktadır. Çalışmadaki sistem bünyesinde, bir InGaAs PIN fotodiyot ve tencere tabanının ve cam-seramik tabağın tabanından yayılan IR radyasyonunu tespit eden bir ön yükseltici barındırmaktadır. Yapılan çalışmadaki analiz, cam seramik malzemenin toplam sinyalden katkısını azaltmak için bir algoritma içermektedir [10].

Paesa ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kullanıcının bir induksiyon ocağını kullanırken, ocak gücü yerine pişirme sıcaklığını seçebilmesi için bir tava sıcaklığı kontrol modeli ele alınmıştır. Otomatik pişirme için de kullanılabilecek olan modelde sıcaklık, seramik camın altına yerleştirilmiş bir termal sensörden hesaplanmaktadır. İndüksiyonlu ocak ile tava arasındaki ısı transferi temelde tavanın

manyetik özelliklerine bağlı olduğundan, yapılan çalışmada iki farklı adaptif şema önerilerek karşılaştırılmış ve pişirme alanından tavaya ya da tavadan pişirme alanına yayılan ısı, durum-uzay modeli kullanılarak modellenmiştir [11].

Lasobras ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ev tipi indüksiyonlu pişirme cihazı için kızılötesi (IR) algılayıcıya dayanan gerçek zamanlı bir sıcaklık kontrol sistemi sunulmuştur. Bahse konu pişirme cihazında; hedeflenen sıcaklığa ulaşım için çıkış gücü seviyesini belirlemek amacıyla orantılı bir integral kontrol yöntemi ve sinyal işleme için, 12-bit ADC'li bir mikroişlemci kullanılmıştır. Pişirme cihazının çalıştırılması esnasında oluşan kızılötesi radyasyonun, çalışma kapsamında elde edilen prototip tarafından algoritmik olarak analiz edilmesi ile elektromanyetik karakteristiği bilinen bir pişirme kabı için, kabın sıcaklığının 60-250°C aralığında maksimum 5°C sıcaklık hatası ile tahmin edilebilmesi sağlanmıştır [12].

Turkiewicz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, hem sert yüzeylerde üretilen klasik termoelektrik jeneratörler hem de elastik yüzeyler için termoelektrikliğin gelişen teknolojisi, olasılıkları ve uygulamaları ile ilgili kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Buna ek olarak çalışmada, bu alanda yeni bir gelişme olan yarı iletken germanyum-antimon alaşımının ince filmleri ve her ikisi de magnetron püskürtme ile elde edilen konstantan ince filmleri hakkında güncel araştırmalar sunulmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, üretilecek termoelektrik malzeme için temel seviye malzeme seçimi, imalat teknikleri ve ısı transfer yöntemlerine dikkat edildiğinde, bu etkenlerin kullanıcılara farklılaştırılmış alanlarda çalışmalar yapma fırsatı verdiğine ulaşılmıştır. Ayrıca geçmişten günümüze, ince ve kalın film termoelektrik jeneratörleri üzerine yapılan çalışmaların sayısının arttığı gözlemlenmiş bu durumun, bahsedilen yöntemin yakın gelecekte, termoelektrik jeneratörlerin üretimi konusunda ana akım haline gelmesine yol açabileceği belirtilmiştir. Bu tip bir jeneratör ile birlikte boyutların daha da küçülebileceği böylece temopiller için maliyet odaklı hassasiyet konusunun da yeniden geliştirilebileceği görülmüştür [13].

Tsai ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, ölçüm performansının artırılması amacıyla özel bir lens ile donatılmış, 0-300°C sıcaklık aralığında $\pm 3^\circ\text{C}$ hassasiyet ile ölçüm alabilen ve bu ölçümden kendi sıcaklığı ile ilgili olan etkiyi doğrusallaştırabilen, bir nesnenin yüzey parlaklık seviyesini tespit ederek yüzey parlaklık kompanzasyonu

yapabilen, taşınabilir haldeki temassız bir sıcaklık ölçüm cihazı tasarlanmıştır. Uzaktan radyometrinin kalitesini artırmaya çalışan araştırmacılar için faydalı bir referans sağlayabilecek bu çalışmada sonuç olarak, kızılötesi tekniklere dayanarak tasarlanan termopil tabanlı bir algılayıcı ile bir nesnenin sıcaklığının uzaktan ölçülmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan deneylere ait sonuçlar cihazın, farklı tipteki nesnelerin sıcaklığını uzaktan ölçebilmek için uygun olduğunu göstermektedir [14].

Schieferdecker ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, yüzey sıcaklığının temassız olarak ölçülebilmesi için polisilikon ve alüminyuma dayalı mikron seviyesinde işlenmiş olan kızılötesi termopiller incelenmiştir. Çalışma için sensör performansının ve yüksek algılama kabiliyetinin, çok düşük sıcaklık duyarlılığına bağlı olarak değişeceği bilindiğinden öncelikle klasik termoelektrik malzemelerde kullanılan bizmut ve antimonundan farklı olarak, sensör malzemesi olan silikonun CMOS standardında IC işlemlerine oldukça iyi bir şekilde uyum gösterdiğinden ve termopil sensörler için yüksek güvenilirlik ile birlikte sıcaklık kararlılığı sağlayabileceğinden bahsedilmiştir. Sonra, açıklanan iki yeni termopil algılayıcı, termoelektrik malzemeler olarak polisilikon ve alüminyumun kullanıldığı bir haliyle mikron seviyesinde işlenmiş ve üretilmiştir. Sonuç olarak, $0,01K^{-1}$ gibi düşük bir sıcaklık katsayısı ile ortaya çıkarılan bu termopil algılayıcılar, düşük toleranslı entegre bir termistör referansı ve analog bir devre ile ortam sıcaklığı kompanze edilerek basit ve kolayca uygulanabilir hale getirilmiştir [15].

Ke ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, termopil dedektörler için kara cisim ve kıyııcı gibi karmaşık ekipmanların kullanımı ile karşılaştırıldığında, termal tabanlı cihazların performanslarının izlenmesi için etkili bir yol, bariz bir kolaylık ve basitlik sağlayan kendi kendine test yöntemi önerilmektedir. Çalışmada bahsedilen kendi kendine test yönteminin geçerliliğini doğrulamak ve teste alınacak dedektörün kızılötesi performansını anlayabilmek için, test sisteminde yüksek performanslı bir termopil kızılötesi dedektör kullanılmıştır. Ayrıca test için gerekli kızılötesi radyasyonu sağlayabilmek için hem referans dedektörün hem de test edilecek dedektörün soğurma alanı içerisinde kalacak şekilde bir platin ısıtıcı konumlandırılmıştır. Buna ek olarak test sistemi için referanslama işlemi, 1240 katlık kuvvetlendirmeye tabi tutulmuş bir termopil ile $0,9mW/cm^2$ 'lik kızılötesi radyasyona maruz bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada normal atmosferik şartlar altında alınan test sonuçları referans dedektörün,

160,03V/W'lik nispeten yüksek bir tepki seviyesi ve $9,75 \cdot 10^7 \text{cm.Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 'lik tespit edilebilirliği ile 2,5ms'lik çok kısa bir tepki süresi elde ettiğini göstermektedir. Sonuç olarak elde edilen verilere göre yapılan çalışmada, termopil kızılötesi dedektörlerin performansının izlenmesi için yanıt verme, algılama ve tepki süresi açısından oldukça uygun bir kendi kendine test yöntemi oluşturulmuştur [16].

Karunanithy ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma elektrikli, doğal gaz ve indüksiyonlu ocaklardaki farklı sos tavalarının ısı transfer özelliklerini araştırmak, her ocak için en uygun tavaları belirlemek amacıyla yapılmıştır. Çalışma kapsamında 7 farklı tava, taban sıcaklığı 450°F'ye ulaşana kadar farklı ocaklarda ısıtılmış ve 10 saniyelik aralıklarla alınan termal görüntüye ek olarak tabana ve yüzeye sabitlenmiş termokupllarla ölçülen 88°F'ye kadar soğutulmuştur. İstatistiksel analizlere bakıldığında ısıtma süresinin 2-10,22dk kadar, soğutma süresinin 28-82dk kadar ve pişirme verimliliğinin %16-81 kadar olduğu görülmüştür. Doğal gaz, elektrikli ve indüksiyonlu ocaklar için pişirme verimliliği sırasıyla %28, %39,3 ve %70 seviyelerinde iken C tavaşı için maksimum pişirme verimliliği doğal gaz ve indüksiyonlu ocaklarda sırasıyla %35,5 ve %81,3 seviyelerinde kaydedilmiştir. Elektrikli ocakta ise A tavaşı için maksimum pişirme verimliliği %51,8 seviyelerinde kaydedilmiştir. Ayrıca Wisconsin konut hizmet bedellerine göre doğal gaz, indüksiyonlu ve elektrikli ocak için sırasıyla bir litre suyu bir yıl boyunca günlük olarak ısıtmak için harcanan enerjinin maliyetleri (elektrik için 0,1416\$/kWh, doğal gaz için 0,0385\$/kWh) dayanarak sırasıyla, C tavaşı için (en düşük) (2.80\$, 4.81\$ ve 13.23\$) ve D tavaşı için (en yüksek) (8.11\$, 12.00\$ ve 30.32\$) şeklindedir. Bu veriler dikkate alındığında istatistiksel analizler tavaların, pişirme verimliliğini ocaklarınkinden daha fazla etkilediğini göstermektedir. Pişirme verimliliğindeki farklar; ısıtma prensipleri, ocakların ısıtma güçleri ve tava özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak yapılan çalışmalarda, farklı ocaklardaki tavaların herhangi bir zamanda sıcaklığının tahmin edilebilmesini sağlayan ısı transfer davranışlarını (ısıtma ve soğutma) modelleyebilmek amacıyla matematiksel eşitlikler, deneysel verilere dayanılarak oluşturulmuştur. Bu aşamada, ısınma ile ilgili matematiksel eşitlikler oluştururken polinomal denklemlerin daha iyi sonuçlar ürettiği, soğuma ile ilgili matematiksel eşitlikler oluşturulurken ise logaritmik denklemlerin daha iyi sonuçlar ürettiği söylenebilmektedir [17].

1.2.2. Patent literatürü

Geliştirilecek sensör sisteminin entegre edileceği uygulamaya benzer kısımlar barındıran indüksiyonlu ısıtıcı uygulamaları için yapılan patent araştırmaları kapsamında, farklı firmalara ait toplam yedi adet patent çalışması, Tablo 1’de listelendiği gibi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Tablo 1. İncelenen patentlere ait genel bilgiler

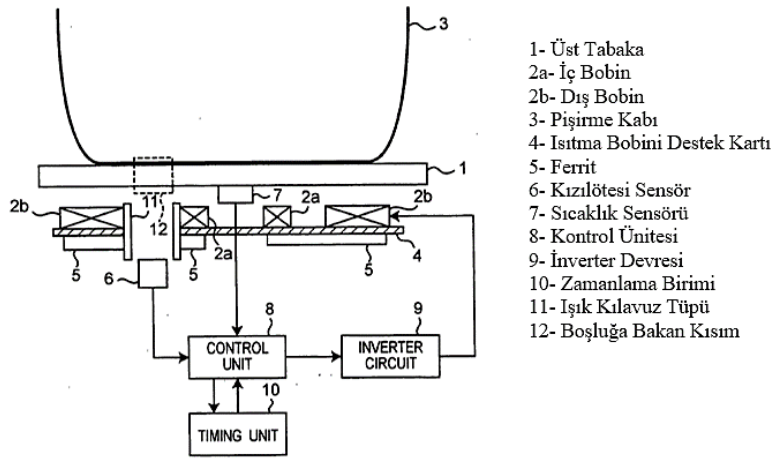
Patent Numarası	Patent Adı	Yayınlama Tarihi	Patent Sahibi	Yasal Durumu
EP2124506B1	Induction Cooking Device	12.03.2007	Panasonic Corporation	Patent
DE102004002058B3	Method For Controlling A Cooking Process On A Ceramic Hob, And Ceramic Hob For Carrying Out Said Method	15.01.2004	MIELE & CIE. KG	Patent
EP3336436A1	Cooking Hob With A Monitoring Device	19.12.2016	Electrolux Appliances Aktiebolag	Patent
JP2007115516A	Induction Heating Device	20.10.2015	MATSUSHITA ELECTRIC IND CO. LTD.	Patent
EP1704754A1	Method For Controlling A Cooking Process On A Ceramic Hob And Ceramic Hob For Carrying Out Said Method	15.01.2004	MIELE & CIE. KG	Patent
EP2153698A1	Control Method For A Hob And Hob For Carrying Out Said Method	05.06.2007	MIELE & CIE. KG	Patent
EP2775786A1	Cooking Device	04.03.2013	MIELE & CIE. KG	Patent

1.2.2.1. Birinci patent çalışması

Konu ile ilgili olarak “Panasonic Corporation” tarafından yürütülen çalışmalar 12.03.2007 tarihinde, “Induction Cooking Device” patent adı ve “EP2124506B1” patent numarası ile koruma altına alınmıştır.

Patent kapsamında, güvenliği sağlanan indüksiyonlu pişirme cihazı ile yüksek sıcaklıkta, pişirme sırasında yüksek ısıtma gücü elde edilmektedir. Bir indüksiyonlu pişirme cihazı bünyesinde; bir üst plaka üzerine yerleştirilmiş bir pişirme kabının indüksiyonla ısıtılması için çalıştırılabilen bir ısıtma bobini (2a, 2b), ısıtma bobinine yüksek frekans akımı sağlamak için çalışan bir invertör devresi (9), pişirme kabından yayılan kızılötesi

ışığın miktarını tespit etmek ve kızılötesi ışığın miktarına dayanan bir algılama sinyali üretmek için çalışan bir kızılötesi sensör (6), pişirme kabının sıcaklığının üst plaka boyunca termal iletimle algılanması için kullanılan bir sıcaklık sensörü (7), invertör devresinin çıkışını kontrol etmek ve kızılötesi sensör ile sıcaklık sensör çıkışlarına göre belirlenen kontrol sıcaklığının ocak tarafından geçilip geçilmediğinin denetlenmesi için çalışan bir kontrol ünitesi (8) bulundurmaktadır. Kızılötesi sensörün normalde pişirme kabının sıcaklığını tespit ettiğine karar verildiğinde, kontrol ünitesi, sıcaklık sensörünün (7) kontrol sıcaklığını, kızılötesi sensörün normal olarak pişirme kabının sıcaklığını tespit etmediği durumdaki haline göre yükseltir [18].



Şekil 1. Patente bahsedilen pişirme sistemi

1.2.2.2. İkinci patent çalışması

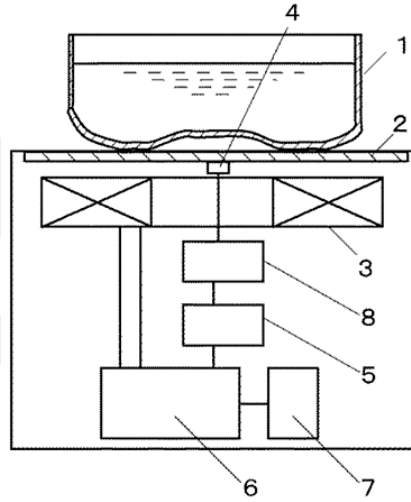
Konu ile ilgili olarak “MIELE & CIE. KG” tarafından yürütülen çalışmalar 15.01.2004 tarihinde, “Method For Controlling A Cooking Process On A Ceramic Hob, And Ceramic Hob For Carrying Out Said Method” patent adı ve “DE102004002058B3” patent numarası ile koruma altına alınmıştır.

Buluş, düz bir cam seramikten oluşan ocak üzerinde pişirme işleminin kontrol edilmesi için geliştirilen bir yöntem ile ilgilidir. Bahsedilen seramik ocak, montaj pozisyonunda plakanın altına yerleştirilmiş bir ısıtma cihazı vasıtasıyla ısıtılabilen en az bir pişirme alanı içermektedir. Bahsedilen ısıtma cihazı, ısıtma cihazının ısıtma kapasitesini kontrol etmek için bir elektrik kontrol sistemi ve plakanın altına yerleştirilmiş birinci ve ikinci sıcaklık sensör birimlerini içermektedir. Buluşun amacı, bir seramik ocak üzerinde bir pişirme işleminin kontrol edilmesi için bir yöntem sağlamaktır. Pişirme düzleminden

1.2.2.4. Dördüncü patent çalışması

Konu ile ilgili olarak “MATSUSHITA ELECTRIC IND CO. LTD.” tarafından yürütülen çalışmalar 20.10.2015 tarihinde, “Induction Heating Device” patent adı ve “JP2007115516A” patent numarası ile koruma altına alınmıştır.

Patent başvuru dokümanında kullanıcının isteğine bağlı pişirme sıcaklığının kontrolünü sağlayan indüksiyonlu bir pişirici cihaz anlatılmaktadır. Patent başvuru dokümanına konu olan uygulamada, kızılötesi sensör tarafından enerjiden sıcaklığa dönüşen ısı algılanarak üst plaka üzerine yerleştirilen pişirme kabına iletilen ısının kontrolü sağlanmaktadır [21].

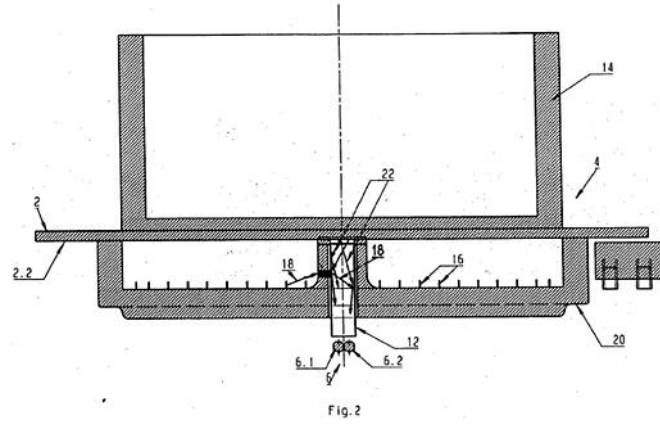


Şekil 3. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm

1.2.2.5. Beşinci patent çalışması

Konu ile ilgili olarak “MIELE & CIE. KG” tarafından yürütülen çalışmalar 15.01.2004 tarihinde, “Method For Controlling A Cooking Process On A Ceramic Hob And Ceramic Hob For Carrying Out Said Method” patent adı ve “EP1704754A1” patent numarası ile koruma altına alınmıştır.

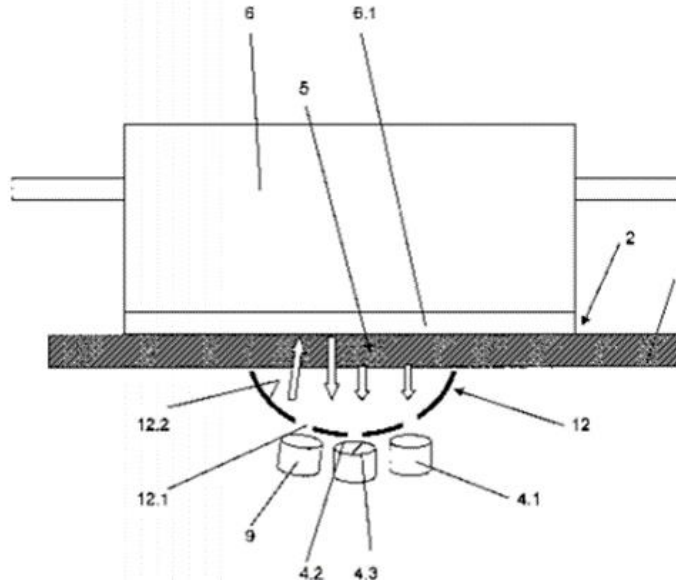
Patent dokümanında; ocak üzerindeki gerçekleştirilen pişirme işleminin kontrol edilmesine dair bir yöntem anlatılmaktadır. Patent dokümanına konu olan uygulama sayesinde tekniğin bilinen durumunda yer alan uygulamalara göre daha sık ve daha hassas ölçümler yapılması sağlanmaktadır [22].



Şekil 4. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm

1.2.2.6. Altıncı patent çalışması

Konu ile ilgili olarak “MIELE & CIE. KG” tarafından yürütülen çalışmalar 05.06.2007 tarihinde, “Control Method For A Hob And Hob For Carrying Out Said Method” patent adı ve “EP2153698A1” patent numarası ile koruma altına alınmıştır. Patent dokümanında; üç tane sıcaklık sensörünün kullanıldığı cam-seramik yapıya sahip pişirici cihaz anlatılmaktadır [23].



Şekil 5. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm

1.2.2.7. Yedinci patent çalışması

Konu ile ilgili olarak “MIELE & CIE. KG” tarafından yürütülen çalışmalar 04.03.2013 tarihinde, “Cooking Device” patent adı ve “EP2775786A1” patent numarası ile koruma altına alınmıştır.

A cross-sectional view of a device assembly 1. The assembly includes a base 2 with a central opening 3. A layer 5 is disposed on top of the base 2. A component 11 is mounted on the layer 5, with a feature 21 on its side. A bracket 83 is positioned above the component 11. A bracket 31 is positioned to the right of the component 11. A bracket 200 is positioned to the right of the component 11, encompassing the component 11 and the layer 5. A bracket 15 is positioned to the left of the component 11, encompassing the component 11 and the layer 5. A bracket 12 is positioned to the left of the component 11, encompassing the component 11 and the layer 5. A bracket 1 is positioned to the left of the component 11, encompassing the component 11 and the layer 5.

Şekil 6. Patente konu buluşun kullanıldığı ürüne ait perspektif bir görünüm

2. MEVCUT SICAKLIK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ ve ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Sıcaklık literatürde, tüm maddeler için var olan, moleküler düzeydeki kinetik enerji temelli aktivitenin bir ölçüsü olarak anılmaktadır. Enerjinin mikroskobik düzeydeki statik hali olarak da nitelendirilebilecek sıcaklık, temel bir fiziksel büyüklüktür. Farklı kurumlarca Celsius (°C), Fahrenheit (°F), Kelvin (°K), Planck (TP), Rømer (°Rø), Réaumur (°R), Newton (°N), Delisle (°De) gibi farklı birimler şeklinde ifade edilebilen sıcaklık pratikte, bir maddenin kendiliğinden enerji verme eğiliminin bir ölçüsü olarak da bilinmektedir [25].

Tablo 2. Sıcaklık skala karşılaştırması [25]

Örnek Durum	Kelvin	Celsius	Fahrenheit	Rankine	Delisle	Newton	Réaumur	Rømer
Mutlak sıfır sıcaklığı	0	-273,15	-920,34	0	-	-	-	-
Suyun kaynaması (sıcaklık ve basınç için standart koşullarda)	373,1339	99,9839	211,97102	671,64102	0	33	80	60
Dünyanın ortalama yüzey sıcaklığı	288	15	59	518,67	127,5	4,95	12	15,375
Dünya'da kaydedilen en düşük yüzey sıcaklığı (Vostok, Antarctica - 21 Temmuz, 1983)	184	-89	-128,2	331,47	283,5	-29,37	-71,2	-39,225
Dünya'da kaydedilen en yüksek yüzey sıcaklığı (Al 'Aziziyah, Libya - 13 Eylül, 1922)	331	58	136,4	596,07	63	19,14	46,4	37,95

Günümüzde, mutlak sıfır olarak nitelendirilen ve maddenin atomik seviyedeki kinetik aktivitesinin tamamen durduğu kabul edilen noktadan, galaksilerin merkezlerindeki yıldızların yüzey sıcaklıklarına kadar çok farklı büyüklükteki sıcaklık seviyelerinin ölçümlenebileceği yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, uygulama biçimlerine göre farklı şekilde sınıflandırılabilirler de esasen literatürde, temaslı ve temassız sıcaklık ölçüm yöntemleri olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmıştır.

2.1. Temaslı Sıcaklık Ölçüm Yöntemleri

Sayısal olarak ölçümü doğrudan yapılamayan bir büyüklük olan sıcaklık çoğunlukla, maddelerin sıcaklıkla ilişkili olarak yaşadıkları fiziksel değişimler baz alınarak

ölçümlenebilmektedir. Bu ölçümleme işlemi temaslı yöntemler söz konusu olduğunda, madde ve ortam gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu kapsamda elektriksel direnç, hacimsel genleşme ve buhar basıncı gibi büyüklüklerin değişimlerinin algılanmasını temel alarak yapılan sıcaklık ölçümleri, birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.1. Ölçümün tarihsel gelişimi ve ölçüm teorisi

Günümüzde halen yaygın olarak kullanılan genişleme tipli termometrelerin de atası sayılabilecek ilk ölçüm aracının, Galileo Galilei tarafından 1597 yılında geliştirilen “termoskop” olduğu tahmin edilmektedir. Alt kısımda ve üst kısımda iki cam hazne ile ince ve uzun bir cam borudan oluşan termoskop esasen, sıvıların hacimlerinin sıcaklığa bağlı olarak genişlemesi ya da daralması ilkesine dayanmaktadır. Ölçtüğü sıcaklığı kategorize edecek herhangi bir işaretin gövdesi üzerinde bulunmadığı termoskop, 1641 yılında Toskana bölgesi imparatoru II. Ferdinand için geliştirilerek 50 eşit kademede işaretlenmiş ve içerisindeki sıvı yerine de alkol kullanılarak ilk termometre unvanını almıştır.



Şekil 7. İlk sıcaklık ölçüm aracı olarak bilinen termoskop

Termometre, İngiliz bilim insanı Robert Hooke tarafından 1664’te, sıvı olarak alkolle birlikte kırmızı boya kullanılacak şekilde değiştirilmiş, gövdesindeki kademelendirme, her kademenin 1 derece olacak şekilde 500’e kadar arttırılması sağlanarak geliştirilmiştir. Ayrıca Hooke, termometre gövdesine yaptığı kademelendirmede sabit nokta olarak suyun donma sıcaklığını seçtikten sonra, termometrenin farklı fiziksel büyüklükler için de standart bir ölçeğe sahip olabileceğini göstermiştir. Bu gelişmelerden sonra 1702

yılında gökbilimci Ole Roemer, termometre ölçeklendirmesini daha standart bir hale getirmek istemiş ve iki sabit nokta olarak suyun katıdan sıvı hale geçiş ile sıvıdan gaz hale geçiş noktalarını referans alıp ölçeklendirmeyi yeniden düzenlemiştir. Bu ölçeklendirmeyi kullanarak geliştirdiği termometreler ile 1708-1709 yılları arasında Kopenhag'ta ölçümler almıştır.

Gabriel Fahrenheit 1724'te, cıvanın ısı genleşme katsayısının yüksek olması sebebiyle, termometre içerisindeki sıvıyı cıva ile değiştirerek ilk kez cıvalı bir termometre kullanmıştır. Cıvanın genleşmesinin düzgün olması sebebiyle bu termometre sayesinde yüksek sıcaklıklarda da doğru ölçümler alınabilmıştır. Fahrenheit daha sonra, buz ile tuz karışımının bulunduğu sıcaklığı 0, normal bir insanın vücut sıcaklığını ise 96 olarak referans almıştır. Bu değerler baz alınarak yaptığı ölçümler ile suyun, buz ve buhar noktalarının sıcaklıklarının sırasıyla 32 ve 212 olduğunu tespit etmiştir. Bu aşamada yapacağı ölçeklendirmede suyun donduğu 32 değerini ve suyun kaynadığı 212 değerini sabit noktalar olarak kabul etmiş, bu iki değer arasını 180 eşit parçaya bölmüştür. Bu ölçeklendirmede ölçülen değer birimi Fahrenheit (F) olarak kabul edilmiştir [26].

Bu gelişmelere paralel olarak İsveçli astronom Anders Celsius 1742'de, suyun kaynama noktasını 0, buzun ergime noktasını 100 olarak referans almış ve 100 derecelik (santigrat) yeni bir ölçeklendirme yapmıştır. Bu ölçeklendirme daha sonra ters çevrilerek kullanılmış, oldukça yaygınlaşmış ve 1943'te "celcius ölçeği" olarak isimlendirilene dek "santigrat ölçeği" olarak anılmıştır.

İngiliz fizikçi Lord Kelvin 1848'de, celsius ölçeğini kullanan ancak sıfır noktasını, mutlak sıfır ($-273,15^{\circ}\text{C}$) olarak kabul eden bir sıcaklık ölçeği ortaya koymuştur. Birimi Kelvin (K) olarak kabul edilen ve ilerleyen yıllarda "termodinamik sıcaklık ölçeği" olarak da anılan bu ölçek, tersinir ısı makineleri temel alınacak şekilde tanımlanmıştır.

Tarihsel süreci termoskop ile başlayan temaslı sıcaklık ölçüm araçları günümüze kadar sürekli geliştirilmiş ve uygulamalara özel olarak sürekli çeşitlendirilmiştir.

2.1.2. Ölçüm yöntemleri ve mevcut uygulamalar

Günümüzde, uygulamaya özel olarak farklı alanlarda kullanılan temaslı sıcaklık ölçüm yöntemleri çalışma prensipleri dikkate alındığında genişleme tipli termometreler,

termistörler, direnç termometreleri, ısı çiftler, yarı iletken ve entegre sıcaklık sensörleri olmak üzere 5 ana kategoride incelenmektedir.

2.1.2.1. Genişleme tipli termometreler

Genişleme tipli termometreler temelde, maddelerin sıcaklık artış ya da azalışları sebebiyle, hacimlerindeki değişimlerini temel alarak, algılama işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlayan termometrelerdir.

Sıvı genişlemeli termometrelerin temel çalışma prensibi, sabit hacimli cam bir hazne içerisindeki sıvının, ısıtılması ile genişlerken cam boru içerisinde yükselmesi durumuna dayanmaktadır. Bu cam termometrelerde; civa, etil alkol, kerosen gibi sıvılar kullanılmaktadır. Bu sıvılardan biri olan civa, $-38,87^{\circ}\text{C}/+356,58^{\circ}\text{C}$ aralığında sıvı fazda bulunduğundan, taşınılabılır ve ekonomik olması amaçlanan cam termometrelerde sıklıkla kullanılmaktadır.

Gaz termometreleri, sabit bir hacimdeki gazın basıncının, ölçüldüğü sıcaklığa göre değişimini kullanarak sıcaklık algılama işlemini gerçekleştirmektedir. Temel çalışma prensibinin ideal gaz kanununa dayanması, 1°K gibi çok düşük sıcaklıklarda ölçüm alınabilmesi mümkün kılmaktadır.

Bimetalik tip termometrelerin temel çalışma prensibi, katı cisimlerin sıcaklıklarının arttıkça genişleme meydana getirmelerine dayanmaktadır. Bu yöntem ile birlikte, birbirlerine göre farklı oranlarda genişleme katsayılarına sahip, şerit halindeki farklı iki metal levhanın yüzeylerinden birbirlerine perçinlenerek ısıtılması ve oluşan bükülme oranlarına bakılarak sıcaklığın tespit edilmesi sağlanmaktadır. Bimetalik tipteki algılayıcılar, düşük sıcaklık değişimlerindeki kullanımlara genellikle, metallerin düşük sıcaklık değişimlerindeki genişlemesinin az olması sebebiyle, uygun değildir. Bu durum, çok yüksek ya da çok düşük sıcaklıklarda algılama yapılabiliyor olmasına rağmen, algılama hassasiyetinin düşük seviyelerde kalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 8. Sırasıyla; sıvı genişlemeli, gaz genişlemeli ve bimetalik tip termometre

2.1.2.2. Termistörler

Sıcaklığa bağlı olarak bazı yarı iletken malzemelerin (metal oksitler) elektriksel dirençlerinde, değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimler baz alınarak hassasiyeti yüksek algılayıcılar elde etmek amacıyla, termistörler tasarlanmışlardır. Sıcaklığa bağlı olarak termistör tarafından verilen sıcaklık değişimi tepkisi, özellikle çok yüksek ve çok düşük sıcaklıklarda doğrusal olarak gerçekleşemediğinden, termistörlerin bu sıcaklıklarda kullanımları uygun değildir.

PTC olarak bilinen ve baryum, titanat, silikon gibi maddelerin kullanılmasıyla oluşturulan termistörler, pozitif sıcaklık sabitine sahiptir ve sıcaklık artışına bağlı olarak elektriksel dirençleri artmaktadır.

NTC olarak bilinen ve germanyum, silikon gibi maddelerin kullanılmasıyla oluşturulan termistörler, negatif sıcaklık sabitine sahiptir ve sıcaklık artışına bağlı olarak elektriksel dirençleri azalmaktadır.



Şekil 9. Sırasıyla; PTC ve NTC termistörleri

2.1.2.3. Direnç termometreleri

Direnç termometreleri (nikel, bakır, platinyum, tungsten), iletken bir telin direnç

değerinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesinden yararlanılarak oluşturulan sıcaklık algılayıcılarıdır. Sarımlı olarak hazırlanmış direnç, sıcaklığı ölçülmek istenilen ortama bırakılarak üzerinden bilinen değerde, sabit miktarda akım geçirilir. Geçirilen akım, direnç değişimine bağlı olarak bir gerilim düşümüne sebep olacağından farklı sıcaklıklar için oluşan farklı gerilim düşümleri, algılama işleminin gerçekleştirilmesini sağlayacaktır.

Direnç termometreleri temelde, iç sarım (inset), dış koruyucu kılıf ve bağlantı parçalarından meydana gelmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak direnci değişen asıl yapı, inset içine yerleştirilip boru içerisine metal oksit tozları doldurularak oluşturulan malzemedir. Oluşturulan malzeme, koruyucu kılıf içerisine yerleştirilerek klemens ile birlikte bir bütün olarak inset şeklinde isimlendirilmektedir.

Termistörlere benzer bir mantıkla çalışan direnç termometreleri, termistörlere göre daha yüksek maliyetleri ve daha uzun tepki süreleri sebebiyle, daha çok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle düşük sıcaklıklardaki ölçümlerde, termokupllara nazaran çok daha doğru değerler üretebildikleri için tercih edilmektedir. Direnç termometrelerin yaygın olarak kullanıldığı alanlar endüstriyel bir süreç söz konusu olduğunda; tanklar, borular ve makine gövdeleri, gaz ve sıvı ortamlar, alçak ve yüksek basınç uygulamaları şeklinde sıralanabilir.



Şekil 10. Endüstriyel tip direnç termometresi

2.1.2.4. Isıl çiftler (Termokupl, Termoeleman)

Farklı metalden üretilmiş iki telin uç noktalarından birleştirilerek, bu birleşim noktasında oluşan elektromotor kuvvetinin değerinin (EMK) algılanmasına dayalı olarak çalışan ısııl çiftler, günümüzde kullanılan en yaygın algılayıcılarıdır. -200°C 'den 2320°C 'ye kadar ölçüm alabilen türleri bulunan ısııl çiftler temelde, sıcak kaynaktan soğuk kaynağa doğru

hareket eden elektronların oluşturduğu elektromotor kuvvetinin algılanması prensibine dayalı olarak çalışırlar.



Şekil 11. Yaygın olarak kullanılan K tip bir termokupl

2.1.2.5. Yarı iletken ve entegre sıcaklık sensörleri

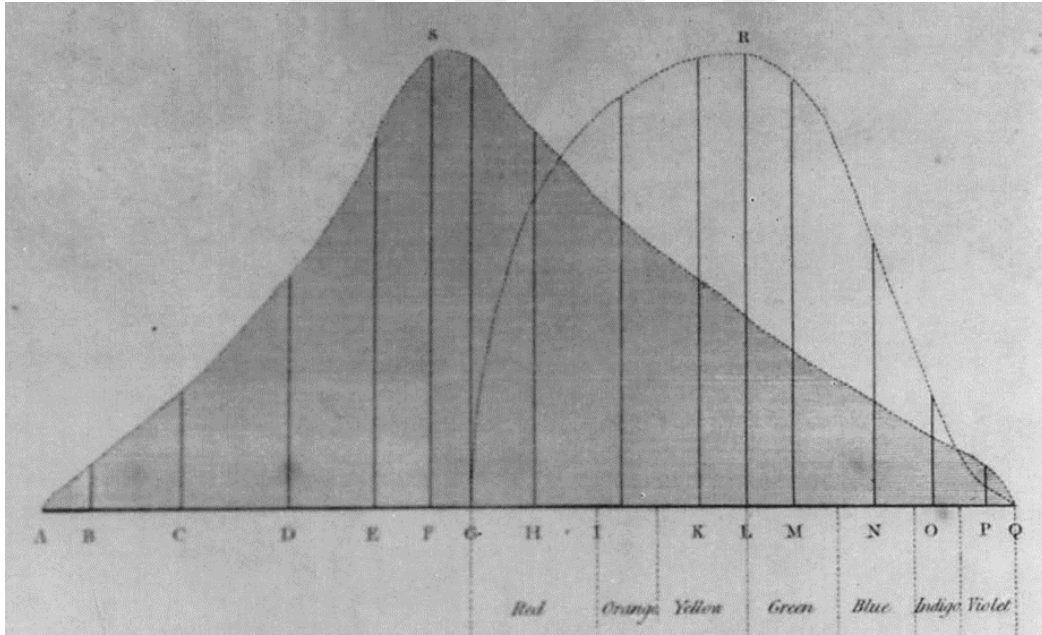
Silisyum diyot

Yarı iletken teknolojisinin ilerlemesi ile birlikte günümüzde, silisyum diyonun kesim-iletim karakteristiklerini baz alarak geliştirilen sıcaklık sensörlerinin kullanımı da oldukça artmıştır. Silisyum diyonun iletme geçirilmesi için gerekli olan 700mV'lik eşik geriliminin azaltılması, sıcaklık değerin artırılmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda ısı, valans elektronların iletim bandına geçmesini kolaylaştırmakta bu da eşik geriliminin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum silisyum temelli diyonlar için, her 1°C'lik değişime karşılık eşik geriliminde -2mV'lik bir değişimin söz konusu olduğunu belirtmektedir. Bu özellikleri sebebiyle sıcaklık ölçümünde kullanıma olanağı bulunan silisyum diyonlar, üretimi esnasında belirlenen (genellikle -50°C ile +150°C) sıcaklık aralığı dışında kullanılırsa kalıcı olarak bozulabilmekte, dolayısıyla da endüstriyel ortamlarda pek tercih edilememektedir.

Sıcaklık duyarlı entegreler

Geniş bir sıcaklık aralığında, hızlı ve hassas ölçümler alınması gereken durumlar için geliştirilen yarı iletken sıcaklık sensörleri temel olarak, zener diyonunun kırılma voltajının mutlak sıcaklığa geniş bir aralıkta orantılı olması gerekliliğine dayanarak, çeşitli koşullar için çeşitli tiplerde entegre devreler şeklinde üretilmiştir. Örneğin LM335 sıcaklık sensörü için, her 1°K'lık değişimdeki gerilim düşümü 10mV civarında olmaktadır.

yerleştirdiği diğer termometreler ile de durumu kontrol etmiştir. Karartılmış termometre spektrumun renkleri boyunca yavaş yavaş hareket ettikçe, sıcaklık okumaları menekşe ucundan kırmızı uca doğru sabit bir artış göstermiştir. Aslında bu durumun, İtalyan araştırmacı Landriani'nin de 1777'de benzer bir deneyde aynı etkiyi gözlemlemesinden dolayı tamamen beklenmedik olmamasına rağmen Herschel bu duruma ek olarak, bu ısıtma etkisinin maksimuma ulaştığı bir nokta olması gerektiğini ve spektrumun görünür kısmıyla sınırlı ölçümlerin bu noktaya ulaşamadığını, şekil 13'teki grafikte yer aldığı gibi keşfetmiştir. Grafik incelendiğinde, görünür ışığın spektrumunun sağında ve ısının ise spektrumun solunda olduğu, o günün şartlarında kırmızı ışığın yer aldığı kısmının ötesinde spektrumun, bir kısım daha barındırdığı tahmini görölmektedir. Çalışmaların sonucunda elektromanyetik spektrumun kıızılötesi bölümünün varlığı Herschel tarafından, 1700'lerde yeni bir optik malzeme araştırılması sırasında bilinçli olmadan yapılmış bir keşif olarak literatüre geçmiştir [27].



şekil 13. Herschel'e göre görünür ışık ve ısıma ısısının spektral dağılımları [27]

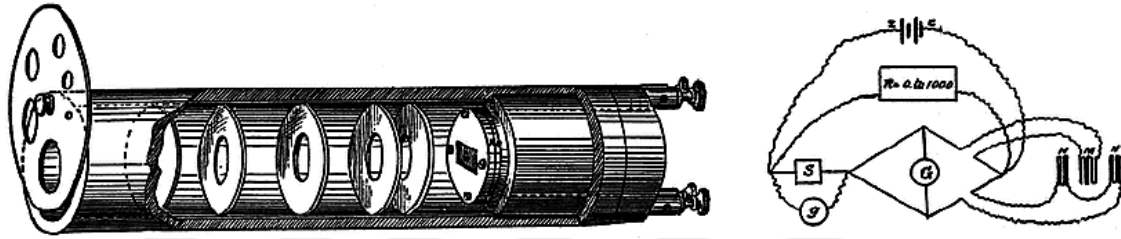
Termometreyi spektrumun kırmızı ucunun ötesindeki karanlık bölgeye taşıyan Herschel, ısıtmanın artmaya devam ettiğini doğrulamıştır. Bu artışın maksimum noktası spektrumun, bugün "kıızılötesi dalga boyları" olarak bilinen bölgesinde, kırmızı ucunun çok ötesindedir. Herschel keşfini açıkladığında, elektromanyetik spektrumun bu yeni kısmına "termometrik spektrum" adını vermiştir yani popöler düşüncenin aksine, "kıızılötesi" terimini üreten Herschel değildir. Bir terim olarak "kıızılötesi", keşiften 75 yıl kadar sonra literatürde bu isimle anılmaya başlanmıştır.

Herschel'in orijinal deneyinin prizmasında cam kullanımı, kızılötesi dalga boylarının gerçek varlığı hakkında dönemin bazı araştırmacıları arasında tartışmalara yol açmıştır. Farklı araştırmacılar tarafından çalışmaları doğrulanmaya çalışırken deneylerde, kızılötesinde farklı geçirgenlik oranlarına sahip çeşitli cam türleri rastgele kullanılmıştır. Daha sonraki deneyleri sayesinde Herschel, camın yeni keşfedilen termal radyasyona sınırlı geçirgenliğinin farkına varmış olsa da çalışmalarında kızılötesi optiklerin (yansıtıcı elemanların, özellikle düzlemsel ve kavisli aynaların) kullanımına mahkûm olduğu sonucuna varmak zorunda kalmıştır [27].

Tarihsel olarak benzer zamanlarda (1830'lu yıllara doğru) İtalyan araştırmacı Melloni tarafından, doğal olarak oluşan ve mercek ya da prizma haline getirilebilecek kadar büyük doğal kristallerde bulunan kaya tuzunun (sodyum klorür), kızılötesi ışıma dikkat çekici derecede geçirgen olduğu kanıtlanmıştır. Bu süreç, kaya tuzunun ana kızılötesi optik malzeme haline gelmesine ve 1930'larda sentetik kristal üretiminin gelişmesine kadar sonraki yüz yıl boyunca bu alanın böyle kalmasını sağlamıştır [28].

Radyasyon dedektörleri olarak termometreler, Nobili'nin termokuplı icat ettiği 1829 yılına kadar yaygın olarak kullanımda kalmıştır. O dönem için Herschel, kendi termometresiyle 0,2°C'ye (0,036°F) kadar olan hassasiyetlerde ölçüm yapabilmıştır ve daha sonraki modellerde bu durumu 0,05°C'ye (0,09°F) olan hassasiyetlere kadar düşürebilmeyi başarmıştır. Sonra bir atılım meydana gelmiş ve Melloni, termokuplın ölçüm hassasiyetini arttırabilmek, (ilk termopili oluşturabilmek) amacıyla seri olarak birkaç termokupl bağlamıştır. Bu işlem sonucunda oluşan yeni sıcaklık ölçüm aracının, ısı radyasyonunu tespit etmek için günün en iyi termometresinden en az 40 kat daha hassas olduğunu fark etmiştir. Ayrıca Melloni yaptığı deneylerde, bu yeni termokupl sayesinde 3 metre uzakta duran bir kişinin ısını bile tespit edebildiğini görmüştür. Bu buluş ve elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölümünün kâşifi Sir John Herschel'in çalışmaları sayesinde, “ısı resmi” denilen terim 1840'ta ortaya atılmıştır. İlerleyen süreçte yapılan çalışmalar sayesinde, üzerine odaklanılan bir ısı modeline maruz bırakıldığında yağ filminin girişim etkisi ile buharlaşmasına dayanarak diferansiyel termal görüntü, gözle görülebilir şekilde yansıyan ışık demeti olarak elde edilebilmiştir. Bu yöntem ile Sir John, “termograf” adını verdiği çalışmanın, yani kâğıt üzerindeki termal görüntünün ilkel bir kaydını elde etmeyi başarmıştır [28].

Samuel P. Langley tarafından 1880'de gerçekleştirilen ve bir başka büyük atılım olan bolometrenin icadına kadar, kızılötesi dedektörlerin hassasiyetinin iyileştirilmesi süreci oldukça yavaş ilerlemiştir. Şekil 14'te görüldüğü gibi tasarlanan ve bolometre olarak isimlendirilen buluş, üzerine kızılötesi radyasyonun odaklanarak hassas bir galvanometrenin tepki verdiği bir Wheatstone köprü devresinin bir koluna bağlanan ince, kararmış bir platin şeritten oluşmaktadır. Yapılan çalışmalara bolometrenin de eklenmesiyle o dönem için dahi 400 metre mesafedeki bir ineekten gelen ısıyı tespit edebilen ölçüm araçları geliştirilmiştir [29].



Şekil 14. Samuel P. Langley'in bolometresi [29]

1900 ve 1920 yılları arasında, dünyanın farklı bölgelerinde kızılötesi ile ilgili yapılan çalışmaların oldukça yaygınlaşmasıyla birlikte personel, topçu, uçak, gemi ve hatta buzdağlarını tespit edebilen cihazlar için birçok patent alınmıştır. Konu ile ilgili modern anlamdaki ilk ölçüm sistemleri, her iki tarafın da kızılötesi askeri faaliyetlerin algılanmasına adanmış araştırma programlarına sahip olduğu, 1914-1918 yılları arasındaki dünya savaşında geliştirilmeye başlanmıştır. Bu programlar, düşman ya da saldırı algılama, uzaktan sıcaklık algılama, güvenli iletişim ve "torpido" rehberliği için deneysel sistemleri içermiştir. Bu süre zarfında test edilen kızılötesi arayıcı sistemler, 1,5km (0,94mil) mesafeden yaklaşan bir uçağı tespit edebilmiştir.

Günümüze kadar geliştirilen hassas sistemlerin tamamı bolometre fikrinin varyasyonlarına dayanmaktadır. Bu durumdan bağımsız olarak iki savaş arasındaki dönemde, “görüntü dönüştürücü” ve “foton dedektörü” olmak üzere literatüre devrim niteliğinde iki yeni gelişme eklenmiştir. Görüntü dönüştürücü olarak nitelendirilen yapı, tam anlamıyla karanlıkta görüntülemenin tarihte ilk kez sağlanması sebebiyle başlangıçta ülkelerin askeri güçlerinin dikkatlerini üzerine çekmiştir. Buna rağmen, görüntü dönüştürücünün hassasiyetinin yakın kızılötesi dalga boylarıyla sınırlı olması ve askeri hedeflerin kızılötesi arama ışınlarıyla aydınlatılması gerekliliğinin, gözlemcinin konumunu benzer şekilde donatılmış bir düşman gözlemciye verme riskini içerdiğinden,

görüntü dönüştürücüye olan askeri ilginin nihayetinde azalmasına sebep olmuştur. Bu kapsamda “aktif” (arama demeti donanımlı) termal görüntüleme sistemlerinin taktik ve askeri dezavantajları, 1939-1945 yılları arasındaki dünya savaşının ardından “pasif” geliştirme olasılıklarına (arama ışını olmadan) ve kapsamlı pasif kızılötesi araştırma programlarının başlatılmasına imkân sağlamıştır. Bu programlar ile son derece hassas foton dedektörleri etrafına konumlandırılan sistemler ortaya çıkarılmaya başlamıştır ancak bu dönemdeki, askeri gizlilik düzenlemeleri kızılötesi görüntüleme teknolojisinin hangi seviyelerde olduğunun açıklanmasını tamamen engellemiştir. Bu gizlilik prosedürlerinin 1950’lerin ortalarından itibaren kademeli olarak hafifletilmesiyle, o dönemden itibaren, sivil kullanımlar (bilimsel araştırmalar ve endüstriyel çalışmalar) için yeterli termal görüntüleme cihazları üretilmeye başlamıştır.

2.2.1.1. Elektromanyetik spektrum ve uzak kızılötesi radyasyon

Elektromanyetik spektrum (EMS), evrende mevcut haldeki herhangi bir noktada, o anki fizik kuralları dahilinde mümkün olan elektromanyetik radyasyonun ve diğer ışıyım türevlerinin tümünün, dalga boyları veya frekanslarına göre yatay bir grafikte yerleşimini öngören kavramdır. Bir cismin için elektromanyetik spektrum ifadesi, o cisim tarafından doğrusal olarak tüm yönlere doğru oluşturulan, karakteristik bir yayılımı ifade etmektedir. Elektromanyetik spektrum dalga boylarına göre, Gama veya X-ışını gibi atom altı uzunluk değerlerinden başlayarak binlerce kilometrelik radyo dalgalarına kadar birçok radyasyon türünü içermektedir. Elektromanyetik spektrumun teorik olarak sürekli ve sonsuz olduğu düşünülse de pratikte, yüksek frekanstaki kısa dalga boyu sınırının Planck uzunluğuna, alçak frekanstaki uzun dalga boyu sınırının ise evrenin fiziksel ölçülerine eşit olduğu tahmin edilmektedir.

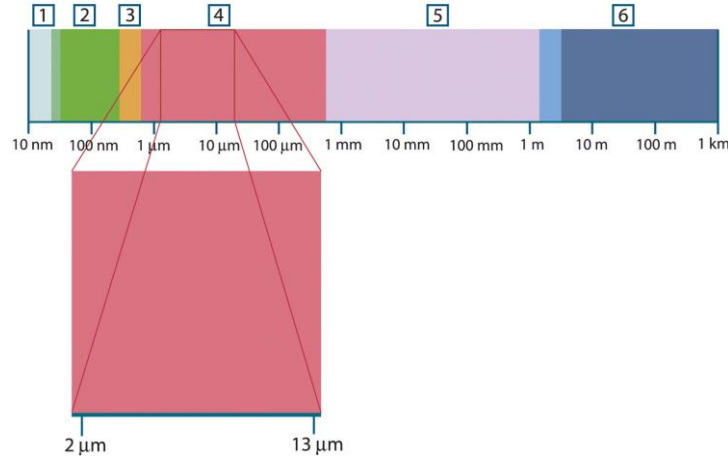
Elektromanyetik spektrum, binlerce kilometreden atom altı uzunluklara kadar geniş bir aralık içerisinde kalan dalga boylarına sahip ışıyımları kapsamaktadır. Maddesel olarak boş kabul edilen ortamlarda teorik olarak, belirli bir dalga boyundaki (λ) elektromanyetik ışıyımın, bu dalga boyu ile orantılı olarak bir frekansı (f) ve bir foton enerjisi (E) bulunmaktadır. Bu sebeple elektromanyetik spektrum dalga boyu, frekans ya da foton enerjisi bakımından ifade edilebilir durumdadır. Sıralanan bu üç büyüklük birbirine, Denklem 2.1 ve Denklem 2.2’deki eşitlikler ile bağlıdır:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 2.1$$

$$E = h \cdot f \quad 2.2$$

Burada ışık hızı $c=299792458$ m/s ve Planck sabiti $h=6,626069.10^{-34}$ J.s olarak ifade edilmektedir. Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 kullanılarak yapılacak basit birkaç işlem ile yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların yüksek enerjiye ancak kısa dalga boyuna, düşük frekanslı elektromanyetik dalgaların ise düşük enerjiye ancak uzun dalga boyuna sahip olduğu çıkarılabilmektedir. Yapılan bu çıkarımlara karşın, bir elektromanyetik dalga türünün atmosfer gibi belirli bir maddesel ortam içerisinde oluşturulması veya bu maddesel ortam içerisinde geçirilmesi görünür ışıktaki olduğu gibi, bu ışının dalga boyunun artmasından dolayı frekansının azalmasına sebep olacaktır. Maddesel ortama bağlı olarak oluşan bu değişiklikten dolayı, ışınımın elektromanyetik spektrum değerlerine ait sayısal bilgiler verilirken çoğunlukla, maddesel olarak boş kabul edilen ortamlardaki değerleri ifade edilmektedir.

Günümüzde, insan gözü tarafından algılanabilen 400-700nm'lik dalga boyu aralığında bulunan görünür ışık bandı haricinde kalan ışınım aralıkları da spektroskopi ile algılanabilmektedir. Evrende var olan küçükten büyüğe farklı hallerdeki bütün cisimlerin fiziksel özelliklerine dair birçok veri, oluşturdukları elektromanyetik ışının bir spektroskop yardımıyla analiz edilmesi sayesinde öğrenilebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bir laboratuvar spektroskobu ile 2-2500nm dalga boyu aralığındaki ışınımın algılanabilmektedir. Bu kapsamda örnek olarak hidrojen atomlarının 21,12cm'lik dalga boyunda spesifik bir radyo dalgası yaymasından bahsedilebilir. Bu ışının, ilgili araştırmacılar tarafından algılanmasıyla, uzak bir gezegenin atmosferinde hidrojen gazı bulunduğu anlaşılabilmektedir.



Şekil 15. Elektromanyetik spektrum. 1: X ışınları; 2: Morötesi; 3: Görünür ışık; 4: Kızılötesi; 5: Mikrodalga; 6: Radyo dalgaları

Termografi, kızılötesi spektral bandı kullanır ve kısa dalga boyunda iken koyu kırmızı renkte görsel algı sınırında yer alır. Uzun dalga boyunda, milimetre aralığında mikrodalga ve radyo dalga boylarıyla birleşir. Kızılötesi bant, literatürde genellikle; yakın kızılötesi (0,75-3µm), orta kızılötesi (3-6µm), uzak kızılötesi (6-15µm) ve aşırı kızılötesi (15-100µm) olmak üzere dört küçük banda ayrılarak anılmaktadır. Kızılötesi dalgalar için dalga boyu µm (mikrometre) cinsinden ifade edilmesine rağmen, nanometre (nm) ve Ångström (Å) gibi başka birimler de kullanılabilir.

Şekil 9’da yer alan görselde elektromanyetik spektrum için temel bir kategorilendirme yapılmışken, Tablo 3’te daha geniş ve kapsamlı bir kategorilendirme yapılmıştır.

Tablo 3. Elektromanyetik spektrum kategorileri [30]

Dalga Tipi	Frekans (f)	Dalga Boyu (λ)	Enerji (E)	Açıklama
Y	300EHZ-30EHZ	1pm-10pm	1,24MeV-124keV	Gama Işınları
HX	30EHZ-3EHZ	10pm-100pm	124keV-12,4keV	Sert X Işınları
SX	3EHZ-30PHz	100pm-10nm	12,4keV-124eV	Yumuşak X Işınları
EUV	30PHz-3PHz	10nm-100nm	124eV-12,4eV	Uzak Mor
NUV	3PHz-300THz	100nm-1µm	12,4eV-1,24eV	Yakın Mor
VIS	Görünür ışık aralığı			
NIR	300THz-30THz	1µm-10µm	1,24eV-124meV	Yakın Kızıl
MIR	30THz-3THz	10µm-100µm	124meV-12,4meV	Orta Kızıl
FIR	3THz-300GHz	100µm-1mm	12,4meV-1,24meV	Uzak Kızıl
EHF	300GHz-30GHz	1mm-1cm	1,24meV-124µeV	Aşırı Yüksek
SHF	30GHz-3GHz	1cm-1dm	124µeV-12,4µeV	Süper Yüksek
UHF	3GHz-300MHz	1dm-1m	12,4µeV-1,24µeV	Ultra Yüksek
VHF	300MHz-30MHz	1m-10m	1,24µeV-124neV	Çok Yüksek
HF	30MHz-3MHz	10m-100m	124neV-12,4neV	Yüksek Frekans
MF	3MHz-300kHz	100m-1km	12,4neV-1,24neV	Orta Frekans
LF	300kHz-30kHz	1km-10km	1,24neV-124peV	Alçak Frekans

VLF	30kHz-3kHz	10km-100km	124peV-12,4peV	Çok Alçak
VF/ULF	3kHz-300Hz	100km-1Mm	12,4peV-1,24peV	Ses Frekansı
SLF	300Hz-30Hz	1Mm-10Mm	1,24peV-124feV	Süper Alçak
ELF	30Hz-3Hz	10Mm-100Mm	124feV-12,4feV	Aşırı Alçak

Radyo dalgaları

Elektromanyetik ışıının bir iletkenine uygulanması sağlandığında, iletkenin yüzeyindeki atomların elektronları daha enerjik hale gelmekte ve bu durum iletkenin yüzeyinde düşük seviyelerde bir elektrik akımı oluşturmaktadır. Binlerce kilometreden yaklaşık bir milimetreye kadarki dalga boyu aralığında bulunmakta olan radyo dalgaları, rezonansa uygun olarak farklı tiplerde tasarlanan antenler ve geliştirilen modülasyon teknikleri sayesinde analog ya da sayısal veri aktarımına uygun hale getirilerek, veri aktarım anlamında yaygın olarak kullanılmaktadır. Radyo dalgaları aracılığıyla veri taşıma işlemine dair özellikler; dalga boyu, frekans ve faz gibi parametrelerinin belirli bir frekans bandı aralığında modüle edilmesiyle belirlenmektedir. Veri aktarımında yaygın olarak kullanılması sebebiyle çeşitli gerekçelerle, spektrumun bu kısmının kullanımı, ülkeler tarafından çeşitli resmî kurumlar aracılığıyla sınırlandırılmakta ve denetim altında tutulmaktadır.

Mikrodalga

Mikrodalgalar tipik olarak TED, IMPATT gibi katı yapıli diyotlar ya da uygun çap ve forma sahip magnetron, klistron tüpler kullanılarak istenilen faz ve frekansta üretilebilmektedir. Çeşitli frekanslardaki mikrodalgaların bazı materyaller tarafından soğurulması sonucunda ısı açığa çıkmaktadır. Bahsedilen yöntemi kullanan mikrodalga fırınlar, su moleküllerinin bu soğurma durumundan yararlanarak besinlerin ısıtılmasını sağlamaktadır. Ayrıca Wi-Fi gibi sıklıkla kullanılan kablosuz veri aktarım türlerinde de düşük yoğunluklara sahip mikrodalga ışıınımlar kullanılmaktadır.

Kızılötesi ışıınım

Gece görüşü, termal verimlilik analizi, çevresel gözetleme, endüstriyel denetimler, temassız sıcaklık algılama, kısa menzilli kablosuz iletişim, spektroskop ve hava tahmini alanlarında yaygın olarak kullanılan kızılötesi ışıınım, yaklaşık 300GHz ile 400THz arasındaki frekanslarda ve 1mm ile 750nm arasındaki dalga boylarında olmak üzere, temel olarak üç sınıfta incelenmektedir.

Uzak kızılötesi radyasyon, 300GHz ($\lambda=1\text{mm}$) ile 30THz ($\lambda=10\mu\text{m}$) arasında kategorilendirilmektedir ve özellikle, gazlarda dönme hareketi yapan moleküller, sıvılarda akışkanlık hareketi yapan moleküller ve katılarda ise fotonlar tarafından soğurulmaktadır. Örneğin, dünya atmosferinde %1 civarında bulunan su buharı tarafından soğurulan uzak kızılötesi ışıınım, atmosferin saydam ve renksiz özellikte olmasında önemli ölçüde pay sahibidir.

Orta kızılötesi radyasyon, 30THz ($\lambda=10\mu\text{m}$) ile 120THz ($\lambda=2,5\mu\text{m}$) arasında kategorilendirilmekte olduğundan belirli sıcaklıktaki cisimler çoğunlukla, spektrumun bu aralığında ışıınım yapmaktadır. Orta kızılötesi ışıınım, standart olarak moleküler titreşim ile soğurulabilmektedir.

Yakın kızılötesi radyasyon, 120THz ($\lambda=2500\text{nm}$) ile 400THz ($\lambda=750\text{nm}$) arasında kategorilendirilmekte ve gaz moleküllerinin algılanması gibi alanlarda kullanılabilir. Ayrıca görünür ışığa en yakın aralıkta bulunduğundan, görünür ışık ile yakın sayılabilecek fiziksel yöntemler sonucu üretilmekte ve benzer optik kurallara bağlı durumda bulunmaktadır.

Uzak kızılötesi radyasyon

Komple elektromanyetik spektrumun yalnızca, kızılötesi radyasyon (IR) bandında olan 15–1000 μm dalga boyu aralığını yani 300GHz-20THz ve 12,4meV-1,24meV foton enerji aralığını kapsayan kısmını ifade etmektedir. Bunun yanında, görünür ışıktaki uzun dalga boyu aralığının kırmızı kenarı ile THz mertebesinin kısa kenarının (3THz'den itibaren) spektral kısmı arasında uzanmaktadır. Kızılötesi ışıının kategorize edilmesi için yaygın olarak kullanılan iki farklı standart bulunmaktadır. ISO 20473 Standardı'na ve CIE'ye göre kızılötesi ışıınım Tablo 4 ve Tablo 5'te görüldüğü gibi kategorize edilmektedir.

Tablo 4. ISO 20473'e göre kızılötesi dalga kategorileri [31]

İşınım Tipi	Dalga Boyu (μm)
Yakın IR, NIR	0,78 – 3
Orta IR, MIR	3,0 – 50
Uzak IR, FIR	50 – 1000

Tablo 5. CIE'ye göre kızılötesi dalga kategorileri [31]

Işınım Tipi	Dalga Boyu	Frekans (THz)
Yakın IR, IR-A	0,7 – 1,4µm (700nm – 1400nm)	215 – 430
Orta IR, IR-B	1,4 – 3,0µm (1400nm – 3000nm)	100 – 215
Uzak IR, IR-C	3,0 – 100µm (3000nm – 0,1mm)	3 – 100

Görünür ışık

İnsan gözü tarafından, elektromanyetik spektrumdaki dalgalardan, görülebilir halde ışık veya renk şeklinde algılanabilen aralığa denk düşen ışınım türüdür. Bu durum, güneşten gelen beyaz ışığın bir prizmadan geçirilmesi sayesinde, bileşenleri olan diğer dalga boylarındaki ışıklara ayrılabilmesini de ifade etmektedir. Esasen görünür ışıktaki, belirli aralıktaki farklı dalga boyuna sahip ışınımın, farklı bir frekansa sahip olması, insan gözü için farklı renkler şeklinde algılanmasına sebep olmaktadır.

Morötesi ışınım

Morötesi (UV) ışınım, görünür ışığa göre daha küçük dalga boylarında daha yüksek enerjili dalgalara sahip olması sebebiyle, kimyasal bağlara zarar vererek bazı molekülleri iyonize edebilmekte ya da bağların bozulmasının hızlanmasına sebep olabilmektedir. Bu duruma örnek olarak, morötesi ışınımın insan derisi üzerindeki yıkıcı etkisinin bir göstergesi olan güneş yanıkları verilebilmektedir. Ayrıca UV ışınım, etkin bir mutajen olmasından ötürü hücrelerin DNA yapısını bozarak kontrolsüz bölünmelere dolayısıyla da mutasyonlara sebep olabilmektedir. Güneş'ten dolayı Dünya'nın maruz kaldığı UV ışınımın çoğunluğu, daha yeryüzüne ulaşmadan, Dünya çevresindeki ozon tabakası içerisinde soğurulmaktadır.

X ışınları

Sağlık sektöründe organ ve kemiklerin görüntülenmesinde ve güvenlik sektöründe x-ray cihazlarının oluşturulmasında kullanılması sebebiyle röntgen ışınları olarak da bilinen X ışınları, spektrumdaki morötesi ışınlar göre daha kısa dalga boyuna sahip olması sebebiyle ve çeşitli malzemelerin içerisinde geçebilmeleri sayesinde kendilerine pek çok sektörde kullanım alanı bulmuşlardır.

Gama ışınları

Çeşitli nükleer aktiviteler sonucunda ya da evrendeki kozmik kaynaklar aracılığıyla üretilen gama ışınları, elektromanyetik ışınım türleri arasında şu ana kadar keşfedilen en

enerjik ışı nım türü olarak, 1900 yılında Villiard tarafından keş fedilmiştir.

2.2.1.2. Termopil teorisi

Termopil, termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ve bu işlemi termoelektrik etkiye dayanarak gerçekleştiren bir algılayıcı türüdür. Termopil algılayıcılar, büyük bir termoelektrik güce ve zıt kutuplara sahip iki farklı malzemeden yapılmış olan mikro boyuttaki termokuplların, çoğunlukla birbirlerine seri olarak bağlanarak bir dizi haline getirilmesi ile oluşturulmuştur. Oluşturulan termopil algılayıcılarda, düşük ısı iletkenliğine ve kapasitansına sahip ince bir diyafram üzerine yerleştirilmiş iki farklı termoelektrik malzeme kullanılmaktadır. Bu iki termoelektrik malzeme esasen bir termokupl yapısı oluşturmakta ve bu termokupl, bağlantı noktalarından termokupl çıkış voltajının ölçüldüğü noktaya kadar sıcaklık farkını ölçerek çalışmaktadır. Termokupl çifti tarafından oluşturulan çıktı, termal direnç katmanı boyunca sıcaklık farkıyla doğrudan orantılı olan bir elektriksel gerilim ve ayrıca termal direnç katmanı boyunca ısı akışına doğru olan bir elektriksel gerilim oluşturmuş olacaktır. Seriy e daha fazla termokupl çifti eklemek, oluş an elektriksel gerilim çıkışının büyüklüğünü arttıracaktır.

Termopiller mutlak sıcaklığ a tepki gösterememekte, ancak yerel sıcaklık farkı veya sıcaklık gradyanıyla orantılı bir çıkış gerilimi üretebilmektedir. Çıkışlarındaki gerilim ve güç miktarı çok küçük oldu ğ u için özel olarak tasarlanmış kontrollü cihazlar kullanılarak milivolt ya da miliwatt mertebesinde ölçümlenebilmektedir. Çıkış sinyalinin kuvvetlendirilmesiyle birlikte termopiller kendine pek çok kullanım alanı bulmuştur.

Termopil özellikleri

Termopil tipindeki sensörleri benzer yapı lı diğ er algılayıcılardan ayıran özelliklerden bazıları; kızılötesi spektrum için geniş bir yanıt aralığı, kullanımında öngerilime veya akımına ihtiyaç duyulmaması, doğru akımda radyasyona verilen kararlı tepki şeklinde sıralanabilmektedir.

Kullanımın gerçekleştirileceğ i alanda, sensörden uygun performansın alınabilmesi amacıyla, uygulamaya yönelik sensör seçimi gerçekleştirilmelidir. Bu kapsamda üretici firmalar tarafından farklı uygulamalara uygun farklı algılayıcılar geliştirilmiştir. Bu durum, örneğ in; hareket algılama amacıyla tasarlanmış bir sensörün algılayabildiğ i

kızılötesi banttaki dalga boyu aralığının (7 -14µm), gaz moleküllerinin algılanmasındaki dalga boyu aralığı (...<5µm) ile aynı ya da benzer olmamasından da anlaşılabilmektedir.

Kullanım alanları

Termopiller, tıp uzmanları tarafından vücut sıcaklığını ölçmek için yaygın olarak kullanılan kızılötesi termometreler veya sensörün kapalı boşluğu içindeki sıcaklık profilini ölçmek için termal ivmeölçerler gibi sıcaklık ölçüm cihazının bir parçası olarak sıcaklığa karşı bir çıktı sağlamak için kullanılır. Termopillerin uygulamaları; endüstriyel ya da sivil kullanımda temassız sıcaklık ölçümü, termal hatların taranması, ısıtma-soğutma ve havalandırma sistemleri kontrolü, aydınlatma kontrolü, hareket tespiti ve insan varlığı, kandaki şeker oranının algılanması, alev ya da yangın algılama, otomatik egzoz gazı analizi şeklinde sıralanabilir.

Termopil temelli algılayıcılar

Termokuplların çalışma prensiplerinin temel olarak Seebeck etkisine dayanması sebebiyle; uçlarda üretilen potansiyel fark miktarı, sıcaklık farkının bir ölçüsü olacak şekilde, kullanılan termoelektrik malzemelerin türlerine bağlı olarak interpolasyona sokulabilir. Yaygın olarak kullanılan termokupllar neredeyse doğrusal sıcaklık-gerilim eğrilerine sahiptir. Ancak kalibrasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerektiği durumlarda, aktif uçlardan biri sabit tutulup referans alınarak eğri oluşturulmalıdır. Bilinen bir sıcaklıkta tutulan uca referans ucu denirken, diğer uca ise aktif uç denmektedir. İdeal bir termokupl için, elde edilen açık devre voltajı, A ve B iletkenleri söz konusu olduğunda Denklem 2.3'teki gibi ifade edilmektedir:

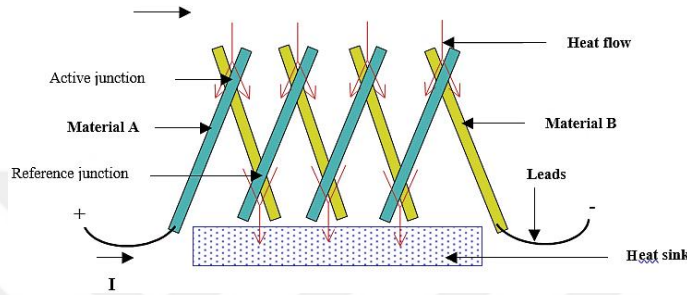
$$\Delta V = Sab(T). \Delta T \quad 2.3$$

Burada Sab, bağlantıların arasındaki sıcaklık farkını belirten ve Sab=µV/K şeklinde ifade edilen nispi bir Seebeck katsayısı olarak bilinmektedir. Bu katsayı yalnızca sıcaklığa değil, aynı zamanda termokuplda kullanılan iki malzemenin seçimine de bağlıdır. Verilen ifadede sıcaklık farkı ile ilgili potansiyel farkın işaretine göre Seebeck katsayısına bir işaret atanmıştır ancak mutlak değerlerle çalışmak da oldukça uygundur. Bir birleşme noktasındaki Seebeck katsayısının büyüklüğü daha sonra her metalin Seebeck katsayısı arasındaki farkın mutlak değeri olarak Denklem 2.4'teki gibi hesaplanmaktadır:

$$S_{ab} = |S_a - S_b|$$

2.4

Bir termopil sensör uygulamasında radyan enerji ısı kaynağı olarak, hareket eden aktif bağlantı noktası üzerinde kaplanmış bir tabaka içine emilir ve aktif bağlantı noktası ile referans bağlantı noktası arasındaki sıcaklık farkı, Seebeck etkisi ile bir çıkış gerilimine çevrilmiştir. Çoğu uygulamada sinyal işleme devresinin giriş empedansının, bir akımın termopilden akmasını sağlamak için yeterince yüksek olduğundan Joule, Thomson ve Peltier etkilerini ihmal etmek mümkündür.



Şekil 16. Termopil sensör tasarımlarının temel gösterimi

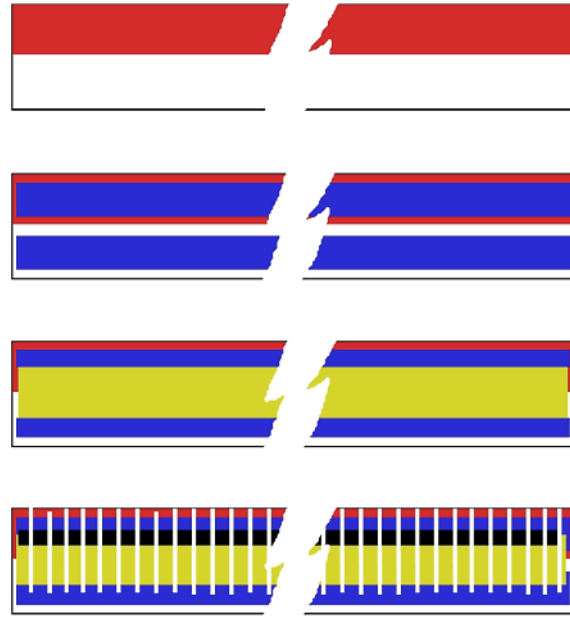
Termopil sensörlerin kullanımı durumunda, bir dengeleme elemanına ya da kutuplu bir güç kaynağına, termopil sensör kendi gerilimini ürettiği için gerek yoktur. Ancak üretilen gerilimin kuvvetlendirilmesi ve işlemci aracılığıyla diğer elemanlara iletilmesi aşamasında harici güç kaynağı kullanılmalıdır. Ek olarak, termopil herhangi bir dengeleme (offset) değeri olmadan doğrudan sıcaklık farklarını ölçme avantajına sahip olarak kullanılmaktadır. Yani algılayıcı herhangi bir radyasyona maruz kalmazsa, çıkışında oluşacak gerilim sıfır olarak kabul edilmektedir. Bunun yanında termopil sensörlerin potansiyel olarak hızlı bir zaman tepkisine sahip olduğu bilinmektedir.

Termopil gibi mikrosensörlerin üretim prosesleri, geleneksel türlerdeki yarı iletken algılayıcılara göre daha zor ve karmaşıktır. Örneğin, yaygın olarak kullanılan üretim proseslerinden birinde termopil sensör üretimleri, atıl bir gazın doldurulduğu ve iyonize edildiği bir vakum odasında püskürtme teknolojisini kullanmaktadır. Bu proseste, iyonlar bir elektrik alan ile hızlandırılarak metal bir hedefe yönlendirilmektedir. Sonra metal iyonları, gaz halindeki iyonlarla kinetik enerji alışverişi yoluyla serbest bırakılarak istenilen yüzey üzerinde bir filme yoğunlaştırılır. Yoğunlaştırma işlemi sonucunda, metal yüzeylerde ortaya çıkan sensör elemanlarının toplam kalınlığı 2µm'den daha azdır. Böylece, ortaya çıkan sensör, küçük bir hacme ve dolayısıyla minimum ısı kapasitesine ve daha hızlı bir zaman tepkisine sahiptir. İnce film katmanları alt tabaka üzerine

biriktirildikten sonra lazerler ile pikseller halinde dilimlenir. Buradaki her piksel bir birim termokupl bağlantı çiftinin oluşmasını sağlamaktadır. Aslında, bu işlem binlerce miktara binlerce mikrosensörün tek seferde mikrometre boyutunda üretilmesine izin vermektedir. Termopilin hassasiyeti ve performans/maliyet oranı bu şekilde geliştirilmektedir.

Şekil 17’deki gösterimde görülen aşamalar hakkında sırasıyla şu bilgiler verilebilir.

- Alüminyum nitrür substrat (beyaz) üzerine parilen malzeme (kırmızı) biriktirilir.
- Platin (mavi) hatları, parilen ve alüminyum nitrür üzerine dökülür.
- İki platin hatla bağlantı oluşturmak için çinko-antimonid (sarı) serpilir.
- Aktif bağlantı, bir emici katmanla (siyah) kaplanır ve daha sonra lazer, piksellere dilimlenir.



Şekil 17. Termopil doğrusal dizisi için imalat aşamaları

Halen yoğun olarak çalışmaların sürdürüldüğü yarı iletken teknolojisi alanında yaşanan gelişmeler, sensör teknolojisi alanındaki ilerlemeleri de beraberinde getirmektedir. Geliştirilen yarı iletken malzemelerin kullanımı, Denklem 2.4’e göre sensörün hassasiyetini doğrudan artıran mevcut durumdan daha iyi bir Seebeck katsayısını sensöre sağlamaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan mevcut algılayıcı metal konsepti oldukça iyidir çünkü platinden yapılmış termokupl bağlantıları için, çinko antimonun amorf bir yarı iletken hali (%50 Çinko+%50 Antimon) kullanılmaktadır. Bu

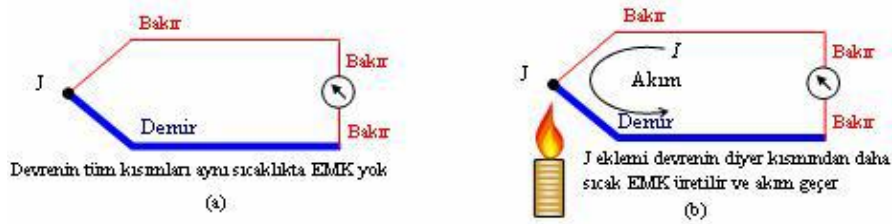
kombinasyon, Krieder'e göre 900 mV/°K kadar yüksek Seebeck katsayısına ait değerleri üretebilmektedir. Başka bir deyişle bu birleşim Seebeck katsayısını, geleneksel metal-metal birleşimlerine göre birkaç yüz kat arttırmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalardan edinilen bu tecrübeler ışığında yüksek hassasiyete, düşük elektrik direncine ve hızlı bir sensör tepkisine tekrarlanabilir bir şekilde sahip olabilmek amacıyla çalışmalar devam ettirilmektedir [32].

2.2.1.3. Konu ile ilgili bilinen kuramlar

Yapılacak çalışmalar kapsamında ilgilenilmesi gereken iki temel kuram öne çıkmaktadır. Bunlardan ilki, sıcaklığın elektrik enerjisine dönüşümünü açıklayan Seebeck Etkisi, ikincisi ise siyah bir cisimden yayılan ışıınımı cismin sıcaklığı açısından tanımlayan Stefan-Boltzmann Kanunu'dur.

Termoelektrik

Bir elektrik devresi birden fazla metalden meydana gelmiş durumda iken bu iki metalin birleşme noktaları farklı sıcaklıklarda ise devrede bir elektromotor kuvvet oluşacak ve bu kuvvet, devrede bir akımın akmasına sebep olacaktır. Sıcaklık farkından dolayı meydana gelen bu etki termoelektrik etki, oluşan elektromotor kuvvet ise termoelektrik elektromotor kuvvet olarak bilinmektedir. Termokuplların çalışma prensibini oluşturan bu durum Şekil 18'deki gösterimde de görülmektedir.



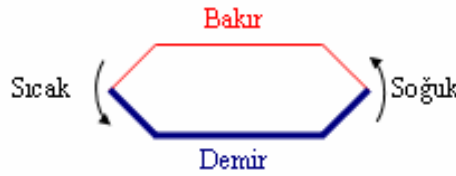
Şekil 18. Termokupl çalışma prensibi

Seebeck Etkisi

Thomas Johann Seebeck tarafından 1821'de gerçekleştirilen çalışmalarda, iki farklı metalin birleşiminden oluşan kapalı bir devre için, metaller farklı sıcaklıklarda olduğunda devreden bir akım aktığı dolaylı olarak fark edilmiştir. Basit bir termokuplın çalışma mantığına benzer olan bu yapıda, demir ve bakır gibi iki farklı metal, iki uç oluşturulacak şekilde uçları birleştirilerek bir ucu oda sıcaklığında tutulurken diğer ucu sıcak bir ortama bırakılırsa, sıcak ortamda bulunan uçta bakırdan demire akım akarken,

oda sıcaklığında bulunan uçta demirden bakıra bir akım akacaktır. Bu aşamada mutlak sıcaklık, metallere birinin ucunun bilinen bir sıcaklık değerine ayarlanması sonrasında uçlar arasındaki gerilim farkına bağlı olarak bulunabilmektedir.

Yapılan bu çalışmalarda, devreye yaklaştırılan pusulanın iğnesinin sapması, Seebeck tarafından yeni bir fenomen olarak yorumlanmış ve uçtan uca elektrik akımı aktığı fark edilememiştir. Daha sonra, Danimarkalı fizikçi Hans Christian Ørsted tarafından bu durum düzeltilerek “termoelektrik” terimi türetilmiştir.



Şekil 19. Basit bir termokuplün gösterimi

Seebeck etkisi esasen, sıcaklık farklılıklarının doğrudan elektrik enerjisine dönüşümüdür. Böyle bir dönüşümün sebebi metallerin, sıcaklık farklarına birbirlerine göre farklı büyüklüklerde tepkiler oluşturmalarıdır. Bu farklı tepkilerden dolayı, elektriksel bir akım döngüsü ve bu döngüden kaynaklanan bir elektromanyetik alan oluşmaktadır. Etkinin oluşturduğu gerilim esasen, 1°K’lik fark için birkaç mikrovolt mertebesinde. Örneğin bakır-konstantandan oluşturulan saf bir malzemenin, standart oda koşullarında 1°K için yaklaşık olarak 41µV’lik ısı güce sahip olduğu bilinmektedir. Bahsedilen bu gerilim, Denklem 2.5’teki gibi ifade edilebilir [32]:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_b(T) - S_a(T)) dT \quad 2.5$$

Burada S_a ve S_b sırasıyla, A ve B metalleri için oluşturulan sıcaklık fonksiyonuna bağlı Seebeck katsayıları yani ısı güçleri olarak belirtilirken T_1 ve T_2 , iki birleşme noktasının sıcaklıkları olarak ifade edilmektedir. Sıcaklığın bir fonksiyonu olmasına rağmen, sıcaklığa bağlı olarak doğrusal bir şekilde değişmeyen Seebeck katsayıları, iletkenlerin mutlak sıcaklık değerlerine, molekül yapılarına ve malzeme özelliklerine doğrudan bağlı olarak değişebilmektedir. Seebeck katsayılarının, ölçümlenen sıcaklıklar için sabit olması durumunda, Denklem 2.5, Denklem 2.6’deki hale getirilebilir:

$$V = (S_b - S_a) \cdot (T_2 - T_1) \quad 2.6$$

Isıl güç

Seebeck katsayısı olarak da ifade edilen ısııl güç, bir malzemede, yapısal özelliklerine bağlı olarak, taşınan birim yük için düşen entropiyi belirtmektedir ve S ile simgelenmektedir. Öte yandan ısııl güç, termoelektrik gerilime maruz bırakılan malzemenin, değişen sıcaklık farkı için oluşturduğu tepkinin büyüklüğüdür ve birimi $V/^{\circ}K$ olarak bilinmesine rağmen, daha kolay ifade edilebilmesi sebebiyle genellikle $\mu V/^{\circ}K$ olarak kullanılmaktadır. Isıl güç, malzemenin sıcaklığı ve malzemenin kristal yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Buna karşın metallerin ısııl gücünün az olmasının sebebi, yarı dolu bantlardaki pozitif ve negatif yüklerin, maruz bırakılan termoelektrik gerilim için birbirlerinin oluşturdukları etkileri, elimine etmesidir. Yarı iletkenlerde bu duruma zıt olarak, elektronların veya elektron boşluklarının taşınması, ısııl gücün sayısal değerinin yükselmesini sağlamaktadır. Ayrıca ısııl gücün negatif ya da pozitif olarak ifade edilmesi, taşınan yüklerin elektriksel iletimdeki fazlalığını belirtmektedir. Bir malzemenin uçları arasında bulunan ΔT sıcaklık farkının az olduğu durumlar için malzemenin yaklaşık ısııl gücü, Denklem 2.7'deki gibi ifade edilmektedir:

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad 2.7$$

Denklem 2.7'de ΔV , uçlarda görülen termoelektrik gerilimi ifade etmektedir. Denklem 2.8'de E , elektrik alanı ve ∇T , sıcaklık değişiminin gradyanını belirtmektedir:

$$S = \frac{E}{\nabla T} \quad 2.8$$

İlgili malzemenin pratik olarak ölçülen mutlak ısııl gücü, Denklem 2.9'daki gibi ifade edilmektedir:

$$S_{ab} = S_b - S_a = \frac{\Delta V_b}{\Delta T} - \frac{\Delta V_a}{\Delta T} \quad 2.9$$

Ayrıca μ Thomson katsayısının ölçümünde malzeme ile ısııl güç arasındaki ilişki, Denklem 2.10'daki gibidir:

$$S = \int \frac{\mu}{T} \cdot dT \quad 2.10$$

Isıl güç, malzeme kalitesi açısından önemli bir parametredir ve malzemenin termoelektrik açıdan verimliliğini ifade etmektedir. Isıl gücün büyük olması, termoelektrik gerilimin ve verimin fazla olduğu anlamına gelmektedir. Süper iletkenlerde ısııl güç neredeyse sıfırdır ve taşınan yüklerde entropi oluşmamaktadır [33].

Siyah cisim ışıması

Günümüzde, cisim tarafından tüm dalga boylarında yapılan ışımların toplamının cismin sıcaklığına eşit olduğu bilgisi çerçevesinde, tüm cisimler tarafından bir elektromanyetik ışıma gerçekleştirildiği bilinmektedir. Bu kapsamda daha sıcak cisimler daha kısa dalga boylarında ışıma yaparken, daha soğuk cisimler daha uzun dalga boylarında ışıma yapmaktadır.

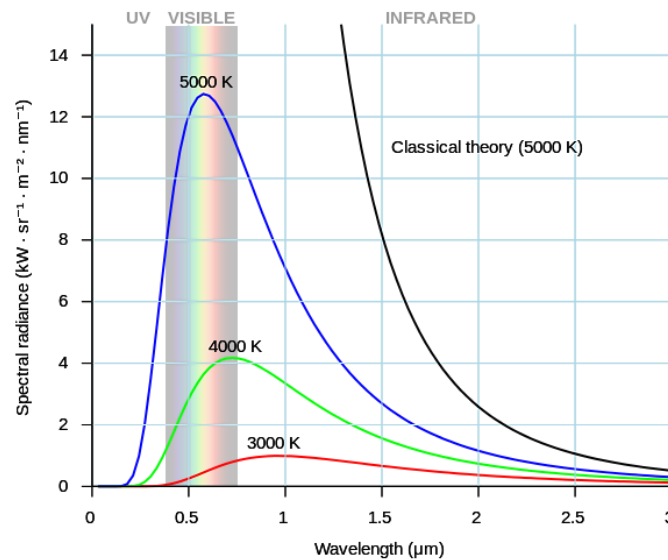
Bir cismin ışıma ısısı o cismin en fazla ışık verdiği dalga boyu ile doğrudan ilişkilidir. Belirli dalga boyunda yapılan ışıma yani yayılan ışık miktarı, yoğunluk olarak ifade edilmektedir. Bir cisim tarafından yapılan ışımanın yoğunluğu her dalga boyu için ayrı ayrı grafiklendirilirse, siyah cisim eğrisi denilen belirli eğriler oluşacaktır. Siyah cisim eğrisi, herhangi bir sıcaklık için her dalga boyunda ne kadar ışımanın yapıldığını (ışıma yoğunluğunu) ortaya koymaktadır. Bu eğride, ışıma yoğunluğunun en üst noktaya ulaştığı yani tepe yaptığı dalga boyu noktaları, cismin rengini belirlemektedir. Sıcaklığı yüksek cisimler için yoğunluğun tepe yaptığı noktalar kısa dalga boylarında (mavi-beyaz) iken, sıcaklığı düşük cisimler için yoğunluğun tepe yaptığı noktalar ise uzun dalga boylarında (kırmızı) görülmektedir. Bu sayede yıldız ya da galaksilerin sıcaklıkları, renkleri gözlemlenerek tahmin edilebilmektedir.

Cisimlerin tümü, maruz kaldıkları elektromanyetik radyasyonun bir kısmını soğururken bir kısmını yansıtmaktadır. Tüm dalga boylarında ve frekanslarda maruz kaldığı radyasyonun tamamını soğuran cisimler için kullanılan “siyah cisim” terimi ilk olarak 1860 yılında Gustav Kirchhoff tarafından ortaya atılmıştır.

Bir siyah cisim kaynağının tasarlanması çalışması, prensipte oldukça basittir. Opak, emici malzemeden yapılmış, bir izoterm boşluğundaki bir açıklığın radyasyon özellikleri, neredeyse bir siyah cismin özelliklerini temsil etmektedir. Bu prensibin bir radyasyon emicisinin tasarımına pratik bir uygulaması, yanlarından birinde küçük bir açıklık bulunan bir kutu ile gerçekleştirilebilmektedir. Delikten kutu içerisine giren herhangi bir radyasyon, tekrarlanan yansımalarla saçılır ve emilir, böylece sadece sonsuz küçük bir fraksiyon kutu içerisinde absorbe edilememiş olur. Diyafram açıklığında elde edilen siyahlık neredeyse bir siyah cisme eşittir ve tüm dalga boyları için tüm radyasyon neredeyse emilmiştir. Buna rağmen siyah cismin, yaydığı enerjinin büyük bir kısmının

kızılötesi spektrumunda olması ve bu aralığın insan gözü tarafından ayırt edilememesi sebebiyle oda sıcaklığında siyah cisim, siyah ve belirli bir formda görünür haldedir. Bu duruma dayanarak bir izotermal boşluğun düzgün bir sıcaklığa kadar uygun bir ısıtıcı ile ısıtılması sağlanırsa izotermal boşluk ortama, karakteristikleri yalnızca boşluğun sıcaklığı ile belirlenen siyah cisim radyasyonu üretmiş olur. Bu tür kavite radyatörleri, termografik enstrümanları referans sıcaklık standartlarında kalibre etmek için, laboratuvarlarda radyasyon kaynakları olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Siyah cisim radyasyonunun sıcaklığı 525°C'nin (977°F) üzerine çıkarsa, kaynak görünür olmaya başlar ve cisim artık siyah görünmez. Bu durumda radyatörün sıcaklığı arttıkça rengi de sırasıyla kırmızı-turuncu ve sarı olarak değişir. Sıcaklığa bağlı olarak oluşan bu değişime dayanarak özellikle ışık kaynaklarının yaydıkları ışığın renkleri için sıklıkla kullanılan renk sıcaklığı kavramı geliştirilmiştir. Renk sıcaklığı, bir siyah cismin aynı görünüme sahip olması için ısıtılması gereken sıcaklığı ifade etmektedir.

Siyah cisim radyasyonu, içerisinde ve çevresinde termodinamik dengede olan siyah bir cisim (ideal seviyede opak veya yansıtıcı olmayan) tarafından üretilen termal elektromanyetik radyasyondur. Teorik olarak sabit olduğu varsayılan cismin sıcaklığına bağlı bir şekilde oluşan spesifik bir spektrum ve ters ışınım yoğunluğuna sahiptir. Doğal siyah cisimlere örnek olarak verilebilecek kara delikler, düşük hacimlere ve yüksek kütlelere sahip olmaları sebebiyle maruz kaldıkları tüm radyasyonu soğurmakta, teorik olarak mükemmel siyah cisimler olarak kabul görmektedir.



Şekil 20. Siyah cisim radyasyon eğrisinin zirvesi sıcaklık azaldıkça, daha düşük yoğunluklara ve daha uzun dalga boylarına doğru hareket etmektedir.

Kızılötesi ışıınım ve siyah cisim ışıması ile ilgili olarak teorik temeli besleyen konular; “Planck Kanunu, Wien’in Yerinden Olma Yasası, Stefan-Boltzmann Kanunu ve siyah olmayan cisimlerin ışıınıını” olarak sıralanabilir.

Planck Kanunu

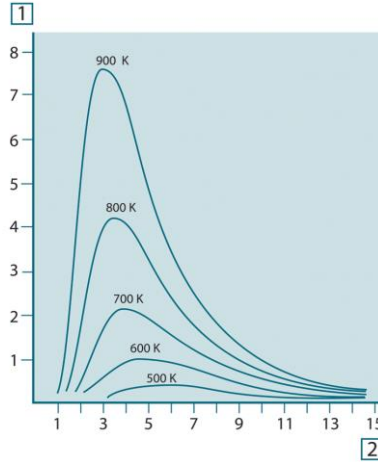
Max Planck, Denklem 2.11’deki formülü kullanarak bir siyah cisimden gelen radyasyonun spektral dağılımını tanımlayabilmiştir:

$$W_{\lambda b} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 (e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1)} \cdot 10^{-6} \quad 2.11$$

Bu tanımlamadaki değişkenler şu şekilde açıklanabilir;

- $W_{\lambda b}$, λ dalga boyu için siyah bir cisme ait spektral radyant yayılımını (Watt/m², μm)
- c , ışık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)
- h , Planck sabiti ($6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule sec.)
- k , Boltzmann sabiti ($1,4 \cdot 10^{-23}$ Joule/K)
- T , siyah cisim için sabit sıcaklık (K)
- λ , dalga boyu (μm)

Spektral yayılımın modellenenilmesi için oluşturulan Denklem 2.11’deki formülde, birim Watt/m², μm olarak ifade edildiğinden Denklem 2.11’in 10^{-6} ile çarpılması gerekmektedir. Planck’ın formülü, çeşitli sıcaklıklar için grafiksel olarak çizildiğinde, bir eğri ailesi oluşmaktadır. Herhangi bir belirli Planck eğrisine göre $\lambda=0$ ’da iken spektral yayılım teorik olarak sıfırdır. Daha sonra yayılımın dalga boyu, λ_{max} dalga boyuna doğru yükseldikçe spektral yayılım da teorik olarak hızla maksimuma yükselir. Maksimum nokta geçildikten sonra spektral yayılım çok uzun dalga boylarında tekrar sıfıra yaklaşır. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, maksimumun meydana geldiği dalga boyu da o kadar kısa olmaktadır [34].



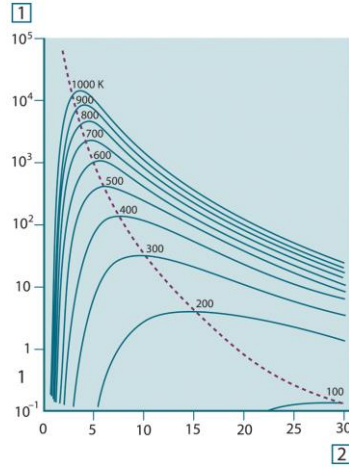
Şekil 21. Çeşitli mutlak sıcaklıklar için Planck yasasına göre siyah cisme ait spektral radyant yayılımı. 1: Spektral radyant yayılımı ($\text{W}/\text{cm}^2 \cdot 10^3 (\mu\text{m})$); 2: Dalga boyu (μm)

Wien'in Yerinden Olma Yasası

Planck'ın formülünü kullanılarak oluşturulan spektral radyant yayılımındaki maksimum dalga boyu değeri λ_{max} , Wien Yasası'na göre Denklem 2.12'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}] \quad 2.12$$

Wilhelm Wien tarafından geliştirilen Wien'in Yerinden Olma Yasası, ısı radyatörünün sıcaklığı arttıkça renklerin kırmızıdan turuncuya veya sarıya değiştiği ortak gözleminin matematiksel olarak ifade edilmesini sağlamaktadır. Böyle bir renk değişiminin olmasının temel sebebi, rengin dalga boyunun, λ_{max} için hesaplanan dalga boyuyla aynı değerlerde olmasıdır. Belirli bir siyah cismin sıcaklığına ait maksimum dalga boyu değerinin hesaplanması işlemi için Denklem 2.12'yi kullanmak doğru bir yaklaşım olacaktır. Örneğin; Mavimsi-beyaz ışık yayan ve çok sıcak bir yıldız olan Sirius, görünmez ultraviyole spektrumu içinde; $0,27\mu\text{m}$ dalga boyunda 11000°K 'lik maksimum spektral radyant değeri ile ışınlamaktadır. Ayrıca güneş, görünür ışık spektrumu içinde; $0,5\mu\text{m}$ dalga boyunda yaklaşık 6000°K 'lik maksimum spektral radyant değeri ile ışınlamaktadır. Bunlara ek olarak, oda sıcaklığında $9,7\mu\text{m}$ dalga boyunda 300°K 'lik maksimum spektral radyant değerine sahip bir ışınlam bulunurken, sıvı azot $38\mu\text{m}$ dalga boyunda 77°K 'lik maksimum spektral radyant değerine sahip, neredeyse ihmal edilebilecek miktarda bir kızılötesi ışınlam yapmaktadır [34].



Şekil 22. Spektral radyant yayılımı ($W/cm^2 (\mu m)$); 2: Dalga boyu (μm)

Stefan-Boltzmann Kanunu

Stefan-Boltzmann Kanunu, siyah bir cisimden yayılan gücü cismin sıcaklığı açısından tanımlamaktadır. Spesifik bir tanım yapılması gerekirse Stefan-Boltzmann Kanunu'nun, bir siyah cismin birim yüzey alanı başına düşen toplam enerjisinin, birim zaman başına tüm dalga boyları boyunca yayıldığını belirttiği söylenebilir. Cismin radyasyonu j^* , termodinamik sıcaklığın dördüncü kuvvetiyle T^4 , Denklem 2.13'te görüldüğü gibi doğrudan orantılıdır. Burada σ , Stefan-Boltzmann sabiti olarak bilinmektedir:

$$j^* = \sigma \cdot T^4 \quad 2.13$$

Stefan-Boltzmann sabiti σ Denklem 2.14'teki gibi şekilde ifade edilmektedir. Burada k Boltzmann sabiti, h Planck sabiti ve c ışığın boşluktaki hızı olarak bilinmektedir:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} = 5,670373 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4} \quad 2.14$$

Işıma (her bir steradian için metrekare başına watt), Denklem 2.15'teki formül ile hesaplanabilmektedir:

$$L = \frac{j^*}{\pi} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\pi} \quad 2.15$$

Maruz kaldığı radyasyonun tümünü absorbe edemeyen bir cisim (gri cisim), siyah bir cisimden daha az toplam enerji yaymaktadır ve $\epsilon < 1$ ile Denklem 2.16'daki gibi karakterize edilmektedir:

$$j^* = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 2.16$$

Cismin radyasyonu j^* , SI ölçüm standartlarına göre metrekare saniye başına Joule ya da

eşdeğeri kadar Watt olarak birimlendirilmektedir. Mutlak termodinamik sıcaklığın T, SI ölçüm standartlarına göre birimi Kelvin'dir. ε (emisivite), mükemmel bir siyah cisim için 1 olarak kabul edilirken daha gerçekçi bir yaklaşımda dalga boyuna bağlı olarak ifade edilmektedir. Bir cisimden yayılan toplam gücü hesaplayabilmek için Denklem 2.17'deki gibi, j^* termodinamik radyasyonunun yüzey alanı ile çarpılması gerekmektedir:

$$P = A \cdot j^* = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 2.17$$

Bunların dışında siyah cisim yüzeyinden yayılan ışıının yoğunluğu Planck Yasası ile Denklem 2.18'deki gibi ifade edilebilmektedir:

$$I(v, T) = \frac{2 \cdot h \cdot v^3}{c^2 \cdot e^{h \cdot v / (k \cdot T)} - c^2} \quad 2.18$$

Denklem 2.18'de verilen eşitlikte $I(v, T)$, T siyah cisim sıcaklığında ve bir v frekansında, birim yüz ölçüm alanı başına birim açı için düşen güç miktarını ifade etmektedir. Bunun yanında, eşitlikteki k Boltzmann sabiti, h Planck sabiti ve c ışığın boşluktaki hızı olarak bilinmektedir. Toplam enerji yoğunluğu U, Denklem 2.17 ve Denklem 2.18'deki eşitliklere benzer şekilde hesaplanabilecektir. Ancak integral işlemi tüm alanın üzerinde olduğundan, kosinüs açısının olmadığı durumlarda U (v, c) enerji akışını ve c boşluktaki ışık hızını ifade ederken U, enerji yoğunluğunu Denklem 2.19'daki şekilde ifade edilebilecektir:

$$U = \frac{1}{c} \int_0^\infty I(v, T) \cdot dv \cdot \int d\Omega \quad 2.19$$

$\int_0^{\pi/2} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta$ işlemi, $\int_0^\pi \sin\theta \cdot d\theta$ işlemi ile değiştirilirse enerji yoğunluğunun hesaplanabilmesi için Denklem 2.20 ortaya çıkacaktır:

$$U = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T^4}{c} \quad 2.20$$

Stefan-Boltzmann formülü kullanılarak insan vücudu tarafından yayılan güç, 300°K'lik sıcaklıkta ve dış yüzey alanı yaklaşık 2m² iken, yaklaşık 1kW olarak hesaplanabilmektedir. Bu güç kaybı, çevredeki yüzeylerden radyasyonun telafi edici olarak emilimi, vücut sıcaklığından çok farklı olmayan oda sıcaklıklarında bulunulması ve elbette kıyafetlerin kullanılması sayesinde sürdürülebilir olmaktadır.

Siyah olmayan cisimlerin ışıması

Bu aşamaya kadar bahsedilen siyah cisim radyasyonu ve siyah cisim radyatörleri haricindeki gerçek nesneler, genişletilmiş bir dalga boyu bölgesi üzerinde neredeyse hiçbir zaman bu yasalara tam olarak uymamaktadır. Günlük hayatta kullanılan gerçek cisimler, ancak belirli spektral aralıklarda siyah cisim davranışına yaklaşabilmektedir. Örneğin, belirli bir beyaz boya türü görünür ışık spektrumunda oldukça iyi bir şekilde beyaz görünebilmesine rağmen yaklaşık 2μm'de belirgin şekilde gri olur ve 3μm'nin ötesinde neredeyse siyahtır.

Gerçek bir nesnenin bir siyah cisim gibi hareket etmesini önleyebilecek üç işlem vardır. Bunlar; gelen radyasyonunun bir kısmının absorbe edilmesi (α), bir kısmının yansıtılması (ρ) ve bir kısmının iletilmesi (τ) şeklinde sıralanabilmektedir. Bu faktörlerin tümü bir şekilde dalga boyuna bağlı olduğundan, λ alt dizisi, tanımlarının spektral bağımlılığını ima etmek için kullanılır. Bu aşamada; spektral soğurma α_λ , bir cisim tarafından emilen spektral radyant gücün, gelen radyasyona oranını belirtirken spektral yansıtma ρ_λ , bir cisim tarafından yansıtılan spektral radyant gücün gelen radyasyona oranını ifade etmektedir. Ayrıca spektral geçirgenlik τ_λ , bir cisim üzerinden iletilen spektral radyant gücün gelen radyasyona oranını ifade etmektedir.

Bu üç faktörün toplamı Denklem 2.21'de de görüldüğü gibi her zaman herhangi bir dalga boyunda 1'e eşit olmalıdır:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad 2.21$$

Opak malzemeler için $\tau_\lambda=0$ olduğundan bu denklem, Denklem 2.22'deki gibi basitleşir:

$$\epsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad 2.22$$

Emisivite adı verilen başka bir faktör, belirli bir sıcaklıkta bir nesne tarafından üretilen bir siyah cismin radyant yayılımının ϵ kısmını tanımlamak için gereklidir. Bu kapsamda spektral radyant yayılım ϵ_λ , spektral radyant gücün bir nesneden aynı sıcaklık ve dalga boyunda bir siyah cisminkine oranını belirtmektedir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde bu, nesnenin spektral yayılımının bir siyah cismin spektral yayılımına oranı olarak Denklem 2.23'teki haliyle yazılabilir:

$$\epsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda 0}}{W_{\lambda b}} \quad 2.23$$

Genel olarak, spektral yayılımının dalga boyuna göre ayırt edilen üç tip radyasyon kaynağı vardır. Bunlar; siyah cisim $\epsilon\lambda=\epsilon=1$, gri cisim $\epsilon\lambda=\epsilon<1$ ve dalga boyuna göre değişen seçici bir radyatör olarak sıralanabilir.

Kirchhoff Yasası'na göre, herhangi bir malzeme için bir cismin spektral yayılımı ve spektral emilimi, herhangi bir sıcaklık ve dalga boyu değeri için Denklem 2.24'teki gibi eşit olmalıdır.

$$\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \quad 2.24$$

Buna ek olarak, opak bir malzeme için spektral emilim ve spektral yansıtma değerlerinin toplamı, Denklem 2.25 ve Denklem 2.26'da olduğu gibi 1'e eşit olmalıdır.

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad 2.25$$

$$\epsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad 2.26$$

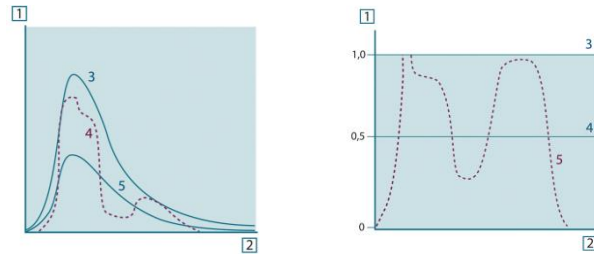
$\epsilon\lambda$ 'nın 0'a yakın olduğu mükemmel yansıtıcı malzemeler için spektral yansıtma değeri, Denklem 2.27'de olduğu gibi 1'e eşit olmalıdır.

$$\rho_{\lambda} = 1 \quad 2.27$$

Gri gövdeli bir radyatör için Stefan-Boltzmann formülü şu şekilde olmalıdır.

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 [Watt/m^2] \quad 2.28$$

Denklem 2.28, bir gri cismin toplam yayılım gücünün, aynı sıcaklıktaki siyah cisimle aynı olduğunu ve gri cisimden ϵ değerine orantılı olarak azaldığını belirtmektedir [34].



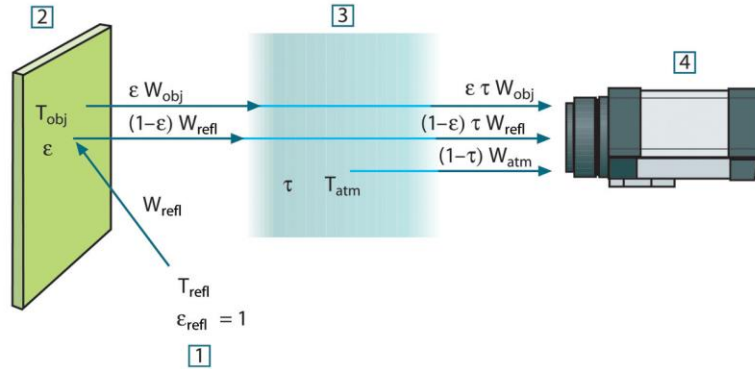
Şekil 23. Üç tip radyatörün spektral radyant yayılımı. 1: Spektral radyant yayılımı; 2: Dalga boyu; 3: Siyah cisim; 4: Seçici radyatör; 5: Gri gövde

2.2.2. Ölçüm yöntemleri ve mevcut uygulamalar

Daha önce de belirtildiği gibi, bir nesnenin ışınlamını algılarken sensör, sadece nesnenin kendisinden gelen radyasyona değil ayrıca nesne yüzeyi üzerinden yansıyan, ortamdan kaynaklı olarak var olan radyasyona da maruz kalmaktadır. Sensör tarafından algılanan radyasyon esasen, ölçüm ortamındaki atmosfer tarafından bir ölçüde zayıflatılmış olarak

sensör ön camına ulaşmaktadır. Bunlara ek olarak sensör tarafından algılanan, sensör ile nesne arasındaki atmosferin kendisinden kaynaklanan üçüncü bir radyasyon katkısı bulunmaktadır.

Bu aşamaya kadar bahsedilen ve kızılötesi ölçüm sistemlerinin oluşturulmasında dikkate alınması gereken etkenler Şekil 24’te görülmektedir. Bunların dışında; atmosferde güneş ışığının saçılması, görüş alanı dışındaki yoğun kaynaklarından dolayı oluşan radyasyon gibi Şekil 24’te gösterilmeyen fakat sistem tarafından gerçekleştirilen ölçüme az da olsa etki eden bazı etkenler de bulunmaktadır. Bu etkenler, kızılötesi ölçüm sistemi tarafından gerçekleştirilen ölçüme olan etkileri oldukça kısıtlı seviyelerde kaldığından çoğunlukla ihmal edilmektedir. Bazı hassas ölçümlerde bu durumların etkilerinin en aza indirilebilmesi için; ölçüm yönünü veya ölçüm konumunu değiştirmek, radyasyon kaynaklarından soyutlanmış bir ortamda ölçüm yapmak gibi bazı önlemler alınmaktadır. Bütün bunlar dikkate alındığında, Şekil 24’teki gösterimi kullanarak kalibre edilmiş sensör çıkışından, nesne sıcaklığının hesaplanması için çok temel bir formül elde edilebilmektedir.



Şekil 24. Genel termografik ölçüm durumunun şematik bir temsili. 1: Çevre; 2: Nesne; 3: Atmosfer; 4: Kamera

Siyah bir cisim olarak nitelendirilen bir sıcaklık kaynağı tarafından oluşturulan radyasyonun gücünün (W_{source}), belirli bir mesafede (T_{source}), girişle orantılı olarak oluşturduğu sensör çıkış sinyali (U_{source}) için oluşturulacak eşitlik, Denklem 2.29’daki gibi olacaktır. Eşitliğe Denklem 2.29’daki haliyle, çıkış sinyaline etki eden diğer parametrelerin de eklenebilmesi için C sabiti dahil edilmiştir.

$$U_{source} = C \cdot W_{source} \cdot T_{source} \quad 2.29$$

Eğer kaynak bir gri cisim ise kaynaktan kaynaklanan radyasyon gücünün bir emisyon katsayısı (ϵ) ile çarpılması gerekecektir. Bu durumda eşitlikteki “ W_{source} ”, artık “ $\epsilon \cdot W_{source}$ ” olarak değiştirilmelidir. Ancak kaynaktaki emisyon durumunun, tek bir emisyon katsayısı (ϵ) ile ifade edilmesi yeterli olmayabilir. Bunun gibi durumlar 3 farklı senaryoda farklı eşitlikler ile ifade edilebilmektedir [35].

1. senaryoda, hedef nesnenin sıcaklığı T_{obj} iken nesneden kaynaklanan emisyon = $\epsilon \cdot \tau \cdot W_{obj}$ şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada ϵ nesnenin emisyonu iken ve τ atmosferin iletimidir.

2. senaryoda ortam kaynaklarının T_{refl} sıcaklığına sahip olduğu anda ölçüm alınırken ortam kaynaklarından yansıyan emisyon = $(1-\epsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl}$ şeklinde ifade edilebilmektedir. Eşitlikteki $(1-\epsilon)$, nesnenin yansımasıdır. Ayrıca T_{refl} sıcaklığının, nesne yüzeyi üzerindeki bir noktadan görülen bir yarım küre içindeki tüm yayıcı yüzeyler için aynı değerde olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım esasen, uygulanabilir bir formül elde etmek için gerekli bir sadeleştirmedir ve T_{refl} 'e, en azından teorik olarak, karmaşık bir çevrenin etkin sıcaklığını temsil eden bir değer verilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu durumda çevre için emisyonun 1 olduğu varsayılmaktadır. Bu durum, Kirchhoff Yasası'na göre de doğru bir varsayım olan “çevrede bulunan yüzeylere çarpan tüm radyasyon en sonunda aynı yüzeyler tarafından emilecektir” ifadesine de uygun düşmektedir.

3. senaryoda, normal şartlar altında etken olarak T_{atm} ’lik bir sıcaklığa sahip atmosferden kaynaklanan emisyon = $(1-\tau) \cdot \tau \cdot W_{atm}$ şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada $(1-\tau)$ atmosferin yayılmasıdır.

Bu 3 senaryo düşünüldüğünde sensör tarafından maruz kalınan toplam radyasyon gücü Denklem 2.30’daki gibi ifade edilebilmektedir.

$$W_{tot} = \epsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad 2.30$$

Denklem 2.30’daki her bir terimin Denklem 2.29’daki gibi C sabiti ile çarpılması ve CW şeklindeki ifadenin U ile değiştirilmesi sonucunda Denklem 2.31’deki eşitlik elde edilmektedir.

$$U_{tot} = \varepsilon\tau.U_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau.U_{refl} + (1 - \tau).U_{atm} \quad 2.31$$

U_{obj} için Denklem 2.31 çözülürse Denklem 2.32'deki ifade elde edilmektedir.

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau}.U_{tot} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}.U_{refl} - \frac{1 - \tau}{\varepsilon\tau}.U_{atm} \quad 2.32$$

Denklem 2.32'de bulunan değişkenlerin ne amaçla kullanıldığına dair bilgiler aşağıdaki haliyle sıralanabilir.

- U_{obj} , Siyah cismin sıcaklığına göre hesaplanmış sensör çıkışı
- U_{tot} , Asıl durum için ölçülen sıcaklığa ait sensör çıkışı
- U_{refl} , Teorideki siyah cisim sıcaklığına göre kalibre sensör çıkışı
- U_{atm} , Teorideki atmosfer sıcaklığına göre kalibre sensör çıkışı

Denklem 2.30, Denklem 2.31 ve Denklem 2.32'deki eşitlikler dikkate alındığında, bu yöntem ile düşük sıcaklıkların düşük toleranslarda ölçümünün, yüksek sıcaklıkların düşük toleranslarda ölçümünden daha zor olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebinin hem ortamdan kaynaklı hem de ortamdaki diğer nesnelerden kaynaklı oluşan “gürültü” olarak nitelendirilebilerek radyasyonun ölçüme etkisinin, hedef nesneninkine yakın olabilmesidir. Bu ölçüm zorluğu, hedef nesnenin yüzeyinden kaynaklı olarak sahip olduğu emisyon oranının düşük olması durumunda daha da artmaktadır [35].

2.2.2.1. Kızılötesi dedektörler

Optik, nanoteknoloji ve yarı iletken alanlarındaki çalışmalar ile birlikte gelişimi hızlanan kızılötesi sensörler; farklı dalga boylarında çalışma, ölçüm hassasiyetlerinin artırılması ve maliyetlerin azaltılması ile beraber pek çok yeni sektörde kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler ışığında farklı sektörler için uygulamaya özel sensörler geliştirilmiş ve piyasaya sunulmuştur. Günümüzde çalışma prensibi, yapım malzemesi ve kullanım yöntemi gibi özelliklere bağlı olarak farklı ayrımları yapılan kızılötesi tabanlı dedektörler temelde, termal dedektörler ve foton dedektörleri olarak ikiye ayrılabilir; termopiller, pnömatik dedektörler, piroelektrik dedektörler, bolometreler, foton dedektörleri ve qwip dedektörler olarak kategorilere ayrılmaktadır [36].

Termal dedektörler

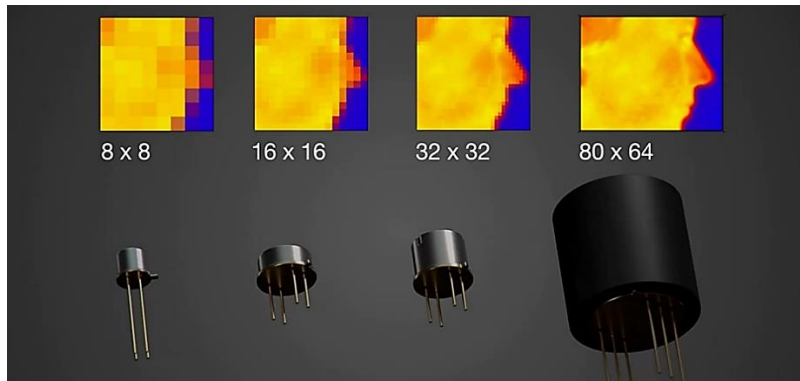
Termal dedektörlerde ölçüm işleminin temeli, ölçümü yapılacak kaynaktan gelen

kızılötesi radyasyonun optik mercekler aracılığı ile dedektöre düşürülüp dedektör sıcaklığının değiştirilmesi ve değişen dedektör sıcaklığının da ölçümü yapılabilecek bazı parametrelerin değişimine neden olmasına dayanmaktadır. Bu durumun en yaygın örneklerinden biri yarı iletkenlerin elektriksel direnç değişimleridir. Termal dedektörlerin çalışma prensibine göre termopiller, pnömatik dedektörler, piroelektrik dedektörler, bolometreler şeklinde farklı türleri bulunmaktadır.

Termopiller

En eski kızılötesi dedektör türlerinden biri olarak ortaya çıkan termopiller, civa göstergeli termometrelerden sonraki ilk gelişme olarak öne çıkmış ve sıcaklık ölçümü amacıyla geliştirilerek kullanılabilir hale getirilmiştir [37]. Termopiller, iki farklı metalik malzemenin birbiriyle bir çift oluşturacak şekilde birleştirilip iki ucu farklı sıcaklıkta tutulması koşuluyla, birleşen uçtaki sıcaklık değişimine bağlı olarak diğer ucta bir gerilim düşümü oluşmasını temel almaktadır. Esasen ısı enerjisiyle elektriksel enerji oluşumu sağlanmaktadır. Termal duyarlılığın yüksek olduğu termopiller ise ısı çift şeklinde birleştirilen yapıların seri olarak birbirlerine bağlanması ile birlikte oluşturulmaktadır.

Termopil sensörleri, çok pikseli sensörler ve tek pikseli sensörler olarak iki temel kategoriye ayırmak mümkündür. Termal kameraların örnek olarak verilebileceği çok pikseli sensörler, daha çok termal görüntüleme amacıyla kullanılırken, kızılötesi dedektörlerin örnek olarak verilebileceği tek pikseli sensörler daha çok gaz algılama, sıcaklık algılama ve hareket algılama gibi temel amaçlar için kullanılmaktadır.



Şekil 25. Piksel sayısına göre termopil sensörler

Pnömatik dedektörler

Hava basıncı temelli olarak çalışan bu tür dedektörler genellikle, golay hücresi ve bir

metal film ile temas halindeki küçük hacimli bir gaz odacığından oluşmaktadır. Çalışırken, metal film ışığı soğurarak ısınmakta ve gaz odacığındaki gazı ısıtmaktadır. Sabit hacimli bir ortam bulunduğundan artan sıcaklık gazın basıncını arttırmakta ve meydana gelen bu basınç değişimi, golay hücresi içerisinde bulunan ve optik yükseltecin yolunu oluşturan aynanın açısını değiştirerek algılama işlemini sağlamaktadır [38].

Piroelektrik dedektörler

Temel olarak ferroelektrik bir malzeme üzerine kaplanmış elektrotlar ve yüksek değerli bir yüklenme direncinden oluşan piroelektrik dedektörler, maruz kaldıkları sıcaklıklara bağlı olarak farklı şekilde kutuplanabilmektedirler. Ferroelektrik malzemedeki bu kutuplanma işlemi ve kutuplanmanın değişimi, sıcaklık değişimine bağlı olarak gerçekleşmekte, yüzey yükünün zamanla değişerek bir elektrik akımı oluşturmaya sebep olmaktadır [39]. Değişimi temel alan bu yöntemde sıcaklığın sabit olması halinde ise bir akım akışı oluşmayacağından ölçüm gerçekleştirilemeyecektir.

Bolometreler

Wheatstone Köprüsü'nü oluşturan dirençlerden birinin termal radyasyona duyarlı bir malzeme ile değiştirilmesini temel alan bolometrelerin ilk örneği, 1880 yılında Amerikalı bilim insanı Samuel Pierpont Langley tarafından geliştirilmiştir ve sıcaklığa bağlı olarak elektriksel direnci değişen bir termal dedektör çeşidi olarak halen kullanılmaktadır [40]. Günümüzde yarı iletken ya da süper iletken malzemelerin kullanıldığı bolometreler, düşük sıcaklıklar için de yüksek doğruluklarda ölçüm yapabilmektedir.

Foton dedektörleri

Kuantum dedektörler olarak da bilinen foton dedektörleri, vericiden yayılan ışınımı spektrum, duyarlılık ve hız gibi parametrelere bağlı bir şekilde algılayarak elektriksel bir sinyale dönüştürmektedir. Foton dedektörlerindeki algılama işlemi, dedektördeki elektronların soğurulan ışınım ile daha üst seviyelere uyarılarak, eski konumlarına dönmenden önce algılanması sayesinde gerçekleşmektedir. Bu soğurulma işlemi bir dizi kuantum olayı ile bağlantılı olarak meydana gelmektedir. Bu sebeple de fotonlar ile ilgili bütün işlemler, olayı başlatacak belirli minimum miktardaki bir foton enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Tek bir foton için bu enerji, $E=h.c/\lambda$ eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

Geçmişten beri yürütölen çalışmalar sayesinde günümüzde insanoğlu, farklı kıızılötesi dedektörler ile bugün bilinen sıcaklık ölçeğinin neredeyse tamamını ölçümleyebilmektedir.



3. ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI

Tez çalışması kapsamında uygulamaya özel olarak oluşturulacak olan ölçüm sisteminin tasarımı için öncelikle; tasarım aşamasında dikkate alınması gereken kriterler, yapılan araştırmalar sonucu belirlenmiştir. Sonra, bu kriterler dikkate alınarak uygulamaya entegre edilebilecek sensörler tedarik edilmiş, belirli testlere tabi tutulmuş ve yalnızca termopil sensör grubu çekirdek performansları dikkate alınarak uygulamada kullanılacak olan sensör belirlenmiştir. Belirlenen sensörün performansını arttırmak ve karşılaşılabilecek muhtemel diğer problemlerin etkisini azaltmak amacıyla bir elektronik devre kartı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sensör grubu diğer bileşenleri için bir üç boyutlu kılıf tasarımı yapılmıştır. Veri toplamak için oluşturulan deney setine uygun olacak şekilde yazılım geliştirilmiş ve tasarım işlemleri tamamlanmıştır. Uygulamaya özel olarak gerçekleştirilen bu ölçüm sistemi tasarımı, veri toplama işlemleri sonucunda ortaya çıkarılacak olan görev algoritması ile donatıldıktan sonra kullanıma hazır hale getirilecektir.

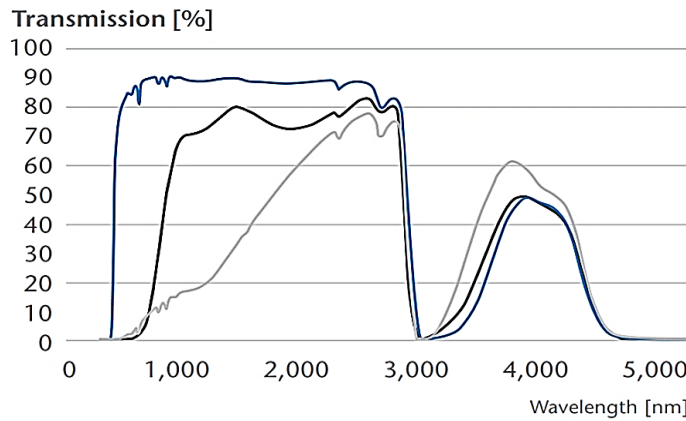
3.1. Tasarımda Dikkate Alınacak Kriterler

Oluşturulması düşünülen ölçüm sisteminde ölçüm doğruluğunun artırılabilmesi için, temel alınacak algılama yöntemine ait kritik noktaların tasarım öncesinde netleştirilmesi gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda, hedef uygulama için bu kritik noktalar aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

- Camın optik karakteristiği, cam yüzey sıcaklığı ve bu parametreler için gerekli kompanzasyon algoritması
- Termal emisyon, kızılötesi soğurganlık, emisivite problemi ve gerekli kompanzasyon algoritması
- Sensör grubu bileşenleri kılıf sıcaklığı ve gerekli kompanzasyon algoritması
- Sensör görüş alanı
- Sensör ölçüm mesafesi
- Atmosferik koşullar
- Elektriksel gürültü
- Diğer etkiler

3.1.1. Camların optik karakteristikleri

Optik anlamda farklı dalga boylarındaki sinyaller için geçirgenliğe sahip pek çok malzeme, günümüzde farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Bu malzemelerden biri de camdır. Günümüz endüstrisinde cam üretimi; bazı fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri baz alınarak seçilip hammadde olarak kullanılan kuvars (silika), soda ve kireç (soda, silikanın daha düşük sıcaklıklarda ergimesine yol açarken kireç, camın daha yüksek kalitede üretilmesini sağlamaktadır) ana karışımına farklı özellikler kazandırmak amacıyla, metal oksitler ilave edilerek gerçekleştirilmektedir. Örneğin bu ana karışıma, kurşun ilave edilirse ortaya çıkacak cam daha parlak ve saydam olacakken, kobalt ilave edilirse ortaya çıkacak cam daha mavimsi, demir ilave edilirse ortaya çıkacak cam daha sarımsı bir renge sahip olacaktır. Ayrıca ana karışımda silika kullanmak yerine borosilikat kullanılırsa ortaya çıkacak cam ısıya karşı normalden daha dayanıklı olacaktır. Bahsedilen bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda camlar hem üretim metoduna hem de katkılандırıldığı maddelere bağlı olarak, farklı dalga boylarındaki ışınım için farklı geçirgenlik seviyelerine sahip olmaktadır. Uygulamaya özel olarak kullanılan camın optik karakteristikleri Şekil 26'daki gibidir.



Şekil 26. Uygulamada kullanılan cama ait optik geçirgenlik karakteristiği

Aynı cama ait termal iletkenlik seviyesi DIN 51936, ASTM 1461-01 standartlarına göre 100°C için 1,5-1,7 W/(m.K) seviyelerindedir.

3.1.2. Emisivite problemi, termal emisyon ve soğurganlık kavramları

Cisimlerin sıcaklıklarına bağlı olarak oluşturdıkları kızılötesi ışınım seviyeleri yüzey yapıları ile ilişkili olarak değişmektedir. Bu ışınımın kızılötesi sensörler tarafından

algılanması söz konusu olduğunda bu değişime ortamdan kaynaklı yansımalar, sensör filtresinin soğurganlık seviyesi ve sensör tarafından ortamdan kaynaklı olarak algılanan kızılötesi ışıının da eklenmektedir. Sağlıklı bir ölçüm için, ölçüm doğruluğunu olumsuz yönde etkileyen bu durumların çeşitli yöntemlerle tolere edilebiliyor olması gerekmektedir.

3.1.2.1. Emisivite problemi

Emisivite

Bir malzemeye ait yüzeyin emisivitesi, termal radyasyon bakımından enerji yaymadaki etkinliği olarak tanımlanmaktadır. Elektromanyetik bir radyasyon tipi olan termal radyasyon hem insan gözü ile görülebilen hem de insan gözü ile görülemeyen kızılötesi radyasyonu içermektedir.

Nicelik olarak emisivite, Stefan-Boltzmann Kanunu'ndaki gibi işlem yapılacak yüzeyin oluşturduğu termal ışımanın, aynı sıcaklıkta ideal bir siyah cismin yüzeyinin oluşturduğu termal ışımaya olan oranı olarak bilinmektedir. Bu oran 0 ile 1 arasında değişmektedir ve ideal bir siyah cisim için oda koşullarında 1 olarak kabul edilmektedir. Bu koşullarda ideal bir siyah cisim için 1 olarak kabul edilen ışıma, metrekare başına yaklaşık olarak 448W olarak ölçümlenmiştir. Dünyada var olan tüm gerçek nesnelerin 1'den daha düşük bir seviyede termal ışıma oluşturduğu tahmin edilmektedir. Hedef nesnenin karakteristik özelliği ve yüzeyin enerji yayılım kabiliyeti sebebiyle farklı malzemeler farklı emisivite değerlerine sahiptir. Bu durum, nesne yüzeyinin üretim ve işleme yöntemlerine bağlı olarak değişmektedir.

Yarım küre emisivitesi

ε ile simgelenen emisivite, yarım daire için Denklem 3.1'deki gibi bir matematiksel ifade ile hesaplanabilmektedir. Verilen matematiksel ifadede Me , yüzeyin radyantını ifade ederken Me° , o yüzeyle aynı sıcaklıktaki siyah bir cismin radyantını ifade etmektedir:

$$\varepsilon = \frac{Me}{Me^\circ} \quad 3.1$$

Spektral yarım küre emisivitesi

ε_λ belirli frekanstaki spektral yarım kürenin emisivitesini belirtirken ε_λ , belirli dalga

boyundaki spektral yarım kürenin emisivitesini belirtmektedir. Bu değişkenlerin hesaplanmasındaki matematiksel ifadeler Denklem 3.2 ve 3.3'teki gibidir:

$$\varepsilon_v = \frac{Me, v}{Me^\circ, v} \quad 3.2$$

$$\varepsilon_\lambda = \frac{Me, \lambda}{Me^\circ, \lambda} \quad 3.3$$

Denklem 3.2 ve 3.3'teki matematiksel ifadelerde bulunan Me, v , yüzeyin o frekanstaki spektral radyant durumunu Me°, v , o frekanstaki o yüzeyle aynı sıcaklıkta olan siyah bir cismin spektral radyant durumunu Me, λ , bu yüzeyin belirli dalga boyundaki spektral radyant durumunu Me°, λ , o yüzeyle aynı sıcaklıkta olan siyah bir cismin belirli dalga boyundaki spektral radyant durumunu ifade etmektedir.

Yönlü emisivite

ε_Ω ile simgelenen doğrusal emisivite, Denklem 3.4'teki matematiksel ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$\varepsilon_\Omega = \frac{Le, \Omega}{Le^\circ, \Omega} \quad 3.4$$

Denklem 3.4'teki matematiksel ifadelerde bulunan Le, Ω , yüzeyin ışınlamını Le°, Ω , o yüzeyle aynı sıcaklıktaki siyah bir cismin yüzeyinin ışınlamını ifade etmektedir.

Spektral yönlü emisivitesi

$\varepsilon_{v, \Omega}$ belirli frekanstaki spektral yarım küre emisivitesini belirtirken $\varepsilon_{\lambda, \Omega}$, belirli dalga boyundaki spektral yarım küre emisivitesini belirtmektedir. Bu değişkenlerin hesaplanmasındaki matematiksel ifadeler Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'daki gibidir:

$$\varepsilon_{v, \Omega} = \frac{Le, \Omega, v}{Le^\circ, \Omega, v} \quad 3.5$$

$$\varepsilon_{\lambda, \Omega} = \frac{Le, \Omega, \lambda}{Le^\circ, \Omega, \lambda} \quad 3.6$$

Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'daki matematiksel ifadelerde bulunan Le, Ω, v , yüzeyin o frekanstaki spektral ışınlam durumunu Le°, Ω, v , o frekanstaki o yüzeyle aynı sıcaklıkta olan siyah bir cismin spektral ışınlam durumunu Le, Ω, λ , bu yüzeyin belirli dalga boyundaki spektral ışınlam durumunu $Le^\circ, \Omega, \lambda$, o yüzeyle aynı sıcaklıkta olan siyah bir cismin belirli dalga boyundaki spektral ışınlam durumunu ifade etmektedir.

3.1.2.2. Termal emisyon ve soğurganlık

Isıl yayılım olarak da nitelendirilen termal emisyon, ısı transferinde ısıнын bir malzeme üzerinde ne kadar hızlı yayıldığını gösteren bir kavram olarak bilinmektedir. Uygulama özelindeki termal emisyon kavramı için, belirli bir sıcaklığı olan her cismin bir kızılötesi ışınım yaptığı kabul edilirse sensör tarafından yapılan ölçümlerde, ölçüm sisteminde kullanılacak olan camdan ve ortamda bulunarak ısı yayılım yapan diğer cisimlerden kaynaklı olarak belirli bir etki gözlemlenecektir. Bu etkiyi en aza indirebilmek için tasarlanacak sistemde, iki farklı önlem alınmıştır. Bunlardan ilki, bahsedilen bu kızılötesi ışınımın büyük bir kısmının cam yüzeyden kaynaklanması sebebiyle, cam yüzey tarafından oluşturulan kızılötesi ışınımı tahmin ederek ölçüm algoritmasına ekleyebilmek amacıyla, mevcut cam yüzey üzerine harici bir sıcaklık sensörü eklenmesi ve bu sensörden alınan veriler ile gerekli kompanzasyon işleminin gerçekleştirilmesidir. İkincisi ise sensör seçimi esnasında, uygulamaya uygun olacak bir dahili filtre grubu barındıran sensörlerin tercih edilmesidir. Yani bu kapsamda sensör grubu tercih işlemi yapılırken, sensör performansları ve diğer sensör parametrelerinin yanında, sensör dahilindeki filtre grubunun, kızılötesi dalga boylarındaki geçirgenlik seviyelerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Sensör dahilinde incelenecek filtre grubunda, termopil sensör grubu üzerine konumlandırılmış belirli dalga boyları için soğurma işlemini gerçekleştiren bir adet soğurucu ve yine belirli dalga boyları için filtreleme işlemini gerçekleştiren bir adet optik kızılötesi filtre yapısı bulunmaktadır. Bahsedilen duruma ait ölçüm sonuçları tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde paylaşılacaktır.



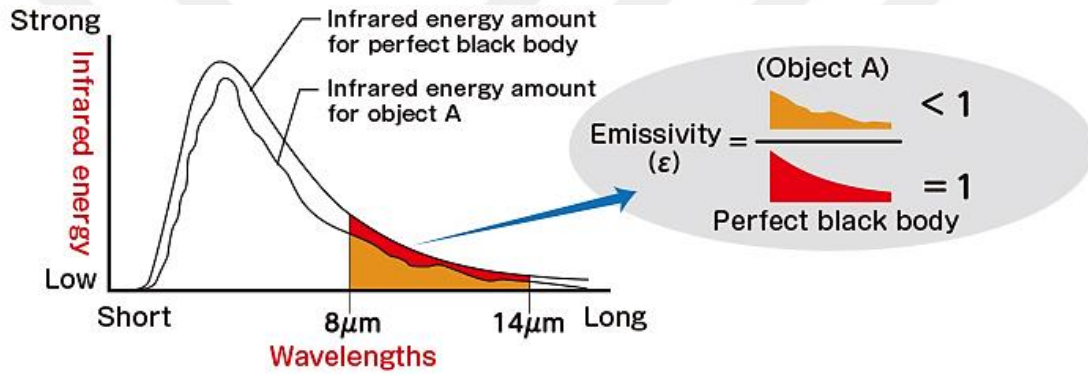
Şekil 27. Çeşitli tiplerde optik filtreler

Termal emisyon

Termal emisyon (veya emisyon gücü), tüm olası dalga boyları için birim zaman başına birim alan için yayılan toplam termal enerji olarak ifade edilmektedir. Bir cismin belirli

bir sıcaklıktaki emisivitesi, bir cismin toplam yayılan termal enerjisinin, o sıcaklıkta tamamen siyah bir cisim tarafından yayılan termal enerjisine oranı olarak ifade edilmektedir. Emisivite terimi genel olarak gümüş gibi basit, homojen bir yüzeyi tanımlamak için kullanılmaktadır. Benzer terimler olan emisyon ve termal emisyon, yalıtım ürünleri gibi karmaşık yüzeylerde termal radyasyon ölçümlerini tanımlamak için kullanılmaktadır.

Planck Yasası'na göre, yayılan toplam enerji sıcaklıkla artarken emisyon spektrumunun zirvesi daha kısa dalga boylarında bulunmaktadır. Daha kısa dalga boylarında yayılan enerji, sıcaklıkla daha hızlı artmaktadır. Örneğin, 1273°K'de termal dengede ideal bir siyah cisim, enerjisinin %97'sini 14µm altındaki dalga boylarında yaymaktadır.



Şekil 28. Termal enerji yayılımına göre emisivite değerleri

Soğurganlık

Bir yüzeyin enerji yayılım kabiliyetini, olay radyasyonunun soğurulmasıyla (yüzeyin emilimi) ilişkilendiren termal radyasyon yasası Gustav Kirchhoff tarafından 1859 yılında literatüre aktarılmıştır. Kirchhoff Kanunu, emisyon oranlarının 1'i hangi sebeple geçemediğini, radyasyonun maksimum soğurulmasının siyah bir cisim tarafından tamamen emilmesine karşılık geleceği mantığına dayandırarak açıklamaktadır. Bu söylem, ışığı yansıtan ayna benzeri metalik yüzeylerin, yansıyan ışığın soğurulamaması sebebiyle düşük emisiyona sahip olacağını da desteklemektedir. Emisivite ve soğurulma ilişkisine örnek olarak, siyah kurum ve parlak metal bir yüzeyin emisiviteleri verilebilmektedir. Siyah kurum, termal radyasyonu çok iyi soğurmakta olduğundan 0,97'ye kadar büyük bir emisiviteye sahiptir ve dolayısıyla ideal bir siyah cisme benzemektedir. Ancak parlak ve gümüş renkli bir yüzey oda sıcaklığında yaklaşık 0,02 emisiviteye sahiptir. Ayrıca çıplak ve parlatılmış metaller haricinde göz tarafından parlak

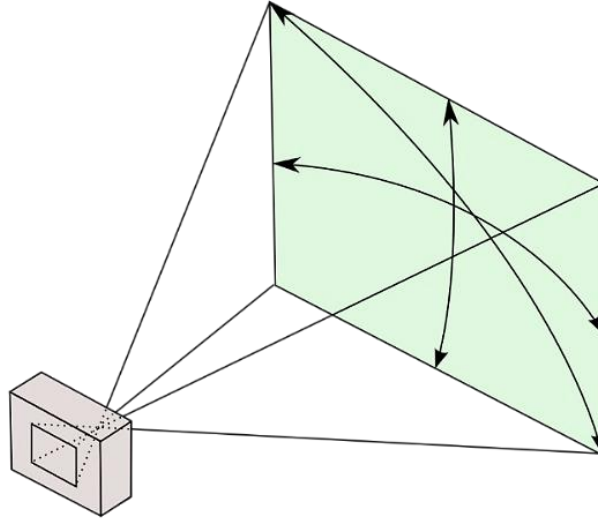
olarak görülen yüzeylerin, oda sıcaklığındaki emisivite değerlerinin düşük olacağı genellemesi doğru değildir. Örneğin beyaz boya, görünür ışığı daha az soğurmasına rağmen $10 \cdot 10^{-6}$ metre dalga boyundaki kızılötesi ışınları daha fazla soğurmaktadır. Bu sebeple de yüksek bir emisivite değerine sahiptir. Metallerin birçoğu ile cam olmayan yüzeylerin emisivitesi %90'ın üzerindedir ve bu sebeple bu tür nesnelerin IR sensörler açısından ölçüm doğruluğu yüksektir. Bunun dışında cam ve metal gibi yansıtıcı yüzeye sahip nesnelerin düşük emisiviteye sahip olması sebebiyle IR sensörler açısından ölçüm doğruluğu düşüktür.

Material	ε
Aluminum foil	0.04
Asbestos board	0.96
Asbestos paper	0.93
Asphalt (paving)	0.97
Brass (hard rolled—polished with lines)	0.04
(somewhat attacked)	0.04
Brick (red—rough)	0.93
Brick (silica—unglazed rough)	0.80
Carbon (T—carbon 0.9% ash)	0.81
Concrete	0.94
Copper (plate heavily oxidized)	0.78
Frozen soil	0.93
Glass (smooth)	0.94
Gold (pure highly polished)	0.02
Granite (polished)	0.85
Ice	0.97
Marble (light gray polished)	0.93
Paper (black tar)	0.93
Paper (white)	0.95
Plaster (white)	0.91
Plywood	0.96
Tin (bright tinned iron sheet)	0.04
Water	0.95
Wood (freshly planned)	0.90

Şekil 29. Bazı malzemelere ait emisivite değerleri

3.1.3. Görüş alanı

Uzaktan algılamada herhangi bir zamanda, bir algılayıcı elemanın (bir piksel sensörünün) elektromanyetik radyasyona duyarlı olduğu açı tarafından taranan alan, görüş alanı (FOV) olarak nitelendirilmektedir. Bu alan uzaklığa da bağlı olarak, sensör tarafından gözlemlenebilen sınırlı bölgeleri ifade etmektedir. Bu durum optik cihazlar veya sensörler söz konusu olduğunda, algılayıcının elektromanyetik ışınımına belirli eksenlerde duyarlı olduğu katı bir açı olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 30. Görüş alanı yatay, dikey veya çapraz olarak ölçülebilir.

İnsan görüşü bağlamında da ifade edilen görüş alanı terimi, tipik olarak sadece gözlükler veya sanal gerçeklik gözlükleri takarken olduğu gibi harici cihaz tarafından görülebilen bir kısıtlama alanı anlamında da kullanılmaktadır. Gözün retinasının bir sensör olarak çalışan analogisinin üzerine bu tanım daraltılırsa, insanlardaki ve hayvanlardaki karşılık gelen anlatım, gözlerin sabitlenmesi sırasındaki görsel açı derecelerinin sayısı olacaktır.

3.1.3.1. Dönüşümler

Pek çok optik cihaz ya da alette, görüş alanı olarak iki farklı durum nitelendirilmektedir. Bunlardan ilki olan açısal görüş alanı, paralel eksendeki alanı derece cinsinden ayırırken, ikincisi olan doğrusal görüş alanı, dik eksendeki alanı uzunlukların bir oranı olarak metre cinsinden ayırmaktadır. Bu duruma örnek olarak kataloglarda da yer alan; 5,8° (açısal) görüş alanına sahip bir dürbünün metre başına 102mm'lik (doğrusal) görüş alanına sahip olduğu bilgisi verilebilmektedir.

Görüş alanı yaklaşık olarak 10 dereceden az olduğu sürece Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'deki yaklaşım formülleri, doğrusal ve açısal görüş alanı arasında bir dönüşüme izin vermektedir.

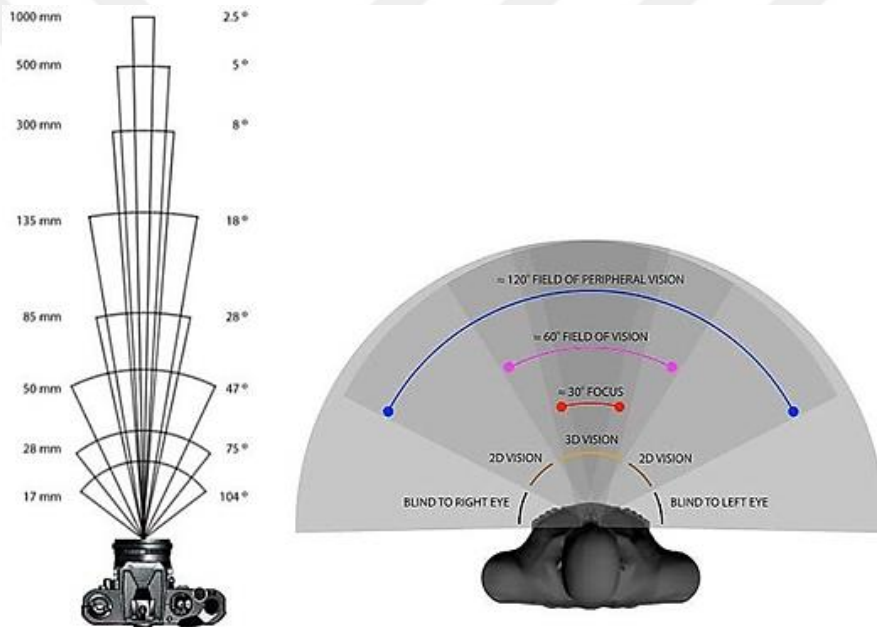
$$A \approx \frac{360^\circ \cdot M}{2 \cdot \pi \cdot 1000} \approx 0,0573 \cdot M \quad 3.7$$

$$M \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot A}{360^\circ} \approx 17,45 \cdot A \quad 3.8$$

Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'deki yaklaşım formüllerinde A , açısal görüş alanını derece cinsinden ifade ederken M doğrusal görüş alanını mm cinsinden ifade etmektedir.

3.1.3.2. Makineler için görünüm

Makine görüşünde lens odak uzaklığı ve görüntü sensörü boyutu, görüş alanı ile çalışma mesafesi arasındaki sabit ilişkiyi oluşturmaktadır. Görüş alanı, kameranın görüntüleyicisinde yakalanan denetim alanını ifade etmektedir. Görüş alanı ile kameranın görüntüleyicisinin boyutu, görüntü çözünürlüğünü doğrudan etkilemekte ve bu durum, nesnenin makinedeki görüntüsü ile gerçekteki görüntüsü arasındaki doğruluk ilişkisinde belirleyici olmaktadır. Çalışma mesafesi lensin arkası ile hedef nesne arasındaki mesafeyi belirtmektedir.



Şekil 31. Görüş alanının gösterimi

3.1.4. Ölçüm mesafesi

Normal şartlar altında, ölçümü yapılacak nesne ile sensörün ön merceği arasındaki uzaklık arttıkça sensör ön merceğine ulaşan kızılötesi ışınım yoğunluğu azalmaktadır. Ancak farklı üreticiler tarafından üretilen sensörlerin MEMS mimari yapılarına ve mercek odaklamalarına bağlı olarak, farklı mesafelerde ölçüm toleransları bulunmaktadır. En uygun ölçüm mesafesi, ampirik olarak ya da üretici tarafından sağlanacak bilgiye göre elde edilebilmektedir.

Ölçüm sistemine bu durumun algoritmik olarak eklenmesi ile birlikte, aşağıdaki iki olgu da telafi edilebilir hale gelecektir.

- Ölçümü yapılacak nesneden gelen radyasyonun mesafeye bağlı olarak, nesne ile sensör arasındaki atmosfer tarafından soğurulabilme oranı
- Atmosferdeki radyasyonun mesafeye bağlı olarak sensör tarafından doğru yoğunlukta algılanabilmesi

Bu olgular için yapılacak telafi etme işlemi kullanıcının sıcaklığı ölçümlenecek cismi, üretici tarafından uygunluğu belirtilen mesafeye konumlandığı varsayılarak gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda ana algoritmaya yapılacak eklentiler, sensör sistemi ile cisim arasındaki mesafe göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmelidir.

3.1.5. Atmosferik koşullar

Ortam sıcaklığının, sensör sistemi üzerindeki negatif katsayılı sıcaklık sensörü tarafından ölçülüp, bileşenler için kompanzasyon işleminin algoritma tarafından gerçekleştirileceği düşünülürse, ölçüme yapılacak en ciddi etki bağıl nem tarafından gerçekleştirilecektir. Ölçümü yapılacak nesneye bağlı olarak oluşan ışıının, sensör sistemine ulaşana kadar atmosfer tarafından iletilmesi ya da soğurulması oranını bağıl nem değiştirecektir. Bu kapsamda normal şartlar altında bağıl nemin yüksek olması, sensör ön merceğine ulaşan ışıının miktarını azaltacaktır. Ancak bu azalma işlemi, ortamın yüksek oranlarda nemli olması durumunda gerçekleşecektir. Işıının miktarı azaldığında, sensör sistemi tarafından doğru değerler üretilemeyeceğinden ölçüm sistemi doğru çalışmayacaktır.

3.1.6. Elektriksel gürültü

Ortaya çıkarılacak ölçüm sisteminde, termopil sensör çekirdeği tarafından üretilen gerilimlerin birkaç milivolt mertebelerinde olmasından dolayı, ölçümün gerçekleştirileceği ortamda sürekli veya anlık olarak bulunan elektriksel gürültünün filtreleneceği gerekmektedir. Bu filtreleme işleminin gerçekleştirilmemesi durumunda besleme ya da sinyal hatlarındaki elektriksel dalgalanmalar, ölçüm sistemi doğru çalışmamasına sebep olacaktır. Filtreleme işlemi için eklenecek donanımsal filtre yapısının, ortamda sürekli olarak gürültü bulunup bulunmadığının analizi yapıldıktan sonra tasarlanması daha doğru olacaktır.

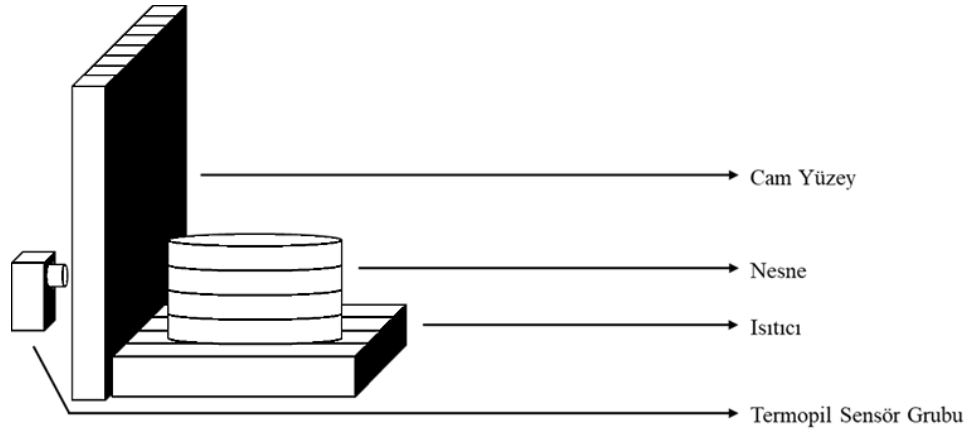
3.1.7. Diğer etkiler

Gerçekleştirilecek ölçüm üzerinde, bu aşamaya kadar bahsedilenlere ek olarak az da olsa etkili olacak diğer parametreler; sensör sistemi ile cisim arasındaki havanın optik kızılötesi geçirgenliği, havanın sıcaklığı, ortam basıncı, ortamda bulunan diğer cisimlerin emisivitesi, sensör sisteminde bulunan lens grubunun veya diğer tüm eklentilerin sıcaklıkları ve ortamdaki elektromanyetik gürültü şeklinde sıralanabilir. Bu parametrelerin gerçekleştirilen ölçüm üzerindeki etkileri çoğu zaman oldukça kısıtlı ve ihmal edilebilir bir seviyede olduğundan yapılan çalışmada bu parametreler, dikkate alınmamıştır.

Sonuç olarak, belirli bir sıcaklığı bulunan her nesne ortam için, belirli dalga boyuna sahip bir ışınım oluşturmaktadır. Bu ışınım kızılötesi ışınım temelli ölçüm teknikleri söz konusu olduğunda; sıcaklıktan kaynaklı olarak nesneden yansıyan kızılötesi ışınımın yoğunluğu, nesnenin formu, nesnenin emisivitesi, ortam bağıl nemi, ortam sıcaklığı, nesne ile ölçüm sistemi arasındaki mesafe, ortamdaki kaynaklı olarak maruz kalınan optik gürültü (çevresel yansımalar) başta olmak üzere pek çok parametreye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu durumu telafi ederek ölçüm doğruluğunun artırılabilmesi için ölçüm sistemlerine genellikle algoritmik eklentiler yapılmaktadır.

3.2. Standart Sensör Testleri ve Sensör Seçimi

Sensör sistemi ve algoritma geliştirme çalışmalarına başlanabilmesi için öncelikle sensör sisteminin temel bileşeni olacak kızılötesi algılayıcı elemanın belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda sensör sistemi tasarımı için gerekli ilk aşama olan sensör belirleme çalışmaları, kızılötesi algılayıcı eleman yani termopil sensör grubu araştırması ile başlatılmıştır. Araştırmalar sonucu uygulama için uygunluğu bulunan potansiyel algılayıcı elemanlar listelenmiş ve daha öncesinde belirlenen optik karakteristik, ölçüm mesafesi, ölçüm doğruluğu, görüş alanı, elektriksel gürültü toleransı, sensör tepkisi gibi tasarımda dikkate alınacak kriterler göz önünde bulundurularak sınıflandırılmıştır. Yapılan sınıflandırma sonucu 4 algılayıcı eleman özel olarak seçilerek, standart sensör testleri için hazırlanan Şekil 32'deki deney setinde önceden belirlenen koşullar altında sırayla teste alınmış ve sensör tepkileri ölçülmüştür.



Şekil 32. Standart sensör testleri için oluşturulmuş deney seti

Mevcut deney setinde, Şekil 32’de görülen elemanların yanı sıra veri toplama kartı, veri kaydetme cihazı, veri toplama bilgisayar ve referans algılayıcı eleman da kullanılmıştır. Kullanılan bu elemanlar ile sensör seçimi amacıyla farklı koşullar altında yapılması planlanan deney ve testlerin listesi Tablo 6’da görülmektedir.

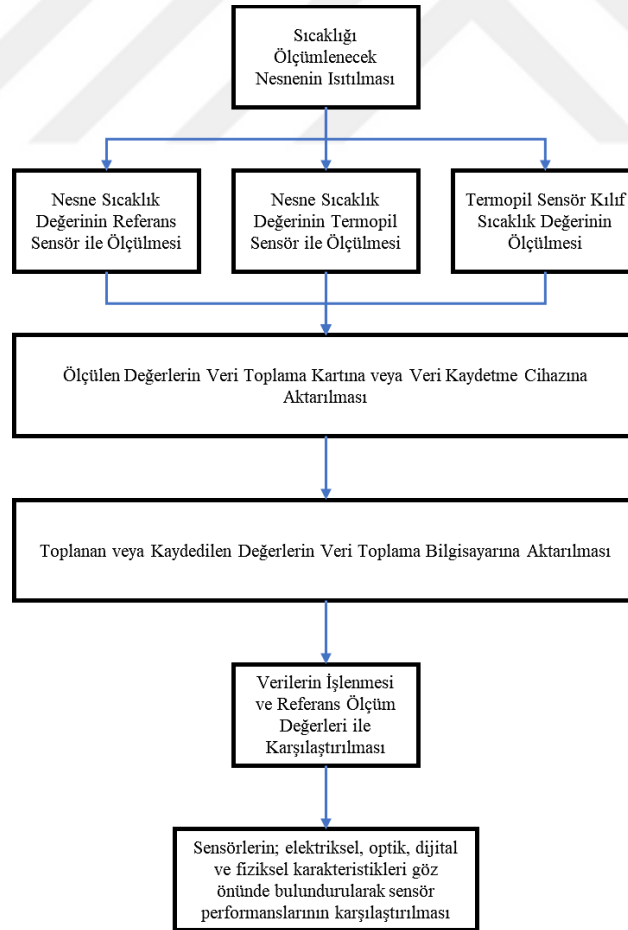
Tablo 6. Sensör seçim işlemleri kapsamında yapılması planlanan deneylerin listesi

Deney Numarası	Sensör Numarası	Cisim Tipi	Isıtma Gücü Kademesi (W)	Sıcaklık Aralığı (°C)
1	1	A	2300	25 - 100
4	1	A	3400	25 - 250
5	1	B	2300	25 - 100
8	1	B	3400	25 - 250
9	2	A	2300	25 - 100
12	2	A	3400	25 - 250
13	2	B	2300	25 - 100
16	2	B	3400	25 - 250
17	3	A	2300	25 - 100
20	3	A	3400	25 - 250
21	3	B	2300	25 - 100
24	3	B	3400	25 - 250
25	4	A	2300	25 - 100
28	4	A	3400	25 - 250
29	4	B	2300	25 - 100
32	4	B	3400	25 - 250

Tablo 6’da görülen liste dikkate alındığında 4 termopil sensör grubu için de farklı koşullardaki performansların değerlendirilebilmesi amacıyla; ısınma karakteristikleri farklı olan A ve B olmak üzere iki tip cisim için, indüksiyonlu ısıtıcının 3400W ve 2300W olmak üzere iki farklı güç kademesinde, cisim yüzey sıcaklığının 25°C’den 100°C ve 250°C sıcaklık seviyesine kadar yükseltilerek deneysel çalışmaların, ikişer tekrarlı olacak şekilde toplamda 64 adet gerçekleştirilmesi planlanmış ve uygulamaya

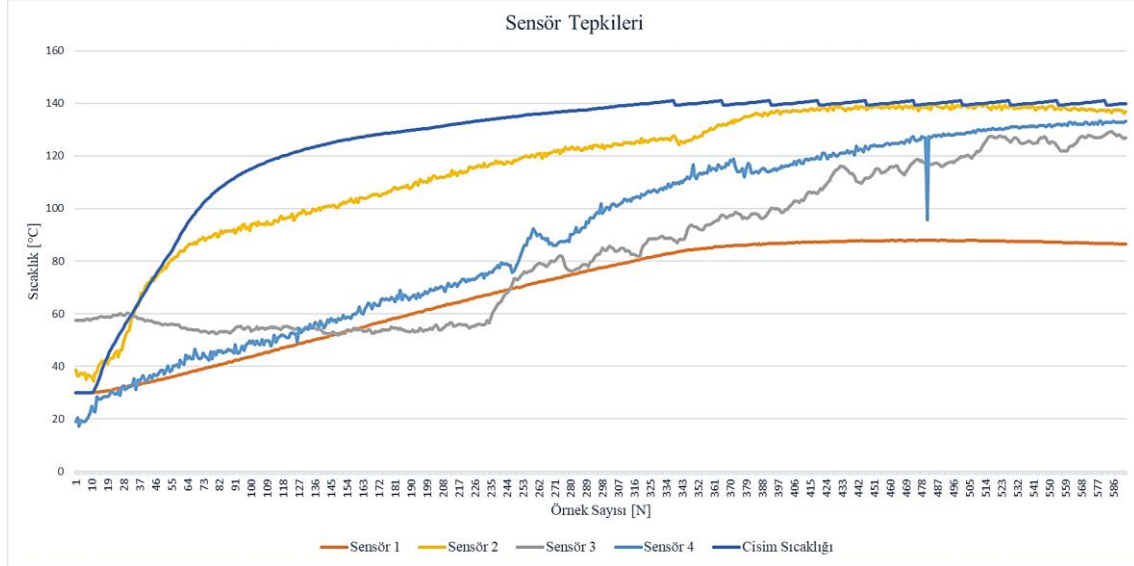
geçirilmiştir.

Her sensör için ayrı ayrı gerçekleştirilen testler, tüm test süreci boyunca nesne sıcaklık değerinin referans sensör ile ölçülmesi, nesne sıcaklık değerinin termopil sensör grubu ile ölçülmesi, termopil sensör grubu bileşenleri için kılıf sıcaklık değerinin ölçülmesi işlemleri sağlanarak sıcaklığı ölçümlenecek nesnenin ısıtılması ile başlatılmıştır. Tüm test süreci boyunca ölçülen bu değerlerin yine tüm süreç boyunca hassasiyeti yüksek bir veri toplama kartı ile toplanarak veri kaydetme cihazına aktarılması sağlanmıştır. Ölçüm, toplama ve aktarım işlemleri ile eş zamanlı olarak toplanan ve kaydedilen veriler, veri toplama bilgisayarında bulunan ara yüz yazılımı ile bilgisayara alınmış ve sensörlerin uygulamayı etkileyecek karakteristik özellikleri göz önünde bulundurularak işlenmiştir. Bu işlem kapsamında veriler, daha önceden belirlenen koşullar altında, temel seviyede bazı veri işleme algoritmalarına tabi tutulmuş ve sensör çıktılarının sıcaklık birimi cinsinden ifade edilebilmesi sağlanmıştır. Bahsedilen bu işlemler ile ilgili akış şeması Şekil 33’te görüldüğü gibidir.



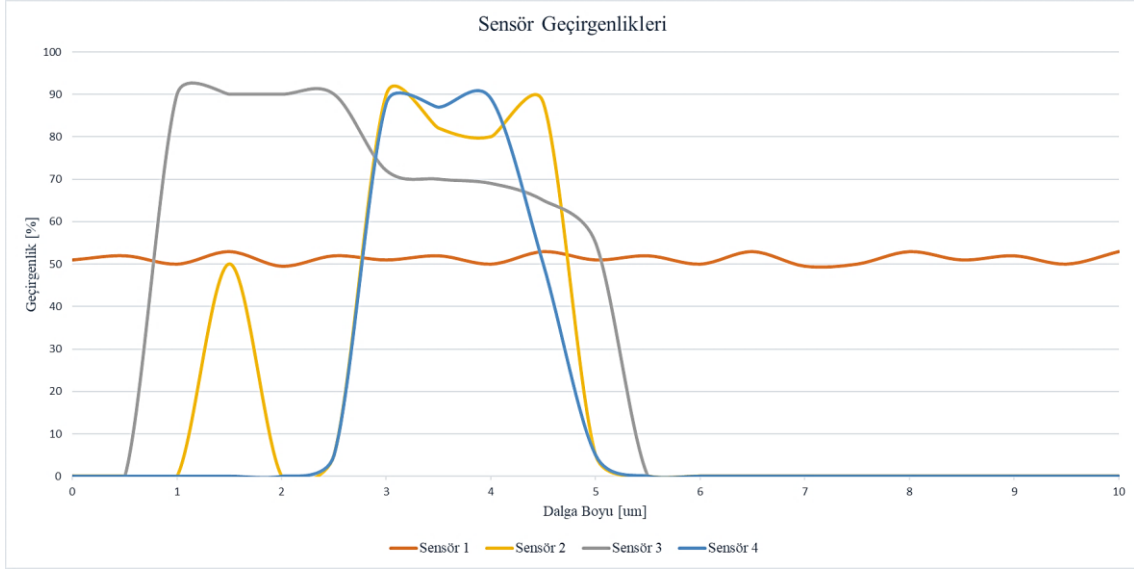
Şekil 33. Termopil grubu için gerçekleştirilen standart sensör testlerine ait akış şeması

Tüm sensörler ve tüm veriler için akış şemasında bulunan işlemlerden sonra sensörlerin, referans sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak birbirleri ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Bu kapsamda yapılan testlerden birine ait grafik Şekil 34’te görülmektedir.



Şekil 34. Sensör seçimi amacıyla yapılan standart sensör testlerine ait ölçüm sonuçları

Şekil 34’te yer alan grafik incelendiğinde, cisim sıcaklığının referans ölçüm değerlerine en yakın ısınma eğrisini, elektriksel gürültüden sınırlı bir seviyede etkilenen Sensör 2’nin sağladığı görülmektedir. Ayrıca grafik incelendiğinde Sensör 2’ye ek olarak Sensör 1’in de hem elektriksel gürültüden etkilenme seviyesi bakımından hem de ısınma eğrisi bakımından oldukça iyi bir konumda olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak sıcaklığa karşı olan sensör tepkileri bakımından bu iki sensör arasında bir karşılaştırma yapıldığında Sensör 2’nin Sensör 1’den daha iyi bir seviyede olduğu da grafikten çıkarılabilecek sonuçlar arasındadır. Grafik Sensör 3 ve Sensör 4 özelinde incelendiğinde, bu iki sensörün de elektriksel gürültüden oldukça etkilendiği ve ısınma eğrilerinin referans sıcaklıklara pek yakın olmadığı sonuçları çıkarılmaktadır. Bu ölçüm sonuçlarına ek olarak, gerçekleştirilecek çalışmada dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biri olan sensör geçirgenliklerine ait grafik Şekil 35’te görülmektedir.



Şekil 35. Sensör geçirgenlik seviyeleri

Tez çalışması sonucunda oluşturulacak sistemde cisim ile sensör birimi arasında geçirgenlik seviyesi, 3-4,5 μ m aralığında iken yüksek seviyelerde olan bir cam yüzeyin var olacağı bilgisi göz önünde bulundurularak Şekil 35'te yer alan grafik incelendiğinde, bu aralık için en yüksek geçirgenlik yüzdesinin Sensör 2 ve Sensör 4'te bulunduğu görülmektedir. Ancak grafikteki diğer sensörler incelendiğinde, tüm dalga boyları için %50 seviyelerinde benzer geçirgenlik karakteristiklerine sahip Sensör 1 ve söz konusu dalga boyu aralığında %70 seviyelerinde geçirgenlik karakteristiğine sahip Sensör 3'ün, deney sonuçlarına göre değerlendirilebilir durumda olduğu görülmektedir.

En başta listelenen termopil sensör grupları için başlangıçta yapılan ön seçim işleminde, elektriksel gürültüden daha az etkilenmesini sağlamak amacıyla, sensör sisteminin daha aşağıya konumlandırılabilmesine imkân vererek, görüş açısı 20°'ler civarında olan termopil sensörler tercih edildiğinden, testlere tabi tutulan termopil sensörler arasında görüş açısı anlamında ciddi bir değerlendirme yapmak söz konusu olamamaktadır. Bu sebeple bu aşamaya kadar yapılan değerlendirmelere ek olarak, seçim işlemi için önemli görülen diğer parametrelerden nesne ölçüm ve sensör çalışma sıcaklıklarına ait maksimum ve minimum değerlerin dikkate alınması gerekmektedir. Hedef nesnenin ölçüm sıcaklıkları ve sensörler için çalışma sıcaklıkları söz konusu olduğunda maksimum ve minimum değerler Tablo 7'de görüldüğü gibidir.

Tablo 7. Sensörlerin nesne ölçüm ve sensör çalışma sıcaklık aralıkları

Model	Ölçüm Sıcaklığı (°C)	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Sensör 1	(-20) ... (+400)	(-20) ... (+100)
Sensör 2	(-20) ... (+400)	(-20) ... (+100)
Sensör 3	(+25) ... (+200)	(-20) ... (+80)
Sensör 4	(-20) ... (+400)	(-20) ... (+100)

Tablo 7 incelendiğinde Sensör 3 haricindeki sensörlerin hem ölçüm hem çalışma sıcaklıkları bakımından, sensör grubunun dahil edileceği sistem için uygun olduğu görülmektedir. Ancak Sensör 3 için bu değerler incelendiğinde, sensör grubunun dahil edileceği sistem için sınır seviyelerde yer aldığı görülmektedir. Bu sebeple Sensör 3, söz konusu uygulama için kullanıma uygun görülmemektedir.

Sonuç olarak, yapılan testler ve diğer çalışmalar kapsamında sensörlerin; lens grubu için kızılötesi lens geçirgenlik seviyesi, görüş açısı, çalışma gerilimleri, çalışma sıcaklıkları, doğruluk değerleri, tepki süreleri ve diğer dijital-elektriksel-fiziksel karakteristikleri göz önünde bulundurularak sensör performanslarının karşılaştırılması yapılmış ve gerçekleştirilecek tez çalışması için uygunluk seviyeleri belirlenmiştir. Son durumda, yapılacak tasarım ve algoritma çalışmaları için sıralanan bu parametreler göz önüne alındığında Sensör 2'nin daha iyi bir performans göstermesine rağmen ve Sensör 1'in geçirgenlik konusunda telafi edilebileceği düşünülmekte olduğundan, benzer seviyelerde çalışmaya dahil edilmesi kararlaştırılmıştır.

3.3. Elektronik Tasarım

Entegre edileceği sistemde gerçek zamanlı olarak ölçüm yapacağından dolayı geliştirilecek sensör grubunun, elektronik donanım yapısı bakımından herhangi bir müdahaleye gerek duymadan yalnız başına, doğruluğu ve kararlılığı yüksek bir şekilde çalışmaya uygun halde tasarlanması gerekmektedir.

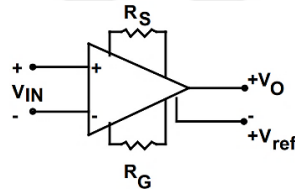
3.3.1. Temel gereksinimler

Yapılacak tasarım için sensör çekirdeği tarafından, nesnenin oluşturduğu kızılötesi ışıma karşı üretilen -5mV ile +10mV arasındaki gerilimin öncelikle milivolt mertebesinde yükseltilmesi, sonra ölçümden ve çevreden kaynaklı oluşabilecek optik, elektriksel ya da elektromanyetik gürültünün filtrelenerek mümkün olduğunca kararlı bir

şekilde kuvvetlendirilmesi, kuvvetlendirildikten sonra da potansiyel bozucu etkilere karşı tekrar filtrelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşamada yapılan araştırmalarda enstrümantasyon kuvvetlendiricilerinin ve analog filtrelerin, mevcut ana ihtiyaçları karşılama potansiyelinin bulunduğu sonucuna varılmıştır.

3.3.1.1. Enstrümantasyon kuvvetlendiricileri

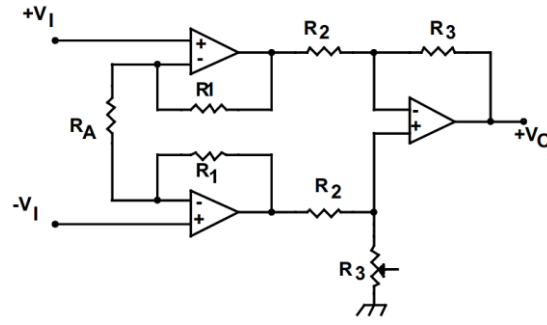
Enstrümantasyon kuvvetlendiricileri, iki tampon kuvvetlendirici devresini birbirine bağlayan üç yeni direnç ve bu dirençler ile birleştirilmiş bir diferansiyel kuvvetlendirici devresini temel alan, yüksek performanslı, yüksek kazançlı, yüksek giriş ve düşük çıkış empedanslı gerilim kuvvetlendiricileridir. Bu kuvvetlendiriciler diğer birçok kuvvetlendirici gibi, negatif geri besleme kullanılarak uygulamalara dahil edildiğinde daha kararlı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca enstrümantasyon kuvvetlendiriciler, ortak modlu sinyalleri bastırma kabiliyetinin yüksek olması ve elektriksel gürültülerden daha az etkilenmesi gibi özellikleri sebebiyle algılayıcılardan gelen sinyallerin yükseltilmesi amacıyla endüstriyel hassas uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 36. Enstrümantasyon kuvvetlendirici devresi genel gösterimi

Şekil 36'daki kuvvetlendirici yapısı incelendiğinde, çıkıştan girişe bir geri besleme direncinin bulunmadığı, kazanç direnci olarak R_g ve duyarlılık direnci olarak R_s 'nin bulunduğu görülmektedir. Bu yapıda, çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı olan kazanç değeri Denklem 3.9'daki gibi ifade edilmektedir.

$$K_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_s}{R_g} \quad 3.9$$

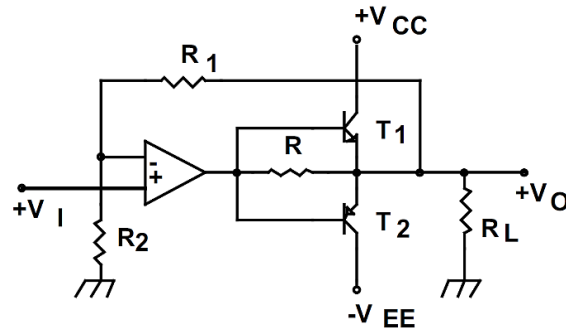


Şekil 37. Enstrümantasyon kuvvetlendirici devresi gösterimi

Şekil 36'dan farklı olarak Şekil 37'de enstrümantasyon kuvvetlendiricileri için daha detaylı bir devre yapısı gösterilmiştir. Bu yapıda, çıkıştan girişe uygulanacak ana geri besleme dirençleri yerine, kuvvetlendirici katları arasında lokal olarak geri besleme dirençleri kullanılmıştır. Temel olarak, kuvvetlendirici devresinin gerilim kazancı, kazanç direnci R_g ve duyarlılık direnci R_s 'nin oranı ile belirlenmektedir. Gösterilen devrenin gerilim kazancı Denklem 3.10'daki gibidir.

$$K_v = \frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{2 \cdot R_1 + R_A}{R_A} \quad 3.10$$

Pek çok uygulamada kuvvetlendirici devresi çıkışından alınması gereken akım, kuvvetlendirici çıkışının sağlayabileceği maksimum akım değerinin üzerinde kalmaktadır. Bu sebeple kuvvetlendirici devresinin, uygulama devresine uygun bir şekilde entegre edilebilmesi için, çıkış akımının artırılması gerekmektedir. Bahsedilen çıkış akımının artırılabilmesi genellikle çift birleşim yüzeyli transistör (BJT), alan etkili transistör (FET) veya metal oksit yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET) gibi ayrık elemanların kullanımı ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 38. Çift birleşim yüzeyli transistör yardımıyla kuvvetlendirici çıkış akımının artırılması

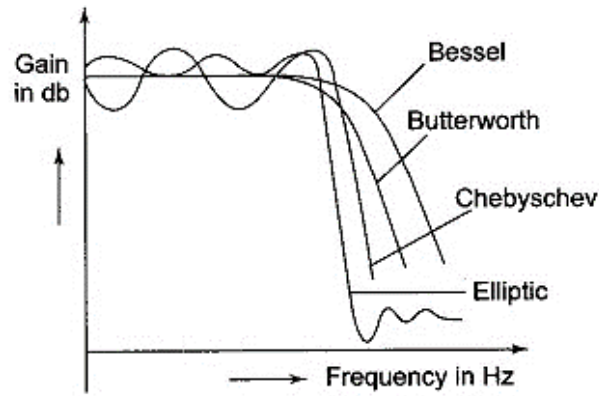
Kuvvetlendirici çıkış akımının artırılması amacıyla oluşturulan Şekil 38'deki örnek

devre şeması incelendiğinde yapının, NPN tipi T1 transistörü ve PNP tipi T2 transistörü üzerine kurulu olduğu görülmektedir. Kuvvetlendirici yapısının çıkışı ile transistörlerin ortak emiter ucu arasına bağlanan R direnci üzerinde oluşacak gerilim, transistörlerin baz ve emiter gerilimlerini sağlamaktadır. Geri besleme işlemi transistörlerin ortak emiter ucundan, kuvvetlendiricinin faz eviren girişine R1 direnci üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kuvvetlendirici çıkış geriliminin düşük seviyelerde kalacağı durumlarda çıkış akımı da düşük seviyelerde kalacağından R direnci üzerindeki gerilim düşümü, T1 ve T2 transistörlerinin baz bacağı üzerinden transistörü ilettime geçirmeye yetmeyecektir. Bu durumda kuvvetlendirici çıkışı, R direnci üzerinden doğrudan çıkışa aktarılacaktır. Bunun dışındaki standart uygulamalarda çoğunlukla kuvvetlendiricinin çıkış akımı, transistörler üzerinden arttırılarak devre dışarısına aktarılacaktır.

3.3.1.2. Analog filtreler

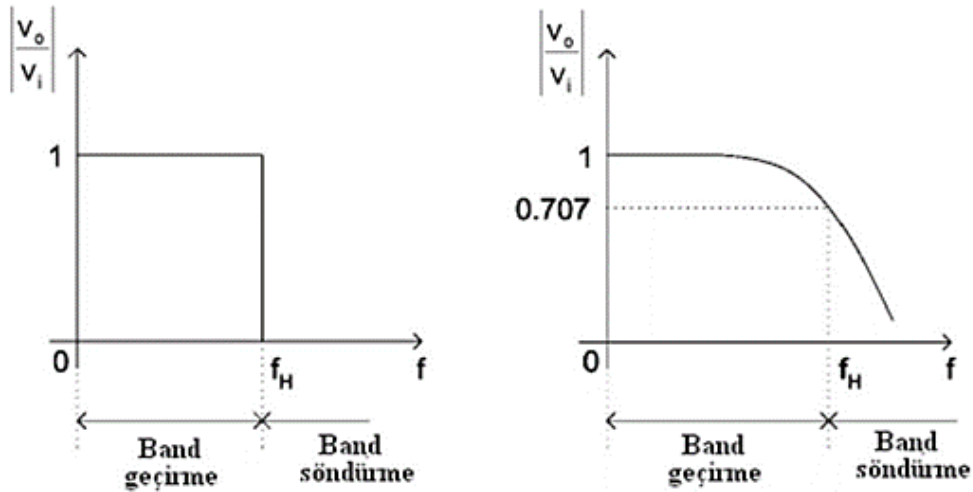
Temelde analog filtreler, frekans bağımlılıkları olan devreler için belirli frekanstaki sinyali geçirip belirli frekanstaki sinyali bastırabilmek amacıyla kullanılan pasif ya da aktif elektronik birimlerdir. Pasif filtreler çoğunlukla rezistif, kapasitif ve endüktif gibi pasif devre elemanları kullanılarak tasarlanırken aktif filtreler, bunlara ek olarak transistör ve işlemsel yükselteç gibi aktif devre elemanları kullanılarak tasarlanmaktadır. Aktif devre elemanları ile tasarlanan aktif filtreler pasif filtrelere göre sinyal zayıflatmama, giriş empedansı, çıkış empedansı gibi pek çok konuda daha iyi performans göstermektedir.

Sinyal filtreleme devreleri ile ilgili olarak literatürde kazanç eğrilerinin karakteristik özelliklerine ve geçirgen oldukları frekans bandına bağlı olarak iki temel sınıflandırma bulunmaktadır. Kazanç eğrilerinin karakteristik özelliklerine göre filtreler; Bessel, Butterworth, Chebyshev, Elliptic şeklinde sıralanabilirken geçirgen oldukları frekans bandına göre filtreler; alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren, bant durduran şeklinde sıralanabilmektedir.



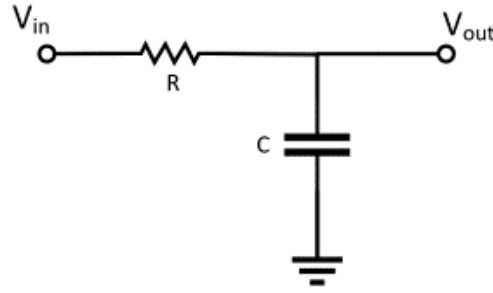
Şekil 39. Aynı sinyalin çeşitli aktif filtreler için frekans tepkileri

Elektronik devrelerde gürültü engelleme ve düşük maliyet söz konusu olduğunda, çoğunlukla alçak geçiren filtreler kullanılmaktadır. Bu tip filtrelerde belirli bir frekans seviyesi altındaki sinyaller geçirilirken, bu frekans seviyesinin üzerindeki sinyaller zayıflatılmaktadır. Bu işlemdeki kesim frekansı, sinyalin zayıflamaya başladığı andan itibaren 3dB'lik bir zayıflama söz konusu olduğu ya da çıkış genliğinin giriş genliğine oranı olan kazancın 0,707 katına düştüğü andaki frekans olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 40. Aynı sinyalin standart alçak geçiren filtreler için frekans tepkileri

Şekil 40'ta standart bir alçak geçiren filtrenin teorideki ve uygulamadaki frekans cevapları, Şekil 41'de ise direnç ve kapasiteyle oluşturulmuş basit bir filtre yapısı gösterilmiştir. Bu devreye göre C kapasitörü düşük frekanslarda açık devre gibi davranırken yüksek frekanslarda kısa devre gibi davranacağından giriş sinyalinin büyük bir kısmı R direnci üzerinden çıkışa iletilecektir.

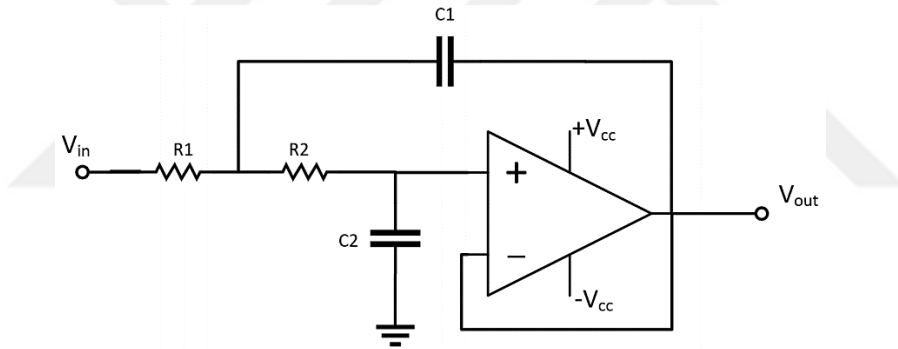


Şekil 41. Pasif alçak geçiren filtre devresi gösterimi

Şekil 41'deki devre şemasında gösterilen kuvvetlendiricinin gerilim kazancı ve kesim frekansı Denklem 3.11 ve Denklem 3.12'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{X_c}{\sqrt{X_c^2 + R^2}} \quad 3.11$$

$$f = V_{in} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c} \quad 3.12$$



Şekil 42. Sallen-Key tipinde ikinci dereceden aktif filtre devresi

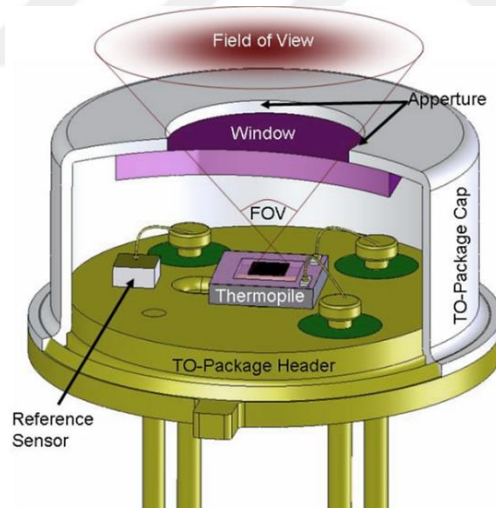
Şekil 42'de direnç, kapasite ve işlemsel yükselteç ile oluşturulmuş bir Sallen Key aktif filtre yapısı gösterilmiştir. Bu filtre yapısı esasen, gerilim kontrollü bir gerilim kaynağı yapısının filtreleme amacıyla bozulmuş bir versiyonudur. Sallen-Key tipindeki aktif alçak geçiren filtre yapısına ait transfer fonksiyonu ve kesim frekansı Denklem 3.13 ve Denklem 3.14'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_{out}(s) = V_{in} \cdot \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{R1 + R2}{R1 \cdot R2 \cdot C1} + \frac{1}{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}} \quad 3.13$$

$$f = V_{in} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}} \quad 3.14$$

Tez çalışması kapsamında geliştirilecek olan ölçüm sistemindeki temel yapılar; termopil

sensor grubu, gerilim referans entegre devresi, sinyal kuvvetlendirme grubu, parlaklık ölçüm grubu, parlaklık ölçüm grubu sürücü devresi, gerilim düzenleyici entegre devresi, donanımsal filtre grubu, cam yüzey sıcaklık sensörü ve referans sıcaklık sensörü algılama grubu, mikrodenetleyici modül grubu şeklinde sıralanabilir. Bu yapılardan termopil sensör grubu kendi içerisinde; kızılötesi ışıının algılanabilmesi için bir termopil sensör çekirdeği, termopil sensör çekirdeği tarafından üretilen elektriksel sinyallerin filtrelenebilmesi için basit bir donanımsal filtre grubu, sensör kılıf sıcaklığının algılanabilmesi için bir referans sıcaklık sensörü, kızılötesi ışıının belirli bir dalga boyuna ait kısmının sensör çekirdeğine düşürülebilmesi için bir lens grubu bulundurmaktadır. Termopil sensör grubundan alınan verilerin yükseltilebilmesi amacıyla ölçüm sistemine ait elektronik devre kartında bir adet gerilim referans entegre devresi kullanılmaktadır. Ayrıca termopil sensör grubu tarafından üretilen gerilimin, potansiyel bozucu etkilere karşı donanımsal olarak filtrelenebilmesi amacıyla bir donanımsal filtreleme grubu, elektronik devre kartına eklenmiştir. Bunlara ek olarak elektronik devre kartına, planlanan sinyallerin daha önceden ayarlanan kazanç değerine göre kuvvetlendirilebilmesi amacıyla, bir sinyal kuvvetlendirme grubu dahil edilmiştir.

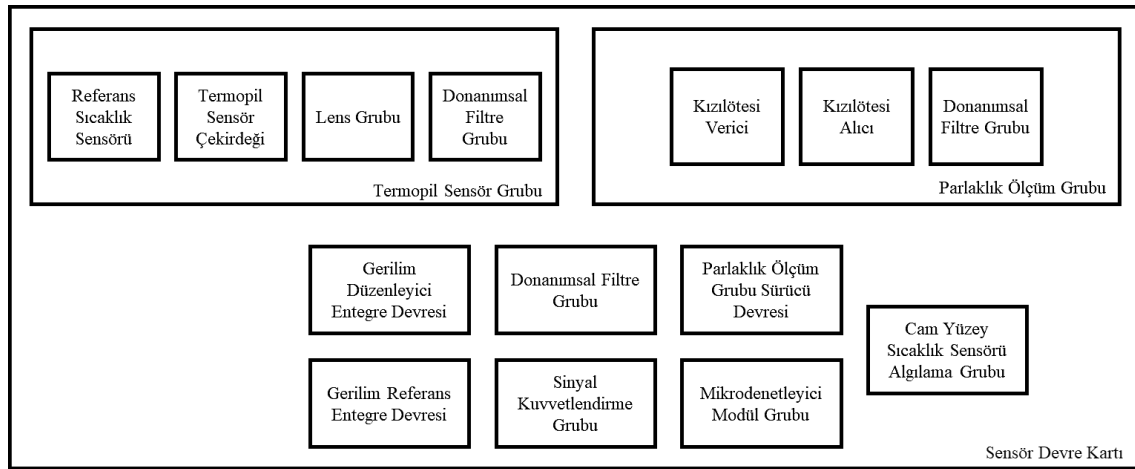


Şekil 43. Termopil sensör grubunun iç yapısına ait genel gösterim

Termopil sensör grubunun temelde hangi komponentlerden oluştuğuna dair simgesel gösterimlerin bulunduğu Şekil 43 incelendiğinde, tüm komponentlerin kullanıcı tasarımına uygun olacak şekilde metal bir kılıf içerisine konumlandırıldığı, bu kılıf sıcaklığının da referans bir sıcaklık sensörü ile ölçümlendiği görülmektedir. Ayrıca termopil sensörün çekirdek kısmı üzerinde, uygun dalga boyundaki kızılötesi sinyaller için belirli bir geçirgenlik seviyesine sahip, belirli açıklıkta bir kızılötesi soğurucu lens

grubu bulunmaktadır. Bu lens grubu ile termopil sensör çekirdeği arasındaki mesafe ve açı değerleri tasarım esnasında, sensör kullanım alanına göre uygun ölçülerde belirlenerek görüş açısı olarak bilinen sensör seçim parametrelerinden birini oluşturmaktadır. Termopil sensör grubunun dış kılıf ve iç yapısı ile ilgili olarak bahsedilmesi gereken bir diğer önemli durum, termopil sensör çekirdeğinin ölçüm esnasında diğer komponent sıcaklıklarından mümkün olduğunca az etkilenmesinin sağlanmasıdır. Komponent yerleşimleri ve kılıf iç yüzeyine ait yapısal tasarımlar, ölçüm doğruluğunu arttıracak olan bu gerekliliğe uygun olarak gerçekleştirilmektedir.

Cisim yüzey parlaklığının algılanabilmesi için eklenen parlaklık ölçüm grubu kendi içerisinde; belirlenen dalga boyunda kızılötesi sinyal gönderen bir kızılötesi verici ve belirli dalga boyunda gönderilen bu sinyalin algılanmasını sağlayan bir kızılötesi alıcı ile algılanan sinyalin potansiyel bozucu etkilere karşı donanımsal olarak filtrelenmesini sağlayan bir donanımsal filtre grubu içermektedir. Ayrıca, eklenen bu parlaklık ölçüm grubunun mikrodenetleyici tarafından istenilen gerilimde, akımda ve frekansta sürülebilmesi için ölçüm sisteminin elektronik devre kartına bir sürücü devresi dahil edilmiştir. Son olarak, cisim ile sensör sistemi arasındaki sıcaklığın ölçülebilmesi amacıyla bir adet sıcaklık sensörü algılama grubu, devre kartının tüm komponentleriyle birlikte belirlenen gerilimle beslenebilmesi için bir gerilim düzenleyici entegre devresi ve ölçüm sistemi yazılımının koşturularak ilgili birimlere ihtiyaç duyulan işlem gücünün sağlanabilmesi amacıyla, donanımsal olarak uygun kapasite ve kaynağa sahip bir mikrodenetleyici modül grubu da ölçüm sistemi devre kartına eklenmiştir.

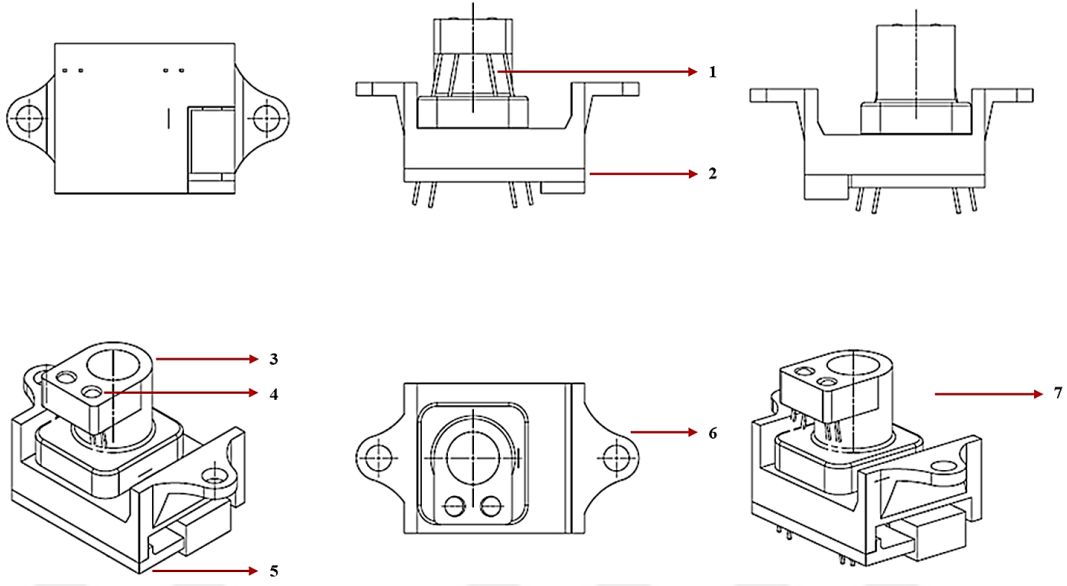


Şekil 44. Sensör sistemi devre kartının son versiyonuna ait blok diyagramı

Son olarak Şekil 44'teki blok diyagram dikkate alınarak elektronik devre kartının genel çalışma şekline dair şunlar söylenebilir. Kızılötesi ışıma bağlı olarak termopil sensör grubu tarafından üretilen sinyal, referans bir gerilimle yükseltip uygun seviyede filtreledikten sonra, sinyallerin daha önceden ayarlanan kazanç değerine göre kuvvetlendirilebilmesi amacıyla eklenen sinyal kuvvetlendirme grubu tarafından kuvvetlendirilerek mikrodenetleyici modül grubuna iletilir ve genel algoritma akışına dahil edilir. Ayrıca mikrodenetleyici modül grubu tarafından iletilen kontrol sinyalleri ile sürücü devresi üzerinden sürülen parlaklık ölçüm grubu, cisim yüzey parlaklığına bağlı olarak elektriksel sinyal üretmekte, üretilen sinyaller de grup içerisinde filtrelenerek mikrodenetleyici modül grubuna tekrar iletilip genel algoritma akışına eklenmektedir. Bunlara ek olarak cisim ile nesne arasındaki camın yüzey sıcaklığının algılanabilmesi için eklenen sıcaklık sensörüne ait veriler de mikrodenetleyici modül grubuna iletilerek genel algoritma akışına katılmaktadır.

3.4. Mekanik Tasarım

Yapılan çalışmalar sonucunda sensör grubunun, dahil edileceği sisteme mekanik olarak entegre halde olabilmesi için, sensör grubunun tasarımı öncesinde belirlenen kritik noktalar dikkate alınarak tasarlanmış bir üç boyutlu kılıf yapısı içerisinde bulunması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılacak olan üç boyutlu tasarımlarda; sensör lens grubuna dış ortamdan kaynaklı optik gürültülerin düşmesini engellemek amacıyla sensör görüş açısına uygun bir silindirik yapı, parlaklık ölçüm devresindeki alıcı ve vericinin yansıma açısına uygun olacak şekilde bir yuva, devre kartı ve konnektörünü kapsayacak şekilde termal iletim ve mukavemet açısından uygun kalınlığa sahip bir dış kılıf, sensör grubunun entegre edileceği sistem için uygun bir mekanik ara yüz, termal iletimi ve elektriksel gürültüyü azaltabilmek için bir alt kapak bulunması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan tasarımlardan birine ait teknik çizimler Şekil 45'te görüldüğü gibidir.



Şekil 45. Sensör grubu kılıf yapısı için hazırlanan teknik çizimler

Tüm bileşenleri ile Şekil 45'te görülen sensör grubu kılıfında 1 ile numaralandırılan kısım, parlaklık ölçüm devresindeki alıcı ve vericinin yansıma açısına uygun olacak şekilde hazırlanmış bir yuvadır. Teknik çizimde alıcı ve verici oyukları 4 ile numaralandırılan bu yuvanın belirli bir açıda eğikliğe sahip olmasının sebebi, verici tarafından hedefteki cisim üzerine düşürülen kızılötesi sinyalin, mümkün olduğunca kayıpsız bir şekilde, alıcının lensine doğru cisimden yansıması gerekliliğidir. Şekil 45'te görülen sensör grubu kılıfında 2 ve 5 ile numaralandırılan kısım, ısıtıcı grubu tarafından ısıtılan alt yüzey ile sensör grubu arasında minimum seviyede termal iletimin oluşmasını sağlayan alt kapağı ifade etmektedir. Bu alt kapak mekanik kısıtlamalardan dolayı, devre kartına ve konnektörüne uygun şekilde boşaltılarak tasarlanmıştır. Şekil 45'teki teknik çizimde 3 ile numaralandırılan kısım sensör lens grubu yüzeyine, dış ortamdan kaynaklı optik gürültülerin düşmesini engellemek amacıyla ve sensör görüş açısını kısıtlamayacak genişlik ile uzunluktaki bir silindirik yapıyı göstermektedir. Teknik çizimde 6 ile numaralandırılan kısım, sensör grubunun entegre edileceği sistem ve bağlantı elemanları için uygun bir mekanik ara yüzü ifade etmektedir. Şekil 45'teki teknik çizimde 7 ile genel görünümü numaralandırılan sensör kılıfı tasarımı, tüm mekanik kıstaslara uygun ölçülerde, termodinamik kurallar dikkate alınarak ve minimum üretim maliyeti oluşturacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Veri Toplama Setinin ve Deney Planının Oluşturulması

Sensör sisteminin tasarlanması aşamasında ortam sıcaklığı, cam yüzey sıcaklığı ve farklı tipteki cisimler için boyut, sıcaklık, yüzey parlaklığı, ısınma karakteristiği gibi sensör sisteminden bağımsız değişkenlere rağmen sensör sistemi tarafından üretilen ölçüm değerlerinin mümkün olduğunca hatasız, hassas ve kararlı olabilmesi amacıyla sisteme dahil edilebilme potansiyeli bulunan konularda, gerçekleştirilmesi gereken kritik bazı deneysel çalışmalar belirlenmiştir. Planlanan bu deneysel çalışmalar;

- Cisim ile sensör sistemi arasındaki cam yüzeyin sıcaklığının, ölçümü ne seviyede etkilediğinin belirlenebilmesi amacıyla, daha önceden belirlenen bir cisim farklı sıcaklıklara kadar farklı hızlarda ısıtılarak ölçüm ve referans verilerinin toplanması,
- Termopil sensör çekirdeğine ait dış kılıfın sıcaklığının (sensör grubu bileşenleri öz sıcaklığının), ölçüme olan etkisinin belirlenebilmesi amacıyla sensör kılıf sıcaklıkları farklı seviyelerde iken, yine daha önceden belirlenen bir cisim farklı sıcaklıklara kadar farklı hızlarda ısıtılarak ölçüm ve referans verilerinin toplanması,
- Sensör sisteminin tümünü kapsayan dış kılıf malzemesinin, çevresel bozucu etkiler bakımından ölçümü nasıl etkilediğinin dikkate alınabilmesi amacıyla sensör sistemi üzerinde, farklı hammaddeler kullanılarak üretilen dış kılıflar bulunurken geçmişte belirlenen bir cismin, farklı sıcaklıklara kadar farklı hızlarda ısıtılarak ölçüm ve referans verilerinin toplanması,
- Yüzey parlaklığının ölçüme olan etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla farklı yüzey parlaklığına sahip cisimlerin, farklı sıcaklıklara kadar farklı hızlarda ısıtılarak ölçüm ve referans verilerinin toplanması,
- Cisim tipinin ölçüme olan etkisinin analiz edilebilmesi amacıyla, farklı fiziksel boyutlara, farklı empedans değerlerine ve farklı ısınma karakteristiklerine sahip cisimlerin, farklı hızlarda farklı sıcaklıklara kadar ısıtılarak ölçüm alınması,

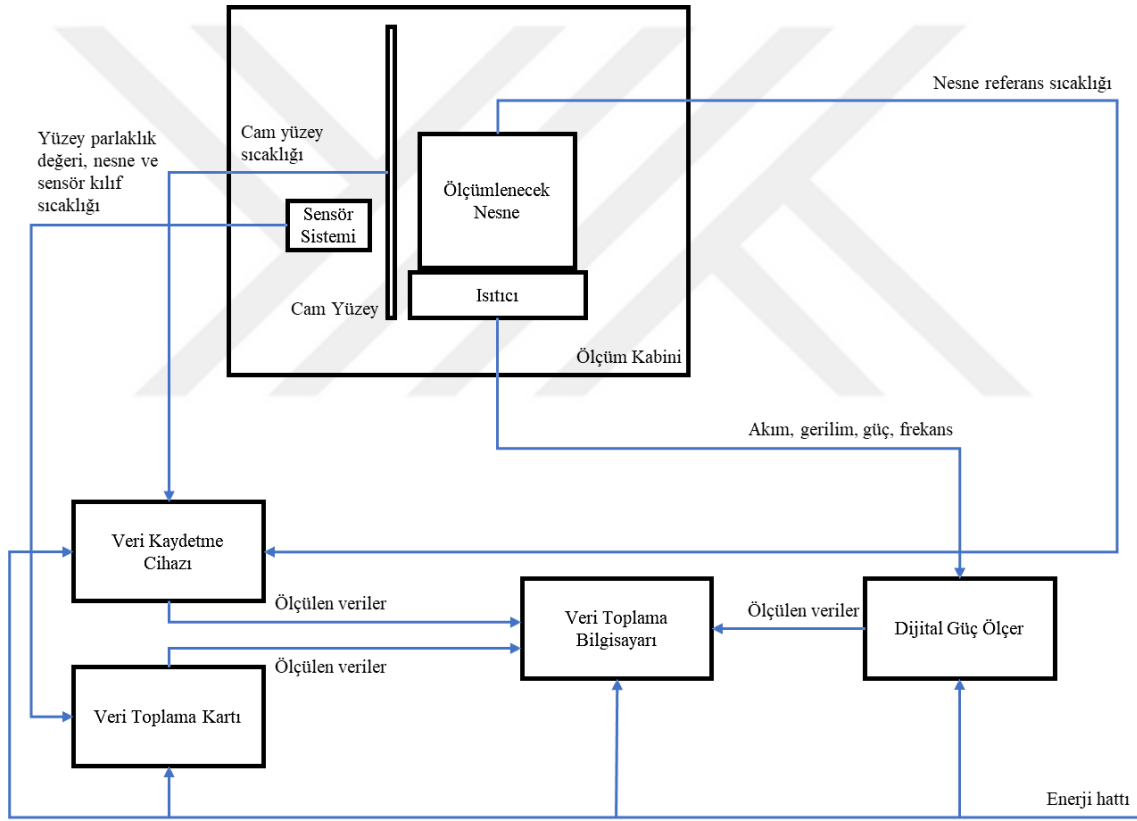
şeklinde sıralanabilir. Bu deneysel veri toplama çalışmalarının gerçekleştirilebilmesi amacıyla Şekil 46’da temel hali gösterilen veri toplama sistemi kurularak, cihazlar ve bilgisayar için gerekli ara yüz yazılımları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu yazılımlar, tüm

verilerin doğru bir şekilde görselleştirilip değerlendirilebilmesi için yapılan deneyler sırasında tüm cihaz, sensör sistemleri ve algılayıcılardan eşzamanlı olarak veri almaya uygun olacak şekilde geliştirilmiştir. Bu yazılımlar için zaman sabitleri, veri toplama bilgisayarı tarafından üretilmiş ve tüm verilerin kayıt işlemleri bu veri toplama bilgisayarında gerçekleştirilmiştir.

Genel yapısı Şekil 46'da görülen veri toplama sistemi dahilindeki deney malzemelerinin dışında sisteme, deneysel çalışmalara uygun olacak şekilde bazı malzemeler eklenmiş, güncellenmiş ya da çıkarılmıştır. Örneğin farklı kızılötesi filtre yapısına sahip sensörlerin benzer koşullar için ne şekilde reaksiyon göstereceklerinin test edilebilmesi amacıyla veri toplama sistemine; başka sensörler ve bu sensörlerin farklı malzemeler kullanılarak üretilen koruyucu kılıflar için, elektriksel ya da atmosferik bozucu etkilerden ne seviyede etkileneceklerinin test edilebilmesi amacıyla farklı sensör kılıfları eklenmiştir. Ayrıca düşükten yükseğe kadar farklı sıcaklıklarda yapılan deneysel çalışmalar için, ölçümlenecek nesnedeki ısı karakteristiğinin daha ayrıntılı olarak incelemesi amacıyla nesne üzerindeki referans sıcaklık sensörlerinin sayısı artırılmış ya da bu sensörlerin konumları değiştirilmiştir. Bunlara ek olarak daha önce de bahsedilen teorilerin deneysel sonuçlarının incelenebilmesi amacıyla sisteme; sıcaklığı ölçümlenecek nesnenin empedans ölçümleri için LCR metre de ihtiyaç duyulan deneyler esnasında eklenmiştir.

Sensör sisteminin son versiyonuna ölçümün iyileştirilebilmesi amacıyla, eklenti oluşturması planlanan tüm teorilerin deneylerle gözlemlenebilmesi için hazırlanan veri toplama sistemine ait blok diyagramın Şekil 46'daki en temel gösterimi incelendiğinde sistemin; ölçümlenecek nesne, sensör sistemi, ısıtıcı, cam yüzey, veri kaydetme cihazı, veri toplama kartı, veri toplama bilgisayarı ve dijital güç ölçerden oluştuğu görülmektedir. Sistemin çalışmaya başlayabilmesi için öncelikle indüksiyonlu ısıtıcının, enerji hattından beslenen dijital güç ölçer üzerinden beslenerek ölçümlenecek nesnenin ısıtılması gerekmektedir. Bu ısıtma işlemi esnasında indüksiyonlu ısıtıcı ihtiyaç duyduğu enerjiyi kullanırken dijital güç ölçer; akım, gerilim, frekans gibi elektriksel güce ait parametrelerin tutularak veri kaydetme cihazına iletilmesini sağlamaktadır. Isıtılma işlemi başladıktan sonra, işlemci birimi tarafından belirlenen algoritmaya göre ölçüme başlatılan sensör sistemi, bu süreçte ürettiği tüm verileri veri toplama kartı ile aralarında bulunan haberleşme hattına göndermekte, veri toplama kartı ise bu verileri alarak veri

kaydetme cihazı ile senkron olacak şekilde veri toplama bilgisayarına iletmektedir. Blok diyagramda görülen veri kaydetme cihazı, ölçümlenecek nesne ile sensör sistemi arasında bulunan cam yüzey üzerindeki sensörden gelen sıcaklık verilerini ve ölçümlenecek nesne üzerine konumlandırılan sensörden gelen referans sıcaklık verilerini bünyesinde kaydederek, veri toplama kartı ile senkron olacak şekilde veri toplama bilgisayarına iletmektedir. Veri toplama bilgisayar, daha önceden geliştirilen yazılımlardaki veri toplama algoritmalarına sadık kalarak verileri belirlenen formatta dahili depolama alanına kaydetmektedir. Bunlara ek olarak cihazlar ve kartlar haricindeki ölçüm seti, bir kabin içerisine konumlandırılarak dış ortamdan atmosferik olarak izole edilmiştir.

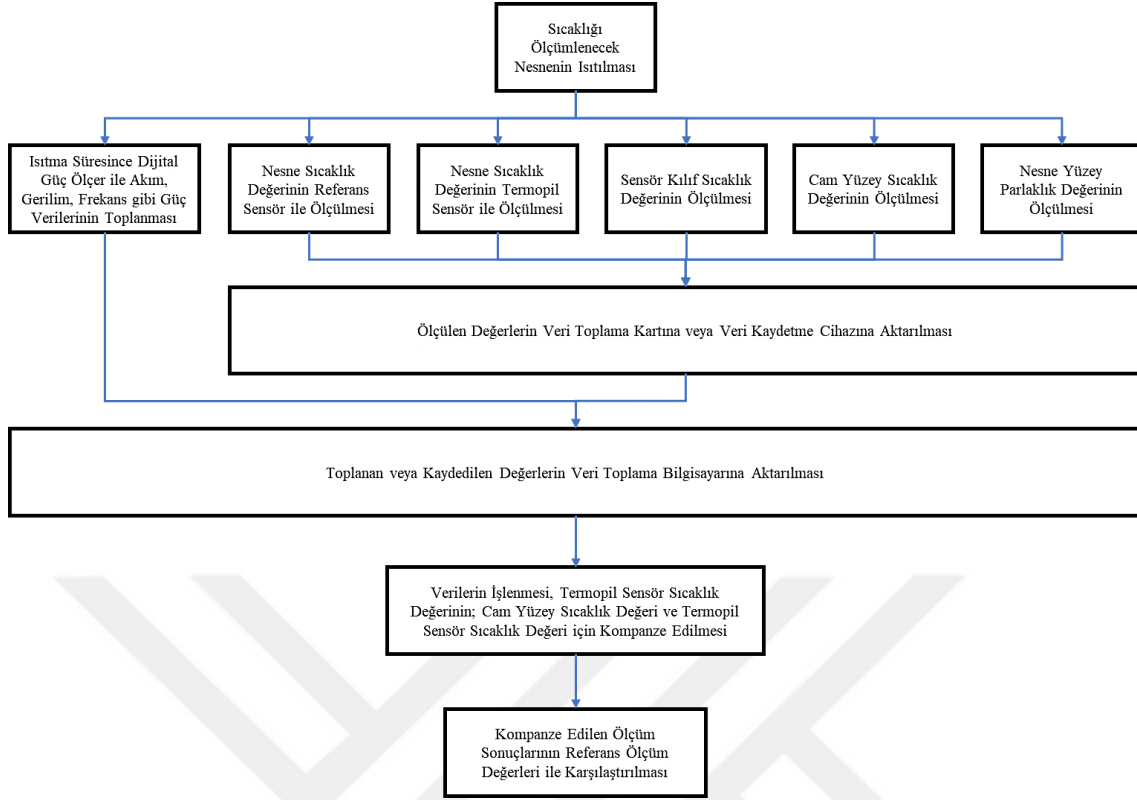


Şekil 46. Veri toplama sistemi genel blok diyagramı

Tablo 8. Veri toplama işlemleri kapsamında yapılması planlanan deneylerin listesi

Deney Numarası	Sensör Numarası	Cisim Tipi	Kılıf Tipi	Isıtma Gücü Kademesi (W)	Sıcaklık Aralığı (°C)
1	1	A	Al	2300	25 - 100
8	1	A	PC	3400	25 - 250
9	1	B	Al	2300	25 - 100
16	1	B	PC	3400	25 - 250
17	1	C	Al	2300	25 - 100
24	1	C	PC	3400	25 - 250
25	1	D	Al	2300	25 - 100
32	1	D	PC	3400	25 - 250
33	1	E	Al	2300	25 - 100
40	1	E	PC	3400	25 - 250
41	2	A	Al	2300	25 - 100
48	2	A	PC	3400	25 - 250
49	2	B	Al	2300	25 - 100
56	2	B	PC	3400	25 - 250
57	2	C	Al	2300	25 - 100
64	2	C	PC	3400	25 - 250
65	2	D	Al	2300	25 - 100
72	2	D	PC	3400	25 - 250
73	2	E	Al	2300	25 - 100
80	2	E	PC	3400	25 - 250

Tablo 8’de görülen liste dikkate alındığında 2 termopil sensör için de farklı koşullardaki performansların değerlendirilebilmesi amacıyla; ısınma karakteristikleri farklı olan A, B, C, D ve E olmak üzere beş tip cisim için, sensör sistemi kılıf tipinin alüminyum veya polikarbonat bir malzemeden üretilmiş olarak Al ve PC şeklinde kullanılması ile indüksiyonlu ısıtıcının 3400W ve 2300W olmak üzere iki farklı güç kademesinde iken, cisim yüzey sıcaklığının 25°C’den 100°C ve 250°C’ye kadarki sıcaklık seviyesine kadar yükseltilerek deneysel çalışmaların, ikişer tekrarlı olacak şekilde toplamda 160 adet için gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Yapılan planlama doğrultusunda başlatılan deneysel çalışmalarda ilk verilere göre, kılıf tipinin değiştirilmesinin bozucu etkileri azaltacağı teorisinin, önemli ölçüde bir fark oluşturmadığı gözlemlendiğinden, deney yükünün hafifletilebilmesi amacıyla bazı deneylerden vazgeçilerek diğer deneyler ve testlere polikarbonat malzemeden üretilen kılıf ile devam edilmesi söz konusu olmuştur. Böyle bir değişiklik sonucunda da veri toplama işlemlerinin önemli ölçüde azaltılarak ikişer tekrarlı olacak şekilde toplamda 80 adet için gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.



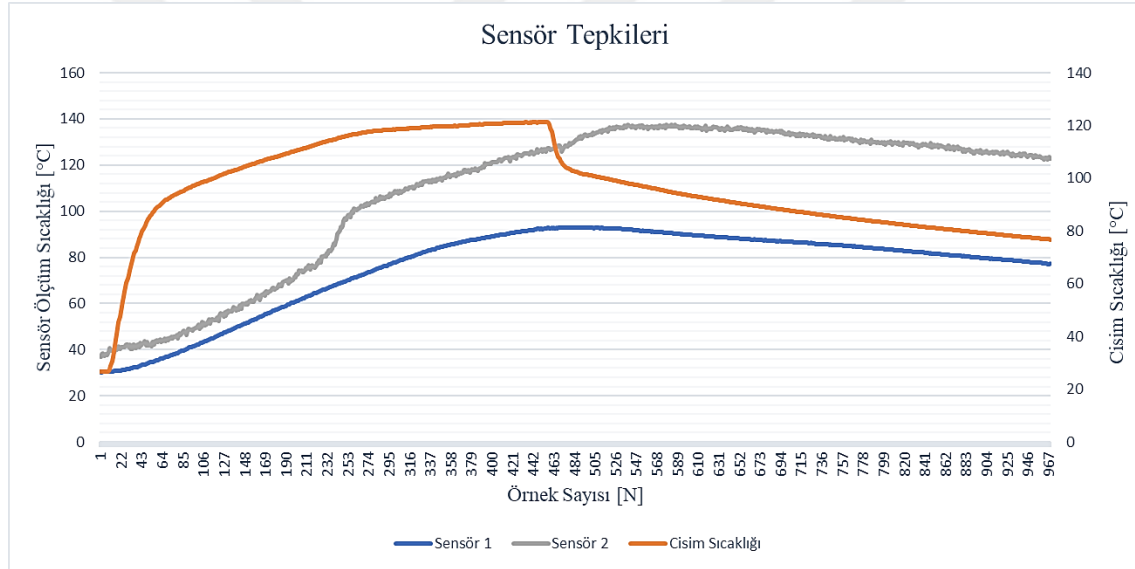
Şekil 47. Veri toplama deneyleri akış diyagramı

Uygulanma sebebine bağlı olarak sınıflandırılan deneysel çalışmaların tümü için, sistemin nasıl işletileceğinin anlatıldığı diyagram Şekil 47’de görülmektedir. Diyagrama göre ölçümlenecek nesnenin indüksiyonlu ısıtıcı ile ısıtılmasına paralel olarak başlatılan akış, süreç boyunca elektriksel güç parametrelerinin alınarak veri toplama bilgisayarına iletilmesi ile devam etmektedir. Bu esnada diğer taraftan; süreç boyunca termopil sensöre ait kılıf sıcaklığı ve cismin kızılötesi ışınımına ölçüm verilerinin, nesne üzerindeki referans sıcaklık sensörüne ve cam yüzey üzerindeki sıcaklık sensörüne ait ölçüm verilerinin, sensör sistemindeki parlaklık ölçüm grubuna ait cismin yüzey parlaklık ölçüm verilerinin, öncelikle veri toplama kartına ya da veri toplama cihazına aktarılması sağlanmaktadır. Aktarılan veriler, veri toplama bilgisayar ile diğer cihazlar ve kartlar arasındaki haberleşme hattına iletilmekte, haberleşme hattındaki veriler ise veri toplama bilgisayarında bulunan ara yüz yazılımı ile işlenmek ve incelenmek üzere kaydedilmektedir. Bu veriler işlenerek, görselleştirildikten sonra sensör kılıf sıcaklığının ve cam yüzey sıcaklığının temel seviyede kompanze edilmesi sağlanır. Bu aşamadan sonra da daha öncesinde belirlenen teorilerin pratik ile uygunluk gösterip göstermediğinin analizi, referans ölçüm verileri kullanılarak yapılır.

4.2. Deneylerin Yapılması ve Veri Setlerinin Oluşturulması

4.2.1. Termopil sensör gruplarının değerlendirilmesi

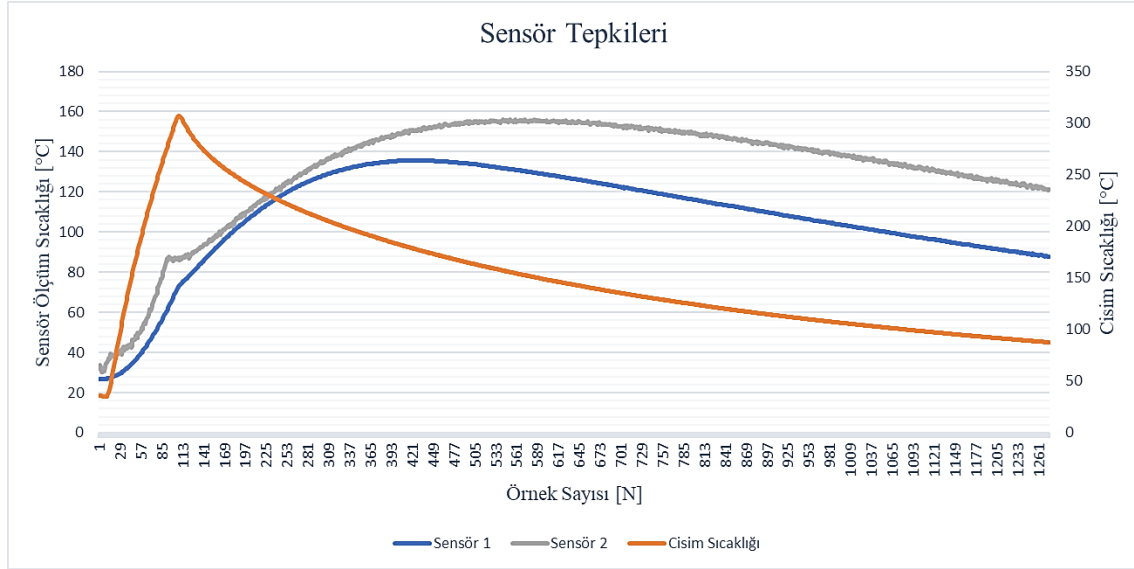
Tüm teorilerin doğrulanabilmesi ve geliştirilecek algoritmaya eklenebilmesi amacıyla planlanan deneysel çalışmalar öncelikle; indüksiyonlu ısıtıcı gücü, cisim tipi, sıcaklık seviyesi gibi parametrelerin değişmesi durumunda iki sensörün de davranışlarının incelenebilmesi amacıyla termopil sensör grubu ile ilgili olan tarafa yoğunlaştırılmıştır. Bu sebeple gerçekleştirilen deneysel çalışmalardaki uç noktalarda, yalnızca termopil sensör gruplarına ait davranışlarının incelenebilmesi için, standart ısınma karakteristiğine sahip A cismi kullanılarak gerçekleştirilen düşük sıcaklık, düşük güç ile yüksek sıcaklık, yüksek güç deneylerine ait karşılaştırmalı sonuç grafikleri Şekil 48 ve Şekil 49’da verilmiştir.



Şekil 48. Düşük sıcaklık seviyesi ve düşük ısıtma gücü için sensör tepkileri

Verilen grafikler incelendiğinde hem hızlı ısıtma ile yüksek sıcaklık deneylerinde hem de yavaş ısıtma ile düşük sıcaklık deneylerinde Sensör 1'in cisim tipine de bağlı olarak daha izlenebilir çıktılar oluşturduğu görülmektedir. Örneğin Şekil 48'de, referans olarak alınacak olan cisim sıcaklığı eğrisi ile Sensör 1 ve Sensör 2'nin sensör ölçüm sıcaklığı eğrileri takip edildiğinde Sensör 2'nin, Sensör 1'e göre daha geç tepki verdiği görülürken, Sensör 1'in Sensör 2'ye göre daha kararlı değerler ürettiği görülmektedir. Ayrıca cismin ısıtılma işlemi tamamlanıp soğumaya başlamasından sonra Sensör 1'in bu soğuma işlemine daha çabuk uyum sağlayarak daha düşük sıcaklık seviyelerine daha kısa sürede düştüğü görülmektedir. Bu sebeple Şekil 48'de verilen grafiğe göre Sensör 1'in

çıktıları, Sensör 2'ye göre referans cisim sıcaklık değerlerine daha benzer bir davranış göstermiştir. Bu sebeple de grafik hakkında, Sensör 1'in Sensör 2'ye göre cismin referans sıcaklık değerlerine daha korele edilebilir bir halde bulunduğu çıkarımı yapılabilmektedir.



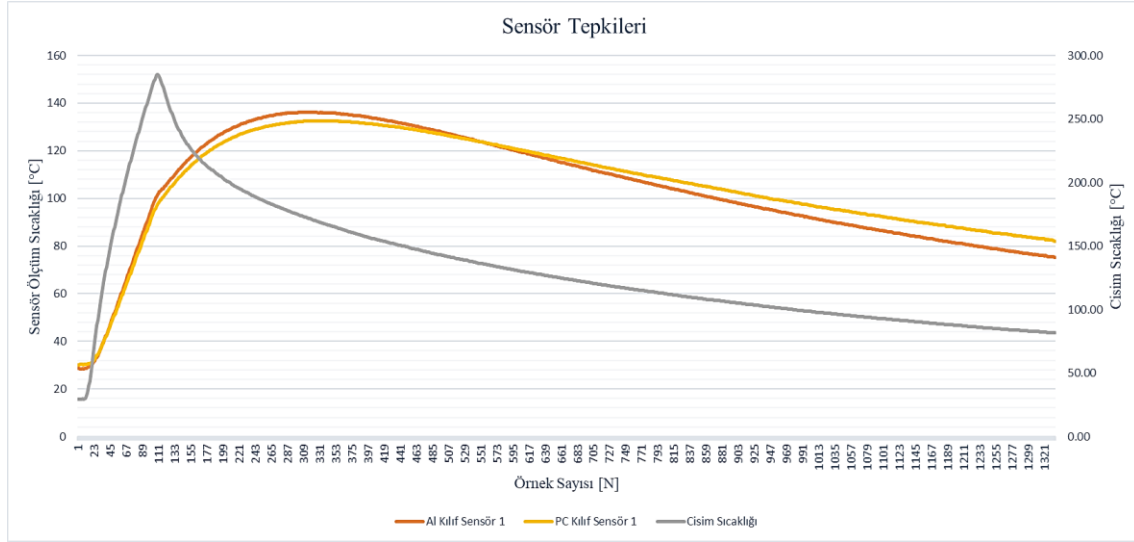
Şekil 49. Yüksek sıcaklık seviyesi ve yüksek ısıtma gücü için sensör tepkileri

Şekil 49'daki grafik incelendiğinde cismin hızlı ısıtılması durumuna, sensörlerin her ikisinin de benzer tepkiler verdiği, ulaşılan maksimum sıcaklıktan itibaren cismin soğutulması durumuna ise Sensör 1'in daha hızlı tepki verdiği görülmektedir. Ayrıca her iki sensör için de maksimum sıcaklığa ulaşılma süresi, referans sıcaklık ölçümlerine göre bir miktar uzun olsa da Sensör 1 için maksimum sıcaklığa ulaşım süresinin Sensör 2'ye göre daha kısa olduğu fark edilmektedir. Bu çıkarımlar ışığında yapılan diğer deneylerin sonuçları da incelendiğinde, yine Sensör 1'e ait eğrilerin, cismin referans sıcaklığına ait eğrilere, daha benzetilebilme potansiyelinin bulunduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durum, oluşturulacak matematiksel modellerin daha doğru ölçüm sonuçları üreteceği anlamına gelmektedir.

4.2.2. Sensör sistemi kılıf malzemelerinin değerlendirilmesi

Farklı sensör grubu kılıf malzemelerinin sensör ölçümlerine olan etkisinin araştırılabilmesi amacıyla standart ısınma karakteristiğine sahip A cismi kullanılarak yapılan deneylerden biri olan yüksek sıcaklık ve hızlı ısıtma deneyine ait sonuçlar, Şekil 50'de görülmektedir. Bu deneysel çalışma için 275°C seviyelerine kadar indüksiyonlu ocağın en yüksek ısıtma gücü ile ısıtılmış cismin, 75°C seviyelerine kadar soğutulması

sağlanmıştır. Bahsedilen bu süreçte alüminyum ve polikarbonat malzemeden üretilen sensör kılıfları deneylerde kullanılmış ve sensör tepkileri gözlenmiştir.



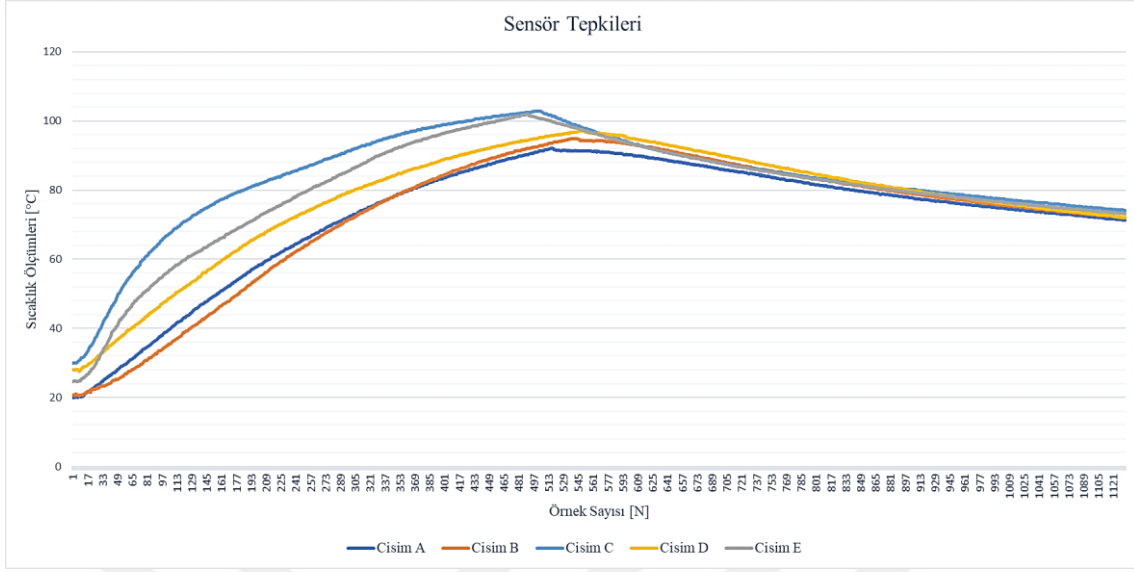
Şekil 50. Farklı sensör kılıf tipleri için yüksek sıcaklık ve yüksek ısıtma gücü seviyelerindeki sensör tepkileri

Yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkarılan Şekil 50'deki grafik incelendiğinde hem alüminyum kılıf için hem de polikarbonat kılıf için elektromanyetik gürültü ve termal bozucu etkiler anlamında, sensör tepkilerinde ciddi bir farklılık görülmemiştir. Ancak alüminyum malzemeden üretilen kılıfın sensör grubunu, ortam sıcaklığına daha duyarlı hale getirdiği ve böylece minör seviyede de olsa değişime hızlı tepki verebilmesini sağladığı da inkâr edilmemelidir. Yapılan bu gözlemler ışığında, üretim maliyetlerinin yüksek olması ve ürünlere entegrasyonunun daha zor olması sebebiyle alüminyum malzemeden üretilen kılıfın bu aşamadan sonraki deneysel çalışmalarda tercih edilmemesi kararı verilmiştir.

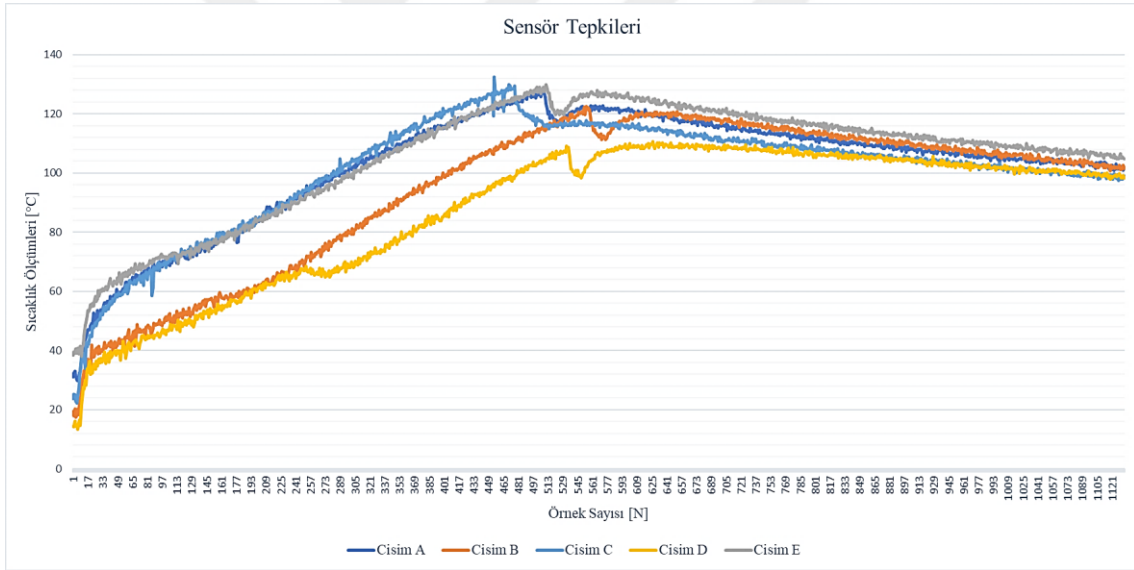
4.2.3. Cisimlerin ısınma karakteristiklerinin değerlendirilmesi

Geliştirilen ölçüm biriminin entegre edileceği sistemin yapısı ve bu sistemdeki farklı cisimlerin indüksiyonlu ısıtıcı aracılığıyla ısıtılacağı düşünüldüğünde, gerçekleştirilen ölçümlerin, cisimlerin elektriksel özelliklerinden ve ısınma karakteristiklerinden bağımsız olarak sürdürülmesi, ölçümler sonucunda da anlık olarak tahmini sıcaklık değerlerinin üretilmesi gerekmektedir. Cisim tipine bağlı olarak oluşabilecek bu olumsuz etkiyi azaltabilmek amacıyla, hem sensör grubu tarafından üretilen tahmini sıcaklık verilerini hem de indüksiyonlu ısıtıcıya ait ve anlık olarak gözlemlenen akım-gerilim-frekans gibi güç verilerini, geliştirilen ölçüm algoritmasına dahil ederek, belirli sınırlar

çerçevesinde, cisimler özelinde bir sınıflandırma işleminin yapılması gerekmektedir.



Şekil 51. Cisimlerin ısınma eğrileri için düşük sıcaklık ve düşük ısıtma gücü seviyelerindeki Sensör 1 tepkileri



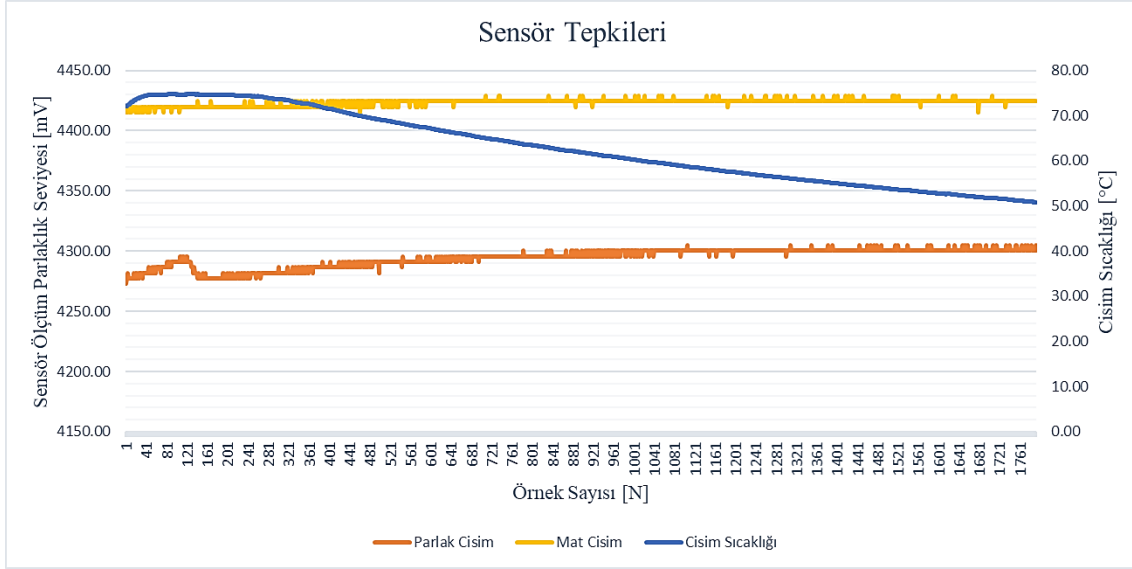
Şekil 52. Cisimlerin ısınma eğrileri için düşük sıcaklık ve düşük ısıtma gücü seviyelerindeki Sensör 2 tepkileri

Cisimlerin karakteristik özelliklerinden kaynaklı olarak belirtilen bu etkinin sensör grupları tarafından algılanabilirliğinin test edilebilmesi amacıyla, iki sensör grubu ile farklı karakteristik özelliklere sahip cisimler kullanılarak, düşük sıcaklık ve düşük güç seviyelerinde, temel filtreleme algoritmaları aktif iken bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sensör 1 özelinde, 5 farklı cisim tipi için ayrı ayrı yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçların yer aldığı Şekil 51'deki grafiksel gösterim incelendiğinde,

Sensör 1 tarafından alınan ölçümlerin, farklı cisim tiplerini doğrudan algılamada pek yeterli olmadığı görülmektedir. Buna ek olarak Sensör 2 özelinde, yine 5 farklı cisim tipi için ayrı ayrı gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait sonuçların yer aldığı Şekil 52'deki grafik incelendiğinde, Sensör 2 tarafından alınan ölçümlerin de farklı cisim tiplerini doğrudan algılamada pek yeterli olmadığı görülmektedir. Doğrudan alınan sıcaklık ölçümlerinin cisimleri sınıflandırmada, her iki sensör grubu için de tek başına yeterli düzeyde olmadığı görüldüğünden, mevcut sınıflandırma işleminin, elektriksel güç verileri kullanılarak yapılabilmesinin daha mümkün olduğu düşünülmektedir.

4.2.4. Cisimlerin yüzey parlaklıklarının değerlendirilmesi

Oluşturulacak sensör grubu esas olarak kızılötesi ışıınımı ölçümleyeceğinden cisimlerin yüzey parlaklığı, kızılötesi ışıınım yoğunluğunu etkilemektedir. Bu etkileşim, kaynakların cisim yüzeyinde oluşturacağı yansımalar sebebiyle, parlaklık arttıkça algılanan kızılötesi ışıının azalması şeklinde olacaktır. Bu kapsamda, cismin parlaklık seviyesinin algılanması, sensör grubu tarafından kızılötesi ışıınımına bağlı olarak üretilen gerilim değerlerinin, gerçek sıcaklık değerleri ile ilişkilendirilerek daha doğru ve kararlı ölçüm sonuçlarının elde edilebilmesi açısından önemlidir. Bu sebeple de farklı yüzeysel özelliklere sahip cisimler için hem yüzey parlaklık seviyesinin hem de cisim sıcaklığının parlaklık seviyesine olan etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 53. Farklı yüzey özelliklere sahip cisimler için soğuma eğrilerine ait parlaklık ölçümleri

Belirlenen sıcaklık seviyesine kadar ısıtılmış olan cisimlerin soğumaya bırakılarak, bu soğuma sürecindeki yüzey parlaklıklarının değişiminin görselleştirildiği Şekil 53'teki grafik incelendiğinde, yüzey parlaklık seviyesi farklı iki cisim için, sensör grubu tarafından iki farklı gerilim seviyesinde eğri oluşturulmuştur. Bu eğriler, referans cisim sıcaklık eğrisine göre değerlendirildiğinde sensör grubu tarafından algılanan cisim yüzey parlaklığı, sıcaklık seviyesine bağlı olarak ihmal edilebilir seviyede de olsa bir değişim göstermektedir. Bunun dışında konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalardan çıkarılacak bir diğer önemli sonuç; farklı yüzey parlaklıklarının, sensör grubunda bulunan ölçüm yöntemi sayesinde, cam yüzeye rağmen önemli ölçüde algılanabilir durumda olmasıdır. Cisimler için algılanan bu yüzey parlaklık verisi, sensör grubu tarafından üretilen ölçüm sıcaklık değerlerinin güncellenebilmesi amacıyla ana algoritmaya girdi oluşturacaktır.

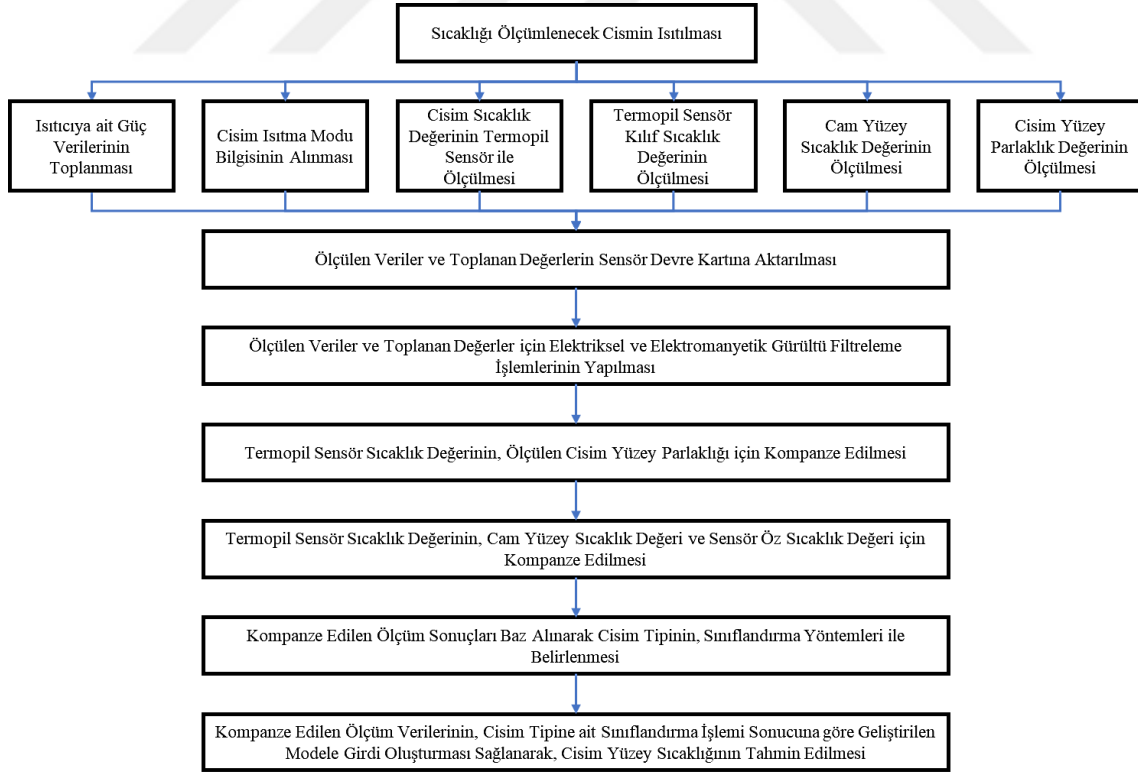
Sonuç olarak veri toplama işlemleri; farklı karakteristik özelliklere sahip cisimler, farklı ısı katsayılarına sahip sensör kılıfları ve cisimlere ait farklı ısınma sıcaklıkları için gerçekleştirilerek, yapılan çalışmaların algoritma geliştirme aşamaları için girdiler oluşturması sağlanmıştır. Ayrıca bu aşamada gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan ve paylaşılan grafiklerden ayrıntılı olarak, algoritma geliştirme aşamasında yararlanılacaktır.

6. VERİLERİN ANALİZİ

Ölçüme ait farklı konularda geliştirilen yöntemlerin, bu çalışmaya konu sensör sisteminde kullanılabilirliğinin sınanabilmesi amacıyla yapılan test ve deneylerden toparlanan veriler, belirlenen yöntemlerin ölçüme etkisinin incelenmesi sonrasında, çalışma sonunda ortaya çıkarılacak sensör sistemine ait algoritmaya girdiler oluşturacaktır. Bu kapsamda gerçekleştirilen analiz ve algoritma çalışmaları; kullanılması hedeflenen yöntemlerin parça parça ele alınıp incelenmesinin sağlanması sonrasında, sensör sistemindeki algoritmaya eklenecek hale getirilmesi ve sistemin kısmi olarak tümünden modellenmesi ile sürdürülmüştür.

6.1. Algoritma Geliştirme ve Optimizasyon Çalışmaları

Kısmi modelleme işlemi öncesinde, sensör sistemi bünyesindeki kaynakların etkili ve verimli kullanılabilmesi amacıyla, sensör sisteminin çalışmasını sağlayacak algoritmaya; gürültü filtreleme ve ölçüm doğruluğunun artırılması, yüzey parlaklık ölçümü ve emisivite kompanzasyonu, sensör bileşenleri öz sıcaklık kompanzasyonu kısımlarının eklenmesi gerekmektedir.



Şekil 54. Sensör sistemine ait algoritma akış diyagramı

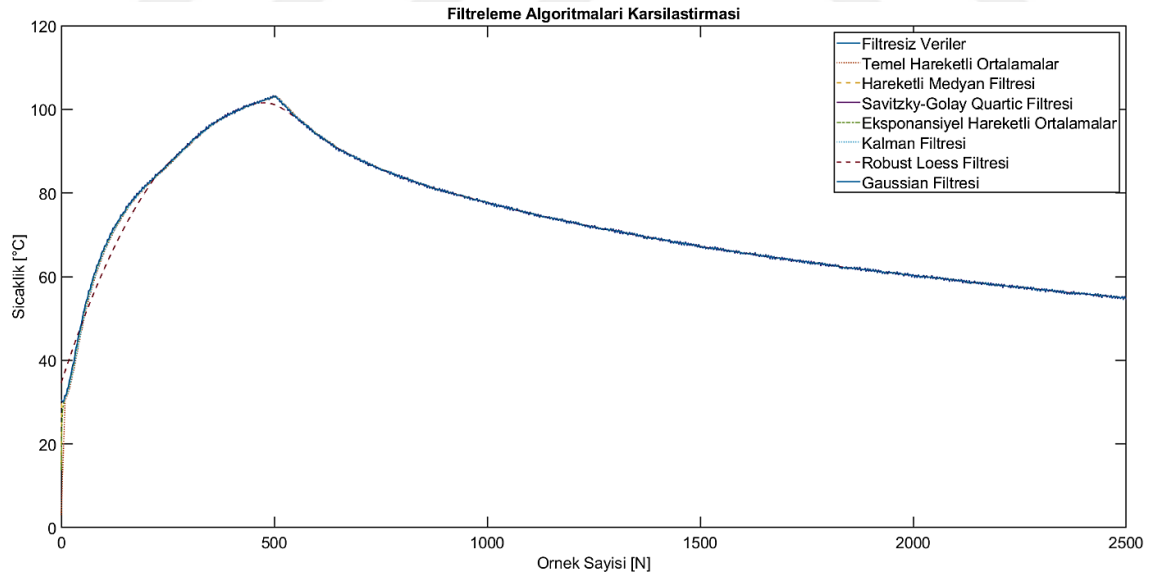
Bahsedilen kısımlar algoritmaya eklendikten sonra öncelikle; elektriksel güç

parametreleri, cisim ısınma eğrisi ve ısıtma modu bilgileri kullanılarak cisim tipi belirlenmeli, belirme işlemi sonrasında ise yapay sinir ağları kullanılarak modellenen sistemin, topladığı verilere bağlı olarak bir cisim yüzey sıcaklık tahmini yapması gerekmektedir. Bu kapsamda her işlem döngüsünde anlık olarak kendisine girdi oluşturacak yeni değerleri işleyerek bir tahmini sıcaklık değeri çıktısı oluşturan algoritma akışına ait şema, Şekil 54’te görülmektedir. Yüzey sıcaklığı ölçümlenecek cismin ısıtılmasıyla başlatılan algoritma akışı her iterasyonda, bu ısınma işlemi esnasındaki; ısıtıcıya ait güç verileri, cisim ısıtma modu bilgisi, termopil sensör devre kartına ait cisim yüzey ve sensör kılıf sıcaklık verisi, cam yüzey sıcaklık ve cisim yüzey parlaklık verisi ile beslenmektedir. Her iterasyonda yeniden ölçümlenerek elde edilen bu veriler, sensör devre kartına aktarılarak burada gerekli olan elektriksel ya da elektromanyetik gürültü filtreleme işlemlerine tabi tutulur. Filtrelenen verilerin içerisinde, cisim yüzey parlaklığından kaynaklı olarak bulunan ölçüm etkisinin, elimine edilebilmesi amacıyla cisim yüzey parlaklık verileri kullanılarak, termopil sensör devre kartına ait ölçüm verileri kompanze edilir. Bu işlem sonrasında termopil sensör devre kartına ait ölçüm verilerinin, ortam sıcaklığından bağlı olarak ısınan ya da soğuyan termopil sensör grubu bileşenleri öz sıcaklığına göre kompanze edilmesi sağlanır. Daha sonra, sensör sistemi ile cisim arasında bulunan cam yüzeyin sıcaklığının, sensör devre kartına ait ölçümlere olan etkisinin azaltılabilmesi amacıyla, cam yüzey sıcaklık kompanzasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu kompanzasyon işlemleri tamamlandıktan sonra, başlangıçta toplanan cisim ısıtma modu bilgileri ve ısıtıcıya ait güç verileri destekleri ile sensör devre kartı ölçüm verileri kullanılarak, makine öğrenmesi yöntemleri ile cisim tipine göre bir sınıflandırılma yapılması sağlanır. Sınıflandırma işlemi sonucuna göre hangi yapay sinir ağı modelinin aktif olacağı belirlendikten sonra, eldeki tüm veriler belirlenen yapay sinir ağı modeline uygulanır ve model çıktısında, cismin yüzey sıcaklığına ait bir tahmin yapılmış olur.

6.1.1. Gürültü filtreleme ve ölçüm doğruluğunun artırılması

Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılacak sensör grubunun, ortamdan veya entegre edileceği sistemden kaynaklı olarak oluşabilecek elektriksel ya da elektromanyetik gürültülere karşı tolerans gösterebilmesi, bu gürültülere rağmen ölçüm sonuçlarını mümkün olduğunca kararlı bir şekilde ilgili kontrol birimine iletmesi gerekmektedir. Bu sebeple sensör grubu için donanımsal olarak yapılan filtreleme

uygulamalarına ek olarak yazılımsal olarak da uygun dijital filtreleme uygulamasının algoritmaya entegre edilmesi, ölçüm doğruluğunun artırılabilmesi adına oldukça önemlidir. Literatürdeki dijital filtreleme çalışmaları incelendiğinde; Temel Hareketli Ortalamalar, Ekspansiyel Hareketli Ortalamalar, Savitzky-Golay Quartic Filtresi, Hareketli Medyan Filtresi, Robust Loess Filtresi, Gaussian Filtresi ve Kalman Filtresi algoritmalarının mevcut sistem özelinde uygulanabilirliğinin bulunduğu görülmüştür. Bu kapsamda literatür araştırmasında karşılaşılan dijital filtreleme algoritmaları sırasıyla, gerçek bir deneye ait sensör verileri kullanılarak test edilmiş ve performansları incelenmiştir. Isınma ve soğuma aşamalarında farklı bir ölçüm karakteristiğine sahip olacak olan ana sistem için, tüm ölçüm süreci boyunca gürültüsüz ve doğruluğu yüksek sonuçların üretilebilmesi açısından, test ve inceleme işlemlerinin en düşük sıcaklık, ısınma, en yüksek sıcaklık ve soğuma şeklinde 4 farklı aşamadan oluşturulması ve filtreleme algoritmalarının bu aşamalara göre ayrı ayrı değerlendirilmesi planlanmıştır. Bu değerlendirmeye referans olması açısından standart ısınma karakteristiğine sahip A cismi kullanılarak elde edilen gerçek deney verileri için gerçekleştirilen filtreleme uygulamalarına ait grafikler Şekil 55, Şekil 56, Şekil 57, Şekil 58 ve Şekil 59’da sırasıyla görülmektedir.

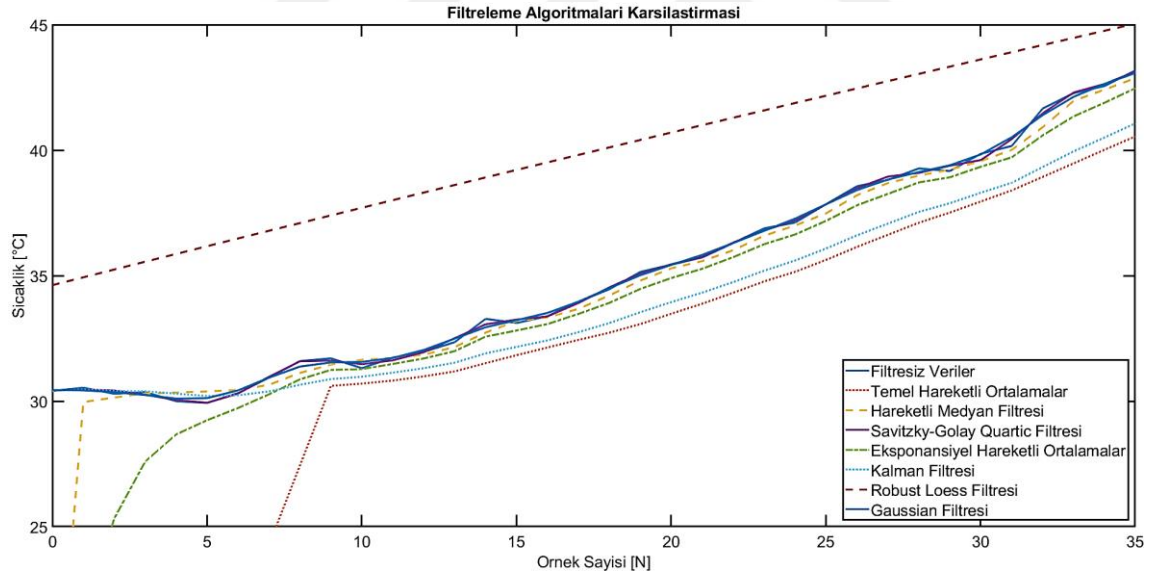


Şekil 55. Karşılaştırma grafiği genel görünümü

Analizde kullanılan deney verilerine ve farklı filtreleme algoritmaları uygulanarak elde edilmiş sonuçlara ait grafik Şekil 55’te görüldüğü gibidir. Tüm grafikler için deney süresince her saniyede 1 örnek alındığı bilgisine göre grafik incelendiğinde, tüm deneyler için ilgili sıcaklığa kadar ısıtma ve soğutma süreci toplamda 40 dakika kadar

sürmektedir. Bu süreçte özellikle indüksiyonlu ısıtıcıların ve soğutucu fanların aktif olmasından kaynaklı olarak ölçümü, sürekli ve kararsız bir elektriksel gürültü etkilemektedir. Gürültünün etkisinin, elektronik devre kartı tarafındaki donanımsal önlemler sayesinde bir seviyeye kadar azaltıldığı söylenebilir ancak ölçüm doğruluğunun artırılması, yazılımsal yöntemlerle mümkün olacaktır.

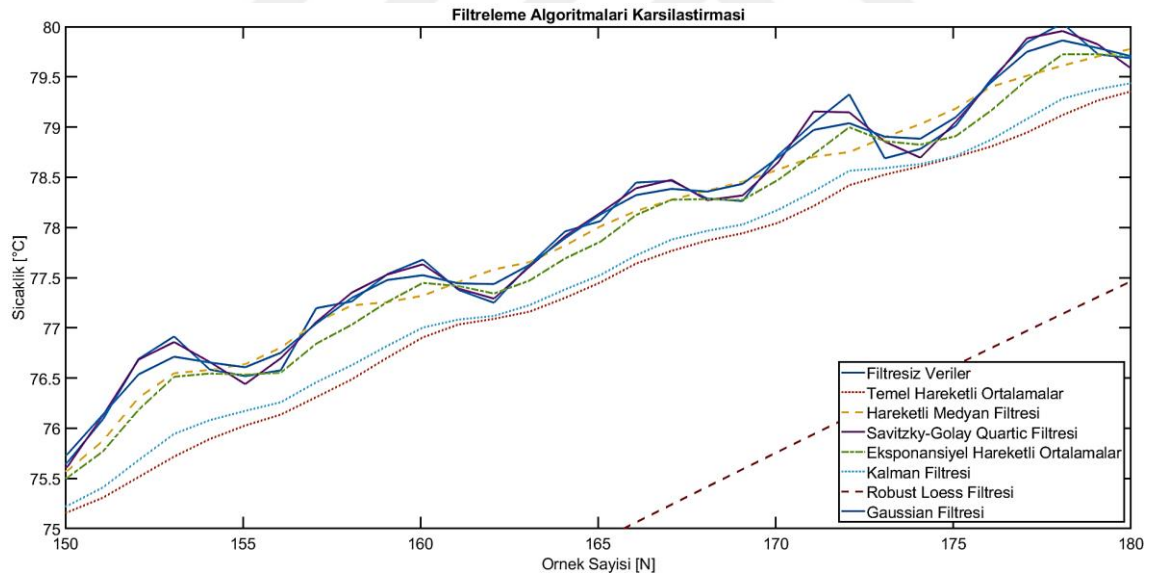
Yapılan test ve analizler için algoritmalara ait ağırlık parametrelerine, yaygın olarak kullanılan ve uygulamaya eklenebilmesi muhtemel değerler atanmıştır. Bu durumda; temel hareketli ortalamalar ve hareketli medyan filtresi için örnek alınacak çerçeve boyutunun 10, Savitzky-Golay Quartic filtresi için; polinomal derecenin 4 örnek alınacak çerçeve boyutunun 7, eksponansiyel hareketli ortalamalar için ağırlık seviyesinin 0,45 ve Kalman filtresi için gürültü kovaryans matrisleri R ile Q'nun sırasıyla 0,35 ile 0,02 ayrıca Robust Loess için açıklık değerinin 0,1 ve Gaussian filtresi için örnek alınacak çerçeve boyutunun 5 olmasının sağlanmasıyla filtre algoritmaları, deney sonuçlarına uygulanmıştır.



Şekil 56. Minimum sıcaklık aşaması için karşılaştırma grafiği

Analiz amacıyla ele alınan grafiklerden indüksiyonlu ısıtıcının ilk çalıştırılmaya başladığı kısma yani minimum sıcaklık aşamasına ait verileri barındıran Şekil 56'da, filtersiz veriler referans alınarak filtreleme yöntemleri incelendiğinde, temel hareketli ortalamalara ait verilerin referans değerlerin oldukça altında kalarak, gecikme ile referansa yakın değerler üretmeye başladığı görülmektedir. Hareketli medyan filtresi, eksponansiyel hareketli ortalamalar ve Gaussian filtresi ile Savitzky-Golay Quartic

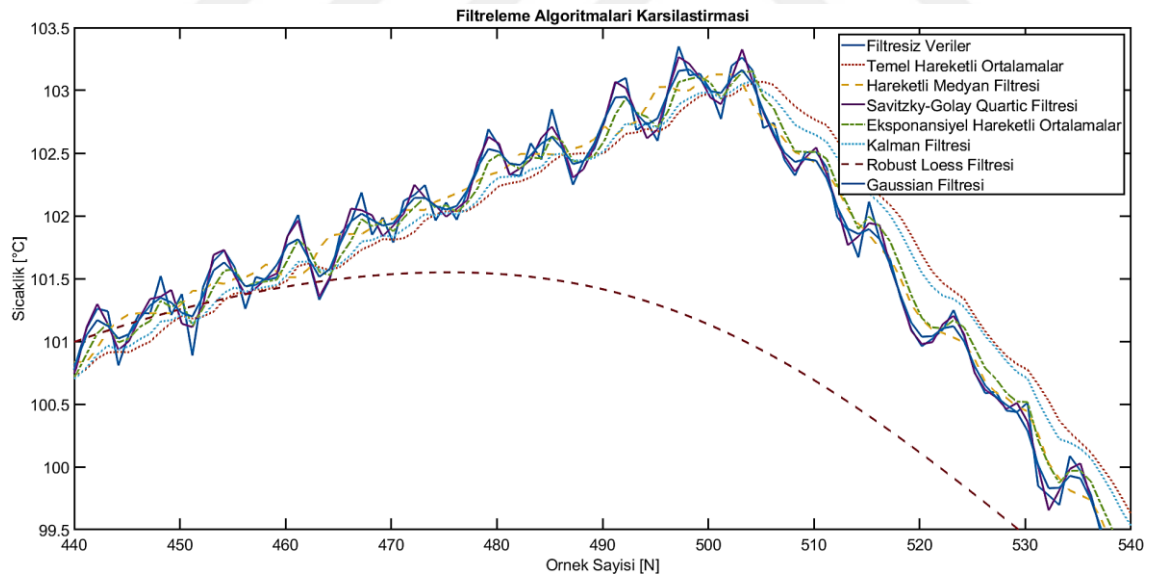
filtresine ait veriler incelendiğinde, referans değerlere oldukça yakın bir seyir ile düşük bir filtre performansı gösterilerek sinyal karakteristiği bozulmadan değerler üretildiği fark edilmektedir. Kalman filtresine ait veriler incelendiğinde, referansa göre daha düşük veriler üretildiği anlaşılsa da Robust Loess filtresi ile birlikte gösterdikleri yüksek filtreleme performansları, uygulama açısından önemlidir. Ancak Robust Loess filtresinin Kalman filtresinden farklı olarak referansa göre çok yüksek değerler ürettiği ve yüksek filtreleme performansına sahip olsa da bu özelliği ile hataya sebep olabileceği dikkate alınmalıdır. Son olarak grafik özelinde aşım, gecikme, filtreleme performansı ve sinyal karakteristiği konularında genel bir değerlendirme yapılması gerekirse; aşım konusunda Robust Loess haricindeki yöntemlerin iyi bir performans gösterdiği, gecikme ve tepki seviyesi bakımından hareketli ortalamalar temelli yöntemlerin atıl kaldığı ve tepki seviyelerinin yüksek olduğu, filtreleme performansı konusunda Gaussian ve Savitzky-Golay Quartic filtresi haricindekilerin yeterli seviyede filtreleme yapabildiği, sinyal karakteristiği konusunda da temel hareketli ortalamalar ve Robust Loess filtresi haricindekilerin sinyale ait karakteristiği önemli ölçüde koruduğu görülmektedir.



Şekil 57. Isınma aşaması için karşılaştırma grafiği

İndüksiyonlu ısıtıcı aracılığıyla sıcaklığı artırılan nesnenin, ilk ısınmadan maksimum sıcaklığa kadar olan ısınma sürecine ait verileri kapsayan Şekil 57'deki grafikte, uygulanan filtreleme yöntemleri filtresiz veriler referans alınarak incelendiğinde, temel hareketli ortalamalara ve Kalman filtresine ait verilerin referans değerlerin biraz altında kalarak, iyi bir filtreleme performansı ve kısmen az bir gecikme ile değerler üretmeye başladığı görülmektedir. Eksponansiyel hareketli ortalamalar, Gaussian filtresi ile

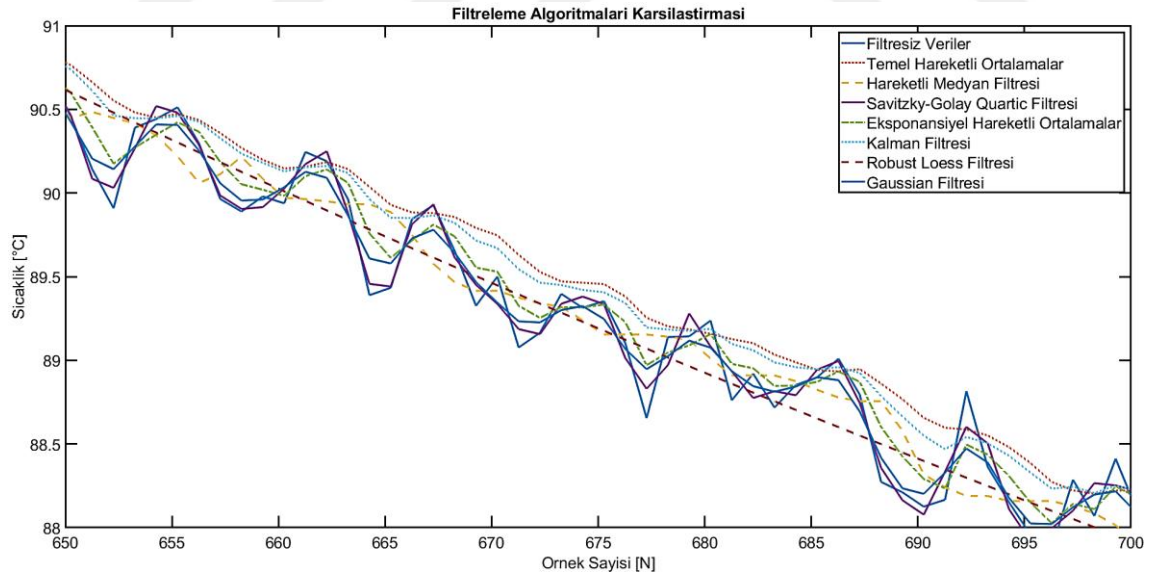
Savitzky-Golay Quartic filtresine ait veriler incelendiğinde, referans değerlere daha yakın bir seyir ile düşük bir filtre performansı gösterilerek sinyal yapısında bozulma olmadan değerler üretildiği fark edilmektedir. Bunlardan farklı olarak hareketli medyan filtresi incelendiğinde nispeten daha iyi bir filtreleme performansı ve daha yüksek seviyede bir gecikme ile değerler üretildiği, Robust Loess filtresine ait veriler incelendiğinde ise referans değerlerden ve sinyalin karakteristik özelliklerinden oldukça uzak bir filtreleme işleminin gerçekleştiği göze çarpmaktadır. Son olarak bu grafik özelinde aşım, gecikme, filtreleme performansı ve sinyal karakteristiği konularında genel bir değerlendirme yapılması gerekirse; aşım konusunda hiçbir yöntemin dikkate alınacak seviyede kötü performans göstermediği, gecikme konusunda Robust Loess, Gaussian ve hareketli medyan filtresi haricindeki yöntemlerin tepki seviyesinin nispeten daha yüksek olduğu, filtreleme performansı konusunda Gaussian ve Savitzky-Golay Quartic filtresi haricindekilerin uygulama özelinde yeterli seviyede filtreleme yapabildiği, sinyal karakteristiği konusunda da Robust Loess filtresi haricindekilerin sinyale ait karakteristiği önemli ölçüde koruduğu ve ciddi seviyede bir bozulmaya sebep olmadığı görülmektedir.



Şekil 58. Maksimum sıcaklık aşaması için karşılaştırma grafiği

İndüksiyonlu ısıtıcı aracılığıyla sıcaklığı artırılan nesnenin, maksimum sıcaklığa ulaşmış haline ait verileri kapsayan Şekil 58'deki grafikte, mevcut filtreleme yöntemleri için işlenmemiş ölçüm verileri referans alınarak incelendiğinde, temel hareketli ortalamalara ve Kalman filtresine ait verilerin referans değerlerin sıcaklık yükselirken biraz altında ve sıcaklık düşerken biraz üstünde kaldığı, iyi bir filtreleme performansı ve oldukça az bir

gecikme ile değerler üretmeye başladığı görülmektedir. Ekspansiyonel hareketli ortalamalar, Gaussian filtresi ile Savitzky-Golay Quartic filtresine ait veriler incelendiğinde, referans değerlere çok daha yakın kalarak ve düşük bir filtre performansı ile sinyal karakteristiği korunarak değerler üretildiği fark edilmektedir. Ayrıca hareketli medyan filtresi incelendiğinde diğerlerine göre iyi bir filtreleme performansı ve tolerans gösterilebilir seviyede bir gecikme ile değerler üretildiği, Robust Loess filtresine ait veriler incelendiğinde ise referans değerlerden ve sinyalin temel yapısına oldukça uzak değerler üretecek bir işlemin gerçekleştirildiği göze çarpmaktadır. Son olarak bu grafik özelinde aşım, gecikme, filtreleme performansı ve sinyal karakteristiği konularında genel bir değerlendirme yapılması gerekirse; aşım konusunda bütün yöntemlerin tolerans sınırları içerisinde değerler ürettiği, gecikme konusunda Robust Loess, Gaussian ve hareketli medyan filtresi haricindeki yöntemlerin değişime karşı reaksiyon seviyesinin nispeten daha yüksek olduğu, filtreleme performansı konusunda Robust Loess, Gaussian, Savitzky-Golay Quartic filtresi ve ekspansiyonel hareketli ortalamalar haricindekilerin grafik özelinde yeterli seviyede filtreleme yapabildiği, sinyal karakteristiği konusunda da Robust Loess filtresi haricindekilerin sinyale ait karakteristiği önemli ölçüde koruduğu ve yüksek seviyede bozulmaya sebep olmadığı görülmektedir.



Şekil 59. Soğuma aşaması için karşılaştırma grafiği

İndüksiyonlu ısıtıcı kullanılarak sıcaklığı arttırılan nesnenin, maksimum sıcaklıktan sonraki soğuma sürecine ait verileri kapsayan Şekil 59'daki grafikte, mevcut filtreleme yöntemleri için ham haldeki ölçüm verileri referans alınarak incelendiğinde, temel hareketli ortalamalara ve Kalman filtresine ait verilerin referans verilerin biraz üstünde

kaldığı, iyi bir filtreleme performansı ve sifıra yakın bir gecikme ile değerler üretmeye başladığı görülmektedir. Ekspansiyel hareketli ortalamalar, Gaussian filtresi ile Savitzky-Golay Quartic filtresine ait veriler incelendiğinde, referans değerlere çok yakın bir şekilde ve düşük bir filtre performansı ile sinyalin temel yapısı korunarak değerler üretildiği fark edilmektedir. Ayrıca hareketli medyan filtresi incelendiğinde diğerlerine göre iyi bir filtreleme performansı ve hatırı sayılır seviyede bir gecikme ile değerler üretildiği, Robust Loess filtresine ait veriler incelendiğinde ise referans değerlere oranla oldukça sert bir filtreleme uygulandığı ve sinyalin oldukça lineer bir forma dönüştürülerek temel yapısından uzaklaştırıldığı göze çarpmaktadır. Son olarak bu grafik özelinde aşım, gecikme, filtreleme performansı ve sinyal karakteristiği konularında genel bir değerlendirme yapılması gerekirse; aşım konusunda temel hareketli ortalamalara ve Kalman filtresine ait verilerin referansa oranla nispeten daha yüksek değerler ürettiği, gecikme konusunda Robust Loess, Gaussian ve hareketli medyan filtresi haricindeki yöntemlerin reaksiyon seviyesinin yüksek olduğu, filtreleme performansı konusunda Gaussian, Savitzky-Golay Quartic filtresi ve ekspansiyel hareketli ortalamalar haricindekilerin grafik özelinde iyi seviyede filtreleme yapabildiği, sinyal karakteristiği konusunda da Robust Loess filtresi haricindekilerin sinyale ait karakteristiği önemli ölçüde koruduğu ve dikkate alınabilecek seviyede bir bozulmaya sebep olmadığı görülmektedir.

Sonuç olarak tüm grafikler değerlendirilerek ilgili yöntemlere ait veriler; aşım, gecikme, filtreleme performansı ve sinyal karakteristiği konularında referans değerler için yapılan karşılaştırmalarla analiz edilmiştir. Bu kapsamda sinyal karakteristiğine yakın değerlerin üretimi ve aşım konularında özellikle Robust Loess filtresi, filtreleme performansı konusunda ekspansiyel hareketli ortalamalar, Gaussian filtresi ile Savitzky-Golay Quartic filtresi yeterli bulunmamıştır. Ayrıca gecikme konusunda temel hareketli ortalamalar ve hareketli medyan filtresi, Kalman filtresine oranla daha yüksek seviyelerde kalmıştır. Bunlara ek olarak Kalman filtresinin uygulama özelinde; sistem yazılımına kolay entegre edilebilmesi, mikrodenetleyici açısından düşük işlem gücüne ve daha az hafıza alanına ihtiyaç duyuyor olması, gerçek zamanlı olarak kazanç parametrelerinin değiştirilip filtreleme ağırlıklarının hızlıca ayarlanabiliyor olması, iyi bir filtreleme performansı sergilemesine rağmen ürettiği değerleri çok düşük gecikmelerle orijinal sinyale yakınsayabiliyor olması gibi avantajlarının bulunduğu fark

edilmiştir. Sıralanan bu sebeplerden ötürü uygulama özelinde potansiyel gürültülerin giderilmesi, ölçüm doğruluğunun artırılması ve sistem kararlılığının korunması amacıyla, gerçek zamanlı olarak Kalman filtresinin kullanılması kararına varılmıştır.

6.1.1.1. Kalman filtresi

Sistemlerin matematiksel olarak modellenip kontrol edilmesi söz konusu olduğunda pratikte; sistem için gerçekte var olan bazı dinamiklerin modelde dikkate alınamamasından dolayı sistem modelinin mükemmel olmaması ve ölçüm birimlerinin bozucu etkilere maruz kalması sebebiyle sistem kontrolü için temiz ve kararlı ölçümlerin alınamaması, şeklinde sıralanabilecek iki temel problem bulunmaktadır. Tasarım sonunda ortaya çıkarılacak sistemden örnek verilmesi gerekirse; ölçümlerin elektriksel ya da elektromanyetik gürültülerden etkilenmesi, ani sıcaklık değişimleri, anlık optik gürültüler ve çevresel koşullardan kaynaklı diğer potansiyel gürültüler gibi durumların sistem kararlılığını bozmaması amacıyla, geri besleme olarak kullanılacak verilerin mikrodenetleyiciye düşük hata toleransı ile daha temiz bir şekilde iletilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda kullanılması hedeflenen Kalman filtresinin, girişe ait bozucu etkiler ve çıkışa ait kararsız veriler altında sistemin, daha önceki sonuçlara göre bilinen giriş ve çıkış durumlarından faydalanarak bilinmeyen dinamik değişimlerinin gürültüsüz olarak elde edilebilmesini sağlaması amaçlanmaktadır. Temel manada bir sistem gözleyicisi olan Kalman filtresi, girişi ve ölçümlenen gürültülü çıkışı dikkate alarak sistemin gerçek çıkışını tahmin etmeye çalışmaktadır.

Kalman filtresi uygulanacak sistemlerin matematiksel olarak, Denklem 6.1 ve Denklem 6.2’de yer aldığı gibi, iki temel durum denklemi ile modellenmesi söz konusudur.

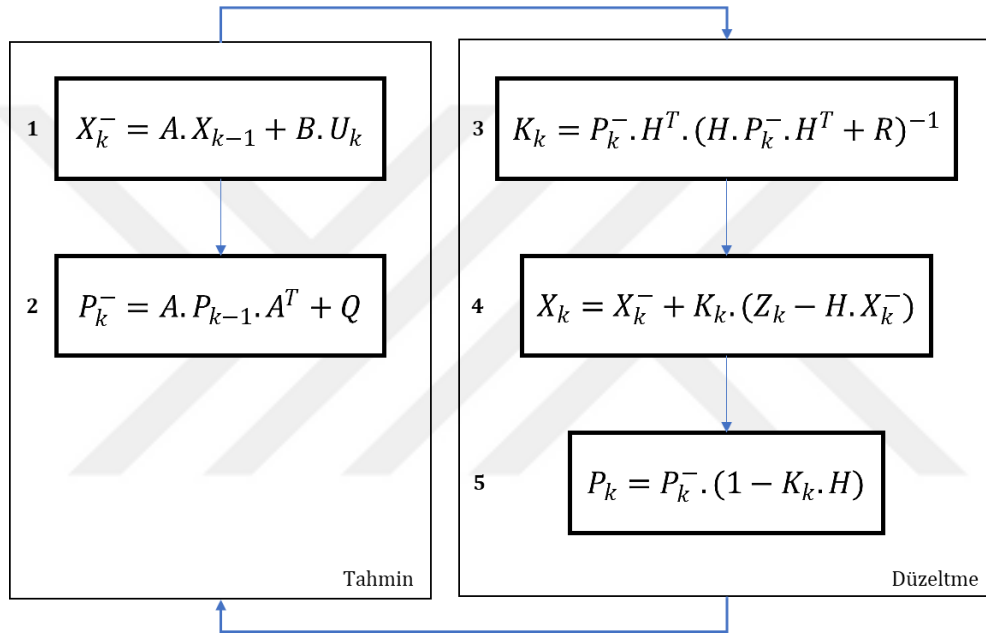
$$X_k = A.X_{k-1} + B.U_k + W_{k-1} \quad 6.1$$

$$Z_k = H.X_k + V_k \quad 6.2$$

X_k ile sistem durumunun, Z_k ile ise ölçüm durumunun ifade edildiği Denklem 6.1 ve Denklem 6.2’de bulunan k zaman göstergesini, U_k sistem girişini yani kontrol sinyalini, W_{k-1} sistem gürültüsünü, V_k ise ölçüm birimine ait gürültüyü belirtmektedir. Bu aşamada sistem durumu; kontrol sinyali, bir önceki Kalman değeri ve bir önceki gürültü değerinin toplamı olarak modellenebilirken ölçüm durumu ise; yeni Kalman değeri ve yeni gürültü değerinin toplamı olarak modellenebilmektedir. Söz konusu uygulamada

Kalman filtresi; bir ölçüm sistemine entegre edileceğinden, bu sistemde bir kontrol sinyali bulunmayacağından ve bir boyutlu bir sistemi ifade edeceğinden denklemlerde görülen U_k değeri “0”, H ve B değerleri ise “1” olarak kabul edilebilecektir.

Sistem durumu hakkında optimize edilmiş bir tahmin sağlayan Kalman filtresi, tahmin ve düzeltme olmak üzere iki temel aşamadan oluşmaktadır. Tahmin aşaması; önceki durumun ve hata kovaryansının tahmin edilmesini içerirken düzeltme aşaması, Kalman kazancının hesaplanmasını, ölçüm durumunun tahmin edilmesini ve hata kovaryansının güncellenmesini içermektedir.

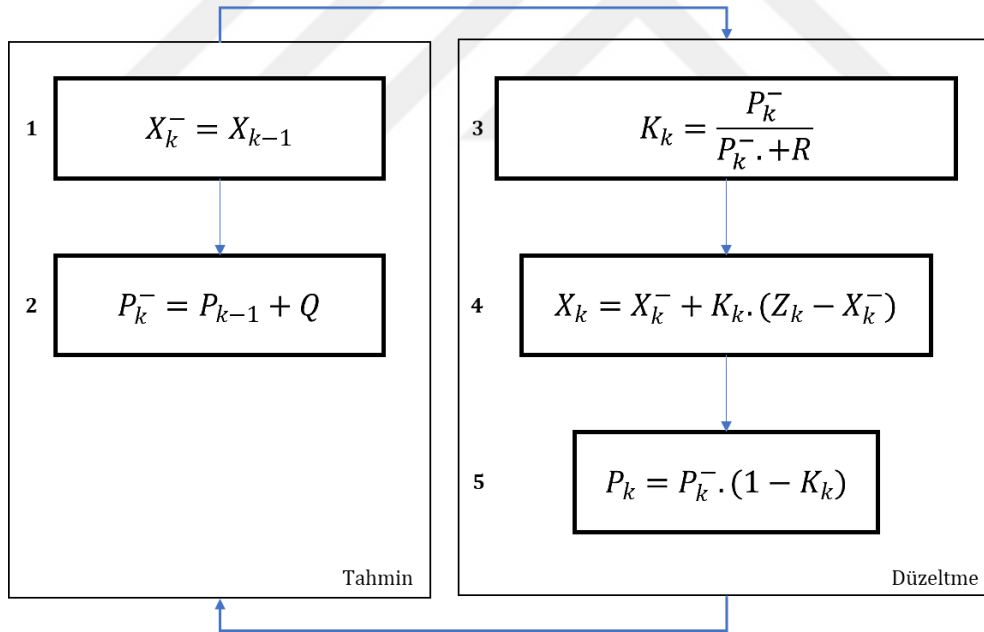


Şekil 60. Kalman filtresi akış diyagramı

Şekil 60’ta görülen diyagramda Kalman filtresinin çalışma süreci $k = 0$ için ilk girdiye uygun olarak yapılan başlangıç tahmini ile başlatılır ve ilk döngü tamamlanır. Diyagramdaki “Tahmin” aşamasında 1 ile numaralandırılan ikinci döngünün birinci adımında, denkleme göre önceki sistem durumu tahmin edilir. Diyagramda 2 ile numaralandırılan ikinci adımda, birinci adımda yapılan durum tahmini için hata kovaryansları tahmin edilir. Bu işlem tamamlandıktan sonra diyagramdaki “Düzeltme” aşamasında 3 ile numaralandırılan adımda, Kalman kazancı hesaplanır. Diyagramda 4 ile numaralandırılan adımda ölçüm durumu için yapılan tahmin güncellenir bu aşamaya ait hata kovaryansı güncellenmesi işlemi gerçekleştirilir. Tahmin ve düzeltme aşamalarına ait döngünün sürekli devam ettirilebilmesi için k için yapılan işlemlere ait sonuçların, $k + 1$ için girdi oluşturması gerekmektedir.

Tüm bu aşamalarda kullanılması gereken hata kovaryansı, esasen sisteme ait tüm verilerden bağımsız olarak elde edilen bir değerdir. Sistemin modellenmesi için kullanılan bu hata kovaryansı değerinin elde edilebilmesi için Q ve R katsayılarının belirlenebilmesi gerekmektedir. Bu katsayılar belirlenirken $Q > R$ şeklinde yapılabilecek bir seçim, oluşturulan modelde hatanın daha baskın olduğu durumlar için tercih edilmeliyken $Q < R$ şeklinde yapılabilecek bir seçim, ölçümlerde hatanın daha baskın olduğu durumlarda tercih edilmelidir. Son olarak $Q = R$, sistem için oluşturulan modelde mi yoksa ölçümde mi hatanın baskın olduğunun bilinemediği durumlar için tercih edilmelidir.

Şekil 60'ta "Tahmin" olarak nitelendirilen aşama esasen zaman göstergesine ait güncellemelerin yapıldığı kısımken, "Düzeltilme" olarak nitelendirilen aşama, ölçüm doğrulamanın yapıldığı kısımdır. Gerekli katsayılar yerine yazıldığında Şekil 60'taki akış diyagramı, Şekil 61'deki hale bürünecek ve sistem algoritmasına daha kolay entegre edilebilecektir.

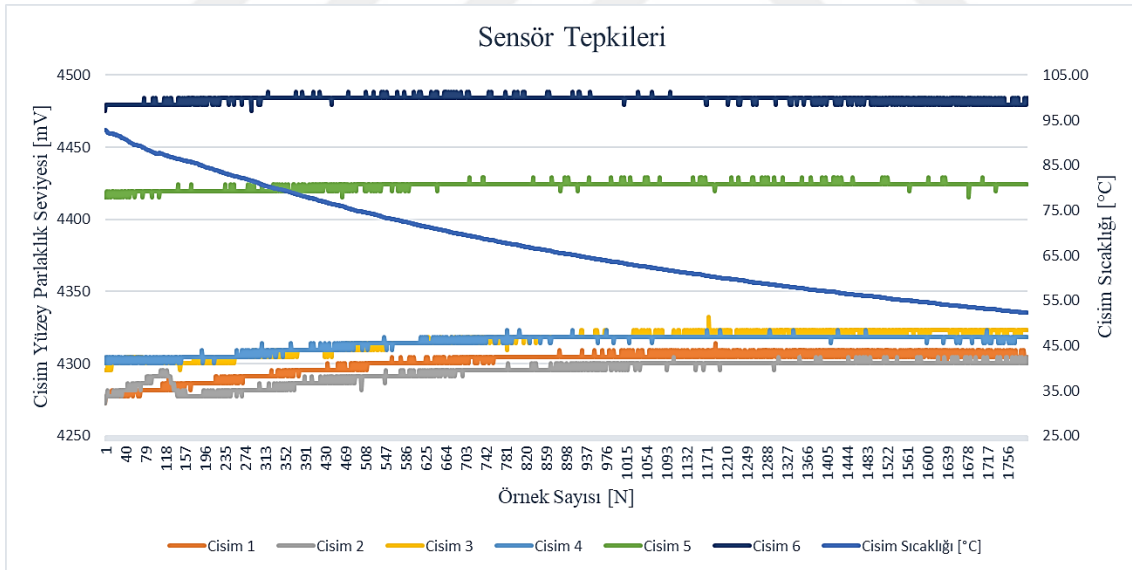


Şekil 61. Uygulama özelindeki Kalman filtresi akış diyagramı

6.1.2. Yüzey parlaklık ölçümü ve emisivite kompanzasyonu

Bilindiği gibi belirli bir sıcaklığa sahip olan cisimlerin bu sıcaklık seviyesine bağlı olarak oluşturdukları kızılötesi ışıyım seviyeleri, yüzeylerinin karakteristik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Mevcut çalışmada kullanılan kızılötesi sensörün de bu ışıyım ile orantılı olacak şekilde bir elektriksel çıkış ürettiği varsayıldığında, aynı sıcaklık

seviyelerinde bulunan iki cisim için oluşturulacak olan elektriksel çıktılar, başta emisivite olmak üzere cisimlerin farklı yüzeysel özelliklere sahip olmaları sebebiyle aynı seviyelerde olmayacaktır. Bu sebeple kızılötesi ısıtım temelli benzer yöntemler kullanılarak gerçekleştirilecek ölçümlerde, cisimlerin sıcaklık seviyelerinin doğru olarak tahmin edilebilmesi için yüzeysel özelliklerin bir katsayı olarak sınıflandırılabilmesi oldukça önemlidir. Cisimlerin yüzey parlaklıklarının ölçülüp emisivitesine ait çıkarımların yapılabilmesi amacıyla, yapılan deneysel çalışmalardan bir kısmına ait ölçümler, Şekil 62'deki grafikte görülmektedir. Grafik incelendiğinde geliştirilen devre kartının, farklı yüzey parlaklıklarına sahip cisimler için birbirinden farklı gerilim değerleri ürettiği görülmektedir. Cisimlere ait parlaklık sıralamasının en parlak cisim olan Cisim 2'den en az parlak cisim olan Cisim 6'ya kadar olan hali ise; Cisim 2, Cisim 1, Cisim 4, Cisim 3, Cisim 5 ve Cisim 6 şeklindedir. Yapılan deneysel çalışmalar, cisimlerin sıcaklık değerleri ile algılanan yüzey parlaklık seviyesi arasındaki ilişkinin, indüksiyonlu ısıtıcı kaynaklı olarak oluşacak elektromanyetik gürültüden etkilenmeden temiz bir şekilde incelenebilmesi amacıyla cisimlerin yüzey sıcaklıklarının, 95°C'den 55°C'ye kadar düşürülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 62. Farklı yüzeysel özelliklere sahip cisimlerin yüzey parlaklık seviyeleri

Sensör grubu tarafından temassız olarak ölçülen sıcaklık değerinin cisim emisivitesine göre düzeltilmesi ve cismin gerçek sıcaklık değerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, ölçümlenen yüzey parlaklık seviyelerinin temel alınıp hedef cismin yüzeysel özellikleri kullanılarak algoritmaya eklenmek üzere, cisme ait bir emisivite katsayısının

belirlenmesi gerekmektedir. Bu katsayı belirlendikten sonra problemin teorisi ile ilgili bazı matematiksel ifadelerden faydalanılarak, gerekli düzeltme işlemlerinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda kullanılacak matematiksel ifadelerden ilki, hedef cisimden yayılan toplam radyasyon gücünün, cismin sıcaklığı ve yüzey parlaklığı ile fiziksel yapısından kaynaklı emisivitesine bağlı olduğunu belirten Denklem 6.3'tür [41].

$$L = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 6.3$$

Denklem 6.3'te görülen L hedef nesne tarafından oluşturulan toplam radyasyonu, ε emisivite katsayısını, σ Stefan-Boltzmann sabitini ($\sigma = 5,6.10^{-8} \frac{W}{m^2} K^4$), T Kelvin ($^{\circ}K$) cinsinden mutlak sıcaklığı ifade etmektedir. Denklem 6.3'te görülen ifade literatürde mevcut olan bazı çalışmalar sayesinde Denklem 6.4'teki hale dönüştürülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmalarda ortam sıcaklığının, termopil sensör çekirdeği ölçümlerine olan etkisini telafi edebilmek amacıyla ölçüm sisteminde, dahili bir telafinin devresi ya da matematiksel olarak Denklem 6.4'ü temel alan bir telafi algoritmasının bulunması gerektiği vurgulanmıştır [42].

$$P_{rad} = K' \cdot (\varepsilon_t \cdot T_t^4 - \varepsilon_s \cdot T_a^4) \quad 6.4$$

Denklem 6.4'te görülen P_{rad} hedef cisim tarafından oluşturulan toplam radyasyonun sensör tarafından algılanan miktarını, K' Stefan-Boltzmann sabitini içeren ampirik bir katsayıyı, ε_t hedef cismin emisivite katsayısını, T_t hedef cismin Kelvin ($^{\circ}K$) cinsinden mutlak sıcaklığını, ε_s termopil sensör grubu ve ortama ait emisivite katsayısını, T_a ortamın Kelvin ($^{\circ}K$) cinsinden mutlak sıcaklığını ifade etmektedir. Buradaki ε_s 'nin ilerleyen aşamalarda $1 - \varepsilon_t$ olarak ifade edilebildiği varsayılmıştır [43]. Bunun sebebi esasen; bir kızılötesi ışıyım kaynağı tarafından oluşturulan radyasyonun, doğrudan hedef tarafından oluşturulan radyasyon ve ortamdaki ya da arka plandan kaynaklı olarak oluşan radyasyon olmak üzere iki bileşeni bünyesinde barındırmasıdır. İkinci bileşenin çoğunlukla $1 - \varepsilon_t$ şeklinde ifade edilerek hedef cismin yüzey emisivitesi ε_t 'ye göre ağırlıklandırıldığı varsayılırsa sensör grubu tarafından algılanan toplam radyasyon matematiksel olarak Denklem 6.5'teki gibi ifade edilebilir [44].

$$E_{sensor} = \varepsilon \cdot E_{target} + (1 - \varepsilon) \cdot E_{background} \quad 6.5$$

$$E_{target} = \varepsilon \cdot E_{blackbody} \quad 6.6$$

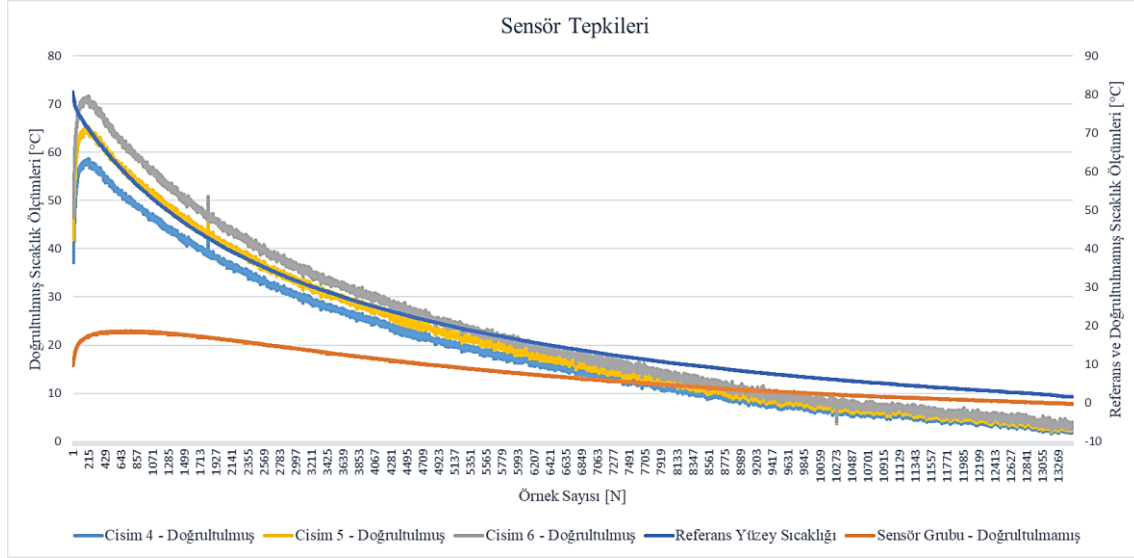
$$E_{blackbody} = \sigma \cdot T_{blackbody}^4 \quad 6.7$$

Denklem 6.5, Denklem 6.6 ve Denklem 6.7’de görülen E_{sensor} sensör tarafından algılanan toplam kızılötesi ışıını, ε hedef cisme ait emisivite katsayısını, E_{target} cisim tarafından oluşturulan kızılötesi ışıını, $E_{background}$ ortam tarafından oluşturulan kızılötesi ışıını, $E_{blackbody}$ cismin bir siyah cisim kabul edilmesi durumunda oluşturacağı kızılötesi ışıını, $T_{blackbody}$ cismin bir siyah cisim kabul edilmesi durumunda mevcut ışıını için sahip olması gereken sıcaklığı ifade etmektedir. Bu bilgiler ışığında denklemler kullanılarak gerekli yerine koyma ve sadeleştirme işlemleri gerçekleştirilirse son durumda kullanılacak matematiksel ifadeler, Denklem 6.8 ve Denklem 6.9’daki hale getirilecektir [45].

$$\sigma \cdot (T_{sensor})^4 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{target})^4 + (1 - \varepsilon) \cdot \sigma \cdot (T_{background})^4 \quad 6.8$$

$$T_{target} = 4 \sqrt{\frac{(T_{sensor})^4 - (1 - \varepsilon) \cdot (T_{background})^4}{\varepsilon}} \quad 6.9$$

Denklem 6.9’da verilen matematiksel ifade, farklı yüzey parlaklık seviyelerine ait cisimlerde sonuçların daha izlenebilir olması amacıyla Cisim 4, Cisim 5 ve Cisim 6 için daha öncesinden ölçüm alınarak elde edilen veri setlerine uygulanmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar Şekil 63’te görülmektedir. Uygulama esnasında cisimlere ait emisivite katsayıları sırasıyla; 0.25, 0.175 ve 0.1 şeklinde alınmıştır. Ayrıca hesaplamalar, matematiksel ifadedeki T_{target} cisim referans sıcaklıklarının tahmin edilebilmesi amacıyla, T_{sensor} termopil sensör grubu ölçüm sıcaklıkları ve $T_{background}$ sensör kılıf sıcaklıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 63. Referans sıcaklığa yaklaşabilmek amacıyla parlaklık seviyelerine göre doğrultulmuş sıcaklık ölçümleri

Şekil 63'teki grafik incelendiğinde, bütün cisimler için yapılan gürültü filtreleme ve emisivite düzeltme işlemlerinin, doğrultulmamış sensör ölçümlerine göre oldukça başarılı olarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Ayrıca filtreleme ve düzeltme kısımlarını barındıran mevcut algoritmanın bir çıktısı olarak üretilen tahmini değerlerin, genel olarak cismin referans yüzey sıcaklık seviyelerini takip etme eğiliminde olduğu da söylenebilir. Son olarak cisimler, yüzeysel özellikler bakımından farklı parlaklık seviyelerinde ve benzer fiziksel formlarda olduklarından, algoritmaya eklenecek matematiksel ifadelerde kullanılmak üzere, atanan emisivite katsayı değerleri için de başarılı bir seçim yapıldığı çıkarımı, deneysel sonuçlara ait grafikler incelendiğinde yapılabilmektedir.

Sensör grubu ile hedef cisim arasında bir cam yüzeyin kullanılmadığı Şekil 63'te sonuçları görülen deneysel çalışmaların bu aşamasında, filtreleme ve düzeltme işlemleri sonucu oluşturulan tahmini sıcaklık değerleri ile referans sıcaklık değerlerine ait eğriler arasındaki hata seviyelerinin incelenmesi amacıyla, farklı hata metriklerine göre yapılan hesaplamalar Tablo 9'da da görülmektedir.

Tablo 9. Emisivite ve filtreleme aşaması sonucunda gerçekleştirilen tahmini sıcaklık değerlerine ait performans değerlendirmeleri

Hata Metrikleri	Cisim 6	Cisim 5	Cisim 4
Ortalama Hata (ME)	-3,03590886	-0,99743409	1,076727611
Ortalama Yüzde Hata (MPE)	-29,5930205	-16,8678062	-4,08393450

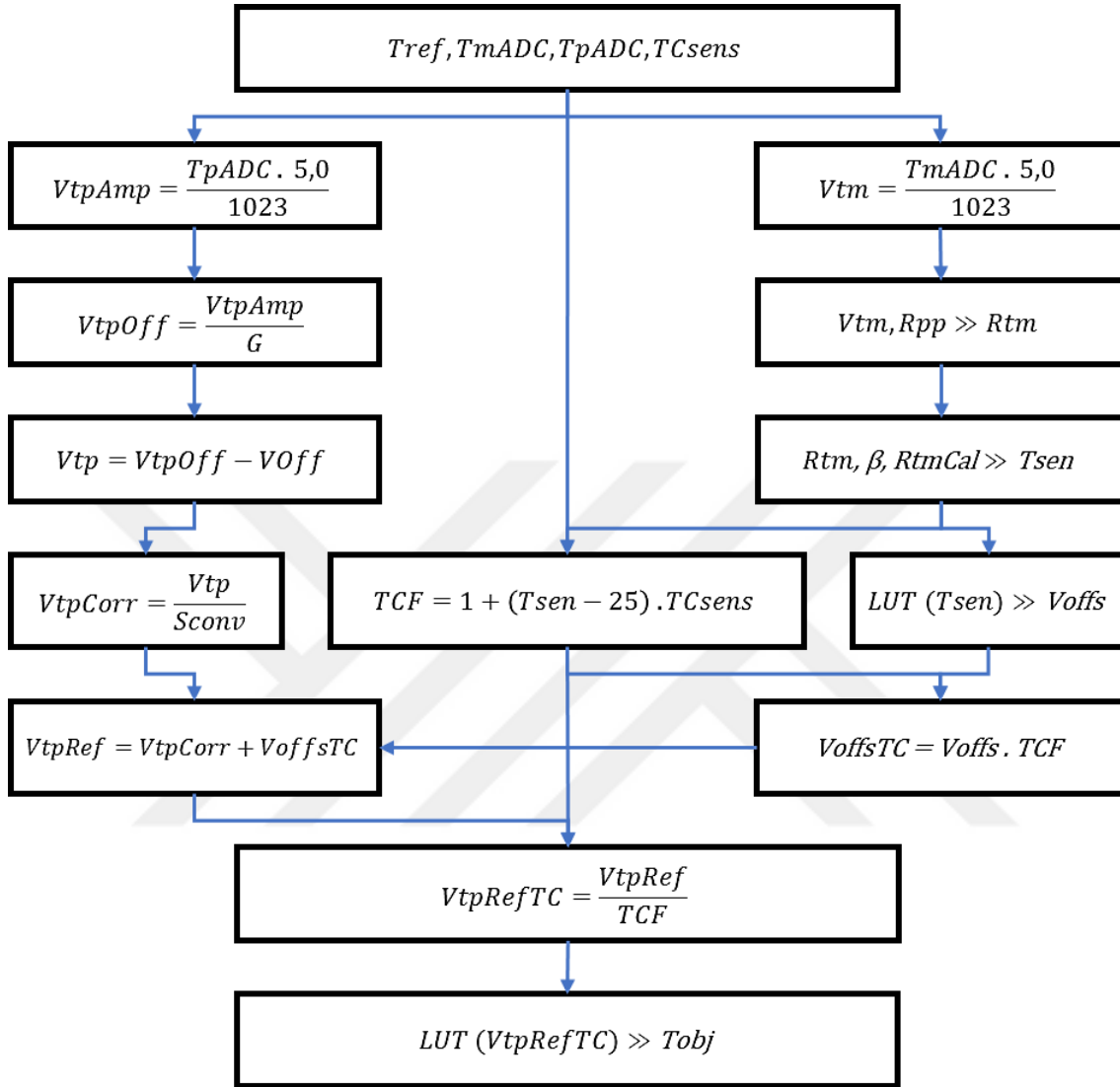
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	3,277510704	1,996451706	1,869111258
Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE)	29,91158553	18,38609071	9,737078725
Ortalama Kare Hata (MSE)	13,60803987	8,002508883	15,46713414
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	3,688907680	2,828870602	3,932827754

6.1.3. Sensör grubu bileşenleri öz sıcaklık kompanzasyonu

Tez çalışmasında kullanılan temassız ölçüm yöntemi ile ilgili yapılan araştırmalarda, termopil sensör gruplarının hedef cisim sıcaklıklarını ölçümlemlerken, sensör grubunu oluşturan bileşenlerin, öz sıcaklıklarına (sensör kılıf sıcaklığına) bağlı olarak oluşturacağı kızılötesi ışıınımdan, etkilendiği görülmüştür. Mevcut çalışmada da ölçüm doğruluğunun arttırılabilmesi amacıyla, çoğunlukla ortam sıcaklığından kaynaklı olarak oluşan bileşenlere ait bu kızılötesi ışıınım etkisinin, kompanze edilmesi gerekmektedir. Bu kompanzasyon işlemi, sensör grubu bileşenleri öz sıcaklık verisinin kılıf sıcaklığı olarak kabul edilmesiyle, sensör grubuna ait devre kartına özel olarak, bazı temel matematiksel ifadeler ve Şekil 64'teki akış diyagramından faydalanılarak gerçekleştirilebilmektedir.

Şekil 64'te yer alan akış diyagramı incelendiğinde kompanzasyon işlemine, nesne ve sensör sıcaklığının, referans sensör ve geliştirilen sensör grubu ile ölçümlenerek sırasıyla Tref, TmADC, TpADC değerlerinin elde edilmesiyle ve termopil sensör çekirdeğine ait bilgi dokümanında bulunan bazı parametrelerin işleme alınmasıyla başladığı görülmektedir. Ölçümleme işleminden sonra, alınan verilerin kompanzasyon için uygun formata dönüştürülebilmesi için termopil sensör grubundan 0-1023 aralığında 10 bit ADC ile alınan termopil ve kılıf sıcaklık verisinin (TpADC, TmADC), sırasıyla milivolt tipinden gerilim seviyesine dönüştürülmesi (VtpAmp, Vtm) sağlanmıştır. Bu ilk dönüşüm işlemi tamamlandıktan sonra, termopil sensör devre kartı tarafından üretilen gerilimin (VtpAmp), sinyal kuvvetlendirme grubu ile sağlanan kazanç değerine (G) bölünerek, kuvvetlendirme öncesindeki gerilim seviyesinin (VtpOff) hesaplanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Sensör devre kartında bulunan voltaj referans entegresi ile sağlanan bu dengeleme (offset) seviyesi (VOff), kuvvetlendiriciye uygulanacak gerilimden (VtpOff) çıkarılarak termopil sensör çekirdeği tarafından üretilen milivolt düzeyindeki gerilim seviyesi (Vtp) elde edilmiştir. Elde edilen, sensör çekirdeği tarafından üretilen elektriksel gerilimin, ölçüm doğruluğunun arttırılabilmesi amacıyla

gerekli kalibrasyon işlemi için, dönüşüm faktörüne (S_{conv}) bölünmesiyle doğrultulmuş gerilim seviyesi (V_{tpCorr}) değerine ulaşılmıştır.



Şekil 64. Sensör grubu bileşenlerine ait öz sıcaklık kompanzasyonu akış diyagramı

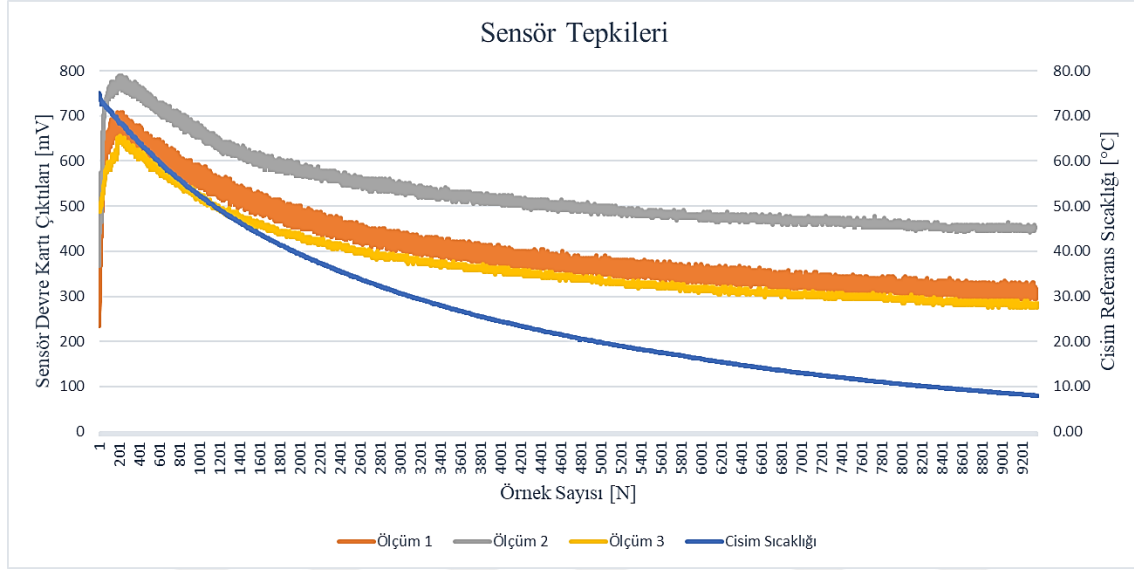
Termopil verileri ile ilgili gerçekleştirilen bu işlemlerden bağımsız olarak kılıf sıcaklığının belirlenebilmesi amacıyla diğer taraftan öncelikle, sensör devre kartında bulunan termistörün üzerine düşen gerilimden (V_{tm}), anlık olarak termistör direnç değerlerinin (R_{tm}), daha sonra ise termistör direnç değerinden, termistörün karakteristik parametreleri (β , R_{tmCal}) kullanılarak sensör kılıf sıcaklık değerinin (T_{sen}) hesaplanması işlemi tamamlanmıştır. Diğer taraftan termistör ve termopil verileri ile ilgili işlemlerden bağımsız bir şekilde termopil sensör çekirdeğinin, kalibrasyon verileri referans alınarak, hangi kılıf sıcaklıklarında iken (T_{tmCal}) hangi cisim sıcaklık değerleri için (T_{tpCal}) hangi elektriksel gerilimi üreteceği (V_{tpCal} , V_{offs}) doğruluk tablosu

yardımıyla oluşturulan kalibrasyon eğrisi kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu aşamaya kadar işlenerek hesap edilmiş olan termopil ve termistör verilerinden bağımsız olarak, sensör kılıf sıcaklık değeri (T_{sen}) ve kalibrasyon koşullarındaki voltaj tepkisinin sıcaklık katsayısı değeri (TC_{sens}) kullanılarak voltaj tepkisi sıcaklık faktörü (TCF) elde edilmiştir. Elde edilen voltaj tepkisi sıcaklık faktörü (TCF) termistör tarafında; termopil sensör çekirdeği tarafından üretilen elektriksel gerilim seviyesi (V_{offs}) ile çarpılarak voltaj tepkisi sıcaklık faktöründen arındırılmış gerilim seviyesinin (V_{offsTC}) hesaplanması sağlanmıştır. Doğrultulmuş termopil sensör çekirdeği gerilim seviyesi (V_{tpCorr}), hesaplanan bu, voltaj tepkisi sıcaklık faktöründen arındırılmış gerilim seviyesi (V_{offsTC}) ile toplanarak termopil tarafında; referans termopil sensör çekirdeği gerilim seviyesinin (V_{tpRef}) eldesini sağlamıştır. Gerçekleştirilen işlemlerde sona gelirken hesaplamaların başında, çarpım ile işleme alınan voltaj tepkisi sıcaklık faktörünün (TCF), hesaplamalardaki etkisinin çıkarılarak hesaplamalarda yalnızca voltaj tepkisi sıcaklık faktöründen arındırılmış gerilim seviyesinin (V_{offsTC}) kalması amacıyla, referans termopil sensör çekirdeği gerilim seviyesinin (V_{tpRef}), voltaj tepkisi sıcaklık faktörüne (TCF) bölünmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak elde edilen voltaj tepkisi sıcaklık faktöründen arındırılmış termopil sensör çekirdeği referans gerilim seviyesi ($V_{tpRefTC}$), sensör çekirdeği bilgi dokümanında yer alan, kalibrasyon koşulları altındaki doğruluk tablosu yardımıyla oluşturulan kalibrasyon eğrisi kullanılarak, hedef nesnenin yüzey sıcaklığı hesaplanmıştır. Bu aşamaya kadar yapılan işlemlerin tümünde, termopil sensör çekirdeği tarafından üretilen gerilimin, kalibrasyon koşullarında iken kılıf sıcaklığına bağlı olarak nasıl etkileneceğine dair mevcut ifadesinin, gerçekleştirilen ölçüme uygulanması sağlanmıştır.

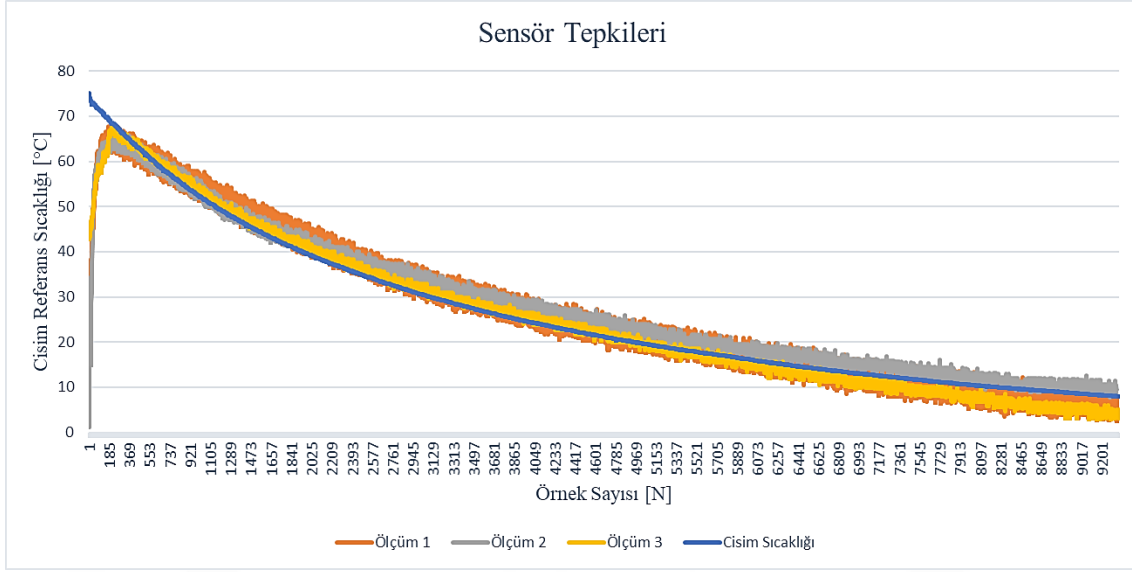
Termopil sensör grubuna ait bileşenlerin sıcaklık kompanzasyonunun gerçekleştirilebilmesi için bu aşamaya kadar teorik olarak gerçekleştirilen işlemlerin, deneysel olarak gözlemlenebilmesi amacıyla belirli koşullar altında bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar, temel filtreleme algoritmaları, emisivite, ya da cam yüzey sıcaklık kompanzasyonları gerçekleştirilmeden, polikarbonat dış kılıf içerisine konumlandırılmış Sensör 1 ile ve cisim ile sensör grubu arasında cam yüzey bulundurulmadan, veriler toplanarak tamamlanmıştır. Ayrıca çalışmalarda, sensör grubu bileşenlerine ait sıcaklıkların, sensör

grubu dış kılıf sıcaklığına eşit olduğu kabulü yapılmış ve cisimler önceden ısıtılarak veri toplama işlemleri, soğuma ile ilgili olan sürecin takibini sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan standart ısınma karakteristiğine sahip A cismi kullanılarak gerçekleştirilen soğutma deneylerine ait başlangıçtaki verileri ve kompanzasyon işlemi sonrasında elde edilen verileri içeren grafiksel gösterimler Şekil 65 ve Şekil 66’da görülmektedir.



Şekil 65. Termopil sensör devre kartları çıktılarına ait işlenmemiş ölçüm verileri

Cisim yüzey soğuma sürecinin, üç farklı termopil sensör ve bir referans sensör ile gözlemlendiği deneysel çalışmaya ait veriler için hazırlanan Şekil 65’teki grafik incelendiğinde, referans sensör verilerine göre soğuma işleminin, 75°C seviyelerinden başlayarak 10°C seviyelerine kadar sürdüğü görülmektedir. Bu soğuma süreci boyunca sensör devre kartı üzerindeki cisim yüzey sıcaklığına bağlı olarak termopil sensör grubu tarafından üretilmiş elektriksel gerilimin bir miktar kaydırılarak kuvvetlendirilmiş hali incelendiğinde, üretilen milivolt mertebesindeki gerilim seviyelerinin, üç devre kartı için de sıcaklığa bağlı olarak farklı ölçülerde azaldığı fark edilmektedir. Elde edilen milivolt tipindeki bu verilerden sadece termopil sensör grubunu kullanarak sıcaklık tahmini yapılabilmesi, kompanzasyon ve dönüşüm işlemleri yapılmadan pek mümkün değildir. Bu durumun temel sebebi, sadece termopil sensör çekirdeği tarafından üretilen veriler ile oluşturulan eğrinin, referans sensör tarafından cisim yüzey sıcaklığına bağlı olarak üretilen veriler ile oluşturulan eğriyi takip edememesidir.



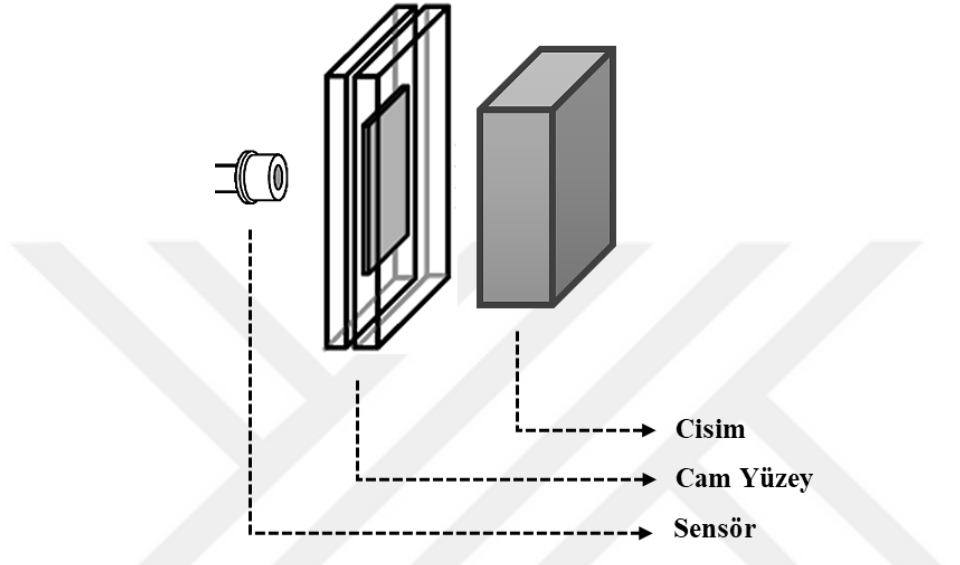
Şekil 66. Referans sıcaklığa yaklaşabilmek amacıyla öz sıcaklık kompanzasyonları yapılmış devre kartlarına ait sıcaklık ölçümleri

Cisim yüzey soğuma sürecine ait verilerin büyük ölçüde kompanze edilmiş hallerinin bulunduğu Şekil 66'daki grafik incelendiğinde, cisim yüzey sıcaklığına ait referans ölçüm verilerinin ve termopil sensör grubu çıktılarına ait verilerin, aynı birimde olması sebebiyle tek eksen ve birbirlerine oldukça yakın şekilde takip edilebildiği görülmektedir. Bu durumun sebebinin, sensör devre kartına ait dengeleme (offset) ve kazanç değerlerinin doğru belirlenerek, termopil sensör devre kartı çıktılarının doğru bir şekilde kompanze edilebilmesi olduğu söylenebilir. Ayrıca Şekil 65 ve Şekil 66'daki grafikler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, gerçekleştirilen kompanzasyon işlemlerinin, yalnızca termopil sensör devre kartı kullanılarak cisim yüzey sıcaklık tahmininin yapılabilmesi adına faydalı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, referans sıcaklık sensör ölçümleri ve termopil sensör devre kartı çıktılarına ait eğrilerin, anlık olarak birbirine benzetilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen kompanzasyon işlemlerinin, Şekil 66'daki grafik incelendiğinde, önemli ölçüde başarılı olduğu görülmektedir.

6.1.4. Cam yüzey sıcaklık kompanzasyonu

Geliştirilecek sensör grubunun entegre edileceği sistem göz önünde bulundurulduğunda, sıcaklığı ölçülecek cisim ile sensör grubu arasında, Şekil 67'de de görüldüğü gibi bir cam yüzey bulunmaktadır. Sisteme ait kullanım senaryosunun büyük bir kısmında cisim ile cam yüzey arasındaki mesafe oldukça az olacağından, cismin sıcaklığının artmasına bağlı olarak cam yüzeyin sıcaklığı da artacaktır. Temel olarak sıcaklıktan kaynaklı ortaya

ıkan kızılötesi ışınımı algılayan sensör grubu bu durumdan etkilenecek, cisim sıcaklığına bağılı olarak ölçüm algoritması tarafından yapılan çıkarımlardaki hatalar artmaya başlayacaktır. Hatta cisim tarafından oluşturulan kızılötesi ışınım, cam yüzey tarafından bir miktar zayıflatılacağından ve uzun süreli ölçümlerde, cam yüzeyin oluşturduğu kızılötesi ışınım baskın seviyelere geleceğinden, cismin sıcaklığının ölçümlenmesini iyice zorlaştırılacaktır.

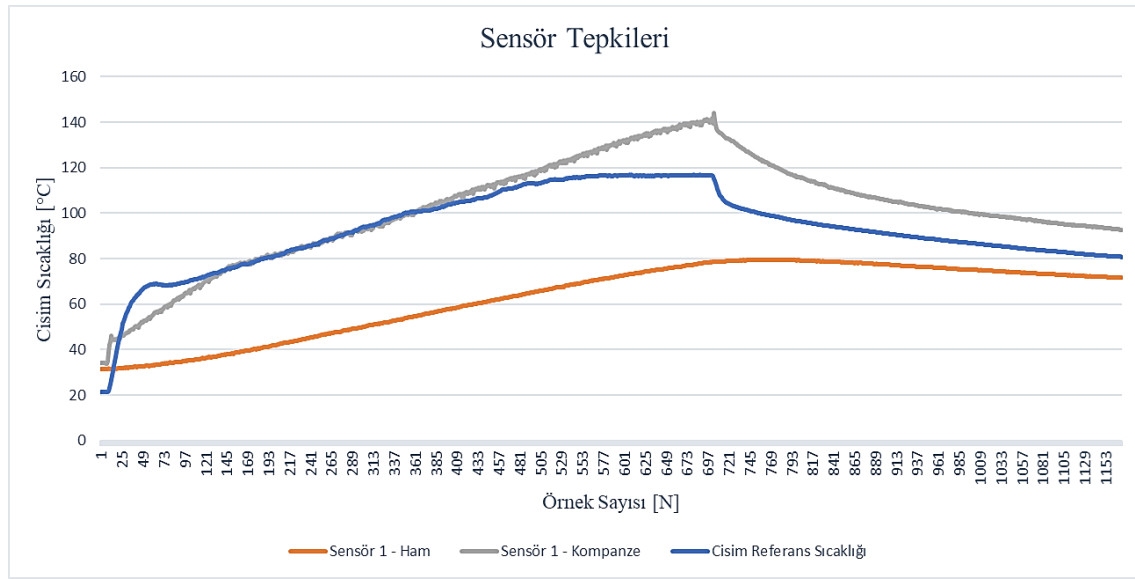


Şekil 67. Sıcaklığı ölçümlenecek cismin bulunduğu sistemdeki cisim, cam yüzey ve sensör grubunun konumlarına dair genel bir gösterim

Cam yüzeye ait sıcaklık etkisinin elimine edilebilmesi amacıyla yapılan araştırmalarda, cam yüzeyin de hedefteki cisim gibi spesifik özelliklere sahip olmasından dolayı, eliminasyon işlemine dair net bir matematiksel eşitlik ile karşılaşılammıştır. Geliştirilen sensör sisteminde cam yüzey sıcaklığının da harici bir temaslı sensör ile ölçülmesine rağmen, bu eliminasyon işleminin matematiksel temellerde net olarak ifade edilemiyor olmasının temel sebepleri; cisim tipine bağılı olarak sıcaklık aktarım hızı, ölçüm mesafesi, yüzey parlaklığı ve emisivitesi gibi termopil sensör grubu ölçümlerini etkileyen parametrelerin, aynı şekilde kızılötesi radyasyon temelli bu cam yüzey eliminasyonu için de mevcut ve etkili olmasıdır. Mevcut etkinin modellenenebilmesi amacıyla çok katmanlı algılayıcı kullanımı, çoklu regresyon analizi gibi yöntemler kullanılarak sonuçlar gözlemlenmiş ancak çok katmanlı algılayıcı kullanılarak sistemin tümünden modellenmesi kısmında, hem bu eliminasyon işlemi hem de sıcaklık tahmini işlemi için daha doğru sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple de bu aşamada, çok katmanlı algılayıcı kullanılarak cam yüzey sıcaklığı kompanzasyonunun

yapılmasına bir alternatif olarak sadece, Şekil 68’de olduğu gibi, yapılmış deneyler için çoklu lineer regresyon analizi gerçekleştirilerek elde edilmiş sonuçlara yer verilecektir.

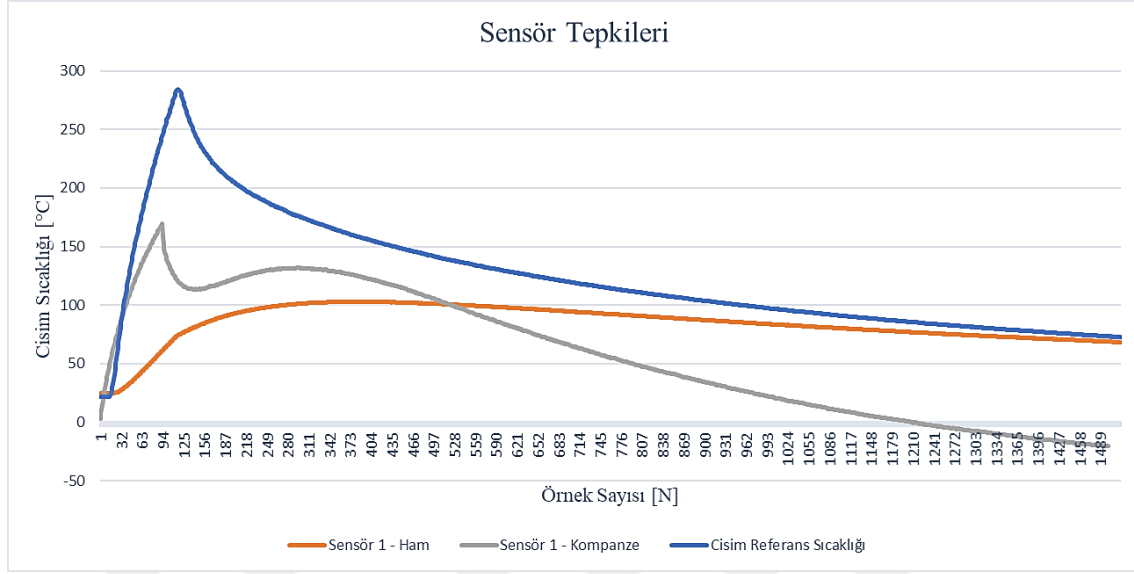
Yapılan deneysel çalışmalardan, cam yüzey sıcaklığı kompanzasyon işlemi yapılmamış ölçümlerden birine ait verilerin bulunduğu Şekil 68 ve Şekil 69’daki deneylere ait veri toplama işlemleri, polikarbonat dış kılıf içerisindeki Sensör 1’e entegre haldeki temel filtreleme algoritmaları kullanılarak, standart ısınma karakteristiğine sahip A cismi için emisivite ve sensör kılıf sıcaklığı bakımından kompanzasyon işlemi yapıldığı kabulüyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 68. Sensör 1 kullanılarak düşük sıcaklıklar için gerçekleştirilen çoklu lineer regresyon analizi

Cam yüzey sıcaklığı, termopil sensör grubu tepkisi ve cisim referans sıcaklığının kullanılmasıyla gerçekleştirilen analiz sonucunu içeren Şekil 68’de görülen grafik incelendiğinde veri toplama işlemlerinin, 30°C mertebelerinde cismin ısıtılma başlangıcı ile beraber başlatılarak, 140°C mertebelerine kadar sürdürülüp, ısıtılma işlemi sonlandırıldıktan sonra da 90°C mertebelerine kadarki soğutulma esnasında devam ettirildiği görülmektedir. Cisim referans sıcaklığı baz alınarak, sensör grubu tarafından üretilen ham haldeki işlenmemiş veriler ve lineer regresyon analizi sonucu ortaya çıkarılan matematiksel eşitlik kullanılarak kompanze edilip elde edilmiş olan verilere göz atıldığında, özellikle soğuma esnasında yüksek seviyelerde hatalar yapıldığı fark edilmektedir. Ham haldeki verilere nazaran analiz sonucunda, referans sıcaklıklara daha yakın tahminler yapılmış olsa da genel olarak hata seviyelerinin yüksek olması (MAE = 10,52763432), bu yöntemin düşük sıcaklıklarda, geliştirilecek algoritma için pek uygun

olmayacağını göstermektedir.



Şekil 69. Sensör 1 kullanılarak yüksek sıcaklıklar için gerçekleştirilen çoklu lineer regresyon analizi

Şekil 68'de girdi olarak kullanılan verilerin yüksek sıcaklıklardaki hallerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen analiz sonucunu içeren Şekil 69'daki grafik incelendiğinde cismin, 30°C mertebelerinden 275°C mertebelerine kadar ısıtılıp, ısıtılma işlemi tamamlandıktan sonra da 75°C mertebelerine kadar soğutulmasının sağlandığı gözlemlenmektedir. Tüm süreç boyunca toplanan verilerden cisim referans sıcaklığı baz alınarak, sensör grubu tarafından üretilen ham haldeki veriler ve regresyon analizi sonucu ortaya çıkarılan matematiksel eşitlik kullanılarak elde edilmiş olan verilere göz atıldığında, özellikle soğuma esnasında bariz hatalar yapıldığı fark edilmektedir. Ham haldeki verilere göre analiz sonucunda, referans sıcaklıklara nispeten daha yakın tahminler yapılmış olsa da genel olarak bariz hatalar yapılıyor olması (MAE = 67,2429983), bu yöntemin yüksek sıcaklıklarda, geliştirilecek algoritma için pek uygun olmayacağını göstermektedir.

6.1.5. Sistem modelleme çalışmaları

Çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılacak sensör sistemi bileşenlerinde (termopil sensör çekirdek değişimi, termopil sensör lens grubu değişimi, sensör devre kartı değişimi vs.) ya da uygulama özelinde kurulu olan fiziksel yapıda (ölçüm mesafesi değişimi, çalışma ortamı sıcaklık aralığı değişimi vs.) gerçekleştirilmesi muhtemel değişiklikler sebebiyle, sistemin entegre edileceği uygulamalar için genel olarak modellenebilmesi, değişimlere rağmen gerçek değerlere yakın sıcaklık tahminlerinin yapılabilmesi açısından oldukça

önemlidir. Oluşturulan model sonucu yüksek doğrulukta bu tahminlerin yapılabilmesi için, yapılacak bu modelleme işleminin; cam yüzey sıcaklık kompanzasyonu, sensör grubu bileşenleri öz sıcaklık kompanzasyonu, emisivite kompanzasyonu gibi uygulama özelinde değişim potansiyeli bulunan kısımları kapsarken, bu kısımlar dışında kalan diğer algoritmik çalışmaları kapsamıyor olması gerekmektedir. Yani aslında modelleme işleminin, veri toplama çalışmaları sonucu elde edilen verilerden, filtrelenmiş ve kompanze edilmemiş olanlarının girdi, cisim yüzeyinin gerçek sıcaklığının ise çıktı oluşturacak şekilde kullanılarak gerçekleştirilip, eldeki veriler ışığında test edilerek final haline getirilmesi planlanmaktadır. Bu kapsamda yapılan modelleme çalışmaları için farklı alternatifler denenmiş olsa da sensör grubunun, entegre edileceği sistemin farklı koşulları altında yapılan ölçümlerinde, daha uygun sonuçlar ürettiği gözlemlenen, yapay sinir ağları dahilindeki çok katmanlı algılayıcı (MLP) modelinin kullanılması kararlaştırılmıştır.



Şekil 70. Geliştirilen ölçüm algoritmasına eklenecek yapay sinir ağının girdi ve çıktıları

Çok katmanlı algılayıcı kullanılarak gerçekleştirilecek modelleme işlemi için öncelikle, bütünsel olarak hangi deneylere ait verilerin ağı eğitiminde kullanılacağı belirlenmiş sonrasında ise, Şekil 70’te de görüldüğü gibi modele girdi olarak; termopil sensör grubu tarafından üretilen cisim sıcaklığı, termopil sensör grubuna ait kılıf sıcaklığı ve cam yüzey sıcaklığı verilerinin, çıktı olarak ise cisim yüzeyine ait referans sıcaklık verilerinin seçilerek, bu verilerin eğitim ve test-doğrulama aşamalarına uygun olarak ayrılıp veri setleri haline getirilmesi sağlanmıştır. Bu işlem sonrasında; gizli katman sayısı, gizli katman nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonu, eğitim algoritması, öğrenme oranı, maksimum iterasyon sayısı, minimum yakınsama miktarı gibi eğitim parametreleri belirlenerek, eğitim algoritmasına ve aktivasyon fonksiyonuna uygun olarak tüm veriler belirlenen aralıkta normalize edilmiştir. Belirlenen parametreler özelinde planlanan veriler ile eğitilen yapay sinir ağının, eğitim sırasındaki test-doğrulama aşamaları sonucunda da nöron ağırlıkları ve diğer katsayıları netleştirilmiştir. Son olarak eğitim ve

test-doğrulama aşamaları sonucunda elde edilen verilerin incelenebilmesi amacıyla, başlangıçta uygulanan normalizasyon işlemine ait parametreler kullanılarak tersine normalizasyon işlemi yapılmış ve veriler yeniden, başlangıçtaki sıcaklık formatına dönüştürülmüştür.

Tüm bu süreç sonunda oluşturulan yapay sinir ağının, diğer koşullarda yapılan deneylere ait veri setlerindeki performansının incelenebilmesi amacıyla, eğitim sırasındaki parametrelerinin değiştirilerek, uygulamaya maksimum uyum sağlarken minimum işlem gücüne ihtiyaç duyacak hale getirilmesi sağlanmıştır. Bu optimizasyon işlemleri kapsamında yapılan çalışmalar için ise öncelikle, ağ performansının en fazla hangi parametrelerden etkilendiği belirlenmiş ve sırasıyla bu parametreler değiştirilerek farklı deneylere ait veri setlerinde ağın test edilmesi sağlanmıştır. Optimizasyon işlemleri başlangıcında yapılan öncül testlerde; eğitim algoritmasının, öğrenme oranının, katman ve katmanlardaki nöron sayısının etkisinin diğer parametrelerden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu öncül testlerde eğitim algoritması ve öğrenme oranı için sırasıyla, Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, Scaled Conjugate Gradient yöntemleri ve %70, %80, %90 oranları denenerek Levenberg-Marquardt için %70 öğrenme oranının uygulama özelinde nispeten daha uygun bir yapay sinir ağı oluşturduğu fark edilmiştir. Yapılan öncül testler için gizli katman sayısının, sensör devre kartındaki mikrodenetleyiciye ait kısıtlı işlem gücü göz önünde bulundurulduğunda, iki olarak belirlenmesi sağlanmış ve bu sayı için test sonuçlarının yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Sonrasında ise, katmanlardaki nöron sayılarının belirlenebilmesi için yapılan testler, aynı veri setleri ile öncül testlere nazaran daha kapsamlı olarak gerçekleştirilip, eğitim işlemleri sonucundaki hata metrikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, başlangıçta düşük ve yüksek sıcaklıklar için hazırlanan iki tipteki veri setinin tümü için sırasıyla 4, 8, 16, 32, 48, 64, 80 nöron sayılarında eğitim işlemleri gerçekleştirilip, ağ çıktıları ile hedef değerler arasındaki hatalara ait MAE, MAPE, MSE, RSME ve R2 metrikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerden düşük sıcaklıklar için yapılan deneylere ait sonuçların yer aldığı Tablo 10 incelendiğinde, oluşturulan yapay sinir ağlarının eğitim ve test-doğrulama süreçlerine ait hata seviyeleri, genel olarak birbirine yakın olsa da katmanlarda on altı nörön kullanıldığında, hedef verilere nispeten daha fazla yaklaşıldığı fark edilmektedir. Yüksek sıcaklıklar için yapılan deneylere ait sonuçların yer aldığı Tablo 11 incelendiğinde ise, oluşturulan yapay sinir ağlarının eğitim ve test-

doğrulama süreçlerine ait hata seviyelerinin bu kez birbirine çok daha yakın olduğu hatta bazı ağlara ait sonuçların hedefler ile aşırı uyumlu olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca Tablo 10 ve Tablo 11 bütünsel olarak incelendiğinde, eğitim ve test-doğrulama faaliyetlerinde iken benzer çıktılar üreten yapay sinir ağlarındaki nöron sayısı etkisinin, net olarak yorumlanabilmesi adına, ağların farklı deneylere ait veriler ile de test edilmesi gerektiği görülmektedir. Bu test işlemlerine, hem işlem gücü bakımından daha az kaynağa ihtiyaç duymaları hem de her iki sıcaklık grubu için de daha uygun çıktılar üretmeleri sebebiyle sekiz, on altı ve otuz ikişer nöronlu ağlar ile devam edilmesi daha uygun olacaktır.

Tablo 10. Düşük sıcaklıklara ait veri setleriyle farklı nöron sayıları için eğitilen yapay sinir ağları tarafından üretilen sıcaklık verilerinin, referans sıcaklık verilerine göre, farklı hata metrikleri ile hesaplanan hata değerleri

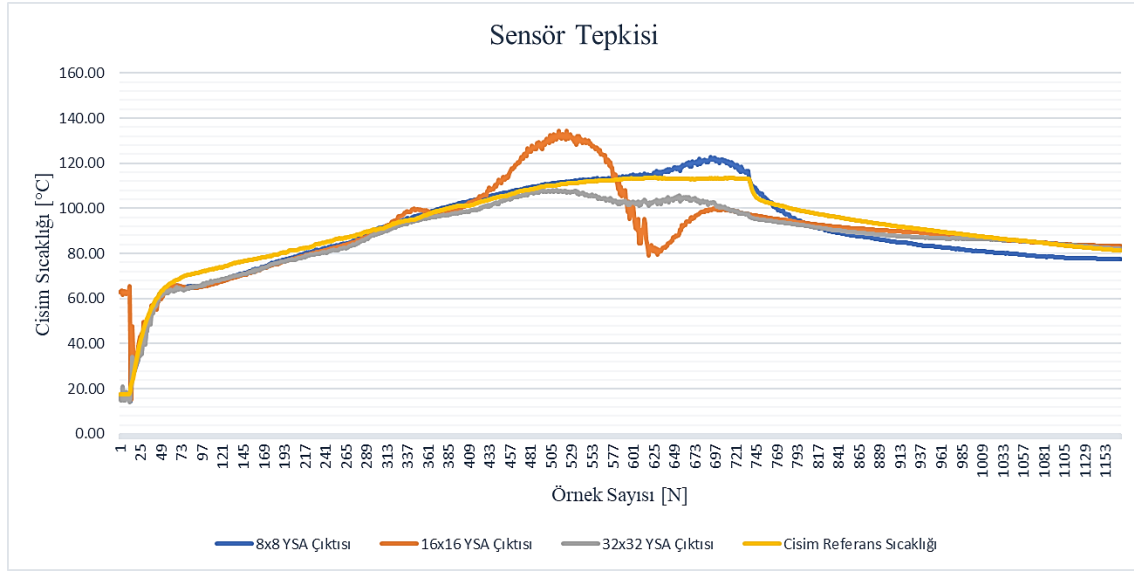
Nöron Sayısı	MAE	MAPE	MSE	RMSE	R2
4x4	0,34177	0,42222	0,34377	0,58632	0,99885
8x8	0,87098	0,98638	1,7287	1,3148	0,99422
16x16	0,43833	0,55035	0,49643	0,70458	0,99834
32x32	0,57718	0,70272	1,10759	1,05242	0,99629
48x48	0,53134	0,63915	0,75544	0,86916	0,99747
64x64	0,60099	0,718	0,88444	0,94045	0,99704
80x80	0,56866	0,79026	0,93212	0,96547	0,99688

Tablo 11. Yüksek sıcaklıklara ait veri setleriyle farklı nöron sayıları için eğitilen yapay sinir ağları tarafından üretilen sıcaklık verilerinin, referans sıcaklık verilerine göre, farklı hata metrikleri ile hesaplanan hata değerleri

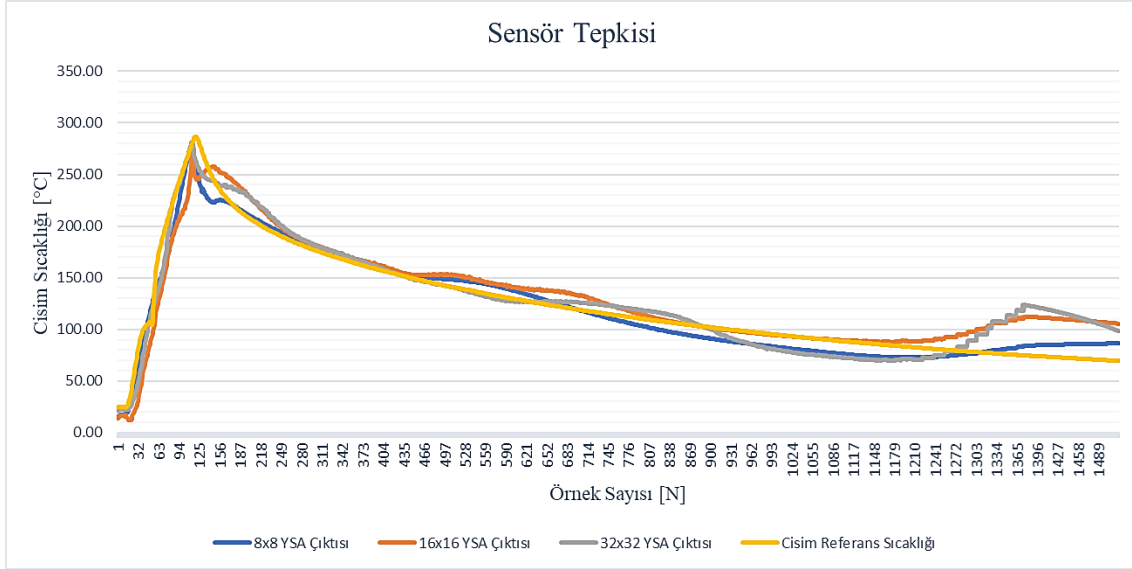
Nöron Sayısı	MAE	MAPE	MSE	RMSE	R2
4x4	0,16525	0,13617	0,0702	0,26495	0,99997
8x8	0,14981	0,11901	0,05295	0,23011	0,99998
16x16	0,10033	0,07634	0,03379	0,18383	0,99999
32x32	0,10989	0,08077	0,03513	0,18742	0,99999
48x48	0,11498	0,11267	0,05992	0,24479	0,99998
64x64	0,09764	0,07059	0,02705	0,16448	0,99999
80x80	0,09841	0,07821	0,02862	0,16917	0,99999

Farklı nöron sayıları ile tasarlanan yapay sinir ağları için, düşük sıcaklıklardaki deneylerden birine ait verilerden oluşturulan veri setinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen testin sonuçlarının görüldüğü Şekil 71'deki grafik incelendiğinde, Tablo 10'daki performanslara zıt olarak, katmanlarında sekiz nöron bulunan yapay sinir ağının

diğerlerine oranla, referans olarak baz alınan eğriyi, çok daha kararlı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Aynı şekilde benzer durumun, yüksek sıcaklıklardaki deneylerden birine ait verilerden oluşturulan veri setinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen testin sonuçlarının yer aldığı Şekil 72'deki grafik incelendiğinde de göze çarptığı görülmektedir. Yani Şekil 72'deki grafikte de eğitim ve test-doğrulama sonuçlarının bulunduğu Tablo 11'deki ağ performanslarına rağmen, katmanlarında sekizer nöron bulunan yapay sinir ağı, referans olarak baz alınan sıcaklık eğrisini diğer ağlara oranla, nispeten daha kararlı bir şekilde takip etmektedir.



Şekil 71. Farklı nöron sayılarıyla eğitilen iki katmanlı yapay sinir ağı tarafından, düşük sıcaklıklara ait veri seti için üretilen veriler

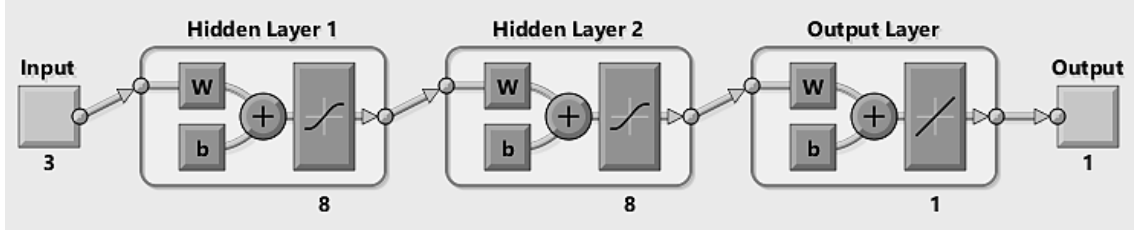


Şekil 72. Farklı nöron sayılarıyla eğitilen iki katmanlı yapay sinir ağı tarafından, yüksek sıcaklıklara ait veri seti için üretilen veriler

Farklı nöron sayılarının ağ performansına etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla, eğitim verilerinden farklı deneylere ait olan farklı sıcaklık seviyelerindeki ölçüm verilerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen ağ testlerine ait sonuçların bulunduğu Tablo 12 incelendiğinde, Şekil 71 ve Şekil 72'deki grafiklerde yer alan durumun mevcut olduğu görülmektedir. Yani mevcut uygulama için, katmanlarda sekizer nöron kullanılarak eğitilen yapay sinir ağlarının farklı deneyler için, diğer ağlara oranla daha az hatalı tahminlerde bulunabildiği çıkarımı yapılabilmektedir.

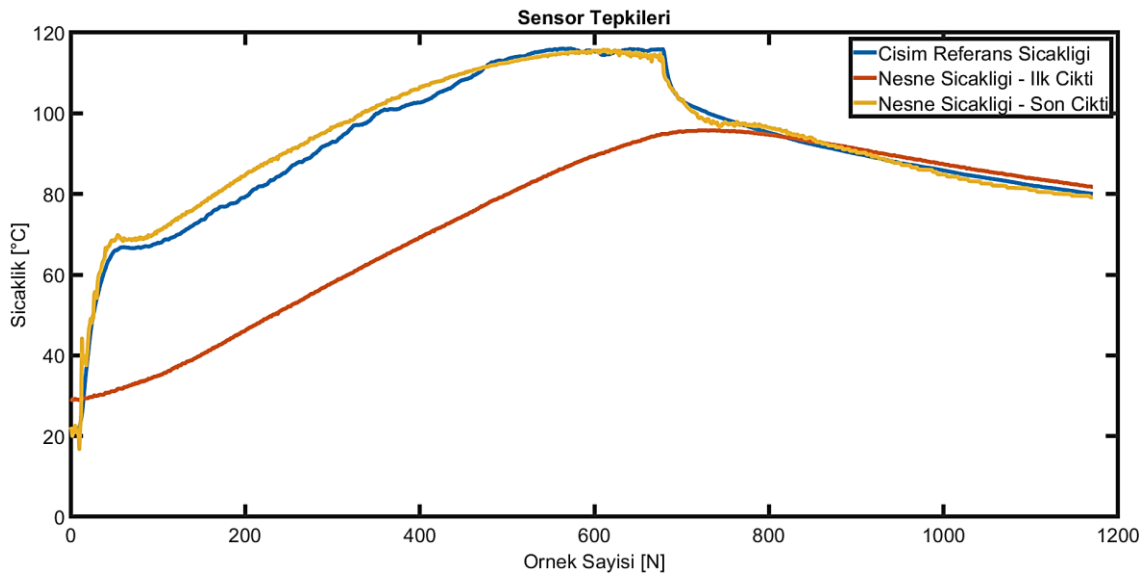
Tablo 12. Farklı nöron sayılarıyla eğitilen iki katmanlı yapay sinir ağının, düşük ve yüksek sıcaklıklara ait iki veri setine göre ürettiği sıcaklık verilerinin, referans sıcaklık verilerine karşın, farklı hata metrikleri ile hesaplanan hata değerleri

Nöron Sayısı – Sıcaklık Tipi	MAE	MAPE	MSE	RMSE	R2
8x8 - Düşük Sıcaklık	3,80861	4,4496	20,7555	4,55582	0,93072
16x16 - Düşük Sıcaklık	6,65368	7,32926	98,3125	9,91526	0,67184
32x32 - Düşük Sıcaklık	4,54084	4,93127	32,6267	5,71198	0,89109
8x8 - Yüksek Sıcaklık	8,64626	8,4173	114,567	10,7036	0,95585
16x16 - Yüksek Sıcaklık	13,1231	13,3159	338,986	18,4116	0,86938
32x32 - Yüksek Sıcaklık	12,4931	13,7412	308,52	17,5647	0,88112

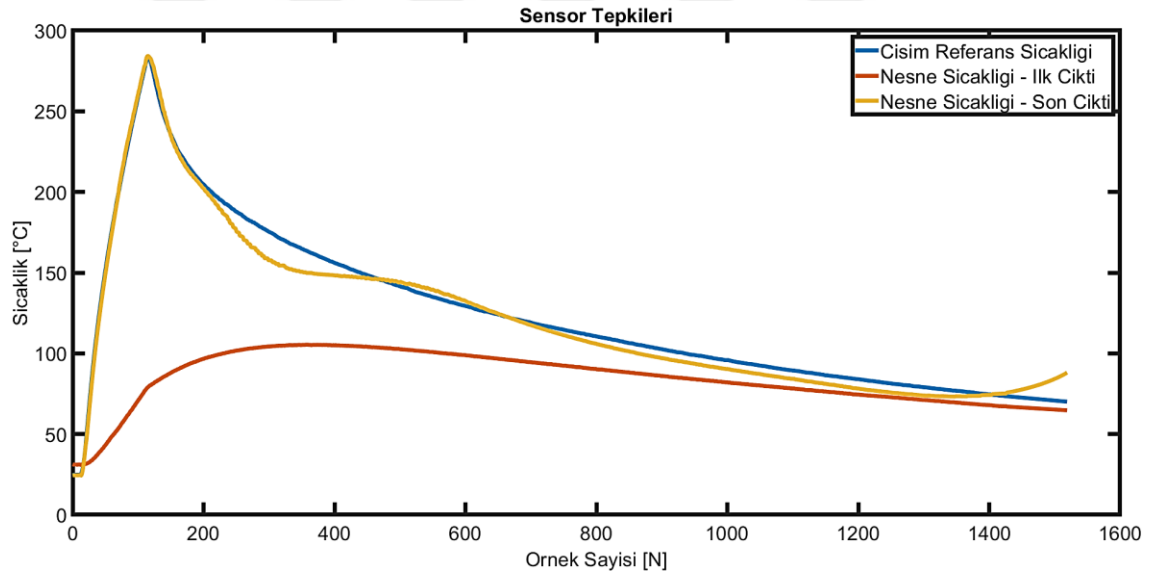
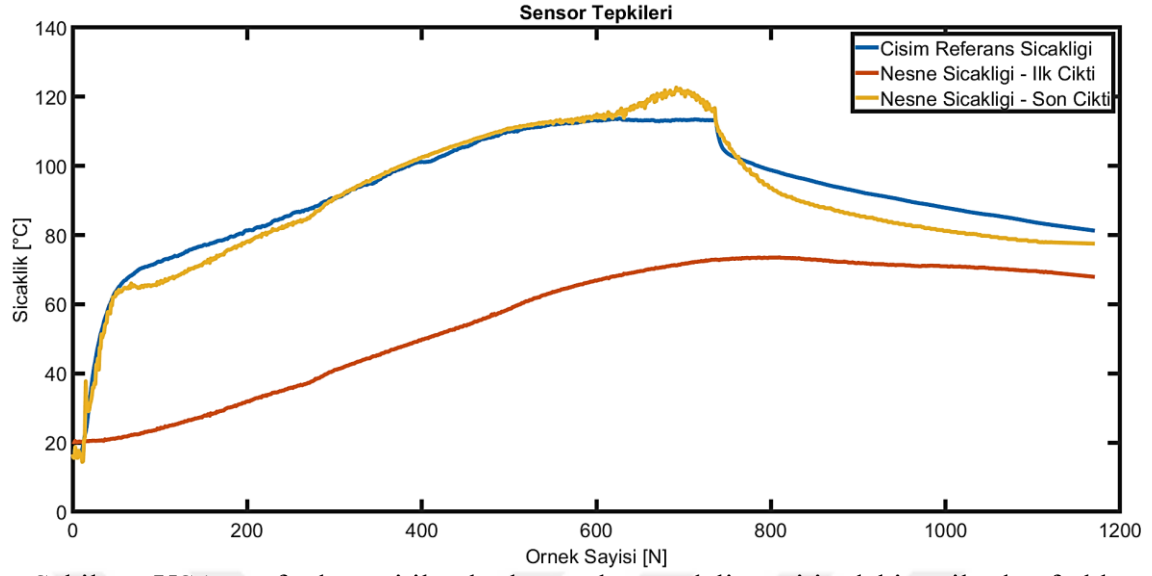


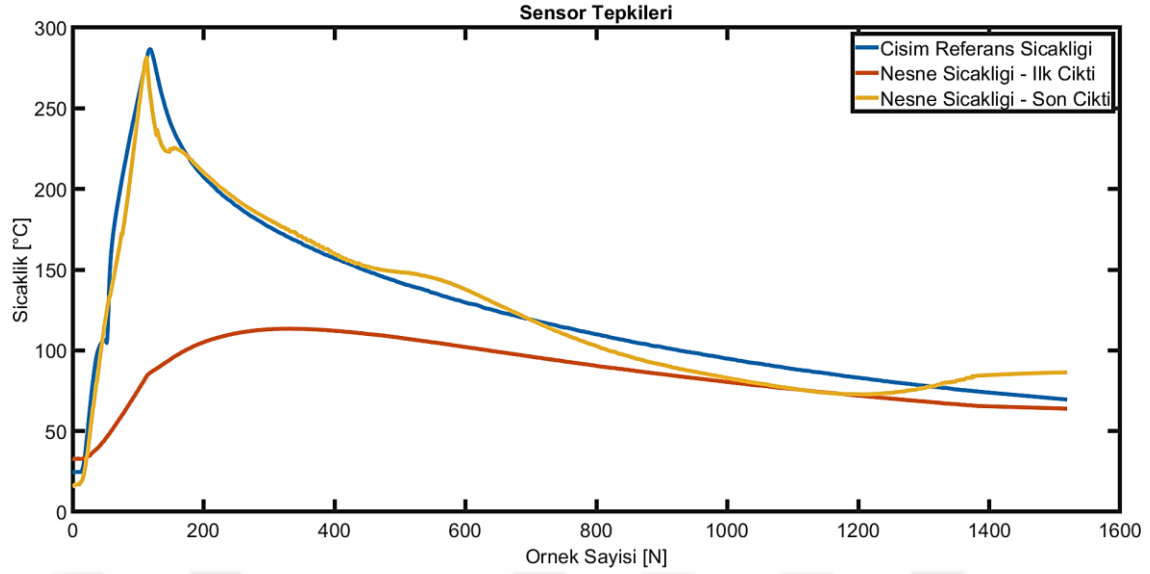
Şekil 73. Sensör sistemi için geliştirilen ve tamamlanan test işlemlerine göre uygunluğu kesinleşmiş olan yapay sinir ağının genel gösterimi

Bu aşamaya kadar modelleme özelinde yapılan işlemler sayesinde, algoritmaya eklenecek matematiksel modellerin; girdi ve çıktı katmanları dışında her biri sekizler nöron barındıran iki adet gizli katmanı bulunan, aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonunu ve eğitim algoritması olarak da Levenberg-Marquardt'ı kullanılarak eğitilen, çok katmanlı algılayıcıyı temel alan ve genel gösterimi Şekil 73'teki gibi olan bir yapay sinir ağı tarafından oluşturulan modeller olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Düşük ve yüksek sıcaklık seviyeleri için ayrı ayrı belirlenen modeller, farklı deneysel verilerdeki performanslarının gözlemlenebilmesi amacıyla sırasıyla, düşük ve yüksek sıcaklıklarda ikişer farklı deneye ait veriler ile Şekil 74, Şekil 75 Şekil 76 ve Şekil 77'deki grafiklerde görüldüğü gibi test edilmiştir. Grafiklerde ilk çıktı olarak belirtilen, herhangi bir modelleme ya da kompanzasyon işlemine tabi tutulmayan salt sensör verileri, modelleme ve kompanzasyon işlemleri sonrasında son çıktı olarak nitelendirilen hale getirilerek, grafiklerde de görüldüğü gibi referans sıcaklık eğrilerini, bu eğrilere yakın değerler üreterek belirli toleranslar içerisinde sürekli takip etmişlerdir.



Şekil 74. YSA tarafından eğitilerek oluşturulan modelin, eğitimdeki verilerden farklı olarak test amacıyla hazırlanan, düşük sıcaklıklara ait birinci veri seti için performansı





Şekil 77. YSA tarafından eğitilerek oluşturulan modelin, eğitimdeki verilerden farklı olarak test amacıyla hazırlanan, yüksek sıcaklıklara ait ikinci veri seti için performansı

Şekil 74, Şekil 75, Şekil 76, Şekil 77’de grafikleri bulunan testlere ait ağ performanslarının yer aldığı Tablo 13 incelendiğinde düşük ve yüksek sıcaklık seviyeleri için ayrı ayrı geliştirilen modeller düşük sıcaklıklarda, Test 1 için ortalama 1,9°C; Test 2 için ise ortalama 3,8°C hata yaparken yüksek sıcaklıklarda, Test 1 için ortalama 5,15°C; Test 2 için ise ortalama 8,64°C hata yapmaktadır. Sensör grubunun entegre edileceği sistemin, öngörülmesi zor birçok değişken barındırdığı düşünüldüğünde bu hataların, hata tolerans sınırları içerisinde kaldığı kabul edilmektedir.

Tablo 13. Her katmanında sekiz nöron bulunan iki katmanlı yapay sinir ağının, düşük ve yüksek sıcaklıklara ait farklı veri setleri için ürettiği sıcaklık verilerinin, referans sıcaklık verilerine göre, farklı hata metrikleri ile hesaplanan hata değerleri

Test Numarası - Sıcaklık Tipi	MAE	MAPE	MSE	RMSE	R2
Test 1 - Düşük Sıcaklık	1,9109	2,38765	6,11318	2,47248	0,97999
Test 2 - Düşük Sıcaklık	3,80861	4,4496	20,7555	4,55582	0,93072
Test 1 - Yüksek Sıcaklık	5,15552	4,64932	42,142	6,49168	0,98314
Test 2 - Yüksek Sıcaklık	8,64626	8,4173	114,567	10,7036	0,95585

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bir cam yüzey arkasındaki cismin sıcaklığının, temassız olarak ölçümlenebilmesi amacıyla başlatılan çalışmalarda ilk olarak, ortam sıcaklığı, cam yüzey geçirgenliği, cisim yüzey parlaklığı, ortam elektriksel gürültüsü gibi uygulama özelinde oluşabilecek potansiyel ölçüm kısıtları belirlenmiş ve bu kısıtlardan mümkün olduğunca az etkilenecek bir ölçüm sisteminin tasarlanması amacıyla kızılötesi ölçüm yöntemi seçilmiştir. Başlangıçta belirlenen kısıtlar göz önünde bulundurularak farklı sensör alternatifleri için araştırmalar yapıp tedarik süreçler başlatılmış ve tedarik edilen sensörler, oluşturulan deney setinde öncül testlere alınarak, uygulamaya ve üzerine bina edilecek sisteme olan uygunlukları sınanmıştır. Temel seviyede gerçekleştirilen öncül testler ile sensör alternatifleri ikiye indirilmiş ve ölçüm doğruluğunun uygulama nezdinde arttırılabilmesi amacıyla donanım, yazılım ve mekanik tasarım anlamında çalışmalar başlatılmıştır. İlk çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılan prototip kullanılarak gerçekleştirilen öncül veri toplama işlemleri sayesinde prototipte bazı iyileştirmeler yapılmış ve gerçek anlamdaki veri toplama işlemleri için bir deney seti oluşturulmuştur. Geçmişte, ölçüm doğruluğunun arttırılması amacıyla belirlenen bazı yöntemlerin, farklı koşullar altındaki sonuçlarının gözlemlenmesi amacıyla, kapsamlı bir şekilde ve tekrarlı olarak yapılan deneyler ile planlama dahilindeki veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu veri toplama işlemlerinde, elektronik devre kartındaki alternatif komponentlerin ve sensör grubu dış kılıfının malzeme özelliklerinin ölçüme olan etkisi gibi farklı konularda da farklı sıcaklıklar altında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tamamlanan veri toplama işlemlerinin ardından verilerin analizi amacıyla yürütülmüş olan düzenleme ve görselleştirme işlemleri sonrasında, algoritma ile ilgili veri analiz çalışmaları başlatılmıştır. Ölçüm doğruluğunun, ölçüm süreci boyunca arttırılmasını amaçlayan bu çalışmalar kapsamında öncelikle, bu aşamaya kadarki ölçümlerde bulunan ve sensör grubunun entegre edileceği sistemdeki ölçümlerde de mevcut halde bulunacak olan elektriksel ve elektromanyetik gürültünün filtrelenmesi amacıyla bazı filtreleme algoritmaları test edilmiş, en uygun sonuçların Kalman temelli oluşturulan algorithmada alındığı görülmüştür. Bu aşamadan sonra yapılmış olan çalışmalar algorithmaya, uygulama koşullarına bağlı olarak birbirinin alternatifi olacak iki grup halinde eklenebilir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm algoritması için birinci grupta yapılması gereken hesaplamalar; cisme ait yüzey parlaklık seviyesinin ölçümlenip sınıflandırılarak, cisme

ait bir emisivite katsayısı oluşturulması ve cisim özelinde anlık olarak emisivite kompanzasyonu yapılması, sensör grubu bileşenlerine ait sıcaklığın mevcut kızılötesi ışıınımdan elimine edilebilmesi amacıyla sensör özelinde anlık olarak bir öz sıcaklık kompanzasyonunun yapılması ve cam yüzey için anlık olarak sıcaklık kompanzasyonunun yapılması şeklinde sıralanabilir. İkinci grupta ise yapılması gerekenler; daha önceden farklı koşullar altında toplanan veriler kullanılarak oluşturulan veri setleriyle eğitilen çok katmanlı algılayıcı temelli yapay sinir ağlarının, farklı deneylere ait veri setleriyle test edilerek hata metriklerinin incelenmesi, inceleme sonucu bu yapay sinir ağlarından sisteme en uygun olanının baz alınıp yapay sinir ağı temelli olarak bir matematiksel model oluşturulması olarak sıralanabilir. Oluşturulan bu modelde girdi olarak, birinci grupta bahsedilen parametrelerin kullanılıp çıktı olarak, cisim yüzey sıcaklığı değerlerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır.

Ölçüm algoritmasına eklenebilmesi amacıyla her iki grupta yapılan çalışmaların, farklı sıcaklık aralıklarında gerçek zamanlı olarak hata seviyeleri incelendiğinde, uygulamaya ve uygulama koşullarına bağlı olarak ayrı ayrı kullanılabilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca ikinci grupta oluşturulan modele ait hata seviyelerinin düşürülebilmesi amacıyla başlangıçta, sensör grubu ham verilerine göre cisim yüzey sıcaklığının değişimi referans alınarak farklı cisimler özelinde yapılan cisim sınıflandırma işleminin, modele girdi olarak kullanılabilmesi mümkündür. Bu sınıflandırma işlemi sayesinde sensör grubunun, farklı karakteristik özelliklere sahip cisimlere rağmen de benzer hata toleranslarında tahminler yapabilmesi sağlanmıştır.

Sonuç olarak yapılan tüm bu çalışmalar sayesinde Şekil 74, Şekil 75, Şekil 76 ve Şekil 77'deki grafiklerde de düşük ve yüksek olarak iki sıcaklık seviyesinde yer aldığı haliyle sensör grubu tarafından yapılan ölçümlerde, çalışmalar öncesinde öngörülemeyen hatalara karşın son durumda, referans sıcaklık eğrisinin sensör sistemi tarafından üretilen tahmini sıcaklık değerleri ile büyük ölçüde takip edilebildiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] C. Franco, J. Acero, R. Alonso, C. Sagues, D. Paesa, “Inductive Sensor for Temperature Measurement in Induction Heating Applications”, IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 5, pp. 996-1003, April 2012.
- [2] U. Has, D. Wassilew, “Temperature Control for Food in Pots on Cooking Hobs”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 1030-1034, June 1999.
- [3] J. Gardner, T. Jones, “Multi-Wavelength Radiation Pyrometry Where Reflectance is Measured to Estimate Emissivity”, J. Phys. E, Sci. Instrum., vol. 13, no. 3, pp. 306–310, March 1980.
- [4] H. Madura, M. Kastek, T. Piatkowski, “Automatic Compensation of Emissivity in Three-Wavelength Pyrometers”, Infrared Phys. Technol., vol. 51, no. 1, pp. 1–8, July 2007.
- [5] S. Stipetic, M. Kovacic, Z. Hanic, M. Vrazic, “Measurement of Excitation Winding Temperature on Synchronous Generator in Rotation Using Infrared Thermography”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 5, pp. 2288–2298, May 2012.
- [6] S. Koide, S. Hiejima, “Temperature Controlled Induction Heating and Cooking Apparatus”, U.S. Patent 4 617 441, 14 October 1986.
- [7] U. Has, J. Schieferdecker, D. Wassilew, “Temperature Control for Food in Pots on Cooking Hobs”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 46, no. 5, pp. 1030–1034, October 1999.
- [8] D. Paesa, C. Franco, S. Llorente, G. Lopez-Nicolas, C. Sagues, “Adaptive Simmering Control for Domestic Induction Cookers”, IEEE Trans. Ind. Appl. 2011, 47, 2257–2267.
- [9] C. Carretero, J. Lasobras, R. Alonso, E. Carretero, E. Imaz, “Radiation Heat Measurement Model for Temperature Estimation in Induction Heating Appliances”, 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Zaragoza, Spain, 2014.
- [10] E. Imaz, R. Alonso, C. Heras, I. Salinas, E. Carretero, C. Carretero, “Infrared Thermometry System for Temperature Measurement in Induction Heating Appliances”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2622-2630, May 2014.

- [11] D. Paesa, S. Llorente, C. Sagüés, Ó. Aldana, “Adaptive Observers Applied to Pan Temperature Control of Induction Hobs”, 1116 IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, no. 3, May/June 2009.
- [12] J. Lasobras, R. Alonso, C. Carretero, E. Carretero, E. Imaz, “Infrared Sensor-Based Temperature Control for Domestic Induction Cooktops”, Sensors 2014, 14:5278-5295.
- [13] M. Turkiewicz, M. Gierczak, D. Nowak, P. Markowski, E. Prociów, A. Dziedzic, “Thermocouples, Thermopiles and Thermoelectric Generators on Rigid and Flexible Substrates”, 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), May 2019.
- [14] C. F. Tsai, W. S. Huang, “Implementation of Remote Temperature-measuring by Using A Thermopile for Wireless Sensor Network”, 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1325-1328, July 2012.
- [15] J. Schieferdecker, R. Quad, E. Holzenkämpfer, M. Schulze, “Infrared Thermopile Sensors with High Sensitivity and Very Low Temperature Coefficient”, Sensors and Actuators A: Physical, pp. 422–427, 1995.
- [16] W. Ke, Y. Wang, H. Zhou, T. Li, Y. Wang, “Research on Self-Test Method Based on Thermopile Infrared Sensor”, 2018 IEEE Sensors, October 2018.
- [17] C. Karunanithy, K. Shafer, “Heat Transfer Characteristics and Cooking Efficiency of Different Sauce Pans on Various Cooktops”, Applied Thermal Engineering, pp. 1202-1215, January 2016.
- [18] Izuo H., Keiko I., Sadatoshi T., Hiroshi T., Kenji W., 2012. Induction Cooking Device, European Patent Office, Publication Number: EP2124506B1, Osaka, Japan, 08.08.2012.
- [19] Dominic B., Minchin C. R. B., Hartmut D., Holger E., Neil G., Michael H., Josef M. D., Joerg V., 2005. Verfahren zur Steuerung eines Kochprozesses bei einem Kochfeld und Kochfeld zur Durchführung des Verfahrens, DPMA Deutsches Patent- und Markenamt, Publication Number: DE102004002058B3, Gütersloh, Germany, 08.09.2008.

[20] Kersten K, 2018. Cooking Hob with a Monitoring Device, European Patent Office, Publication Number: EP3336436A1, Stockholm, Switzerland, 20.06.2018.

[21] Tomoya F., Masayo H., Motonari H., Naoaki I., Katsunori Z., 2007. Induction Heating Device, Japan Patent Office, Publication Number: JP2007115516A, Osaka, Japan, 10.05.2007.

[22] Dominic B., Minchin C. R. B., Hartmut D., Holger E., Neil G., Michael H., Josef M. D., Eduard S., Joerg V., 2006. Method for Controlling a Cooking Process on a Ceramic Hob and Ceramic Hob for Carrying Out Said Method, European Patent Office, Publication Number: EP1704754A1, Gütersloh, Germany, 27.09.2006.

[23] Holger E., Uwe F., Sonja H., Thomas K., 2010. Control Method for a Hob and Hob for Carrying Out Said Method, European Patent Office, Publication Number: EP2153698A1, Gütersloh, Germany, 17.02.2010.

[24] Volker B., Dominic B., Bastian M., Sonja S., 2014. Cooking Device, European Patent Office, Publication Number: EP2775786A1, Gütersloh, Germany, 10.09.2014.

[25] “Comparisons of temperatures in various scales”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Temperature>, 02.03.2020.

[26] Grigull, U., “Fahrenheit A Pioneer of Exact Thermometry”, Proceedings Of The Workshop On The Second Law of Thermodynamics, Vol. 1, 13.1–13.10, 27-30 Augustos 1990 Kayseri, 1991.

[27] Barr, E.S. 1961. The infrared pioneers-I. Sir William Herschel. Infrared Physics, 1: 1–4.

[28] Barr, E.S. 1962. The infrared pioneers-II. Macedonio Melloni. Infrared Physics, 2: 67–73.

[29] “Transition Edge Sensor Bolometers for CMB Polarimetry”, http://cmbpol.uchicago.edu/workshops/technology2008/depot/cmbpol_technologies_benford_jcps_4.pdf, 07.01.2020.

- [30] “Electromagnetic Spectrum, The Physics Hypertextbook”, <https://physics.info/em-spectrum/>, 05.03.2020.
- [31] Prasad K. N., “Radiation Injury Prevention and Mitigation in Humans”, CRC Press, Boca Raton, 2012.
- [32] Wolfe W. L., Zissis G. J., “The Infrared Handbook”, Environmental Research Institute of Michigan for the Office of Naval Research Department of Navy, Washington, 1978.
- [33] Guyer E. C., Brownell D. L., “Handbook of Applied Thermal Design”, CRC Press, New York, 1989.
- [34] Madding R. P., “Thermographic Instruments and Systems”, University of Wisconsin-Extension, Department of Engineering & Applied Science, Wisconsin, 1979.
- [35] Paljak I., Pettersson B., “Thermography of Buildings”, National Swedish Institute for Building Research, Stockholm, 1972.
- [36] Kızılötesi Sensörlerin Sağlık Alanındaki Uygulamaları, T.C. İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi Cilt 4 Sayı 2-2016.
- [37] Jr. Hudson R. D., Infrared Systems Engineering, John Wiley&Sons, New York, 1969.
- [38] Chevrier J.-B., Baert K. and Slater T., Verbist A. Micromachined infrared pneumatic detector for gas sensor, Microsystem Technologies 1995; 1: 71- 74.
- [39] Dereniak E. L., Boreman G. D. Infrared detectors and systems, Wiley Interscience, New York, 1996.
- [40] Barr E. S. The infrared pioneers- III. Samuel Pierpont Langley, Infrared Phys, 1963; 3: 195-206.
- [41] D. P. DeWitt, G.D. Nutter, “Theory and Practice of Radiation Thermometry”, John Wiley & Sons, pp. 25-87, New York, 1988.

[42] K. Keranen, J. T. Makinen, P. Korhonen, E. Juntunen, V. Heikkinen, J. Makela, “Improved Infrared Temperature Sensing System for Mobile Devices”, 2nd Electronics System-Integration Technology Conference, Greenwich, United Kingdom, September 2008.

[43] Campbell G.S. & Diak G.R. (2005) “Net and Thermal Radiation Estimation and Measurement”, In Micrometeorology in Agricultural Systems, (eds. Hatfield J.L. & Baker J.M.), pp. 59-92, Wisconsin, The United States of America, January 2005.

[44] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Wiley 6th Ed. 2007, pg 736.

[45] “A Review of the Physics for Emissivity Correction of Infrared Temperature Measurements”,
<https://www.apogeeinstruments.com/content/SI-emissivitycorrection.pdf>, 02.02.2020.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Muhammed Yusuf APAYDIN

Doğum Tarihi ve Yeri: 1995, Afyonkarahisar

E-Posta: myusufapaydinn@gmail.com

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2017

Mesleki Deneyim:

Firma/Kurum	Görev	Yıl
Arçelik A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi	2019-...
Sadtek Elektronik San. ve Tic. Ltd. Şti.	Gömülü Sistem Mühendisi	2017-2019