ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SOĞUTMALI KIZILÖTESİ DEDEKTÖR PAKET YAPISINDA KULLANILAN MALZEMELERİN TERMAL KÜTLE VE ISIL YÜKLERİNİN İNCELENMESİ

Salih KARASARI

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2023

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SOĞUTMALI KIZILÖTESİ DEDEKTÖR PAKET YAPISINDA KULLANILAN MALZEMELERİN TERMAL KÜTLE VE ISIL YÜKLERİNİN İNCELENMESİ

Salih KARASARI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şinasi Barış EMRE

Cisimlerin kızılötesi bant aralığında yaydıkları ışımayı algılayan ve anlamlı bir veriye dönüştüren kızılötesi dedektörler, termal ve foton dedektörleri şeklinde sınıflandırılmaktadırlar. Foton dedektörlerinin kriyojenik seviyelere soğutulma gereksinimlerinin aksine, termal dedektörler genellikle oda sıcaklığında çalışırlar. Soğutmalı kızılötesi foton dedektör paketlerinin ısıl yönetimleri oldukça önemlidir.

Bu tez çalışması kapsamında, kriyojenik seviyelere soğutulan kızılötesi dedektör paket yapısı içerisindeki soğuk parmakların ısıl yükleri incelenmiştir. Soğuk parmaklar üzerinde teorik olarak gerçekleştirilen ısıl yük hesapları, bilgisayar destekli bir simülasyon programında gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Soğuk parmakların ısıl yüklerinin belirlemesinde kullanılan kaynama test sistemi için bir kullanıcı arayüz yazılımı geliştirilmiştir. Malzeme özelliklerinin ısıl yüke etkisini incelemek için yaklaşık olarak aynı et kalınlığına sahip (~ 100 µm ve ~ 105 µm) paslanmaz çelik 316 (AISI 316) ile titanyum-grade 5 (Ti-6Al-4V) karşılaştırılmıştır. Ek olarak, ~ 105 µm ve ~ 185 µm et kalınlıklarına sahip iki ayrı AISI 316 soğuk parmakların ısıl yük karşılaştırmaları yapılmıştır. Böylece ısı iletiminin gerçekleştiği duvar kalınlıklarının ısıl yüke etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen teorik ve deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Haziran 2023, 82 sayfa

Anahtar Sözcükler: Soğutmalı kızılötesi foton dedektör, kriyojenik soğutma, soğuk parmak, kaynama testi, termal kütle, ısıl yük.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE THERMAL MASS AND HEAT LOADS OF MATERIALS USED IN THE COOLED INFRARED DETECTOR PACKAGE STRUCTURE

Salih KARASARI

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Şinasi Barış EMRE

Infrared detectors that detect the radiation emitted by objects in the infrared bant and convert it to meaningful data, are classified as thermal and photon detectors. In contrast to thermal detectors generally working at room temperature, photon detectors need to be cooled to cryogenic levels. Therefore, thermal management of cooled infrared detector packages is critical.

In this thesis, the heat load of the cold fingers which are in the cryogenic level cooled infrared detector packages were investigated. The theoretical heat loads of cold fingers are compared with the results of the analysis in a computer-aided simulation. User interface has been developed for the boil-off test to measure cold fingers' heat loads. To investigate the effect of material properties on the heat load, stainless steel 316 (AISI 316) and titanium-grade 5 (Ti-6Al-4V) with the almost same wall thicknesses (~ 100 µm and ~ 105 µm) were compared. In addition, heat load comparison of two stainless steel 316 cold fingers which have ~ 105 µm and ~ 185 µm different wall thickness. So, the effect of wall thickness on the heat load was experimentally investigated. The theoretical and experimental data results were compared.

June 2023, 82 pages

Key Words: Cooled infrared photon detector, cryogenic cooling, cold finger, boil-off test, thermal mass, heat load.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından sonuna kadar ilgi, destek, tecrübe ve zamanını esirgemeyen, çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şinasi Barış EMRE'ye (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi) teşekkür ederim. Tüm eğitim-öğretim, hayatım süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim. Tez çalışmamda desteğe her ihtiyacım olduğunda, bilgi ve tecrübelerini tereddüt etmeden aktaran iş arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Çok değerli aileme…

Salih KARASARI
Ankara, Haziran 2023

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK i
ÖZET ii
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR iv
SİMGELER DİZİNİ vii
ŞEKİLLER DİZİNİ x
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER 5
2.1 Kızılötesi Işımaya İlişkin Temel Bilgiler ve Tarihi 5
2.2 Kızılötesi Işıma 7
2.2.1 Kara cisim ışıması 7
2.2.2 Atmosferik koşullar 10
2.3 Kızılötesi Dedektörler 11
2.3.1 Kızılötesi termal dedektörler 12
2.3.2 Kızılötesi foton dedektörleri 13
2.3.3 Kızılötesi dedektörlerin performanslarını etkileyen parametreler 15
2.4 Kızılötesi Foton Dedektörlerinin Alt Bileşenleri 17
2.4.1 Kriyojenik soğutucular 19
2.4.2 Soğuk parmak 26
2.4.3 Vakum gövdesi 28
2.4.4 Gaz emiciler 29
2.4.5 Dış seramik 30
2.4.6 Taşıyıcı seramik 30
2.4.7 Sensör takımı 31
2.4.8 Soğuk kalkan 31
2.4.9 Vakum kapağı 32
2.4.10 Optik pencere 33
3. MATERYAL VE YÖNTEM 34

3.1 Soğutmalı Kızılötesi Dedektör Paket Yapılarının ve Alt Parçalarının Isıl Test Yöntemleri 34
3.1.1 Dedektör paket yapısı ısıl yönetimi ve gereksinimler 35
3.1.2 Kaynama test yöntemi ve kurgu 43
3.1.3 Sıcaklık sensörü için gerilim - sıcaklık dönüşümü 46
3.1.4 Test düzeneğinin kurulumu 47
3.1.5 Test yazılımının geliştirilmesi 53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI 56
4.1 Termal Kütle ve Isıl Yüke İlişkin Teorik Hesaplamalar 57
4.2 Isıl Yük için Sonlu Elemanlar Analizi 64
4.3 Kaynama Testleri 69
5. SONUÇ 75
KAYNAKLAR 79
ÖZGEÇMİŞ 82

SİMGELER DİZİNİ

°C	Celcius
°F	Fahrenheit
∞	Sonsuz
A_d	Dedektörün aktif alanı
c	Işık hızı
D	Dedektivite
D^*	Normalize dedektivite
g	Foton kazancı
G-R	Jenerasyon-Rekombinasyon
h	Plank sabiti
h_c	Isı taşınım katsayısı
h_{sb}	Buharlaşma gizli ısısı
i_n	Gürültü akımı
$J \cdot K^{-1}$	Joule/Kelvin
J-T	Joule-Thomson
K	Kelvin
k_b	Boltzmann sabiti
$L(\lambda, T)$	Spektral radyan
$M(T)$	Kara cismin yaydığı ışınım enerjisi
$M(\lambda,T)$	Spektral radyant
N	Gürültü
Ø	Çap
Q	Termal kütle
q	Isıl yük
q_c	Taşınım ile aktarılan ısı
q_k	İletim ile aktarılan ısı
q_r	Işınım ile aktarılan ısı
q_e	Elektron yükü
R	Tepkisellik
R_i	Akım tepkiselliği
R_v	Gerilim tepkiselliği
S	Sinyal
sr	Steradyan
T	Sıcaklık
T_∞	Taşınımda akışkan sıcaklığı
T_s	Katı yüzeyin sıcaklığı
v	Foton frekansı

V	Akış hızı
V_n	Gürültü gerilimi
W	Watt
x	İletim mekanizmasında ısı akışı olan mesafe
α	Spektral soğurma
Δf	Frekans bant genişliği
ΔT	Sıcaklık farkı
ε	Işınım yüzeyinin yayıcılığı, emisivite
η	Kuantum verimliliği
λ	Dalga boyu
µm	Mikrometre
µV	Mikro-volt
π	Pi sayısı
ρ	Spektral yansıma
σ	Stefan-Boltzmann sabiti
τ	Spektral iletim
Φ_e	Işınım gücü
ρ_d	Yoğunluk

Kısaltmalar

Al_2O_3	Alümina
AlN	Alüminyum nitrür
Ar	Argon
atm	Atmosfer basıncı
CAD	Computer Aided Design (bilgisayar destekli tasarım)
CH_4	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
FIR	Uzak dalga boyu kızılötesi
FPA	Odak düzlem dizini
H_2	Hidrojen
He	Helyum
IDCA	Integrated Dewar Cooler Assembly (Entegre vakum oda soğutucu montajı)
InGaAs	Indiyum galyum arsenik
InP	Indiyum fosfat
IR	Infrared
LN_2	Sıvı azot
LWIR	Uzun dalga boyu kızılötesi
MCT	Mercury Cadmium Telluride

MWIR	Orta dalga boyu kızılötesi
N_2	Azot
N_2O	Azot protoksit
Ne	Neon
NEP	Gürültü eşiti güç
NETD	Gürültü eşiti sıcaklık farkı
NIR	Yakın dalga boyu kızılötesi
O_2	Oksijen
O_3	Ozon
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetector (Kuantum kuyulu kızılötesi dedektör)
ROIC	Okuma devresi
sccm	Dakika başına santimetreküp akış
SNR	Sinyal-Gürültü oranı
SP	Soğuk Parmak
SWIR	Kısa dalga boyu kızılötesi
TMP	Turbo moleküler pompa
UV	Ultraviyole
VIS	Görünür
VLWIR	Çok uzun dalga boyu kızılötesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Elektromanyetik-spektrum 2
Şekil 1.2 Dünya yörüngesine fırlatılan roketlerin/uyduların kg fırlatma maliyeti (USD) 3
Şekil 2.1 Kızılötesi dedektör teknolojisinin yıllar içerisindeki gelişimi 6
Şekil 2.2 Kara cisim spektral ışıma eğrisi 9
Şekil 2.3 Deniz seviyesindeki atmosferik geçirgenlik eğrisi 11
Şekil 2.4 a) Termal dedektör şematik b) elektriksel gösterimi 12
Şekil 2.5 p-n eklem foto-diyot a) yapısı b) enerji bant diyagramı c) elektrik alan uygulaması d) akım-gerilim şematik gösterimi 13
Şekil 2.6 Foto-iletken dedektör şematiği 14
Şekil 2.7 Harici elektrik alan altında QWIP şematik gösterim 14
Şekil 2.8 a) Lynred Scorpio MW kızılötesi IDCA dedektör b) Patlatılmış Lynred Scorpio MW kızılötesi IDCA dedektör 18
Şekil 2.9 Soğutucu tiplerinin şematik gösterimi (Radebaugh, 2000) 20
Şekil 2.10 Le-Tehnica firmasının füzeler için geliştirdiği mini J-T soğutucu 21
Şekil 2.11 a) Ricor K508 marka/model rotatif tip lineer soğutucu (500 mW @80K) b) DRS lineer çift pistonlu stirling soğutucu (1.75 W @80 K) 22
Şekil 2.12 a) Rotatif tip kinematik stirling kriyojenik soğutucu b) Rotatif tip pnömatik stirling kriyojenik soğutucu 22
Şekil 2.13 Thales marka RM serisi entegre rotatif tip stirling kriyojenik soğutucu 23
Şekil 2.14 Lineer tip pnömatik stirling kriyojenik soğutucu 23
Şekil 2.15 a) Thales marka geçmeli lineer tip stirling kriyojenik soğutucu b) soğutucu sürücüsü 24
Şekil 2.16 a) Farklı tiplerdeki pulse tüplerin şematik gösterimleri b) Thales marka geçmeli lineer pulse tüp stirling kriyojenik soğutucu 24
Şekil 2.17 Termoelektrik Soğutucu (TEC) alt parça tanımlama görseli) 25
Şekil 2.18 Testlerde kullanılacak soğuk parmak kılıfı 3D katı model görseli 27
Şekil 2.19 Farklı tasarımlarda soğuk parmak örnekleri 28
Şekil 2.20 SCD firmasının geliştirdiği a) paket yapısı b) vakum gövdesi katı model kesiti (Veprik, 2015) 28
Şekil 2.21 Farklı tasarımlardaki SAES marka poroz yapıda gaz emiciler (SAES) 29
Şekil 2.22 Yüksek sıcaklık altında birleştirme yöntemiyle üretilen, farklı tasarımlardaki Ametek marka dairesel dış seramikler 30
Şekil 2.23 Özel tasarım bir taşıyıcı seramik ve ROIC+FPA görseli 31
Şekil 2.24 Farklı tasarımlara sahip soğuk kalkan görselleri 32
Şekil 2.25 Safir, Si ve Ge optik pencerelerin 2-6 µm bandında AR kaplamalı ve kaplamasız optik geçirgenliklerinin karşılaştırılması 33
Şekil 3.1 Suyun ve bazı kriyojenik sıvıların kaynama noktaları 34
Şekil 3.2 Bazı metallerin sıcaklık ile ısıl iletkenlik değişim grafiği 37
Şekil 3.3 Çizelge 3.3'de hesaplanan ısıl iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması 39
Şekil 3.4 Isı geçiş mekanizmaları 40
Şekil 3.5 Vakum odası ve soğuk parmak test düzeneği ısıl yük mekanizmaları 42
Şekil 3.6 a) Tüm alt parçaları montajlı, teste hazır vakum odası patlatılmış CAD görüntüsü b) test vakum odası ölçüleri 43
Şekil 3.7 Kaynama test sistemi akış şeması 44

Şekil 3.8 Silisyum diyot için gerilim - sıcaklık dönüşüm grafiği 46
Şekil 3.9 a) Test sisteminde kullanılan vakum odası b) Edwards marka T-station 300 turbo moleküler pompa istasyonu c) Edwards WRG NW25-Vakum ölçer 48
Şekil 3.10 LN_2 buhar hızını ölçmek için geçiş adaptörü a) katı model b) talaşlı imalat sonrası görselleri 48
Şekil 3.11 LN_2 buharının kütle akış ölçer arasındaki hat kurulumunda kullanılan a) boru bükme aparatı b) boru kesme aparatı c) MFM montaj görseli 49
Şekil 3.12 a) Soğuk parmak termal pasta uygulaması b) sıcaklık sensör-soğuk parmak montaj işlem görseli 50
Şekil 3.13 Keithley 2450 kaynak ölçüm cihazı 50
Şekil 3.14 Test odası-hermetik konnektör a) bağlantı kontrolü b) kablaj bağlantı işlem görselleri 51
Şekil 3.15 LN_2 doldurma işleminin görseli 51
Şekil 3.16 Alicat/M500 kütle akış ölçer (MFM)-test odası montaj görseli 52
Şekil 3.17 Kaynama test düzeneği görseli 52
Şekil 3.18 Kaynama test yazılımı-front panel-ana ekranı 53
Şekil 3.19 a) Kaynama test yazılımı-front panel-sıcaklık kontrol ekranı b) akış hızı kontrol ekranı c) ısıl yük kontrol ekranı 54
Şekil 3.20 Kaynama test yazılımının blok diyagram görseli 55
Şekil 3.21 Örnek bir parçanın kaynama testinin Excel kayıt dosya görüntüsü 55
Şekil 4.1 Tez çalışmasında kullanılan soğuk parmakların CAD çizimi a) üst b) kesit ve c) alt görüntüsü 56
Şekil 4.2 a) SP1 (AISI 316), SP3 (Ti-6Al-4V) uç kısım b) Al_2O_3 seramik ölçüleri 58
Şekil 4.3 Kaynama testinin faklı aşamalardaki görselleri 70
Şekil 4.4 SP1 için gerçekleştirilen ısıl yük a) Test-1 b) Test-2 c) Test-3 d) Test-4 72
Şekil 4.5 SP2 için gerçekleştirilen ısıl yük a) Test-1 b) Test-2 c) Test-3 d) Test-4 72
Şekil 4.6 SP3 için gerçekleştirilen ısıl yük a) Test-1 b) Test-2 c) Test-3 d) Test-4 73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Kızılötesi ışımaların bant aralıkları ve tanımlamaları 5
Çizelge 2.2 Bazı malzemelerin farklı sıcaklıklardaki yayıcılıkları 8
Çizelge 2.3 Bazı IR dedektörlerin çalışma bant aralıkları ve sıcaklıkları (Teledyne) 11
Çizelge 2.4 Kriyojenik seviyede kaynama noktaları olan bazı maddeler 19
Çizelge 3.1 Bazı malzemelerin kriyojenik sıcaklıklardaki özgül ısıları 36
Çizelge 3.2 Isıl iletkenlik hesaplamaları için logaritmik sabitler 38
Çizelge 3.3 Farklı sıcaklıklarda hesaplanan ısıl iletkenlik değerleri..... 39
Çizelge 3.4 Test sisteminde kullanılan malzeme listesi ve kullanım amaçları 47
Çizelge 4.1 Tez çalışmasında kullanılan soğuk parmakların özellikleri..... 56
Çizelge 4.2 SP_105µm_AISI 316 için ısıl yük hesaplamalarında kullanılan veriler..... 59
Çizelge 4.3 SP_185µm_AISI 316 için ısıl yük hesaplamalarında kullanılan veriler..... 61
Çizelge 4.4 SP_100µm_Ti-6Al-4V için ısıl yük hesaplamalarında kullanılan veriler ... 62
Çizelge 4.5 Soğuk parmak-1 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları 64
Çizelge 4.6 Soğuk parmak-2 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları 66
Çizelge 4.7 Soğuk parmak-3 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları 68
Çizelge 4.8 Tüm soğuk parmaklar ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları..... 71
Çizelge 4.9 Teorik, simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılma tablosu..... 73

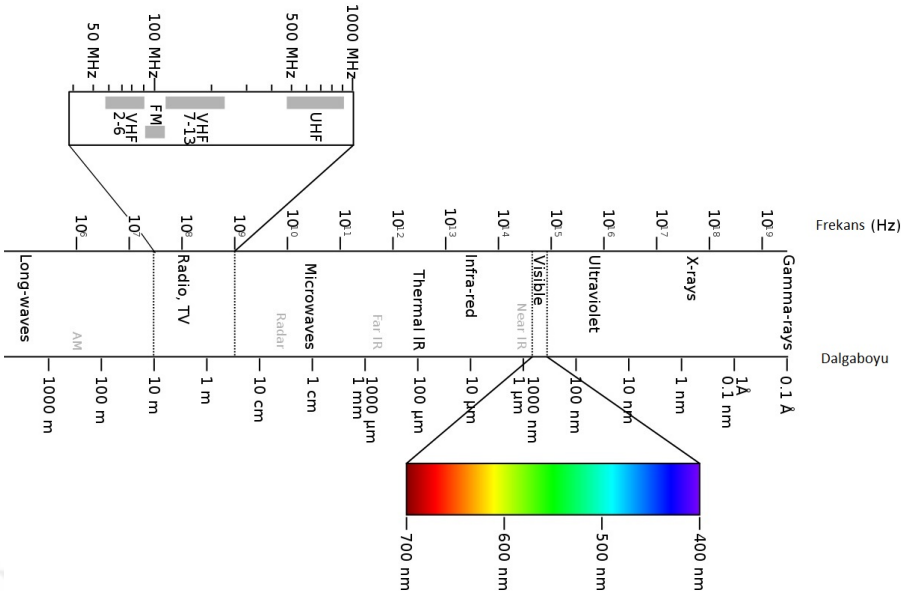
1. GİRİŞ

Günden güne gelişen teknoloji ve dolayısıyla oluşan yeni ürün ihtiyacı sebebiyle sürekli olarak teorik ve deneysel çalışmalar yürütülmektedir. Otomotiv, savunma, uzay, medikal vb. sektörlerde çeşitli alanlarda yeni teknoloji ihtiyacı ve bu ihtiyaçlara yönelik çözümler üretmek amacıyla çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmaların arasında algılama yapabilen cihazlar da yer almaktadır. Fiziksel bir olguyu algılamak (dedekte etmek) amacıyla çıkış sinyali üreten aygıtlar, dedektörlerdir.

Günümüz teknolojisinde dedektörler oldukça önemli bir yer tutmakta, dedektörlerin kullanım alanlarıyla beraber kullanım özellikleri ve tasarımları da değişmektedir. İhtiyaçlar doğrultusunda belirlenen malzemeler kullanılarak, dedektör teknolojisinin kullanım alanlarını genişletmek ya da yeni teknoloji dedektör sistemleri üretmek mümkündür.

Dedektörler medikal, otomotiv, savunma ve uzay sanayi, tarım vb. pek çok yerde kullanılmaktadır. Dedektörlerin kullanım alanlarının ve uygulamalarının farklılık göstermesi sebebiyle ihtiyaca göre, nano ve mikro seviyelerinde boyutlara sahip, çok küçük değişimleri algılayabilecek hassasiyetlerde sensörler üretilebilmektedir.

Tüm elektromanyetik ışınımın/radyasyonun farklı dalga boyu ya da frekanslara göre ölçütü olan elektromanyetik spektrum, Şekil 1.1'de verilmiştir. Elektromanyetik dalgaların birçoğu Dünya atmosferi tarafından soğurulmaktadır. Atmosfer, elektromanyetik ışınımın sadece belirli dalga boyuna sahip ışınımlarının yer yüzeyine ulaşmasına izin vermektedir. Ayrıca atmosfer içeresinde kalan kısımda ise bazı gaz moleküllerinin soğurma ve saçma etkileri sebebiyle algılama yapılamamaktadır. İnsan gözünün, Şekil 1.1'de yer alan elektromanyetik spektrumda gösterildiği gibi görünür bölgenin hemen yanından başlayan daha büyük dalga boyuna sahip bölgedeki (~ 0,7 μm ila 100 μm arasında) ışınımları algılaması mümkün değildir. Bu banttaki ışınımların algılanması için kızılötesi bantta algılama yapan dedektörler kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Elektromanyetik-spektrum

(Web sitesi: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum)

Görüntü dedektörleri 0 (sıfır) kelvin üzerindeki tüm cisimlerin yaydığı ışığı algılayarak bir elektriksel sinyale çevirirler. Kızılötesi bantta çalışan dedektörler temel olarak ısıl (termal) dedektörler ve foton dedektörleri olmak üzere ayrılırlar.

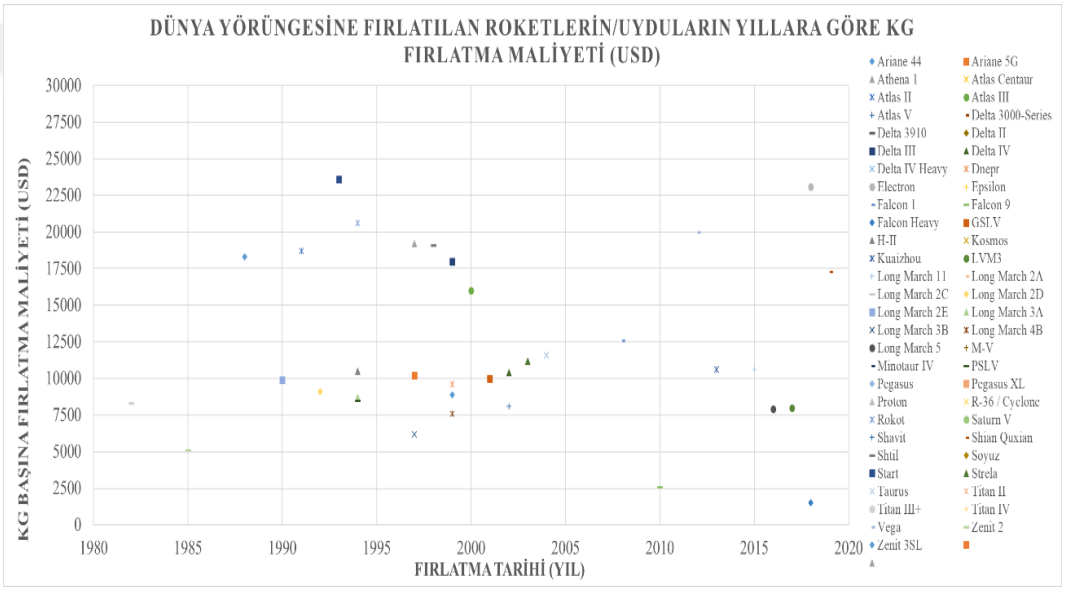
Cisimlerin yaydıkları ışınımları algılarken; malzemelerin sıcaklık farkından kaynaklanan fiziksel değişimlerden yararlanan, boyutları nispeten küçük ve maliyeti düşük sistemler termal dedektörlerdir.

Foton dedektörleri ise cisimlerin enerjileri sebebiyle yaydıkları fotonları sayarak algılama yapan sistemlerdir. Bu dedektörlerin çalışabilmesi için kriyojenik sıcaklıklara soğutulması gerekmektedir. Bunun için özel olarak tasarlanmış kriyojenik soğutucular kullanılmaktadır. Foton dedektörler nispeten daha ağır, büyük ve maliyetli olmasına karşı çok daha uzun menzillerde, çok daha yüksek çözünürlükte görüntülemeler yapabilmeleri sebebiyle savunma sanayiinde tercih edilmektedirler.

Savunma, uzay ve havacılık gibi sektörlerde, ağırlık ve güç tüketimi oldukça önem taşımaktadır. İleri teknoloji sektörlerde sistemlerin ağırlıkları ve boyutları,

montajlanacakları yerlerdeki işlem alanlarının kısıtlı olması ve maliyetleri sebebiyle kritiktir.

Dünya yörüngesine bir kg yük göndermenin, yıllara göre kg başına fırlatma maliyetini gösteren grafik, Şekil 1.2'de verilmektedir. Şekil 1.2'deki grafiğe göre, Dünya yörüngesine bir kilo yük göndermenin maliyeti binlerce Amerikan doları seviyesindedir. NASA'nın hedefi 1 kg'lık bir yükün uzaya ulaşma maliyetini 25 yıl içinde kg başına bin dolar altına, 40 yıl içinde ise kg başına yüz dolar altına düşürmektir (Web sitesi: https://www.nasa.gov).



Şekil 1.2 Dünya yörüngesine fırlatılan roketlerin/uyduların kg fırlatma maliyeti (USD) (Web sitesi: https://ourworldindata.org)

Uzay havacılık sektöründe faaliyet gösteren firmalar ise bu gibi sebepleri göz önünde bulundurduğunda malzeme bilimi üzerine ciddi yatırımlar yaparak, küçük ve hafif ürünler tasarlamaktadırlar. Bu sebeple dedektörler tasarlanırken boyutların olabildiğince küçük ve düşük güç tüketimine sahip olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ek olarak, $\Delta T \sim 200$ °C (veya K) gibi bir sıcaklık değişiminde montajlanan malzemelerin birbirlerine yakın fiziksel özelliklerde olması istenmektedir. Örnek olarak; farklı genleşme katsayısına sahip iki malzemenin yüzeyleri birbiri ile yapıştırıldığında, yaklaşık $\Delta T \sim 200$

°C (veya K) sıcaklık farkında, malzemeler üzerinde oluşan farklı gerilmeler sebebiyle yapısal sorunlar ile karşılaşılabilmektedir. Tasarım yapılırken termal kütle, ısıl yük ve genleşme, mukavemet, elastikiyet gibi malzeme davranışları belirlenmeli, ona göre malzeme seçimi yapılmalıdır.

Medikal, savunma, uzay vb. birçok sektörde kullanım alanı olan soğutmalı kızılötesi dedektörlerin kullanımı günümüzde gittikçe artmaktadır. Kızılötesi dedektörlerde kullanılan malzemelerin kriyojenik sıcaklıklarda davranışlarının incelenmesi ve sistemin termal kütlesi, ısıl yükünün belirlenebilmesi amacıyla test sistemlerinin geliştirilmesi oldukça önem taşımaktadır. İhtiyaç duyulan teknolojik gelişimlerin gerçekleştirilmesi amacıyla yapılan literatür çalışmaları sonucunda ileri teknoloji ve kriyojenik seviyede çalışan malzemelerin karakterizasyonları ile ilgili yeterli kaynağın olmadığı görülmektedir. Bu alanda yapılan araştırmaların arttığı bilinmekte fakat daha da artması gerekmektedir. Bu kapsamda kızılötesi soğutmalı dedektörlerin ısıl yönetimleri ise dikkat çekmektedir. Bu alanda çalışmalar zorlu olmasına rağmen geliştirilmesi gerekmekte, ısıl yük, termal kütle, kriyojenik ortam uyumlu malzeme analizi, ilgili test sistemleri gibi konular üzerine çalışılmalıdır.

Bu tez çalışması kapsamında soğutmalı kızılötesi dedektörler paket yapılarındaki soğuk parmakların; malzeme, fiziksel özellik, fiziksel değişim gibi parametrelerinin incelenmesi, analiz edilmesi ve üretimi sonrasında da ısıl yüklerinin ve termal kütlelerinin hesaplanması ve test edilmesi hedeflenmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Kızılötesi Işımaya İlişkin Temel Bilgiler ve Tarihi

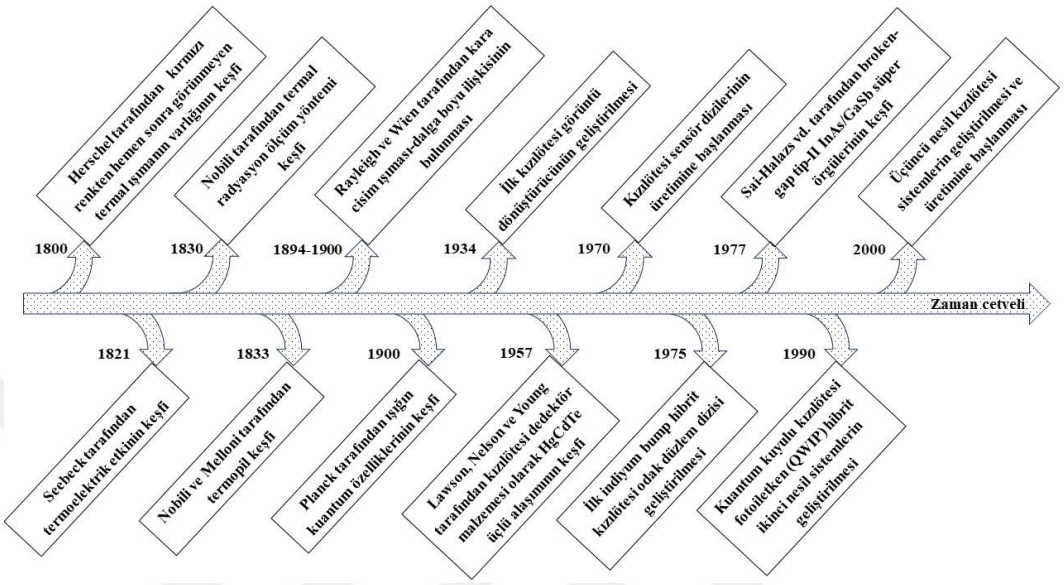
Elektromanyetik spektrumda yer alan X-ışını, görünür, kızılötesi, radyo dalgaları vb. arasındaki sınır çizgileri mutlak değildir ve bu bölgeler arasında net bir aralık ayrımı yapılmasına gerek yoktur. Görünür bölge ile mikrodalga bölgesi arasında yer alan bölge kızılötesi bölgedir (Çizelge 2.1). Şekil 1.1'de elektromanyetik spektrum içerisinde kalan görünür ve kızılötesi ışıma için µm cinsinden dalga boyu bant aralıklarında yapılan sınıflandırma görülmektedir. Görünür bölge bant aralığı yaklaşık 0,4–0,7 µm iken, kızılötesi bant için yaklaşık 0,7 µm ila 100 µm arasında geniş bir bant aralığı vardır. Kızılötesi ışınımın üzerine düşmesi ile elektriksel sinyal üreten aygıtlar, kızılötesi dedektörlerdir. Sinyal üretme yöntemindeki farklılıklara göre termal ve foton dedektörleri olmak üzere iki ayrı ana başlığa ayrılırlar (Vincent vd., 2015).

Çizelge 2.1 Kızılötesi ışımaların bant aralıkları ve tanımlamaları (Rogalski, 2012)

Dalga boyu aralığı (µm)	**Bölge tanımlama (İngilizce)**	**Bölge tanımlama (Türkçe)**	**Kısaltma**
~ 0,2 – 0,4	Ultraviolet	Ultraviyole	UV
~ 0,4 – 0,7	Visible	Görünür	VIS
~ 0,7 – 1	Near infrared	Yakın kızılötesi	NIR
~ 1 – 3	Short infrared	Kısa kızılötesi	SWIR
~ 3 – 5	Medium infrared	Orta kızılötesi	MWIR
~ 5 – 14	Long infrared	Uzun kızılötesi	LWIR
~ 14 – 30	Very long infrared	Çok uzun kızılötesi	VLWIR
~ 30 – 100	Far infrared	Uzak kızılötesi	FIR

Kızılötesi (IR) ışınım ilk olarak Frederick William Herschel (1738-1822) tarafından gerçekleştirilen termometre deneyi sonrasında rapor edilmiştir. Herschel 11 Şubat 1800'de, güneş ışığındaki enerji dağılımını ölçebilmek için (renklerin sıcaklığını ölçebilmek için) prizmadan geçirdiği ışığın her renk dağılımına termometre koymuştur

ve enerjilerini algılamak istemiştir. Kırmızı rengin hemen yanında (gözle göremediği bir yerde) diğer renklerden çok daha yüksek bir enerji olduğunu fark etmiştir (Şekil 2.1'deki zaman çizelgesinde) ve bu bulguyu karanlık ısı olarak rapor etmiştir (Rogalski, 2012).



Şekil 2.1 Kızılötesi dedektör teknolojisinin yıllar içerisindeki gelişimi (Rogalski, 2012)

Sonraki yıllarda ise uzun bir süre kızılötesi ışınımın basit optik temeller ile uyumluluğu üzerine, yavaş ilerleyen ve çok fazla somut çıktıları olmayan çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmaların sınırlanmasındaki en önemli sebeplerden biri de kızılötesi ışınımı algılamak için dedektör olarak kullanılan termometreler olduğu ortaya çıkmıştır. Alman bilim adamı Thomas Johann Seebeck (1770-1831) 1821 yılında birbirine lehimlenmiş iki farklı metalden oluşan bir devrenin uçları kapatıldığında, manyetik bir iğnenin mıknatıs gibi döndüğünü keşfetmiştir. Devredeki sıcaklık farkına bağlı olarak iğnenin dönme hızının değiştiğini belirtmiştir. Seebeck etkisi; herhangi bir iletken malzemeye bir sıcaklık farkı uygulayarak, bir gerilim üretilmesidir (Ravindra vd., 2018).

Seebeck, birbiri ile bağlı tellerde elde edilen gerilimin μV/K gibi düşük seviyelerde olması sebebiyle çok küçük sıcaklık farklarını ölçememiştir. 1829'da Leopoldo Nobili termoelektrik etkiye dayanan elektrikli termometreyi geliştirmiştir. Yakın bir zaman sonra Macedonio Melloni, birkaç bizmut-bakır termokuplu (ısıl çifti) seri bağlayarak elde ettiği termopiller ile daha yüksek ölçülebilir bir çıkış gerilimi üretmiştir. O dönem için en

iyi termometreden en az 40 kat daha duyarlı ve yaklaşık 10 m mesafedeki bir insandan gelen ısıyı tespit edebilen bir dedektör geliştirilmiştir (Rogalski, 2012). 1880'de Samuel Pierpont Langley, iki ince platin folyo şeridin birbirine bağlandığı ilk bolometreyi geliştirmiştir. Langley'in bolometresinin hassasiyeti, o dönemki termokupllardan çok daha fazla ve 400 m mesafedeki bir inekten gelen ısıyı tespit edebilmiştir.

Kızılötesi teknolojisinde, foton dedektörleri üzerine oldukça fazla çalışmalar yürütülse de 20. yüzyılın ortalarına kadar kızılötesi algılama, termal dedektörler ile yapılmaktaydı. Aslında kızılötesi dedektörler için yürütülen ilk çalışmalarda, termal dedektörler ve foton dedektörleri arasında bir ayrım yoktur. 2. Dünya Savaşı sırasında kızılötesi görüntüleme ve bu alanda kullanılan malzemeler üzerine birçok araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülmüş ve askeri kullanıma yönelik birçok ürün ortaya çıkmıştır. Sonrasında, günümüze kadar olan dönemde askeri uygulamaların yanında sivil uygulamalar için de kızılötesi teknolojisi alanında hızlı ilerlemeler kaydedilmiştir (Arslan, 2014).

2.2 Kızılötesi Işıma

2.2.1 Kara cisim ışıması

Sıfır (0) kelvin (mutlak sıfır) üzerindeki tüm cisimler ışıma yapmaktadırlar. Bunun sebebi, bu sıcaklığın üzerinde cisimlerin atomlarının titreşmeye başlamalarıdır. Mutlak sıfırdan uzaklaştıkça cisimlerin atomlarının enerjileri artacağından, daha fazla titreşirler ve dolayısıyla tüm cisimler sıcaklıklarına ve spektral yayma güçlerine bağlı olarak daha fazla ışıma yaparlar. Bir kara cisim, üzerine gelen ışınımı çok iyi soğurur. Tersi durumda da yayma gücü; Kirchhoff Yasası'na göre ısıl dengedeki soğurma gücüne eşit olması gerektiğinden, üzerindeki enerjiyi çok iyi yayar. Kara cisimler, radyometrik cihazların kalibrasyonunda ve test edilmesinde kullanılmaktadırlar. Kara cismin fiziksel temelinde Planck yasası, Wien yasası ve Stefan-Boltzmann yasası vardır (Rogalski, 2010).

Cisimlerin üzerine gelen ışınım emilir, cisim boyunca iletilir veya yansıtılır. Enerjinin korunumu gereği bu üç terim toplamı, gelen ışımanın toplamına eşit olmalıdır ve Eşitlik (1) şeklinde ifade edilmektedir.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{1}$$

Burada α spektral soğurma, τ spektral iletim ve ρ spektral yansımadır. Cisimlerin çoğu kara cisim seviyesinde mükemmel soğurucu özelliğe sahip değildirler ve birimsiz, 0 ila 1 arasında değişen yayma gücü (emisivite, ε) değerleri; kara cisme ne kadar yakın olduklarını belirler.

Bahsedilen ε değeri, cisimlerin yüzey durumları, kalınlıkları ve dalga boyuna doğrudan bağlıdır (Arslan, 2014). Çizelge 2.2'de farklı yüzey pürüzlüklerine sahip, farklı sıcaklıklardaki malzemelerin yayıcılık değerleri karşılaştırılmıştır. ε değeri sıcaklıkla azalır ancak oksidasyon, kirlilik, yüzey pürüzlülüğü gibi etkenler ile artar. Yayıcılık değerini azaltmak için malzemelerin yüzey pürüzlüklerini düşürmek ve temizlik işlemlerini ileri seviyede uygulamak gerekir.

Çizelge 2.2 Bazı malzemelerin farklı sıcaklıklardaki yayıcılıkları (Baudouy, 2015)

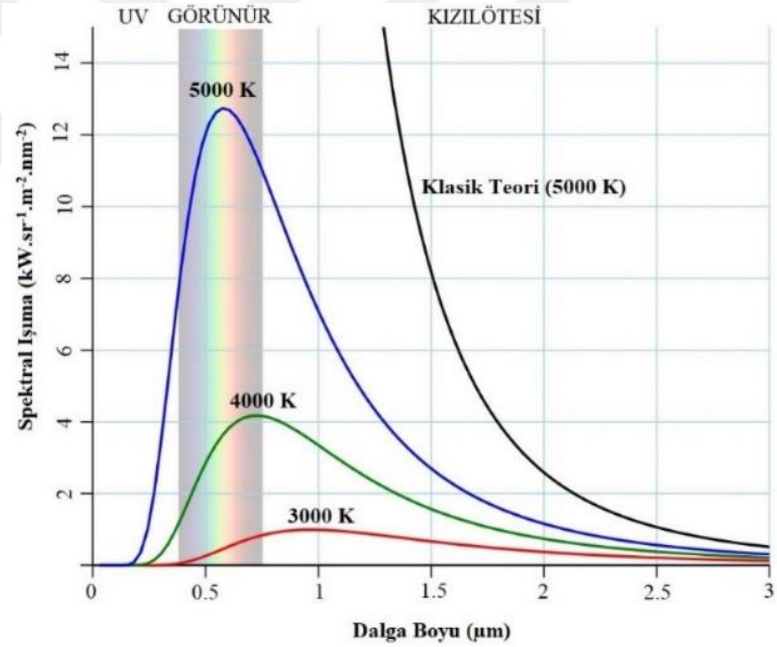
Malzeme	**300 K - 78 K**	**78 K - 4,2 K**
Elektropolisaj Al	0,075 ±%9	0,036 ±%7
Mekanik polisaj Al	0,1 ±%9	0,058 ±%6
Mekanik polisaj Cu	0,06 ±%9	0,023 ±%12
Elektropolisaj SS	0,1 ±%13	0,065 ±%5
Mekanik polisaj SS	0,12 ±%8	0,074 ±%5
Mekanik polisaj Ti-6Al-4V	-	0,08 ±%7 (Frolec, 2019)

Planck Yasası bir kara cisimden gelen ışınımın sıcaklık ve dalga boyuna nasıl bağlı olduğunu gösterir. Spektral ışınım (*W*), dalga boyu *(λ)* ve sıcaklığa (*T*) bağlıdır.

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \tag{2}$$

$$W(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \tag{3}$$

Eşitlik (2) ve (3)'te λ dalga boyu, T sıcaklık, h Planck sabiti ($6{,}62618 \cdot 10^{-34}$ J·s), k_b Boltzmann sabiti ($1{,}38066 \cdot 10^{-23}$ J·K^{-1}), c ışığın boşluktaki hızıdır ($2{,}9979 \cdot 10^{8}$ m·s^{-1}). Spektral radyant çıkış, $M(\lambda, T)$ ve spektral radyans, $L(\lambda, T)$ için karşılık gelen denklemler $M = \pi L$ ile ilişkilidir (Rogalski, 2010). Şekil 4'te görüldüğü gibi cismin sıcaklıkları arttıkça grafikteki tepe noktası, yüksek enerjili tarafa kaymaktadır.



Şekil 2.2 Kara cisim spektral ışıma eğrisi
(Web sitesi: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body)

Kara cisim tarafından yayılan enerjinin maksimum spektral dağılımı Eşitlik (4) ve (5)'te verilen Wien yasası ile ifade edilir. Sıcaklık arttıkça enerjinin maksimumu daha düşük dalga boylarına kaymaktadır.

$$\lambda_{max(watt)}T = 2898 \quad \mu m \cdot K \tag{4}$$

$$\lambda_{max(foton)}T = 3670 \quad \mu m \cdot K \tag{5}$$

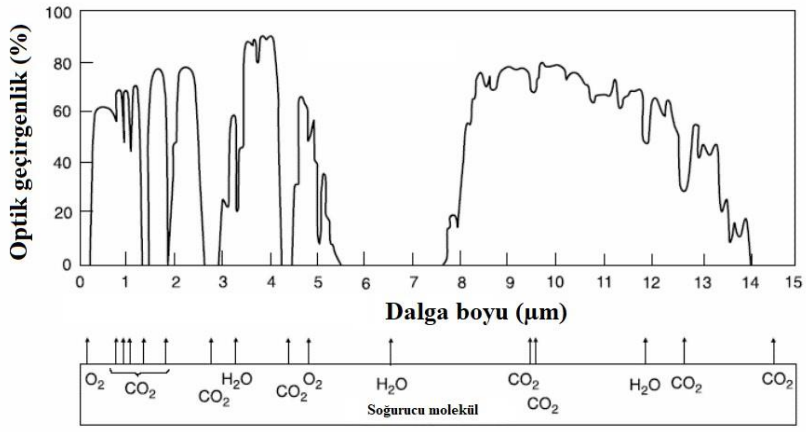
Planck yasasının, λ dalga boyunun $0 \rightarrow \infty$ aralığında çözülmesi durumunda, kara cismin yaydığı spektral güç ($M(T)$) ise Stephan-Boltzmann yasası ile verilmektedir. Kara cisim dışındaki cisimlerin yaydığı spektral güç Eşitlik (6)'da verilmektedir.

$$M(T) = \varepsilon \, \sigma \, T^4 \tag{6}$$

Burada T, sıcaklık ve σ, Stefan-Boltzmann sabitidir ve değeri $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m^2·K^4)'dir (Asar, 2014). Kara cisim ε değeri 1 olduğu için Eşitlik (6) doğrudan; $M(T) = \sigma \, T^4$ şeklinde ifade edilmektedir.

2.2.2 Atmosferik koşullar

Elektromanyetik ışınımın büyük bir bölümü atmosfer içerisinde soğurulmaktadır. Atmosferik iletim dolayısıyla kızılötesi iletim için hava koşulları, rakım, nem ve havanın içeriği oldukça önemlidir. Atmosferde bulunan H_2O, O_3, N_2O, CO, CH_4 ve N_2 gibi moleküller kızılötesi ışımayı önemli ölçüde engellemektedirler. Şekil 2.3'te verilen atmosferik iletim eğrisine bakıldığında kızılötesi ışımanın atmosferde bulunan moleküller tarafından soğuruldukları aralıkların, kızılötesi bandı belirli bölgelere ayrıldığı görülmektedir (Arslan, 2014).



Şekil 2.3 Deniz seviyesindeki atmosferik geçirgenlik eğrisi (Arslan, 2014)

2.3 Kızılötesi Dedektörler

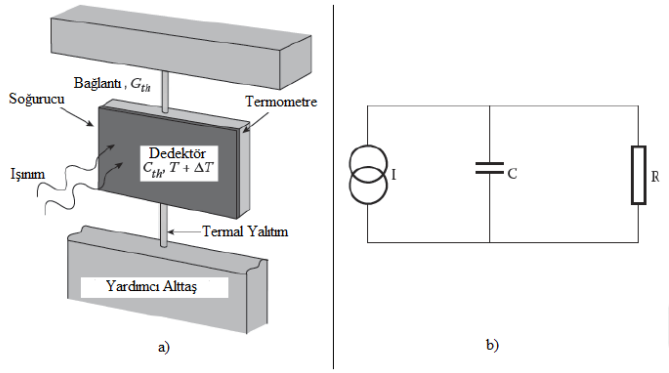
Kızılötesi dedektörler temel ve en genel şekilde, birbirinden farklı algılama yöntemine göre 'Termal Dedektörler' ve 'Foton Dedektörler' olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bahsi geçen iki dedektör tipinin ise kendi içlerinde birden fazla çeşitleri de bulunmaktadır. Kızılötesi dedektörlerin bazılarının yarı iletken temelleri sebebiyle kızılötesi ışınımı algılayabilmek için soğutulmaları gerekmektedir. Soğutmalı ve soğutmasız tipte kızılötesi dedektörler bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bazı kızılötesi dedektörler Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3 Bazı IR dedektörlerin çalışma bant aralıkları ve sıcaklıkları (Teledyne)

Kızılötesi dedektör odak düzlem dizini tipi	**Çalışma bant aralığı**	**Çalışma sıcaklığı**
Mikrobolometre	Geniş Bant Dedektör	Soğutmasız (~300 K)
HgCdTe	SWIR Foton Dedektörü	Soğutmalı (~200 K)
HgCdTe	LWIR Foton Dedektörü	Soğutmalı (~77 K)
InSb	MWIR Foton Dedektörü	Soğutmalı (~77 K)
PtSi	MWIR Foton Dedektörü	Soğutmalı (~77 K)
QWIP	LWIR Foton Dedektörü	Soğutmalı (~70 K)

2.3.1 Kızılötesi termal dedektörler

Termal dedektörlerin çalışması; dedektöre gelen kızılötesi ışınım sayesinde dedektör malzemesinin sıcaklığının yükselmesi ile dedektör malzeme yapısındaki fiziksel değişimlerin ölçülmesi temeline dayanmaktadır. Şekil 2.4'de bir termal dedektörün şematik ve elektriksel gösterimi verilmektedir. Termal dedektörler genellikle oda sıcaklığında çalıştırılmaktadırlar. Kriyojenik seviyelerde soğutmaya ihtiyaç duymazlar fakat çalışma sıcaklığının stabilizasyonunu sağlamak amacıyla sistemde termoelektrik soğutucu kullanılan termal dedektörler de vardır. Maliyeti nispeten düşük uygulamalar olmaları sebebiyle sivil uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.4 a) Termal dedektör şematik b) elektriksel gösterimi (Rogalski, 2010)

Bolometreler, gelen kızılötesi ışınımın soğurulmasıyla birlikte dedektör malzeme yapısındaki elektriksel iletkenliğin değişmesi ilkesine dayanır.

Termokupllar, iki farklı malzemenin bir uçta birleştirilmesiyle oluşturulur. Çalışma prensibi Seebeck etkisine dayanmaktadır. İki farklı malzeme bir uçta birleştirilip ısıtıldığında, malzemelerin açık ucunda kendiliğinden oluşan bir gerilim farkı olmaktadır. Kendinden üretilen gerilimin büyüklüğü, iki malzemenin Seebeck katsayılarının farkı ile doğru orantılıdır. Genellikle, tek bir termokupl tarafından üretilen gerilim doğru bir şekilde ölçülemez.

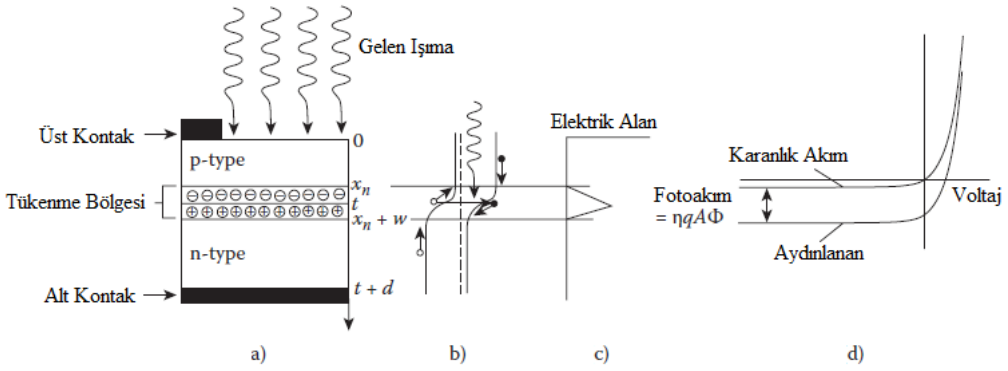
Termopiller, çıkış gerilimini artırmak için birden fazla termokupl seri olarak bağlanmasıyla oluşan yapıdır.

Piroelektrik dedektörler ise polar bir malzemenin kızılötesi ışınım ile sıcaklığındaki artışın, geçici bir potansiyel fark oluşturması temeline dayanır (Eker, 2010).

2.3.2 Kızılötesi foton dedektörleri

Kızılötesi foton dedektörlerin soğutmalı yapıda olmalarının yanı sıra; InGaAs/InP tabanlı yarı iletken malzemeler ile üretilen, kısa dalga boyunda kızılötesi algılama yapan soğutmasız dedektörler de bulunmaktadır. Foton dedektörler, sıfır (0) kelvin üzerindeki cisimlerin yaydığı ışımadan kaynaklanan fotonları algılayan yarı iletken aygıtlardır. Kriyojenik seviyelerde soğutulmaya ihtiyaç duyarlar. Soğutmalı kızılötesi dedektörler olarak adlandırılabilirler.

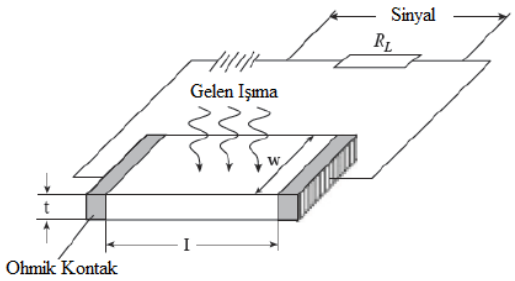
Fotovoltaik dedektörlere yaygın olarak *p-n* eklem fotodiyot yapıları örnek verilmektedir. Dedektör üzerine ulaşan fotonlar *p* ve *n* bölgelerinde elektron-boşluk çiftleri oluşturur ve güçlü elektrik alan altında foto-akım oluşur. Şekil 2.5a'da ise yaygın olarak kullanılan bir fotodiyot *p-n* eklem yapısı üzerine gelen ışıma (bant aralığından daha yüksek enerjili), *p* ve *n* tarafta elektron-boşluk çiftleri oluşturur. Elektron-boşluk çiftleri güçlü bir elektrik alan (Şekil 2.5c) etkisiyle ayrılırlar. Bu sayede taşıyıcılar hızlandırılır ve akım-gerilim grafiği Şekil 2.5d'de görüldüğü gibi kayarak foto-akım oluşur.



Şekil 2.5 *p-n* eklem foto-diyot a) yapısı b) enerji bant diyagramı c) elektrik alan uygulaması d) akım-gerilim şematik gösterimi (Rogalski, 2010)

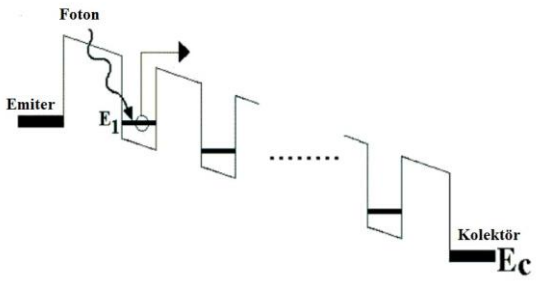
Fotoiletken dedektörler; ışınıma duyarlı bir direnç yapısına sahiptirler. Fotoiletken üzerine belirli sayıda gelen fotonlar serbest taşıyıcılar oluşturur ve bu taşıyıcılar yarı

iletken malzemenin elektriksel iletkenliğinin değişmesine sebep olur. Bu değişim akım-gerilim karakteristiği ile ölçülebilir. Bir fotoiletkenin şematik gösterimi Şekil 8'de verilmektedir. Bant aralığı enerjisinden (E_g) daha büyük hv enerjili bir foton, elektron-delik çifti üretmek için soğurulur ve böylece yarı iletkenin elektriksel iletkenliği değişir.



Şekil 2.6 Foto-iletken dedektör şematiği (Rogalski, 2010)

Kuantum kuyulu kızılötesi dedektörler (QWIP) geniş ve düşük bant aralıklarına sahip yarı iletkenlerin katmanlı yapıda büyütülmesiyle kuantum kuyularının elde edilmesi temeline dayanır. Dedektöre gelen foton, bir elektron ya da deliği komşu kuyuya gönderebildiğinde algılama gerçekleşir. Elektronu, kuantum kuyu yapısında bulunan bariyerin ucundan tünel açmaya yönlendirmek ve sürekli bir ilerleme elde edebilmek için Şekil 2.7'de şematiği gösterilen şekilde harici bir elektrik alan gerekir.



Şekil 2.7 Harici elektrik alan altında QWIP şematik gösterimi (Arslan, 2014)

Süper örgü dedektörler farklı yarı iletken malzemeler kullanılarak, katmanların birbiri üzerine tekrar tekrar büyütülmesi ile elde edilmektedirler. Tip-II süper örgü yapılarda, kademeli bant aralığına uygun yapıda olacak şekilde seçilen iki malzemenin ardışık çok

katmanlı büyütülmesiyle yapay bir bant aralığı oluşturulur. Gelen foton, yapay bant aralığı boyunca elektronları uyarır.

2.3.3 Kızılötesi dedektörlerin performanslarını etkileyen parametreler

Askeri, uzay-havacılık, medikal gibi sektörler başta olmak üzere; 100 yılı aşkın süredir bu sektörlerin, ortam atmosferik koşulları, mekanik isterler, ağırlık kriterleri, soğutma süresi ve soğutucu boyutları vb. ihtiyaçlarına cevap verebilmek amacıyla farklı yarı iletken, opto-mekanik ve soğutucu yapısına sahip kızılötesi dedektör çeşitleri bulunmaktadır. Bu dedektörlerin mekanik, optik isterlerinin yanı sıra sensör düzeyinde elektronik performans kriterlerinin doğrulanması gerekmektedir. Bu parametreler aşağıda detaylandırılmıştır.

Gürültü: Gürültü ölçülen sinyaldeki dalgalanmalar olarak tanımlanabilir. Kızılötesi dedektörlerde bu dalgalanmalara; dedektör montajı sırasında kullanılan kablolama işlemleri gibi elektriksel bağlantılar, dedektör yarı iletken yapısındaki gürültüler sebep olmaktadır. Kullanılan dedektörün yapısına bağlı olarak çeşitli gürültü tanımlamaları vardır. Foton dedektörleri için; fotonların dedektör üzerine rastgele çarpması sonucunda oluşan Shot (vuruş), bir iletkenin doğası gereği oluşan termal gürültüler sebebiyle oluşan Johnson, yarı iletken malzemede rastgele yüklü parçacıkların üretilmesi ve rekombinasyonu sonucunda ortaya çıkan jenerasyon-rekombinasyon (*G-R*) gibi gürültüler etkili olmaktadır (Yelboğa, 2012).

Karanlık akım: Dedektörlerin üzerine herhangi bir ışınım gelmediği durumlarda dahi ölçülen akım değeri, karanlık akım olarak tanımlanmaktadır. Karanlık akım değeri, nesneye bakıldığında fotonlardan kazanılan akım değerinden çıkarılarak, dedektörün kazandığı net akım değeri elde edilebilir (Eker, 2010).

Tepkisellik: Dedektörün çıkış sinyalinin, dedektör üzerine ulaşan ışınım gücüne oranıdır (Arslan, 2014). Dedektörün, üzerine gelen foton enerjisine verdiği tepkiyi tanımlar ve birim foton başına dedektörün oluşturduğu akım veya gerilim miktarıdır (Yelboğa, 2012).

$$R = \frac{q_e}{hv}\eta g \tag{7}$$

Burada q_e elektron yükü, h Planck sabiti, v foton frekansı, η kuantum verimliliği ve g foton kazancıdır. R, dedektörün foton tepkiselliği ve birimi A/W'tır (Eker, 2010).

Gürültü eşiti güç: Sinyal-Gürültü oranı (Signal to Noise Ratio-SNR) olarak da bilinmektedir. Dedektör çıkışında sinyal ve gürültü oranının 1 olması için dedektör üzerine gelmesi gereken güç, gürültü eşiti güç (Noise Equivalent Power-NEP) olarak tanımlanır (Tumkaya, 2003).

$$\frac{S}{N} = \frac{R_i \Phi_e}{i_n} \tag{8}$$

$$\frac{1}{\Phi_e} = \frac{R_i}{i_n} \tag{9}$$

$$NEP_{akım} = \frac{i_n}{R_i} \; ve \; NEP_{voltaj} = \frac{V_n}{R_v} \tag{10}$$

Burada S sinyal, N gürültü, i_n gürültü akımı, $R_{(i/v)}$ tepkisellik ((A veya V) /W), Φ_e ışınım gücü (W), Vn, gürültü gerilimidir (Yelboğa, 2012).

Kuantum verimi: η kuantum verimliliği; üretilen serbest elektron sayısının, dedektöre çarpan toplam foton sayısına oranıdır. Tepkisellik ile doğrudan bağlantılıdır.

Dedektivite ve Normalize dedektivite: Foton dedektörlerinin algılama gücü dedektivitedir. Dedektivitenin yükselmesi dedektör performansını arttırmaktadır. Dedektivite (detectivity-*D*), NEP'nin tersidir ve (1/NEP) şeklinde tanımlanmaktadır.

Normalize dedektivite (Normalized detectivity-D^*) ise dedektörün aktif alanına (A_d), frekans bant genişliğine (Δf) ve gürültü eşiti güç (NEP) değerlerine bağlıdır (Rogalski, 2010).

$$D^* = D\sqrt{A_d \Delta f} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP} \tag{11}$$

Gürültü eşiti sıcaklık farkı: Tepkisellik ve dedektivite ölçümleri ile piksel seviyesinde performans ölçümü yapılırken, odak düzlemi seviyesinde performans belirlemek amacıyla gürültü eşiti sıcaklık farkı (Noise Equivalent Temperature Difference-NETD) kullanılır. NETD, SNR değerinin 1'e (bir) eşit olduğu minimum sıcaklık farkı olarak tanımlanabilir (Eker, 2010).

$$NETD = \frac{Gürültü\ Voltajı}{Sinyal\ Voltajı} \Delta T \tag{12}$$

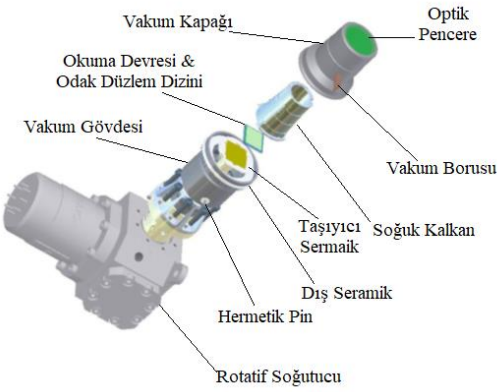
2.4 Kızılötesi Foton Dedektörlerinin Alt Bileşenleri

Soğutmalı kızılötesi dedektörler birden fazla parçadan oluşmaktadır ve bu parçalar birbirleriyle birden fazla yöntemle montajlanmaktadırlar. Bu montajlama işlemine paketleme işlemi de denmektedir. Dedektörün çalışma prensibi sebebiyle paket yapısı içinde bulunan sensör soğutulmaya ihtiyaç duymaktadır. Bahsedilen soğutma seviyesi, yaklaşık 120 K altındaki değerler olarak tanımlanan kriyojenik sıcaklıklardır (Ross, 2016). Soğutma gereksinimleri gibi, foton dedektör çalışmasını doğrudan etkileyecek sebeplerden dolayı paket iç yapısı vakum sızdırmaz olmak zorundadır. Her bir paket parçasının fiziksel ve kimyasal özellikleri, malzeme seçimi yaparken kritik rol oynamaktadır. Çok düşük seviyelerde sıcaklık farklarını algılama ihtiyacı, yüksek görüntü kalitesi, görüntü menzili, sisli-nemli hava şartlarında görüntüleme yapmak gibi gereksinimler olması durumunda soğutmalı kızılötesi dedektörler talep edilmektedir.

Bir foton dedektöründe çıkış sinyali oldukça düşük seviyededir. Kriyojenik sıcaklıkların dışında, çıkış sinyali yarı iletkendeki taşıyıcıların rastgele oluşumu ve rekombinasyonundan kaynaklanan termal gürültü tarafından bastırılır. Yarı iletkendeki taşıyıcıların termal gürültü oluşumunu azaltmak ve gürültüyü en aza indirmek için foton dedektörler kriyojenik seviyelere soğutulmalıdır. Dolayısıyla, foton dedektörde soğutucu kapasitesinin düşürülmesi, atmosfer basıncında soğutulan dedektörün sensör yapısı üzerine atmosferdeki su buharı, tozlar vb. kirliliklerin yoğuşmasını engellemek amacıyla vakum odası altında soğutulması gerekmektedir (Sharma, 2004). Soğutmalı dedektör yapısının detaylı incelenmesi ve anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 10'da genel görsel ave patlatılmış katı model görselinde yer alan parçalar aşağıda listelenmiştir.

- Kriyojenik soğutucu
- Soğuk parmak
- Vakum gövdesi
- Hermetik pin
- Gaz emici
- Vakum borusu
- Dış seramik
- Taşıyıcı seramik
- Okuma devresi
- Odak düzlemi
- Soğuk kalkan
- Vakum kapağı
- Sıcaklık sensörü
- Optik pencere

a)



b)

Şekil 2.8 a) Lynred Scorpio MW kızılötesi IDCA dedektör (Web sitesi: https://www.lynred-usa.com) b) Patlatılmış Lynred Scorpio MW kızılötesi IDCA dedektör (Abraham, 2019)

2.4.1 Kriyojenik soğutucular

Kriyojenik (Cryogenic) kelime anlamı olarak Yunanca ‘cryos’, soğuk/don ve İngilizce ‘gen’, üretmek kelime köklerinin birleşiminden ortaya çıkar ve ‘soğuk üretmek’ anlamında kullanılır (David, 2003). Kriyojenik sıcaklıklar -150 °C veya -238 °F’ye karşılık gelen yaklaşık 120 K’in altındaki sıcaklıklardır. Bu sıcaklık aralığında malzemelerin mekanik, termal ve elektriksel gibi fiziksel özellikleri de değişmektedir. Dolayısıyla kriyojenik uygulamalar bazı kısıtlamalara ve ölçüm yöntemlerinde yeniliklere ihtiyaç duyulabilmektedir (Ross, 2016).

Yaklaşık 200 yıldan daha önceye dayanan kriyojenik çalışmalarda; kriyojenik sıcaklıklara inebilmek için pasif soğutma olarak bilinen, kriyojenik seviyelerde kaynama noktaları olan sıvılardan yararlanılmaktadır. Kriyojenik seviyelerde kaynama noktaları olan bazı element ve moleküller Çizelge 2.4’te verilmektedir. 20. yüzyılın ortalarında ise dünyada savunma sanayindeki gelişmeler ve uzay-havacılık faaliyetleri gibi sebepler ile geliştirilen son derece hassas hareketli mekanik parçalara sahip soğutucular, özel gazların sıkıştırılması temeline dayanarak kriyojenik seviyelerde soğutma yapabilmektedir (David, 2003).

Çizelge 2.4 Kriyojenik seviyede kaynama noktaları olan bazı maddeler (David, 2003)

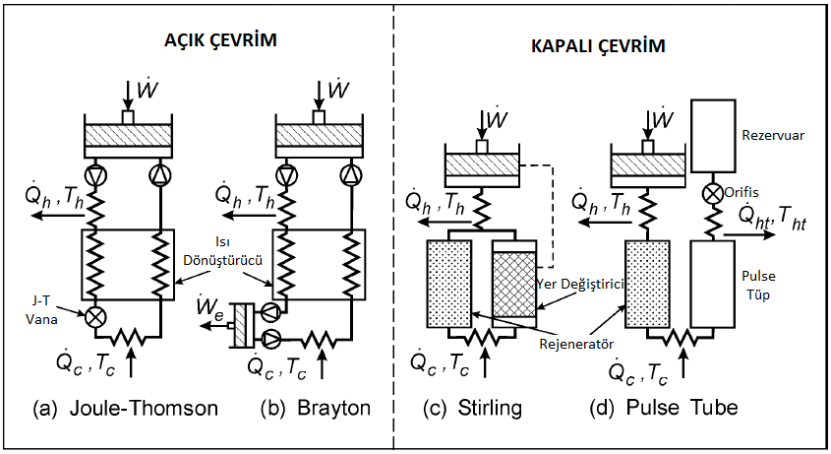
Sıvı haldeki maddeler	CH_4	O_2	Ar	CO_2	N_2	Ne	H_2	He
Kaynama noktası (K)	111,7	90,1	87,4	81,1	77,3	27,2	20,4	4,2

Isıl bir kaynaktan yayılan fotonlardan elde edilen sinyalden daha az seviyede gürültü seviyesi elde edebilmek amacıyla foton dedektörleri; kriyojenik seviyelere soğutulmaya ihtiyaç duyarlar.

Kızılötesi foton dedektörlerinde soğutma ihtiyacı genellikle mekanik soğutucular ile gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra termoelektrik modüller ile düşük seviyelerde soğutma yapılabilmektedir. Dedektörün sahadaki ihtiyacına ve kullanım alanına göre soğutucu seçimi önem kazanmaktadır. Örneğin, el tipi bir uygulama ihtiyacı durumunda

nispeten daha küçük boyutlarda ve ağırlıklarda olan rotatif kriyojenik soğutucular ve termoelektrik soğutucular tercih edilirken, askeri araçların içerisinde genellikle lineer soğutucular kullanılmaktadır.

Kriyojenik seviyelerde soğutma elde edebilmek için mekanik olarak termodinamik çevrim yöntemine göre sınıflandırıldığında; kendi içinde Lineer ve Rotatif şeklinde ayrılan 'Kapalı Çevrim'/Stirling Çevrimi ve 'Açık Çevrim'/Joule-Thomson ve Brayton soğutucular kullanılmaktadır. Dedektör yapısında kullanım gereksinimine göre soğutucular; geçmeli ve entegre yapıda olabilmektedirler.



Şekil 2.9 Soğutucu tiplerinin şematik gösterimi (Radebaugh, 2000)

Açık çevrim Joule-Thomson (*J-T*) soğutucularda, yüksek basınçlı gaz akışı; orifis (dar geçiş deliği), valf gibi kısımlardan geçerken genişlediğinde soğutma sağlanır. Genleşme, sisteme herhangi bir ısı girişi veya iş üretimi olmadan sabit bir entalpide gerçekleşir. Isı girişi; genleşmeden sonra meydana gelir, soğuk gazı ısıtmak veya genleşme sürecinde oluşan herhangi bir sıvıyı buharlaştırmak için kullanılır. Sabit sıcaklık altında, ideal bir gazda entalpi, basınçtan bağımsızdır fakat gerçek gazlar, basınç etkisiyle bir entalpi değişimi yaşar. Bu nedenle, gaz akışının orifis, valf gibi kısımlardan geçerken genleşmesiyle soğuma, sadece gerçek gazlarda ve inversiyon eğrisinin altındaki sıcaklıklarda meydana gelir. Tipik olarak *J-T* soğutucularında nitrojen veya argon kullanılır. 200 bar gibi yüksek basınçlarda gaz sıkıştırmasına ihtiyaç duyarlar. Bu seviyelerde yüksek basınçları elde etmek ve korumak zordur (Radebaugh, 2000).

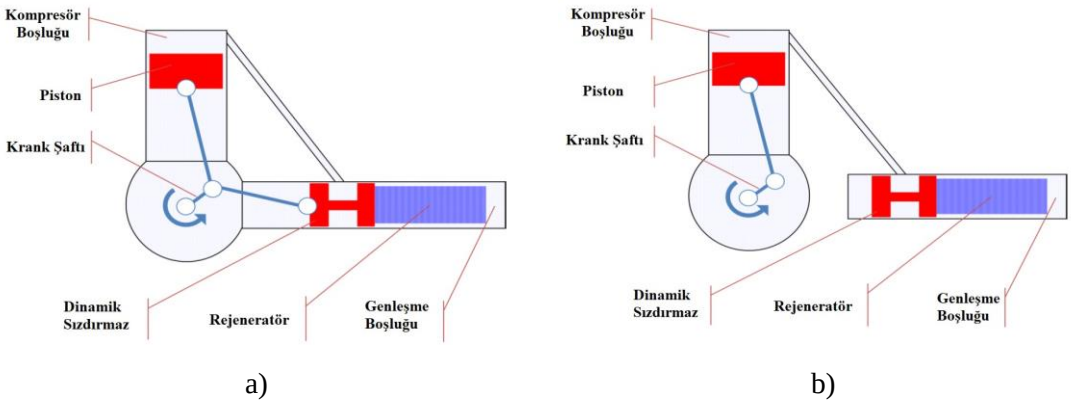
Şekil 2.10 Le-Tehnica firmasının füzeler için geliştirdiği mini J-T soğutucu (Web sitesi: https://cryocoolers.eu)

Termodinamiğin *I.* yasasına göre Brayton çevriminde ideal bir gaz ile emilen ısı, üretilen işe eşittir. Bu işlem *J-T* çevriminden daha verimlidir ve yüksek oranda bir basınç gerektirmez. Brayton çevrimi genellikle büyük sıvılaştırma tesislerinde kullanılır. Nispeten küçük yapıda Brayton kriyojenik soğutucuları için en büyük sorun; yüksek genleşme verimliliğini sağlayan küçük boyutlarda turbo genleştiriciler üretmektir (Radebaugh, 2000).

Kapalı çevrim Stirling soğutucuların çalışma prensibi olan stirling çevrimi, Robert Stirling tarafından 1815 yılında icat edilmiştir. Sonraki yıllarda stirling çevrimi üzerine çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Bahsi geçen sistemlerde çalışma sıvısı olarak hava kullanılmıştır. 1946 yılında Hollandalı bir şirket diğer tip soğutucularda kullandıklarında daha yüksek verim elde ettikleri için stirling temelli soğutucularda, çalışma sıvısı olarak helyum kullanmıştır. Stirling kriyojenik soğutucuları; füze, uçak gibi uygulamalarda kullanılan *J-T* kriyojenik soğutucular ile elde edilen hızlı soğuma sürelerini sağlayamazlar. Bu sebeple stirling kriyojenik soğutucular daha çok tank ve sınır gözetleme gibi askeri sistemlerde kızılötesi dedektörlerin soğutulmasında kullanılmaktadır (Radebaugh, 2000). Stirling kriyojenik soğutucuların, lineer ve rotatif tipte çeşitleri bulunmaktadır.

Şekil 2.11 a) Ricor K508 marka/model rotatif tip lineer soğutucu (500 mW @80K) b) DRS lineer çift pistonlu stirling soğutucu (1.75 W @80 K) (Ross, 2016)

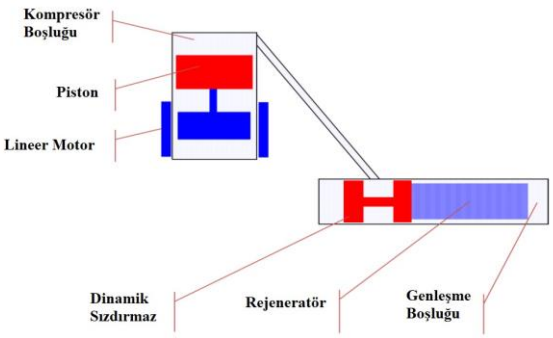
Rotatif tip kriyojenik soğutucular, soğutmalı kızılötesi dedektörlerin ilk dönemlerinde yaygın olarak kullanılan soğutuculardı. Rotatif soğutucular hassas mekanik faz kontrolü mekanizmalarına sahip olmaları ve fazın frekansla değişmemesi sebebiyle lineer soğutuculara göre daha hızlı soğurlar, daha verimlidirler. Fakat krank mili hareketi mekanik parçalar üzerine yan kuvvetlere neden olmaktadır. Böylece kullanım ömürleri lineer soğutuculara göre nispeten düşüktür (Web sitesi: https://insidegnss.com).



Şekil 2.12 a) Rotatif tip kinematik stirling kriyojenik soğutucu b) Rotatif tip pnömatik stirling kriyojenik soğutucu (Özbay, 2011)

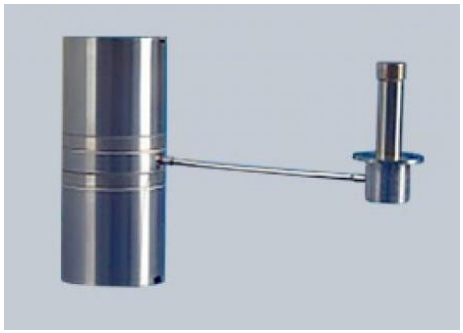
Şekil 2.13 Thales marka RM serisi entegre rotatif tip stirling kriyojenik soğutucu (Web sitesi: https://www.thalesgroup.com)

Lineer tip kriyojenik soğutucular ise daha uzun ömürlü ve titreşim seviyesi düşük olması sebebiyle tercih edilirler. Rotatif soğutuculara göre daha büyüktürler. Rezonansa yakın seviyede çalışmaları gerektiği için tek bir çalışma frekansına sahiptirler. Bu sebeple rotatif soğutuculara göre yavaş soğumaktadırlar (Web sitesi: https://insidegnss.com). Şekil 2.14'te bir lineer soğutucunun şematik gösterimi verilmektedir.

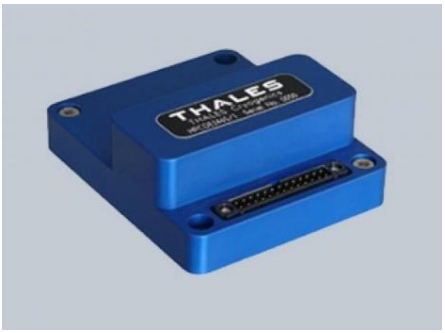


Şekil 2.14 Lineer tip pnömatik stirling kriyojenik soğutucu (Özbay, 2011)

Kullanıma alanına ve ihtiyaca bağlı olarak, genellikle lineer soğutucuları çalıştırabilmek için kullanılan sürücü elektroniği ayrık olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 2.15'te bir lineer soğutucu ve sürücü elektroniği verilmektedir.



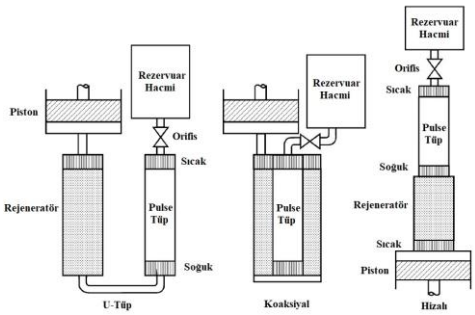
a)



b)

Şekil 2.15 a) Thales marka geçmeli lineer tip stirling kriyojenik soğutucu b) soğutucu sürücüsü (Web sitesi: https://www.thalesgroup.com)

Pulse (Darbeli) tüp kriyojenik soğutucularda, stirling soğutuculardaki gibi 'yer değiştirici' bulunmamaktadır. Stirling soğutuculardaki hareketli yer değiştirici parçası bir titreşim kaynağıdır. Bu sebeple sürtünme etkileri görülmekte ve soğutucunun ömrünü azaltmaktadır. Pulse tüp soğutucularda piston, tüp içerisindeki gazı sıkıştırmak için hareket eder. Sıkıştırılmış ve ısınmış gaz, rezervuardaki ortam basıncından daha yüksek basınca sahip olduğu için rezervuara doğru hareket eder ve rezervuardaki gaz ile ısı alış-verişi yapar. Pulse tüpteki basınç ortam basıncına denk olduğunda akış durur. Piston diğer yönde hareket ederek pulse tüp içerisindeki gazı genleştirir ve içeride soğuk ve düşük basınçlı gaza dönüştürür. Düşük basınçlı ve soğuk gaz, orifis aracılığıyla soğuk tarafa doğru akmaya zorlanır ve ısı alır. Döngü tekrarlanarak devam eder (Radebaugh, 2000).

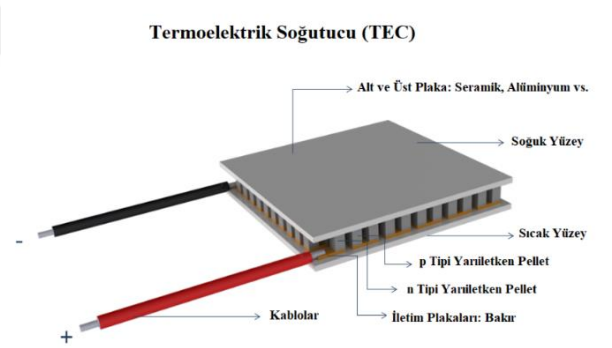


a)

b)

Şekil 2.16 a) Farklı tiplerdeki pulse tüplerin şematik gösterimleri (Radebaugh, 2000) b) Thales marka geçmeli lineer pulse tüp stirling kriyojenik soğutucu(Web sitesi: https://www.thalesgroup.com).

Termoelektrik soğutucular, elektriksel olarak seri, ısıl olarak paralel bağlanan çok sayıda *n*-tipi ve *p*-tipi ısıl çiftten oluşmaktadır. Termoelektrik etki; ısı enerjisinin elektrik enerjisine ya da elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesidir. Termoelektrik etkinin temelinde Seebeck, Peltier ve Thomson etkisi yatmaktadır. Herhangi bir iletken malzemeye bir sıcaklık farkı uygulayarak, bir gerilim üretilir; böyle bir etkiye Seebeck etkisi denir (Ravindravd., 2018). Peltier etkisinde bir elektrik akımının farklı iletken tellerden geçişi, bağlantı noktasında sıcaklık değişimi oluşturmaktadır. Bir elektrik akımı, iletkenden geçtiğinde bir sıcaklık değişimi oluşması ve bunun tersi olduğunda ise herhangi bir iletken içindeki ısının, elektrik akımına değişimi ise Thomson etkisi olarak bilinmektedir. Şekil 2.17'de görüldüğü gibi belli bir matriste dizilen *p* ve *n* tipi termoelektrik materyaller, modül için mekanik bütünlük sağlayan ve sıcak/soğuk yüzeylerini oluşturan seramik plakalar, pelletler arasındaki seri elektrik akımının iletimini ve seramik üzerine montajlanmasını sağlayan iletken yollar ve kablolar, pelletler ve seramik arasındaki montaj işleminde kullanılan lehim vb. bağlantı elemanlarından oluşmaktadır (Doğdu, 2013).



Şekil 2.17 Termoelektrik Soğutucu (TEC) alt parça tanımlama görseli (Web sitesi: https://thermalbook.wordpress.com)

Bir termoelektrik modül; hem termoelektrik jeneratör (TEG) hem de termoelektrik soğutucu (TEC) olarak kullanılabilir. Alt ve üst seramik yüzeyler arasında sıcaklık farkı oluşmaktadır. Bu fark kullanılan *p-n* pellet yapılarının performansına göre değişmektedir. Kızılötesi dedektör teknolojilerinde, çok katlı ve tek katlı yapıda olabilen termoelektrik soğutucular genellikle nispeten daha yüksek sıcaklıklarda çalışan kısa dalga boylu dedektörlerin soğutulmasında kullanılmaktadır. Bu yapıların küçük, hafif ve düşük maliyetli olmaları avantajlarındadır fakat iki yüzey arasında oluşan sıcaklık farkı

dolayısıyla ısınan yüzeyden ısının atılması gerekmektedir. Buradaki ısı yönetimi gerekliliği dezavantajlarındadır. Çok katlı yapılarda ulaşılabilecek en yüksek ΔT yaklaşık 100-120 K seviyelerindedir. Günümüzde termoelektrik etki üzerine performans arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

2.4.2 Soğuk parmak

Soğuk parmak dedektör paket yapısı içerisinde, kriyojenik soğutucu uç kısmında elde edilen kriyojenik sıcaklık seviyelerini sensör takımına aktarmak amacıyla kullanılmaktadır. Soğutucu birimiyle doğrudan ilişkili bir alt parçadır. Sistemde kullanılan kriyojenik soğutucunun tipine göre değişiklik göstermektedir. Dedektör yapısında entegre tip soğutucu kullanılacak ise önce soğuk parmak ve paket yapısı birbiri ile hermetik yapı elde edecek şekilde montajlanmaktadır. Sonrasında soğutucunun rejeneratör kısmı soğuk parmak ile özel contalar kullanılarak birleştirilmektedir. En son olarak da kriyojenik soğutucuda kullanılacak soğutma gazı soğutucuya basılmaktadır.

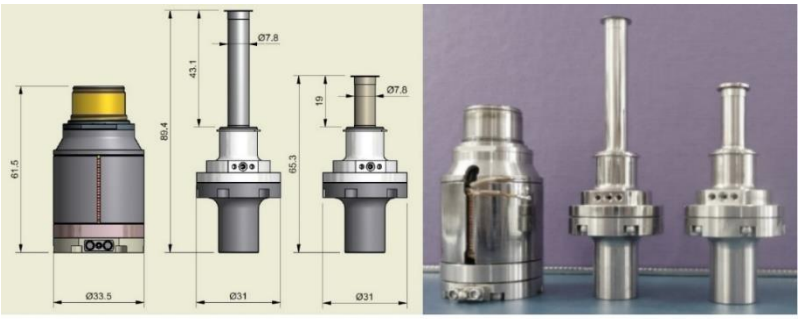
Sistemde geçmeli tip kriyojenik soğutucu kullanılacak ise soğuk parmak, paket yapısı ile önceden montajlanmakta ve hermetik yapı elde edilmektedir. Üzerinde kendi soğuk parmağı olan kriyojenik soğutucuya soğutma gazı önceden basılmaktadır. Daha sonra iki ayrı sistem birbiri ile termal pasta ya da indiyum folyo gibi malzemeler kullanılarak montajlanmaktadır. Bu tip sistemlerde paket yapısında kullanılan soğuk parmakları soğuk parmak kılıfı olarak isimlendirmek daha doğru olacaktır.

Soğuk parmaklar, ısıl yönetimi oldukça kritik, kriyojenik soğutucularla doğrudan temasta oldukları için paket tasarım faaliyetleri esnasında üzerinde en çok durulan parçalardandır. Soğuk parmak, dedektörün vakum odası içerisinde yer alan dedektör sensör birimini soğutmak amacıyla doğrudan taşıyıcı seramiğe temas eder ve diğer ucu ise oda sıcaklığındadır. Yaklaşık 300 K ila 65-77 K arasındaki sıcaklıklar için ısıl köprü görevi görmektedir. Soğutucu rejeneratörünün tip (uç) kısmındaki düşük sıcaklık değerini en az kayıpla taşıyıcı seramik üzerine aktarması gerekirken, atmosfer basıncında ve oda sıcaklığında kalan kısmından ise ısı çekmemesi gerekmektedir. Bu sebeple Şekil 2.18'de

yer alan görselde de görüldüğü gibi cidarları oldukça ince ve malzeme yapısının düşük ısıl iletkenliğe sahip olması gerekmektedir.

Şekil 2.18 Testlerde kullanılacak soğuk parmak kılıfı 3D katı model görseli

Malzemeler kriyojenik sıcaklıklara maruz kaldıklarında malzeme özelliklerinde meydana gelen ciddi değişiklikler gerçekleşmektedir. Bu sebeple kriyojenik sıcaklıklarda çalışacak malzemeler dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Atmosferik sıcaklıklarda normalde sünek olan malzemeler, kriyojenik sıcaklıklara maruz kaldıklarında son derece kırılgan hale gelebilirken, başka malzemeler için bunun tersi de mümkündür. Malzemeler seçildikten sonra kriyojenik sıcaklıkta uygun montajlama veya kaynak yöntemleri de performansın korunmasını için oldukça önemlidir. Kullanılacak malzemelerin kriyojenik sıcaklıklardaki fiziksel özellikleri bilinmediği durumlarda, o sıcaklıklardaki deneysel yöntemler uygulanmaktadır (David, 2003).

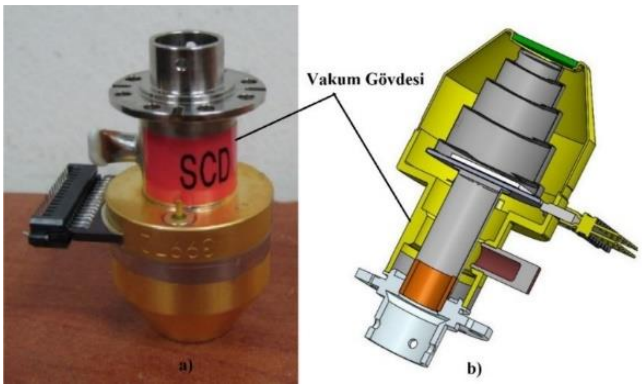


a) b)

Şekil 2.19 Farklı tasarımlarda soğuk parmak örnekleri (Veprik vd., 2015)

2.4.3 Vakum gövdesi

Dedektör paket yapısında vakum sızdırmaz (hermetik) gövde kısmıdır. Soğuk parmak, dış seramik, hermetik pin, vakum borusu ile doğrudan montajlanmaktadır. Soğuk parmak ile montaj işlemleri (kullanılan malzemelerin birbiri ile uyumu göz önünde bulundurularak) kaynak veya sert lehim ile gerçekleştirilebilmektedir. Doğrudan düşük sıcaklıklara maruz kalmamaktadır. Hermetik yapı oluşturmak için birleşeceği parçalar ile dikkatli bir şekilde montajlanmalı ve her birleştirme aşamasında sızıntı testleri gerçekleştirilmelidir. Şekil 2.20'de Semi-Conductor Devices (SCD) firmasının bir kızılötesi dedektör paket yapısının görseli ve katı model çizim kesiti yer almaktadır.



Şekil 2.20 SCD firmasının geliştirdiği a) paket yapısı b) vakum gövdesi katı model kesiti (Veprik, 2015)

2.4.4 Gaz emiciler

Malzemeler doğası gereği bazı yapısal kusurlar içermektedir. Bu kusurlar, malzemelerin fiziksel özelliklerine etki edebilirken, bazı malzemelerin kolay şekil değiştirmesine yol açmak gibi avantajlar da sağlayabilmektedirler. Yapısal kusurlar; atomik seviyede boşluk gibi noktasal kusurlar, tek boyutlu çizgisel kusurlar (dislokasyonlar), iki boyutlu düzlemsel kusurlar ve malzemelerin birleştirilmesi aşamasında oluşabilen çatlakları tanımlayan üç boyutlu kusurlar şeklinde sınıflandırılabilirler.

Vakum yapısı içerisinde yapısal kusurlara hapsolan istenmeyen parçacıklar, ısıl işlem sonrasında da bulundukları yerden çıkamaz ve vakum kapatma işlemi sonrasında dedektör paket yapısında kalabilirler. Bu parçacıklar sahip oldukları enerji sebebiyle sürekli hareket halindedirler ve zaman geçtikçe vakum odasına kusmaktadırlar. Bu durum paket yapısındaki vakum seviyesini bozmakta ve soğutma işlemini zorlaştırmaktadır. Hatta kriyojenik soğutucu, ısıl yükün artması sebebiyle yapıyı soğutamaz hale gelebilir. Bu yüzden sistem içerisinde gaz emici olarak tanımlanan Şekil 2.21'de görülen poroz yapılar kullanılmaktadırlar. Vakum ortamına kusan kirlilik sebebi parçacıklar, bu yapıların içerisine girerek hapsolurlar. Böylece vakum seviyesi korunmuş olur.

Şekil 2.21 Farklı tasarımlardaki SAES marka poroz yapıda gaz emiciler (SAES)

2.4.5 Dış seramik

Vakum sızdırmaz paket yapısına uygun, Şekil 2.22'de görüldüğü gibi farklı tasarımlarda üretilebilen dış seramik; yine paket yapısı içerisindeki okuma devresinden gelen ve işlenmesi gereken sinyallerin vakum ortamından, atmosfer basıncındaki dış dünyaya hermetik olarak aktarılması için kullanılmaktadır.

Şekil 2.22 Yüksek sıcaklık altında birleştirme yöntemiyle üretilen, farklı tasarımlardaki Ametek marka dairesel dış seramikler (Web sitesi: https://www.ametekinterconnect.com)

Elektriksel sinyallerin iletileceği metalize yolların birbiri ile temasının engellenmesi için dielektrik yapıda ve vakum uyumlu olması gerekmektedir. Bu sebeple seramik tabanlı malzemeler seçilmektedir. Seramik hermetik konnektör olarak da isimlendirilebilirler.

2.4.6 Taşıyıcı seramik

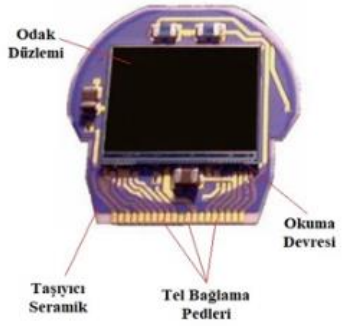
Dedektör paket yapısında okuma devresi ve odak düzlemi bir taşıyıcı üzerine yerleştirilmektedir. Soğuk parmak ile optik eksen dikkate alınarak hizalanırlar. Taşıyıcılar, çok yüksek seviyede bir sıcaklık değişimine maruz kaldıkları için okuma devresi ve odak düzlemi üzerine stres oluşturmaması amacıyla Al_2O_3 ve AlN gibi ısıl genleşme katsayısı nispeten düşük, seramik malzemelerden seçilmektedir. Taşıyıcı üzerindeki elektriksel yollar sayesinde sinyaller dış seramiğe yakın bir noktaya getirilmekte fakat temas etmemektedir. Bunun sebebi sistemin ısıl yükünün düşük seviyelerde tutulmak istenmesidir. Dış seramik ve taşıyıcı seramik arasındaki vakum ortamı sebebiyle taşınım ihmal edilebilecek seviyedir. Okuma devresinden sinyallerin atmosfer ortamına çıkarılabilmesi için düşük ısıl yük gereksinimi dikkate alınarak, Ø 20-

25 µm gibi düşük çaplarda, elektriksek iletkenliği yüksek, ısıl iletkenliği düşük teller ile dış ve taşıyıcı seramik arasında tel bağlama işlemi yapılmaktadır. Şekil 2.23'te tel pedleri görülebilen, sensor takımı entegre bir taşıyıcı seramik görseli verilmektedir.

2.4.7 Sensör takımı

Okuma devresi ve odak düzleminden oluşan yapıdır. Kızılötesi dedektör sistemlerinde okuma devresi (ROIC), dedektör üzerine gelen fotonların oluşturduğu foto-akımı düşük gürültü ile işler ve her bir piksel için elde edilen veriyi çıkış sinyaline dönüştürmektedir.

Odak düzlem dizini (FPA) kızılötesi ışınımın algılandığı, her biri piksel olarak adlandırılan binlerce (çözünürlüğüne göre değişkenlik gösterir) dedektörden oluşan matrisli yapılardır. Okuma devresi ile çok hassas cihazlar kullanılarak, birkaç mikron seviyesinde hizalanmaktadırlar. Böylece odak düzleminin algıladığı kızılötesi ışınımı/foto-akımı, okuma devresi işleyerek sinyale çevirmektedir. Şekil 2.23'te taşıyıcı seramik üzerine montajlamış sensör takımı (ROIC+FPA) gösterilmektedir.



Şekil 2.23 Özel tasarım bir taşıyıcı seramik ve ROIC+FPA görseli (Gibson, 2008)

2.4.8 Soğuk kalkan

Optik pencereden geçerek dedektör paket yapısına giren kızılötesi ışımadaki başı boş ışınların, dedektöre ulaşmasını engelleyen yapılara ihtiyaç vardır. Dedektöre ulaşması istenen ışımanın da odak düzlemi üzerinden geri yansıyarak tekrar odak düzlemine

düşmesini engellemek ve iç duvarlarından kaynaklı istenmeyen ısıl ışımayı kesmek amacıyla kullanılan opto-mekanik parçalar soğuk kalkanlardır. Optik parametreler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda birden fazla çeşitte soğuk kalkan tasarımları bulunmaktadır. Şekil 2.24'te görüldüğü gibi basamaklı, kademeli, konik vb. yapıda soğuk kalkanlar üretilmektedir.

Şekil 2.24 Farklı tasarımlara sahip soğuk kalkan görselleri
(Web sitesi: https://www.nicoform.com)

Soğutulma ihtiyacı duyan soğuk kalkan üzerine gelen ışımanın, soğurularak ısıya dönüşmemesi amacıyla soğuk kalkanın dış yüzeyinin kızılötesi bölgede oldukça yansıtıcı olması gerekmektedir. Aynı zamanda FPA yüzeyinden soğurulmayarak yansıyan ışınların ise soğuk kalkan iç duvarlarından yansıyarak tekrar FPA üzerine düşmesini engellemek amacıyla kızılötesi bantta soğurucu olacak şekilde iç yapısının karartılmış olması gerekmektedir.

Soğuk kalkanlar dedektör paket yapısında soğutulan taşıyıcı seramik üzerine montajlanmaktadır. Dolayısıyla düşük termal kütle oluşturacak şekilde ince cidarlı ve ısı iletimi yüksek malzemelerden üretilmelidir. Yaygın olarak kullanılan soğuk kalkanlar 100-150 µm kalınlığında, bakır ve nikel malzemelerden üretilmektedir.

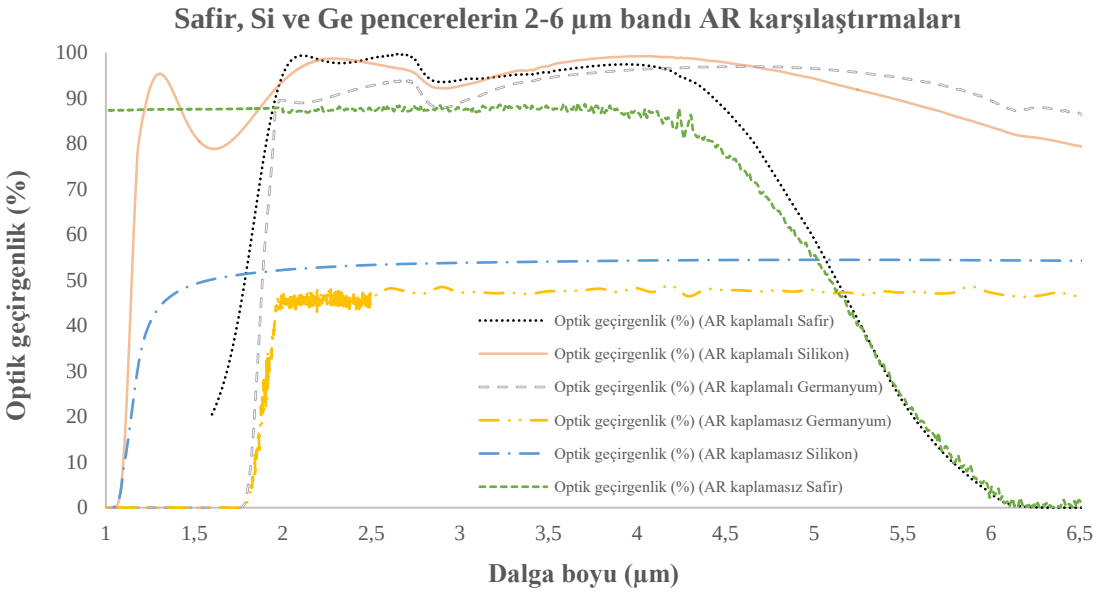
2.4.9 Vakum kapağı

Vakum kapağı, optik pencereyi taşıyan ve vakum odasını hermetik olarak tamamlayan paket parçasıdır. Dış seramik ile montaj işlemi, kaynak veya yumuşak lehim ile

gerçekleştirilebilir. Optik pencere ile yumuşak lehim ya da kontak arayüzlerine erime noktası düşük, eriyik metal döküm işlemi ile montajlanmaktadır. Bazı dedektör paket tasarımlarında, üzerinde vakum borusu da bulunabilmektedir.

2.4.10 Optik pencere

Kızılötesi dedektörlerde, ışınımın vakumlu hermetik yapı içerisine girerek, odak düzlem dizini tarafından algılanabilmesi amacıyla dedektörün çalışma spektral bant aralığında geçirgen optik pencere kullanılmaktadır. Optik pencerenin seçimi, kızılötesi bandın hangi aralığında çalışılacağı ile ilgili olarak optik geçirgenlik ve maliyet karşılaştırması yapılarak belirlenmelidir. Örnek olarak; safir, silisyum ve germanyum optik pencerelerin 2-6 µm bandında AR kaplamalı ve kaplamasız optik geçirgenlik karşılaştırması **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te verilmektedir. Grafikte ele alınan ürünlerin optik özellik verileri, Thorlab firmasında satılan optik pencerelerin verileridir. Üç farklı optik pencerenin yasıma önleyici (AR) kaplamalı ve kaplamasız optik geçirgenlikleri karşılaştırılmaktadır. Bir kızılötesi dedektör yapısında, çalışılacak bant aralığına uygun yansıma önleyici kaplamalar ile optik geçirgenliği yüksek pencereler seçilmelidir.



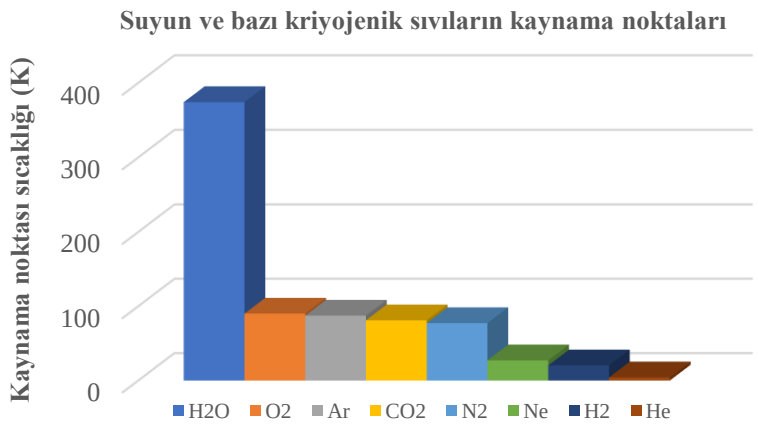
Şekil 2.25 Safir, Si ve Ge optik pencerelerin 2-6 µm bandında AR kaplamalı ve kaplamasız optik geçirgenliklerinin karşılaştırılması

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Soğutmalı Kızılötesi Dedektör Paket Yapılarının ve Alt Parçalarının Isıl Test Yöntemleri

Soğutmalı kızılötesi dedektörlerin paket yapıları; paketleme faaliyetlerinin son aşamasında, paket kapatma işleminin öncesinde ısıl yük testine tabii tutulmaktadır. Bunun sebebi, paketin kapatılma işlemi öncesinde herhangi bir sızıntı olmadığındaki (aktif pompalama esnasında basınç göstergesinde 10^{-8} veya 10^{-9} torr seviyeleri okunabiliyorken) ısıl yükünü referans alabilmek içindir. Kapatma işleminden hemen sonra bir ısıl yük testi yapılmakta ve değer aktif pompalama işleminde alınan ısıl yük değeriyle karşılaştırılmaktadır. Böylece kapatma işlemi esnasında bir sızıntı ya da gaz kusma sebebiyle hermetik yapının bozulup bozulmadığı kontrol edilmektedir.

Bahsi geçen ısıl yük testleri için pasif soğutma yöntemleri olarak bilinen sıvıların doğal kaynama noktalarından yararlanılmaktadır. Kriyojenik seviyelerde kaynama noktaları bulunan bazı maddelerin ve suyun Şekil 3.1'de karşılaştırması verilmektedir. Soğutmalı kızılötesi dedektörlerin yaklaşık olarak çalışması gereken sıcaklık değeriyle (~ 65 - 80 K) aynı seviyede kaynama noktasına sahip olan sıvı azot (~ 77 K) kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.1 Suyun ve bazı kriyojenik sıvıların kaynama noktaları (David, 2003)

3.1.1 Dedektör paket yapısı ısıl yönetimi ve gereksinimler

Görece geniş enerji bant aralığına sahip sensörlerde, odak düzlem dizini malzemesinin iç yapısından ve fabrikasyon esnasında oluşan hatalardan kaynaklı kendiliğinden oluşan karanlık akım fazla değildir ve herhangi bir soğutmaya ihtiyaç duymadan oda sıcaklığında çalışabilirler. Dar enerji bant aralığına sahip sensörlerde ise karanlık akım oranı yüksektir ve sahneden gelen fotondan elde edilen algılama seviyesine çok yakındır. Karanlık akım sebebiyle oluşan gürültü, sinyal/gürültü oranını düşürmektedir. Bir kızılötesi dedektörde karanlık akımı bastırmanın en etkili yolu, dedektörleri kriyojenik seviyelere soğutarak çalıştırmaktır. Tip *II*-Süper örgü dedektörler 90 K ila 150 K, MCT dedektörler 77 K ila 90 K civarında soğutulmaya ihtiyaç duyarlarken, QWIP dedektörler 40 K ila 70 K arasında soğutma seviyelerine ihtiyaç duyabilirler (Han, 2022).

Soğutmalı kızılötesi dedektörlerin kriyojenik seviyelerde uzun süreler kalmasından dolayı, paket yapısı içerisinde ısıl yönetimin çok dikkatli yapılması gerekmektedir. Soğutuculara doğrudan bağlanan ve sensör takımı arasında ısı geçiş köprüsü olarak görev yapan soğuk parmakların tasarımlarına, paket montaj yöntemlerine, paket alt parçalarının malzeme seçimine ısıl yönetim açısından dikkat edilmesi gerekmektedir.

Soğuk parmak duvarlarının kalınlığı, soğuk parmak ısıl yükünün artmasına ve dolayısıyla atmosfer/oda tarafındaki flanş yapısından fazla ısı geçişi olmasına sebep olmaktadır. Böyle bir durumda önceden seçilmiş soğutucunun kapasitesi, dedektör paket yapısını soğutmaya yetmeyecektir. Bir soğuk parmağın μ seviyesinde cidara sahip olması, seramiğe temas eden yüzeyinin ısıl iletkenliği yüksek, duvarlarının düşük iletkenlikte olması gerekmektedir. İhtiyaca göre sandviç yapıda soğuk parmaklar üretilebilmektedir. Soğuk parmak üretiminde yaygın olarak seçilen malzemeler; ‘titanyum, paslanmaz çelik, invar, kovar vb.’dir.

Özgül ısı, bir maddenin sıcaklığını 1° değiştirmek için birim kütle başına gerekli ısı miktarıdır. Aynı sıcaklık değişim oranına eşit kütleli maddelerin ihtiyaç duydukları enerjinin farklı olması sebebiyle her maddeye özgü özgül ısı katsayıları olduğu ortaya çıkmıştır ve birimi J/kg·K’dir.

Bir kızılötesi dedektör paket yapısının ısıl yönetiminin gerçekleştirilebilmesi için ısıl yük ve termal kütle gibi temel iki tanımlamanın bilinmesi gerekmektedir. Kızılötesi dedektör paket yapısı içerisinde soğutulan bir alt parça üzerinden inceleme yapıldığında; örneğin kriyojenik sıcaklıklara soğutulmuş bir soğuk parmağı ~ 80 K'de sabit tutmak için gereken ısı miktarına ısıl yük (ısıl kayıp) denir ve birimi watt'tır. Yaklaşık oda sıcaklığındaki (~ 300 K) bir soğuk parmak sıcaklığını, ~ 80 K'e getirmek için (yani $\Delta T = 220$ K sıcaklık değişimi) gerekli enerji miktarı ise o soğuk parmağın termal kütlesidir ve birimi joule'dür (Willems vd., 2018). Bir soğuk parmağın kesit alanı en düşük (et kalınlığı en dar) duvarlarından akan ısı iletimi ısıl yüktür. Termal kütle ise bir soğuk parmağın ne kadar sürede soğuyacağı ile ilgili bir tanımdır. Bu tez kapsamında farklı malzemeden yapılan, farklı ölçülerdeki soğuk parmakların termal kütleleri, özgül ısıyla doğrudan ilişkilidir. Çizelge 3.1'de bazı malzemelerin kriyojenik sıcaklıklardaki özgül ısıları verilmiştir.

Çizelge 3.1 Bazı malzemelerin kriyojenik sıcaklıklardaki özgül ısıları

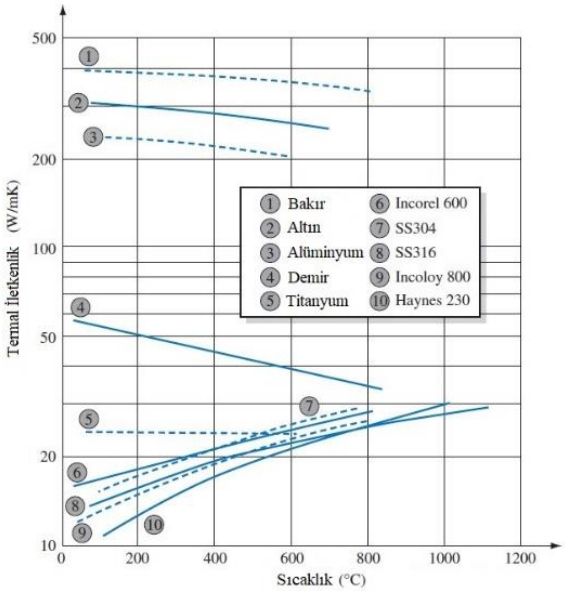
Malzeme	**Özgül ısı, c_p (J/kg·K) @ ~ 80 K**	**Kaynak**
Al_2O_3	150 - 300	Simon, 1994
AISI 316	250 - 300	Tummescheit, 2014
Ti-6Al-4V	300 - 350	Bartsch, 2021

Soğutulması için soğuk parmağın uç kısmına yerleştirilen, farklı malzemelerden üretilmiş tüm cisimler termal kütleye etki etmektedir. Malzemelerin birbirinden farklı termofiziksel özellikleri bulunmaktadır ve farklı sıcaklıklarda, farklı özgül ısı katsayıları bulunmaktadır. Bu sebeple teorik çözümlemeler yapılırken kullanılan malzemelerin kriyojenik sıcaklıklardaki özgül ısıları dikkate alınmaktadır. Soğutulmak istenen nesnelerin yaklaşık olarak oda sıcaklığından, kriyojenik sıcaklıklara gelmesi için gerekli enerji termal kütledir ve Eşitlik (13)'te verildiği gibi soğutulmaya çalışılan tüm kütleler için ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

$$Q = mc_p\Delta T \tag{13}$$

Isıl genleşme, sıcaklık değişimi sonrasında malzemelerin geometrik ölçülerindeki ve hacmindeki değişimlerdir. Malzemelerin ölçülerindeki ve hacmindeki değişimin ne kadar olduğunun ölçüsü de ısıl genleşme katsayısı ile tanımlanmaktadır. Birimi m/K'dir.

Isıl iletkenlik, ısıyı iletebilme kabiliyetini tanımlamaktadır. Bir malzeme üzerinden gerçekleşen ısı transferinin ölçüsünü veren değer ısıl iletkenlik katsayısıdır. Isıl iletkenlik katsayısının birimi W/m·K'dir. Malzemelerin farklı sıcaklıklardaki ısıl iletkenlik değerleri farklılık göstermektedir. Şekil 3.2'de bazı metallerin sıcaklığa göre ısıl iletkenliklerinin nasıl değişiği ile ilgili grafik verilmektedir.



Şekil 3.2 Bazı metallerin sıcaklık ile ısıl iletkenlik değişim grafiği (Kreith vd., 2011)

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi taşıyıcı seramik, üzerinde ROIC ve FPA yapısı taşımaktadır. Taşıyıcı seramik takım yapısı ise bir soğuk parmağın uç kısmına montajlanmaktadır. Bu parçaların tasarım çalışmaları yapılırken, malzeme seçimi önem kazanmaktadır. Oda sıcaklığından kriyojenik seviyelere kadar, tekrarlanan şekilde soğutma işlemlerine yani ani yüksek sıcaklık değişimine maruz kalmaktadır. Birbirinden faklı iki malzemenin genleşme ve büzüşme eylemleri sonrasında, malzeme üzerindeki montajlarının kopması, kontak yüzeyinin azalması, mikro/makro çatlaklar gibi sorunlar yaşanabilmektedir. Sıcaklık değişiminin yüksek olduğu montaj noktalarında, ısıl

genleşme katsayısı uyuşmazlığı olan malzemeler seçilmemelidir. Ek olarak, montajlamada kullanılan ara malzemelerin seçimi de oldukça önemlidir. Yukarıda bahsedilen sorunların kompanse edilebileceği fiziksel özelliklere sahip özel üretim ürünler kullanılmalıdır. Isıl iletkenlik katsayı değerleri, genellikle oda sıcaklığı çevresindeki sıcaklık değerleri için belirlenen değerlerdir. Malzemelerin ısıl iletkenlik katsayıları sıcaklıkla değişmektedir. Oda sıcaklığındaki bir malzeme ile kriyojenik sıcaklıklardaki aynı malzemenin ısıl iletkenlik katsayı değerleri aynı değildir. Marquardt vd.'nin, NIST verilerini kullandığı çalışmadan elde edilen Eşitlik (14)'te ısıl iletkenlik katsayısının sıcaklık ile değişimi verilmektedir (Marquardt vd., 2000).

$$log(k) = a + b\,log\,T + c(log\,T)^2 + d(log\,T)^3 + e(log\,T)^4 + f(log\,T)^5 + g(log\,T)^6 + h(log\,T)^7 + i(log\,T)^8 \tag{14}$$

Çizelge 3.2 Isıl iletkenlik hesaplamaları için logaritmik sabitler (Web sitesi: nist.gov)

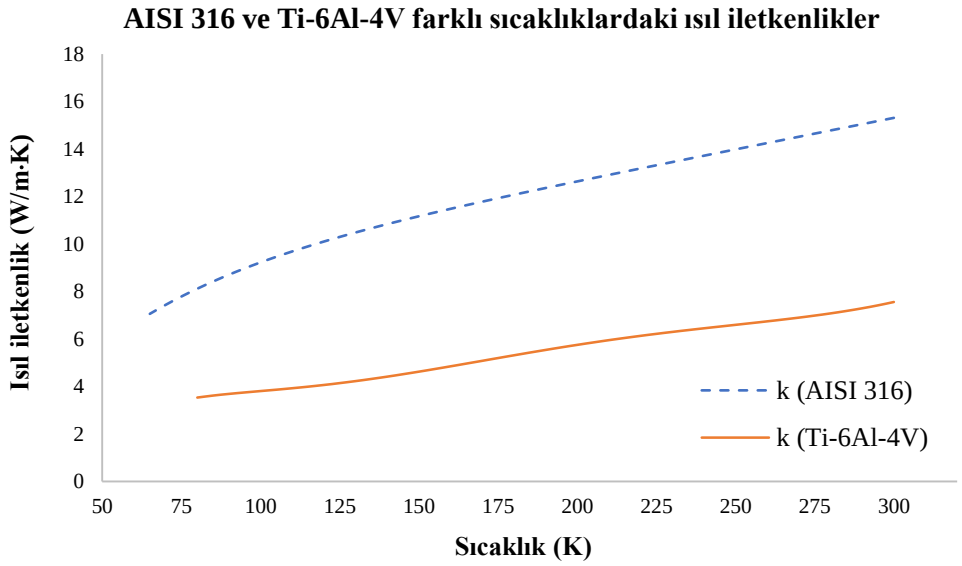
Sabit	Ti-6Al-4V	AISI 316
a	-5107,88	-1,4087
b	19240,42	1,3982
c	-30789,1	0,2543
d	27134,76	-0,626
e	-14226,4	0,2334
f	4438,215	0,4256
g	-763,078	-0,4658
h	55,79659	0,165
i	0	-0,0199

Soğuk parmak üretiminde kullanılan malzemelerin farklı sıcaklıklardaki ısıl iletkenliklerini belirleyebilmek için Amerika Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST)'in kriyojenik sıcaklıklardaki fiziksel özellikleri dikkate alınmıştır. Soğuk parmak malzemeleri olarak kullanılan AISI 316 ve Ti-6Al-4V metallerinin farklı sıcaklıklardaki

ısıl iletkenlik değerleri Eşitlik (14)'te verilen eşitlik ve Çizelge 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 3.3'te verilmektedir (Web sitesi: https://trc.nist.gov).

Çizelge 3.3 Farklı sıcaklıklarda hesaplanan ısıl iletkenlik değerleri

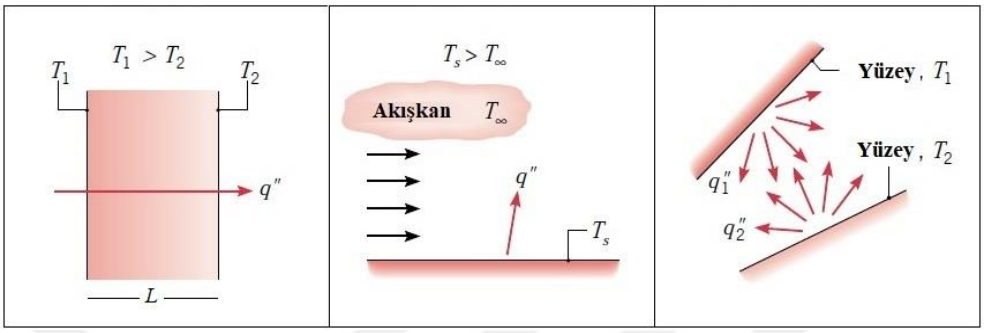
T (K)	*k* (AISI 316) (W/m·K)	*k* (Ti-6Al-4V) (W/m·K)	T (K)	*k* (AISI 316) (W/m·K)	*k* (Ti-6Al-4V) (W/m·K)
300	16,161	6,954	**160**	11,732	4,510
296,15	16,038	6,855	**140**	11,027	4,116
280	15,525	6,521	**120**	10,240	3,799
260	14,895	6,219	**110**	9,800	3,676
240	14,270	5,958	**100**	9,316	3,570
220	13,648	5,672	**90**	8,776	3,465
200	13,024	5,330	**80**	8,167	3,327
180	12,390	4,932	**70**	7,471	3,109



Şekil 3.3 Çizelge 3.3'de hesaplanan ısıl iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 3.3'de verilen, 300 K ve 80 K arasındaki farklı sıcaklıklar için elde edilen ısıl iletkenlik katsayılarının ortalamaları alınarak ısıl yük teorik hesaplamalarında ısıl iletkenlik katsayısı olarak kullanılmıştır. Sıcaklıkları birbirinden farklı cisimler, ısıl

dengeye ulaşabilmek için birbirleri arasında iletim, taşınım ve ışınım olmak üzere Şekil 3.4'te gösterilen üç farklı mekanizmayla ısı aktarabilirler. Isı enerjisinin geçişi, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklıktaki cisimlere doğrudur.



İletim Taşınım Işıma

Şekil 3.4 Isı geçiş mekanizmaları (Incropera vd., 2007)

İletim, katılar veya sabit bir akışkan üzerinden gerçekleşen ısı geçişidir. Fourier yasası olarak bilinen Eşitlik (15)'te; q_k iletim ile aktarılan ısı, A_s kesit alanı, T sıcaklık, L ısı geçişinin olduğu cismin boyu, x ise ısı akışı olan mesafedir. Isı akışının gerçek oranı ise fiziksel bir özellik olan k, ısıl iletkenlik katsayısına bağlıdır.

$$q_k = -kA_s \frac{dT}{dx} \tag{15}$$

$$q_k = -kA_s \frac{dT}{dx} \Rightarrow q \int_0^L \frac{dx}{A} = -\int_{T_1}^{T_2} k(T)dT \tag{16}$$

$$q_k = -\frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T)dT \tag{17}$$

Taşınım, katı bir yüzeyden gaz ya da sıvı gibi bir akışkan arasında gerçekleşen ısı geçişidir. Eşitlik (18)'de taşınımı ifade eden eşitlik verilmektedir.

$$q_c = h_c A_s (T_s - T_\infty) \tag{18}$$

Eşitlik (18)'de q_c (W), taşınım ile aktarılan ısı, A_s (m^2), ısı geçişinin gerçekleştiği alan, h_c ($W/m^2 \cdot K$), ısı taşınım katsayısı, T_s (K), katı yüzeyin sıcaklığı ve T_∞ (K) ise akışkanın sıcaklığıdır.

Işınım ise iki farklı katı yüzey arasında elektromanyetik ışınım ile gerçekleşen ısı geçişidir (Kreith vd., 2011). Genel ışınım formülü Eşitlik (19)'da verilmektedir.

$$q_r = \varepsilon \sigma A_s (T_1^4 - T_2^4) \tag{19}$$

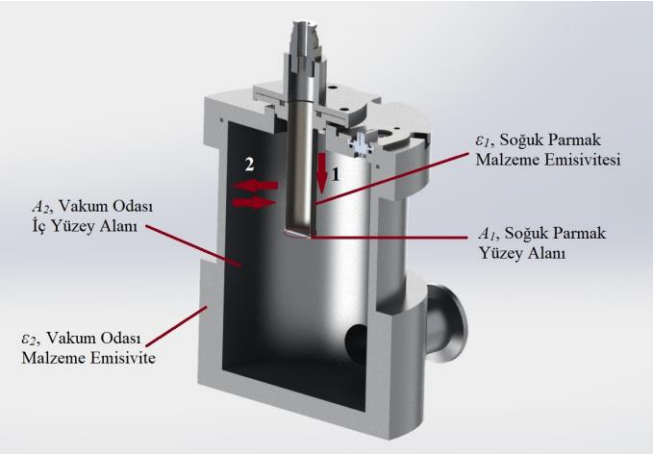
Eşitlik (19)'da q_r (W), ışınım ile aktarılan ısı, A_s (m^2), ışınımın gerçekleştiği yüzey alan, ε (birimsiz); ışınımın gerçekleştiği yüzeyin yayıcılık değeri, σ ($W/m^2 \cdot K^4$); Stefan-Boltzmann T_1 (K), 1 numaralı yüzeyin sıcaklığı ve T_2 (K) ise 2 numaralı yüzeyin sıcaklığıdır. Şekil faktörü olarak tanımlanan F_{12} ise 1 numaralı yüzeyden ayrılan ışınımın, 2 numaralı yüzeye ulaşım oranını göstermektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen testlerde ışınım hesabı; ~ 296,15 K sıcaklığında bir vakum odası içerisinde, sıvı azot doldurulan bir hazne olması sebebiyle iç içe geçmiş iki kapalı hacim için Eşitlik (20)'de verilmektedir.

$$q_r = \frac{\sigma\,(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \tag{20}$$

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi A_1, vakum odası içerisindeki soğuk parmak dış yüzey alanını, A_2, vakum odasının iç yüzey alanını, ε_1, soğuk parmak malzeme yayıcılığı ve ε_2, vakum odası malzeme yayıcılığını ve F_{12} ise şekil faktörünü ifade etmektedir (Lienhard, 2019). Burada soğuk parmak duvarları üzerinden 1 numaralı ok yönünde iletim gerçekleşmekte, 2 numaralı oklar yönünde ise karşılıklı ışınım mekanizmaları gerçekleşmektedir. Oda iç

duvarı ve soğuk parmak dış duvarı arasında kalan hacim ise vakum ortamıdır ve dolayısıyla test sistemi içerisinde taşınım mekanizması bulunmamaktadır.

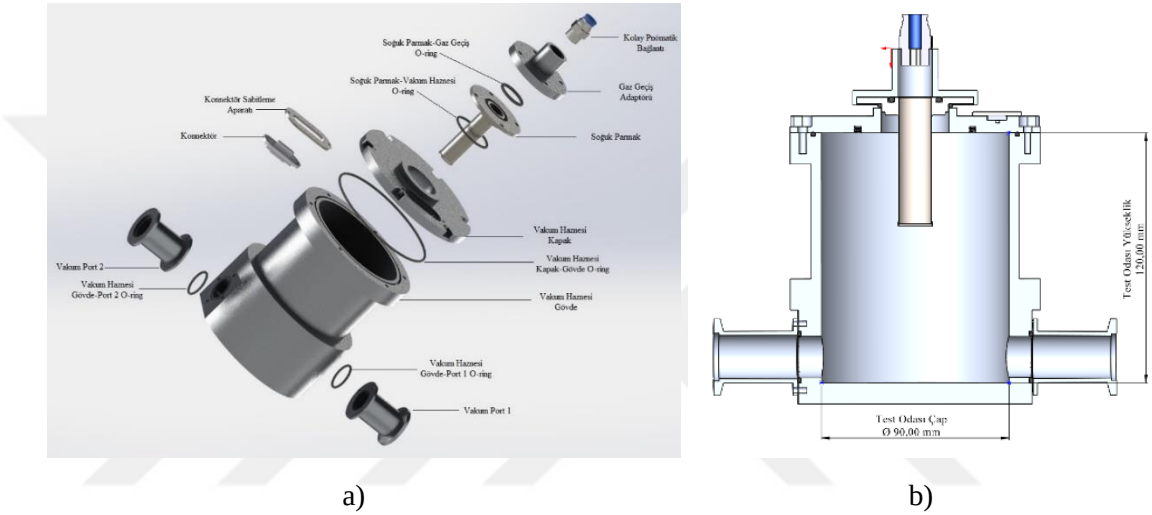


Şekil 3.5 Vakum odası ve soğuk parmak test düzeneği ısıl yük mekanizmaları

Yukarıda anlatıldığı üzere soğutmalı kızılötesi dedektör paket yapısı dedektör performansını etkileyecek birçok parametre bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, soğutmalı kızılötesi dedektör paket yapısı içerisinde bulunan soğuk parmakların et kalınlıklarının, ısıl yüke etkisinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Teorik olarak gerçekleştirilen ısıl yük hesapları, bilgisayar destekli bir simülasyon programında gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Dedektör paket yapısının ısıl yüklerinin belirlemesinde kullanılan kaynama test sistemi soğuk parmak yapılarının ısıl yüklerinin testlerinin yapılması amacıyla kurulmaktadır. Test sisteminin kurulum işlemleri devamında kullanıcı için uygun bir kontrol arayüz yazılımı geliştirilmiştir. Kaynama testi ile soğuk parmak yapısının ısıl yük değerinin test edilmesi ve kaynama testinin ısıl yük tespiti için uygun bir yöntem olup olmadığının belirlenmesi hedeflenmiştir. Neredeyse aynı et kalınlığına sahip (100 µm ve 105 µm), farklı ısıl iletkenlik katsayısı olan AISI 316 ile Ti-6Al-4V karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ısıl yüke etkisi incelenmiştir. 105 µm ve 185 µm et kalınlıklarına sahip AISI 316 malzemelerin ısıl yük karşılaştırmaları yapılarak, ısı iletiminin gerçekleştiği duvar kalınlıklarının ısıl yüke etkisi kaynama test yöntemi kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, birbirinden farklı ısıl iletkenlik katsayı değerleri ve kalınlıkları olan 3 ayrı soğuk parmağın karşılaştırması yapılmıştır.

3.1.2 Kaynama test yöntemi ve kurgu

Kaynama testinin vakum altında yapılması gerekmektedir. Testin vakum altında gerçekleştirilmemesi durumunda, sıvı azot beslemesiyle ortamdaki tüm kirlilik unsuru parçacıklar ve su buharı, soğuk parmak duvarlarında yoğuşarak testi olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple testlerin içerisinde gerçekleştirileceği özel tasarım Şekil 3.6'da gösterilen bir vakum odası kullanılmaktadır.



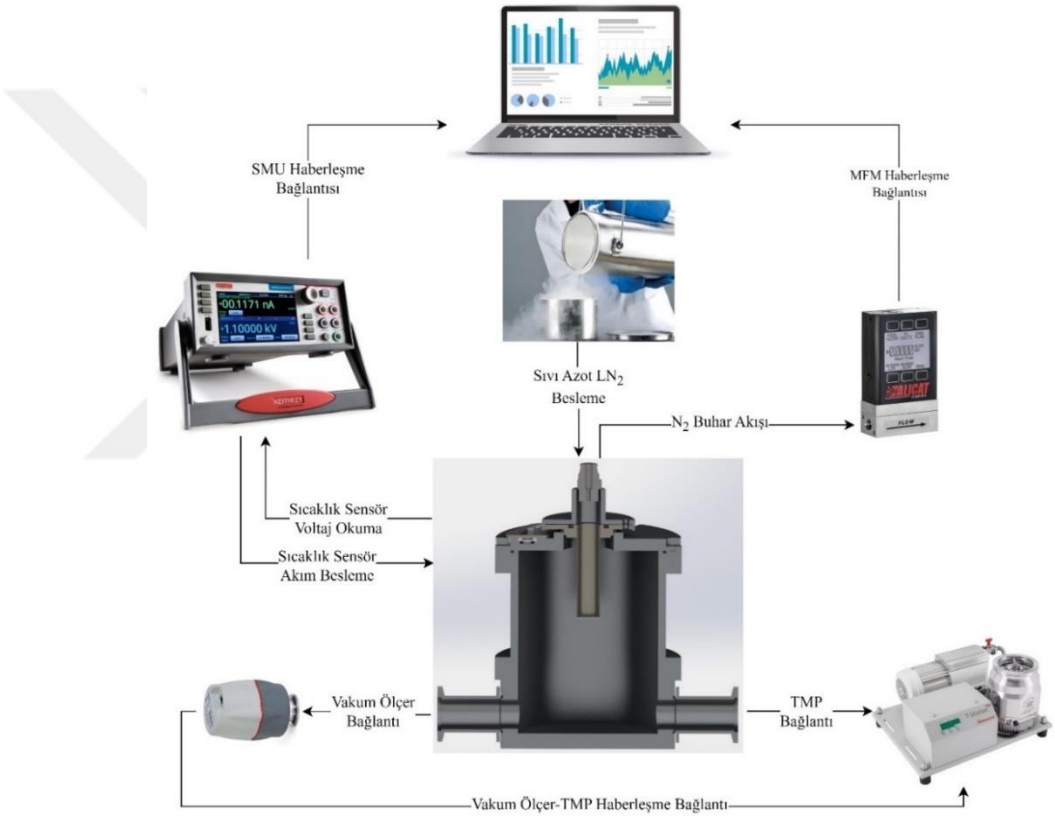
a) b)

Şekil 3.6 a) Tüm alt parçaları montajlı, teste hazır vakum odası patlatılmış CAD görüntüsü b) test vakum odası ölçüleri

Vakum odasını istenen vakum değerine düşürebilmek için kullanılan, Şekil 3.9-b)'de görülen bir adet Edwards/T-station 300 marka/model kaba ve turbo moleküler pompa istasyonu yer almaktadır. Vakum odası iç basınç değerini görebilmek ve takip edebilmek için Şekil 3.9-c)'de Edward WRG NW25 vakum ölçer, sıcaklık sensörlerini 1 mA seviyesinde hassas bir akım değeriyle sürebilen ve mV seviyesinde gerilim ölçebilen Keithley/2450 kaynak ölçüm birimi (Source Measure Unit-SMU) ise Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Şekil 3.11c'de görseli paylaşılan Alicat/M500 kütle akış ölçer ile buharlaşan sıvı azot (LN_2) buharının akış hızı ölçülmektedir. Ölçüm cihazlarının birbirleriyle haberleşmesini, kontrol edilebilmesini ve alınan verilerin anlık olarak kaydedilebilmesini sağlamak amacıyla ara yüz ve kontrol yazılımı yazmak amacıyla

Labview yazılımı kullanılmaktadır. Tüm test sistem donanımlarının bir araya getirilebilmesi için çeşitli elektriksel ve mekanik bağlantı elemanları yer almaktadır.

Vakum odasındaki soğuk parmağın toplam ısı akışı, soğuk parmağın içinde kaynayan kriyojenik sıvının buharı kullanılarak bir kütle akış ölçer aracılığıyla buharlaşırken ürettiği kaynama oranı ve buharlaşma gizli ısısı değeri ile çarpılarak hesaplanmaktadır (Veprik vd., 2015). Bu testlere kaynama testi adı verilmektedir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen kaynama testi akış şemasını içeren görsel Şekil 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.7 Kaynama test sistemi akış şeması

Alicat/M500 kütle akış ölçer ile alınan sıvı azotun buhar akış hızı verileri, yoğunluk ve buharlaşma gizli ısısı kullanılarak teorik olarak ısıl yük değerine çevrilmektedir. Teorik çalışmalar sonucunda ısıl yük q (W), volümetrik akış hızı $\dot{V}$ (m^3/s), soğutucu akışkan yoğunluğu ρ_d (kg/m^3) ve soğutucu akışkanın buharlaşma gizli ısısı h_{sb} (kJ/kg) çarpımlarıyla elde edilir. Azotun, 1 atm ve 20 °C yani 293,15 K'deki buharlaşma entalpisi

199,1 kJ/kg, yoğunluğu 1,165 kg/m^3'tür (Web sitesi: https://www.engineeringtoolbox.com).

$$h_{sb} = h_b - h_s \tag{21}$$

$$q = \dot{V}\rho_d h_{sb} \tag{22}$$

$$q = 3{,}865\dot{V} \tag{23}$$

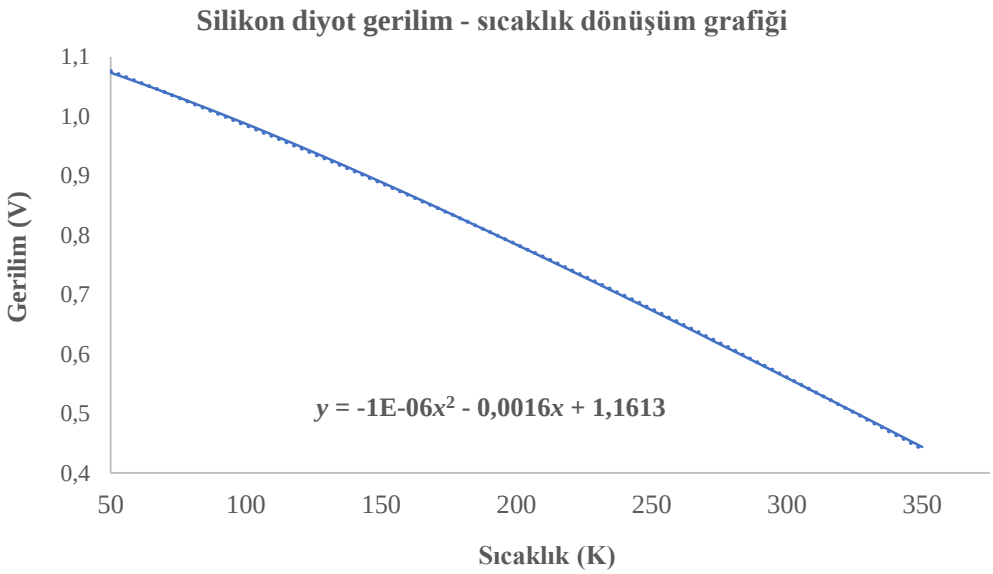
Şekil 3.20'de verilen yazılımın blok diyagramında yer alan, ısıl yük hesaplamaları için (22) numaralı eşitlikten yararlanılmaktadır ve kJ/s → mW birim dönüşümlerini içeren bir buton da bulunmaktadır (Wlodek, 2019 ve Laycook, 1988). Sıvı azot kullanılarak gerçekleştirilen kaynama testleri için ise Eşitlik (23)'te görüldüğü gibi akış hızı, hesaplanan bir sabitle çarpılarak ısıl yük değeri bulunabilmektedir.

Test sırasında anlık sıcaklıkların ölçülmesi ve kaydedilmesi gerekmektedir. Testler sırasında kullanılan sıvı azotun 1 atm'de kaynama noktası, 77,15 K'dir (Web sitesi: engineeringtoolbox_boilingpoint.com). Ankara bölgesindeki atmosfer basıncı 1,02 atm'dir (Web sitesi: https://ankara.mgm.gov.tr) ve bu sebeple LN_2'nin kaynama noktası yaklaşık olarak ~ 80 K seviyelerindedir. Soğuk parmak yapısı içerisine doldurulan sıvı azot, sıcaklık seviyesini hızlı bir şekilde ~ 80 K seviyelerine düşürmekte ve buharlaşmanın bittiği noktada, ortam sıcaklığıyla ısıl dengeye gelene kadar sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklık takibi, soğuk parmak uç kısmına yerleştirilen sıcaklık sensörü ile gerçekleştirilmektedir. Sensöre beslenen akım değerine karşılık, alınan gerilim sinyalleri sıcaklığa göre değişmektedir. Farklı sıcaklıklarda, farklı gerilim değerleri vermektedir. Bu sensörden alınan gerilim değerlerinin hangi sıcaklık değerlerine denk geldiğini belirleyebilmek amacıyla veri dönüşüm grafiği kullanılmaktadır. Veri dönüşüm grafiğinden elde edilen formül ise yazılım içerisinde kullanılmaktadır.

3.1.3 Sıcaklık sensörü için gerilim - sıcaklık dönüşümü

Kaynama test sisteminde, vakum odası içerisinde yer alan soğuk parmak uç kısmına bir adet kalibre silisyum diyot montajlanmıştır. Silisyum diyotun uçları doğrudan hermetik konnektör yapısının 2 çıkış pini üzerine lehimlenmiştir. Bu pinler sayesinde sıcaklık verileri, vakum ortamından sızdırmaz şekilde atmosfer basıncına aktarılabilmektedir. Şekil 3.8'de yer alan grafik, silisyum temelli kalibre sıcaklık sensörünün sıcaklık-gerilim dönüşüm grafiğini vermektedir. Veriler, silisyum diyot sıcaklık sensörü üretici firması tarafından temin edilmiştir. Bu grafiğin eğimi üzerinden hesaplanan formülasyon, (24)'te verildiği gibidir.

$$T(\mathrm{K}) = -10^{-6}{V_s}^2 - 0{,}0016V_s + 1{,}1613 \tag{24}$$



Şekil 3.8 Silisyum diyot için gerilim - sıcaklık dönüşüm grafiği

3.1.4 Test düzeneğinin kurulumu

Test sisteminin Şekil 3.7'de verilen akış semasına uygun şekilde kurulumu sağlanmıştır. Test sistemini oluşturan ekipmanlar Çizelge 3.4'te verilmektedir. Bu cihazların birbiri ile montaj işlemleri; elektriksel konnektörler, vakum uyumlu mekanik bağlantı adaptörleri ve vakum uygun sızdırmaz contalar gibi uygun ara bağlantı elemanları ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.4 Test sisteminde kullanılan malzeme listesi ve kullanım amaçları

Malzeme	Kullanım amacı
Vakum odası	Testlerin vakum altında yapılabilmesi için kullanılmaktadır. Gövde ve kapak olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır.
Soğuk parmak	Isıl yük testlerinin gerçekleştirileceği kızılötesi dedektörün alt parçasıdır.
Turbo moleküler pompa	Vakum odasını vakumlamak için kullanılan pompadır.
Vakum ölçer	Vakum odasındaki basıncı ölçmek için kullanılmaktadır.
Taşıyıcı seramik	Sıcaklık sensörünü taşımak için kullanılmaktadır.
Sıcaklık sensörü	Soğuk parmak sıcaklığını ölçmek için kullanılmaktadır.
Kütlesel akış ölçer	Buharlaşan sıvı azotun debisini ölçmek için kullanılmaktadır.
Kaynak ölçüm birimi	Sıcaklık sensörünü akım ile beslemek ve gerilimini okumak için kullanılmaktadır.
Bilgisayar	Ölçüm cihazlarını kontrol etmek ve test yazılımını çalıştırmak için kullanılmaktadır.
Sıvı azot (LN_2)	Test işlemi sırasında soğutma sıvısı olarak kullanılmaktadır.

Öncelikle test sisteminde kullanılacak vakum odasının, TMP ile vakum ölçerin vakum odasına bağlanacak bağlantı ara yüzlerinin CAD programında tasarımı gerçekleştirilmiş ve sonrasında talaşlı imalat ile ürettirilmiştir (Şekil 3.9a).

a) b) c)

Şekil 3.9 a) Test sisteminde kullanılan vakum odası b) Edwards marka T-station 300 turbo moleküler pompa istasyonu c) Edwards WRG NW25-Vakum ölçer

Boru hattının diğer ucunda ise soğuk parmak içerisine, LN_2'nin doldurulduğu flanş kısmı için CAD tasarımı yapılarak ürettirilen Şekil 3.10'da görseli verilen gaz geçiş adaptörü montajlanmaktadır. Gaz geçiş adaptörü ve kütle akış ölçer montaj görseli Şekil 3.16'da verilmektedir.

a) b)

Şekil 3.10 LN_2 buhar hızını ölçmek için geçiş adaptörü a) katı model b) talaşlı imalat sonrası görselleri

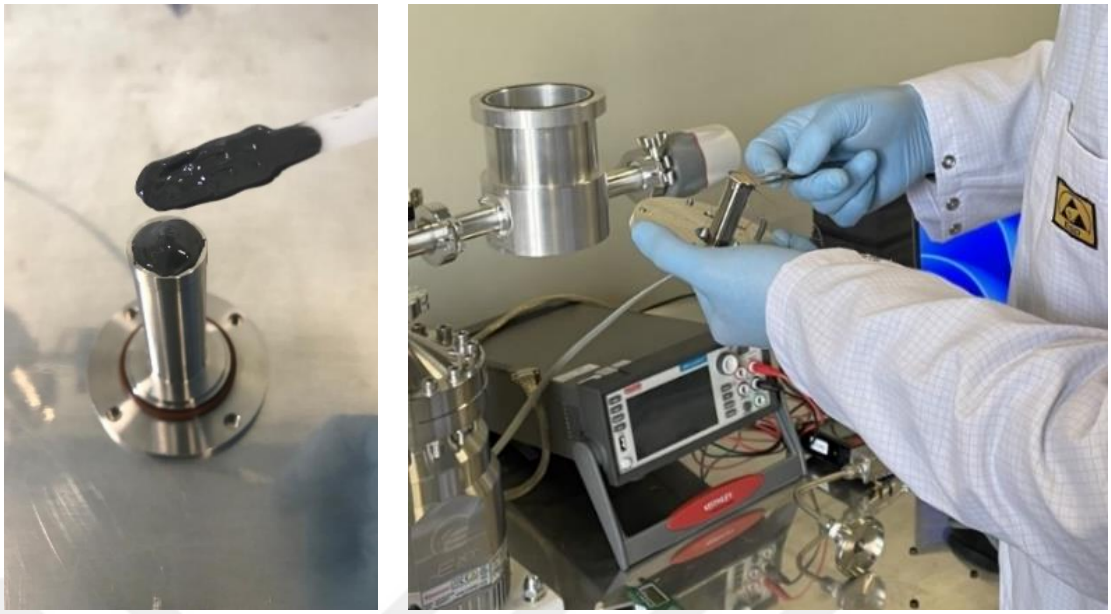
Kütle akış ölçer ile vakum odası arasında azot buharının akacağı boru hattı için Ø 6,35 mm (¼") paslanmaz çelik borular; Şekil 3.11'de görülen boru kesme ve bükme aparatları ile Şekil 3.16'da görüldüğü gibi uygun geometriye getirilerek, kütle akış ölçer cihazının gaz giriş portuna montajlanmıştır.

a) b) c)

Şekil 3.11 LN_2 buharının kütle akış ölçer arasındaki hat kurulumunda kullanılan a) boru bükme aparatı b) boru kesme aparatı c) MFM montaj görseli

Uygun vakum bağlantı ekipmanları seçilerek; vakum odası, vakum ölçer ve turbo moleküler vakum istasyonu montajı gerçekleştirilmiştir. Test odası üzerine montajlanan soğuk parmağın montaj arayüzlerinden vakum kaçağı olmaması amacıyla soğuk parmak üzerine uygun ölçülerde O-ring yerleştirilmiştir. Soğuk parmak üzerinden sıcaklık verilerinin alınabilmesi amacıyla, üzerinde sıcaklık sensörü bulunan taşıyıcı seramik; uç kısmına Şekil 3.12a'daki gibi termal pasta uygulanan soğuk parmak ile Şekil 3.12b'de görüldüğü gibi montajlanmıştır.

Şekil 3.12b'de soğuk parmak ile montaj işlemi gösterilen sıcaklık sensörüne, 1 mA akım beslemek ve sıcaklık değişimine göre gerilim okumak için Şekil 3.13'te görseli verilen Keithley 2450 kaynak ölçüm birimi kullanılmıştır.



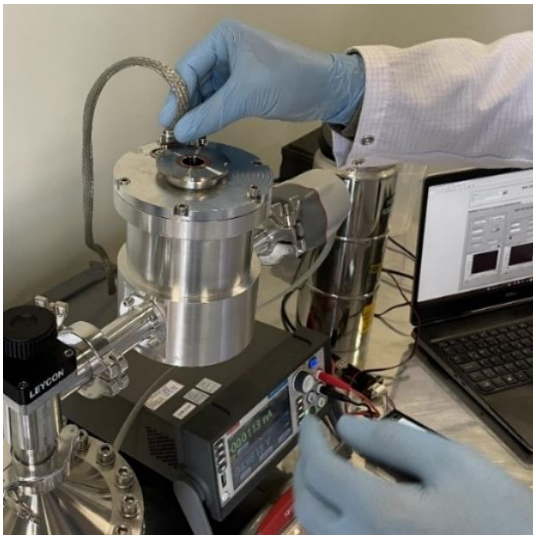
a) b)

Şekil 3.12 a) Soğuk parmak termal pasta uygulaması b) sıcaklık sensör-soğuk parmak montaj işlem görseli

Şekil 3.13 Keithley 2450 kaynak ölçüm cihazı

Hermetik konnektör ile kablo bağlantısı öncesinde sensör bağlanan pinlerden veri akışı olduğunu doğrulamak için Şekil 3.14a'da görüldüğü gibi bir multimetre ile sensör gerilimi okunmaktadır. Sonrasında sensörden çıkan sıcaklık verileri, Şekil 3.14b'de görülen hermetik yapıdaki konnektörlere bağlanan kablo ile dış dünyaya aktarılabilmektedir.

a)



b)

Şekil 3.14 Test odası-hermetik konnektör a) bağlantı kontrolü b) kablaj bağlantı işlem görselleri

Sıvı azot beslemesi yapılan soğuk parmaktan buharlaşan LN_2 akış hızını ölçmek için Alicat/M500 marka/model kütle akış ölçer kullanılmıştır. Sıvı azot besleme işlemi Şekil 3.15'te gösterilmektedir.

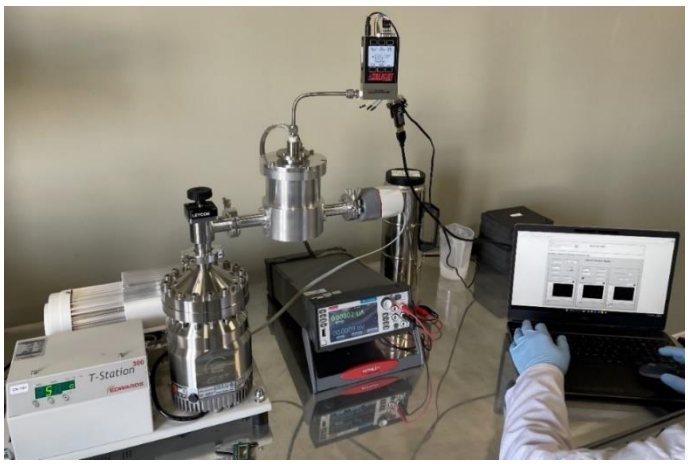
Şekil 3.15 LN_2 doldurma işleminin görseli

Uygun koruyucu ekipmanlar kullanılarak sıvı azot tankından, taşıma kabı yardımıyla bir miktar sıvı azot alınmakta ve soğuk parmak içerisine doldurulmaktadır. Sıcaklık verileri anlık olarak ekran üzerinden kontrol edilerek, sıcaklığın, LN_2 Ankara'daki kaynama

noktası olan ~ 80 K seviyelerine indiği gözlenmektedir. Sonrasında gaz geçiş adaptörü ve MFM yapısı vakum odası üzerinde konumlandırılan soğuk parmak ile Şekil 3.16'da gösterildiği gibi montajlanmıştır.

Şekil 3.16 Alicat/M500 kütle akış ölçer (MFM)-test odası montaj görseli

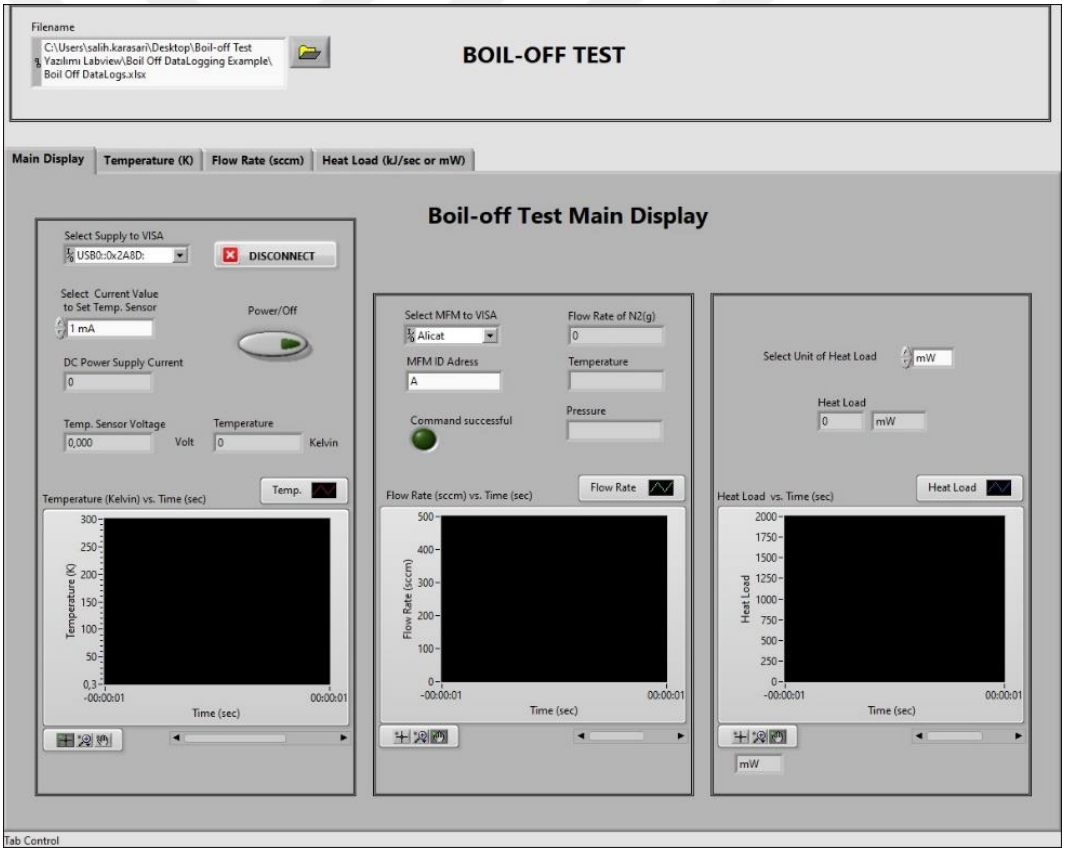
Isıl yük testine başlamak için Labview yazılımı üzerinden geliştirilen kullanıcı arayüz yazılımı açılmaktadır. Şekil 3.17'de ısıl yük testlerinin gerçekleştirildiği test düzeneğinin görseli verilmektedir. Bu andan itibaren ısıl yük testi aktif olarak başlamakta ve soğuk parmak içerisindeki sıvı azot tamamen buharlaşana kadar devam etmektedir. Tüm soğuk parmaklar için yukarıda bahsedilen test adımları tekrarlanarak, elde edilen veriler Şekil 3.21'de görüldüğü gibi bir Excel dosyasına kaydedilmektedir.



Şekil 3.17 Kaynama test düzeneği görseli

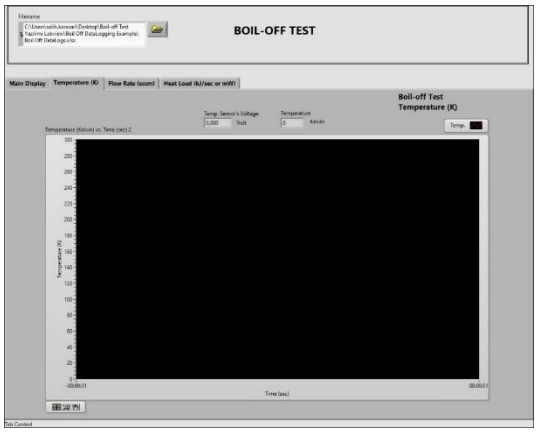
3.1.5 Test yazılımının geliştirilmesi

Kaynama testleri sırasında anlık buharlaşma hızlarının ölçülebilmesi için kullanılan kütle akış ölçerden saniye başına veri alınmaktadır ve sıcaklık sensörü ile alınan anlık veriler ile kaydedilmelidir. Alınan verilerin grafiksel şekilde kullanıcı tarafından takip edilebilmesi gerekmektedir. Alınan verilerin ısıl yük değerine çevrilerek kullanıcıya iletilebilmesi için ise bazı matematiksel hesaplamaların çözdürülmesi gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı kullanıcının testi başlatarak, takip edebileceği ve tüm verileri istediği aralıklarda alarak kaydedebileceği bir kullanıcı ara yüzü geliştirilmiştir. Testin tüm sayısal çıktılarına ulaşabileceği bir ana ekran geliştirilmiştir ve 'Kaynama Test Yazılımı-Front Panel-Ana Ekran' görseli Şekil 3.18'de verilmektedir.

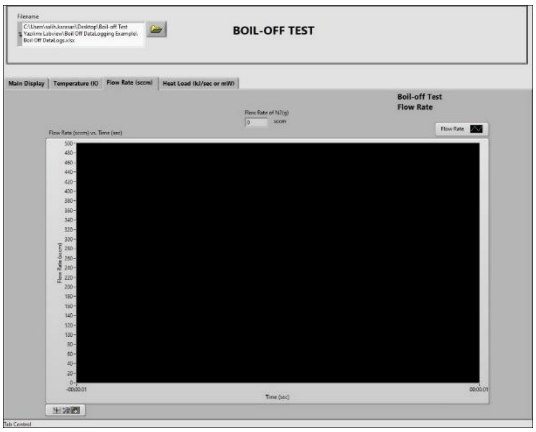


Şekil 3.18 Kaynama test yazılımı-front panel-ana ekranı

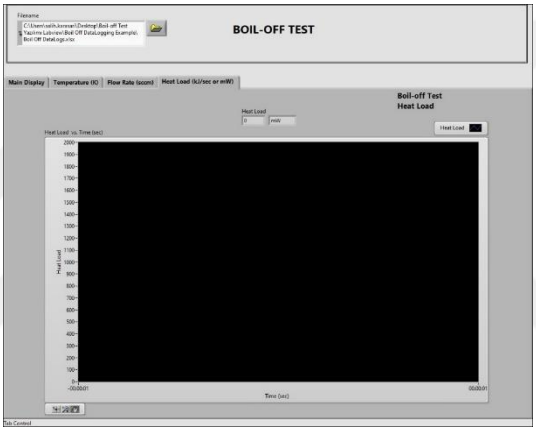
Kullanıcının grafikleri detaylı bir şekilde takip edebilmesi amacıyla 'Sıcaklık', 'Akış hızı' ve 'Isıl yük' için Şekil 3.19'da görüldüğü gibi ayrı sayfalar oluşturulmuştur.



a)



b)

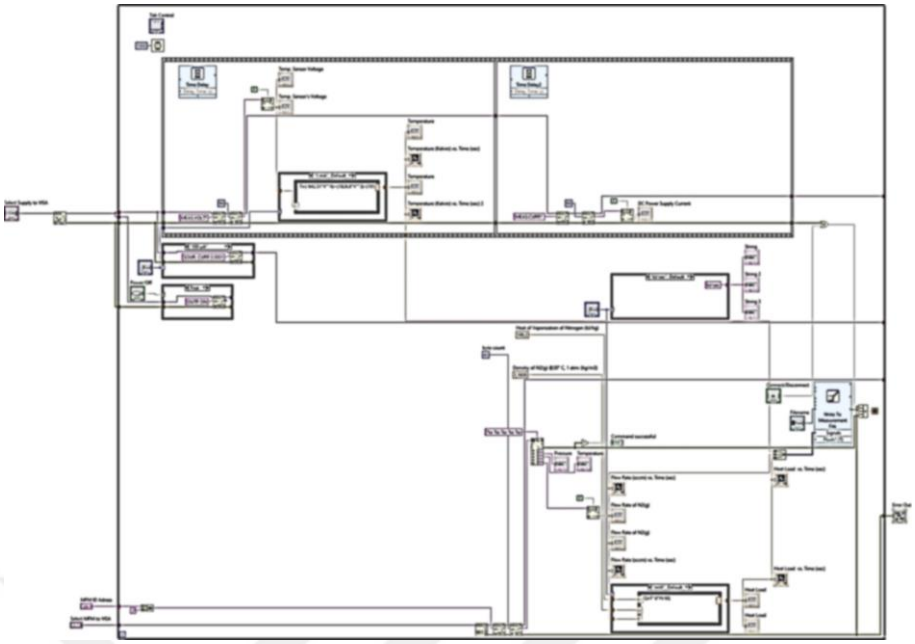


c)

Şekil 3.19 a) Kaynama test yazılımı-front panel-sıcaklık kontrol ekranı b) akış hızı kontrol ekranı c) ısıl yük kontrol ekranı

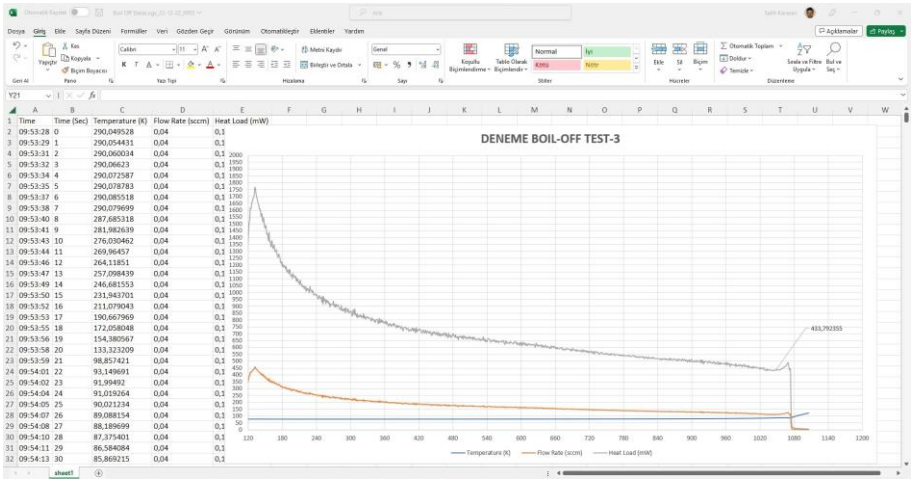
Labview yazılımı ile kullanıcı ara yüzü geliştirirken, öncelikle kütle akış ölçer ve kaynak ölçüm biriminin bilgisayar ile seri haberleşme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her cihazın bilgi dokümanlarından, yazılımda kullanılacak verilerin çağırılabileceği ya da ayarlanabileceği komutlar belirlenmiştir.

Labview yazılımının geliştirildiği ve tüm yazılımı içeren blok diyagram görseli Şekil 3.20'de verilmektedir.



Şekil 3.20 Kaynama test yazılımının blok diyagram görseli

Alicat M500 sccm marka/model kütle akış ölçer cihazından, atmosfer basıncı, ortam sıcaklığı, akış hızı değerleri alınmıştır. Akış hızı, kullanıcı ara yüzü üzerinden görülebileceği gibi Eşitlik (22)'de verilen formül kullanılarak ısıl yük değerine dönüştürülerek kullanıcıya aktarılmaktadır. Elde edilen anlık verilerin her test sonrasında kaydedildiği bir Excel dosyası da oluşturulmaktadır. Şekil 3.21'de örnek bir parça üzerinden alınan kaynama test sonucunun Excel formatındaki görseli verilmektedir.



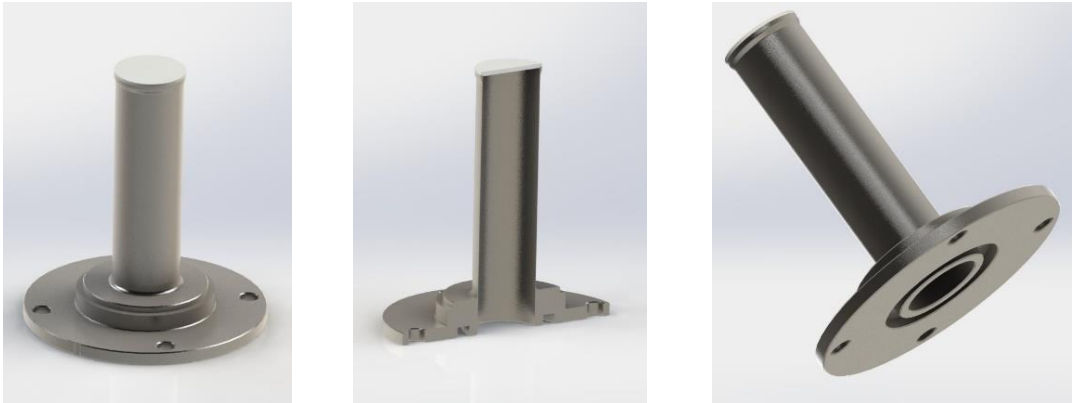
Şekil 3.21 Örnek bir parçanın kaynama testinin Excel kayıt dosya görüntüsü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tez çalışması kapsamında, Çizelge 4.1'de açıklamaları verilen, 3 farklı soğuk parmak yapısının teorik olarak ısıl yük hesapları yapılmıştır. Sonrasında, CAD programında tasarımı yapılan ve ardından ürettirilen, 3 farklı soğuk parmak için bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizi yapılarak teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Teorik çalışmaların ardından, deneysel olarak doğrulama yapılabilmesi amacıyla kurulan kaynama test sisteminde üretimi talaşlı imalat ile yaptırılan soğuk parmakların ısıl yük testleri yapılmıştır. Böylece teorik ve deneysel çalışmaların birbiri ile karşılaştırması gerçekleştirilmiş, malzeme fiziksel özelliklerinin soğuk parmak tasarımları üzerine etkileri yorumlanmış ve kaynama test yönteminin düşük hacimli vakum paketleri için uygun yöntem olup olmadığı araştırılmıştır.

Çizelge 4.1 Tez çalışmasında kullanılan soğuk parmakların özellikleri

	Malzeme	**Duvar kalınlığı**
Soğuk Parmak -1	AISI 316	105 µm
Soğuk Parmak -2	AISI 316	185 µm
Soğuk Parmak -3	Ti-6Al-4V	100 µm



a) b) c)

Şekil 4.1 Tez çalışmasında kullanılan soğuk parmakların CAD çizimi a) üst b) kesit ve c) alt görüntüsü

4.1 Termal Kütle ve Isıl Yüke İlişkin Teorik Hesaplamalar

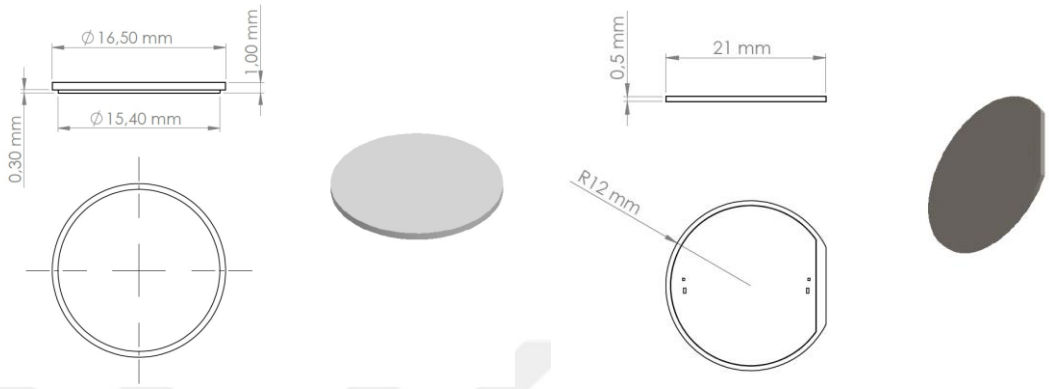
Soğuk parmakların teorik ısıl yük hesaplamalarını yaparken dikkat edilmesi gereken husus, farklı sıcaklıklardaki iki noktanın arasında ısının aktığı yüzeylerin kesit alanlarını belirlerken, ısının aktığı yolun en dar olduğu nokta seçilmelidir. Yüksek sıcaklığın olduğu tarafta bulunan flanş yapısı oda sıcaklığında bir ısı rezervuarı gibi düşünülmektedir. Düşük sıcaklık tarafındaki yüzeyin üzerinde kalan dolu kütle ise soğutma işleminin ne kadar sürede gerçekleşeceği ile ilgilidir. Yani termal kütleyle tanımlanır. Dolayısıyla ısıl yük hesaplamaları yapılırken, sıcak taraftan soğuk tarafa ne kadar ısı akacağını hesaplamak gerekmektedir. Bu durumda en dar kesit alanına sahip en uzun yol üzerinden hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. SP_105µm_AISI 316 için Çizelge 4.2'de, CAD programından elde edilen veriler kullanılarak; 'Soğuk Parmak-1', SP_185µm_AISI 316 için Çizelge 4.3'te 'Soğuk Parmak-2', SP_100µm_Ti-6Al-4V için Çizelge 4.4'te 'Soğuk Parmak-3' üzerinden ısıl yük hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Hesaplamalar yapılırken, ısıl iletkenlik katsayılarının sıcaklık etkisi altında farklılık gösterdiği dikkate alınmıştır. Bu sebeple testlerin gerçekleştiği sıcaklık değerleri arasında birden fazla noktadan hesaplanan ısıl iletkenlik katsayılarının ortalama değeri alınarak ısıl iletkenlik katsayıları belirlenmiştir.

Soğuk Parmak için Termal Kütle Hesaplamaları;

Termal kütle; soğuk parmak yapılarında ısı köprüsü olarak görev yapan cidarların uç kısımlarında yer alan kütlenin ve üzerinde sıcaklık sensörü bulunan taşıyıcı seramik kütlesinin oda sıcaklığından, LN_2 kaynama noktasına kadar olan yaklaşık 220 K sıcaklık değişimi için gerekli enerji miktarıdır. Tüm soğuk parmakların uç kısımları, yüksek sıcaklık değişimlerinde seramik ve metal uç arasında ısıl genleşme farkından dolayı mekanik yapısal bozulmalar olmaması amacıyla ısıl genleşme katsayısı seramik malzemenin değerine yakın bir metal malzeme seçilmelidir. Soğuk parmağın soğutulacak kısmı olan SP1 (AISI 316), SP3 (Ti-6Al-4V) uç kısım ve üzerine termal pasta ile yapıştırılan Al_2O_3 taşıyıcı seramik termal kütleleri için her malzemenin özgül ısı (c_p) değeri; ısıl iletkenlik katsayısında olduğu gibi sıcaklıkla değişiklik göstermektedir. Bu

sebeple Çizelge 3.1'de verilen özgül ısı değerleri kullanılarak (ortalama alınarak) termal kütle hesapları yapılmıştır. Alümina için ~ 80 K'deki c_p değeri ~225 J/kg·K, AISI 316 için ~275 J/kg·K ve Ti-6Al-4V için ise ~325 J/kg·K'tir.



a) b)

Şekil 4.2 a) SP1 (AISI 316), SP3 (Ti-6Al-4V) uç kısım b) Al_2O_3 seramik ölçüleri

Yoğunluğu 3800 kg/m^3 (Web sitesi: https://www.matweb.com) olan Al_2O_3 seramik, yoğunluğu 8000 kg/m^3 (Web sitesi: https://www.matweb.com) AISI 316 ve yoğunluğu 4428 kg/m^3 olan Ti-6Al-4V uç kısımları için; Şekil 4.2'de verilen 2D çizimdeki ölçülere göre $m_{(Al2O3)}$, $m_{(AISI316)}$, $m_{(Ti\text{-}6Al\text{-}4V)}$ kütle değerleri sırasıyla, 0,96 g, 1,64 g ve 0,91 g'dır. Testler boyunca oda sıcaklığından (~ 296,15 K) LN_2 kaynama noktasına (~ 80 K) kadar sıcaklık değişimi için ΔT = 216,15 K'dir. Buna göre Eşitlik (13) kullanılarak, tüm soğuk parmaklar için ortak olan termal kütle değeri Eşitlik (25), (26) ve (27)'de hesaplanmıştır.

$$Q_{(Al203)} = 0{,}00096\ \text{kg}\cdot 225\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\cdot(296{,}15\ \text{K} - 80\ \text{K}) = 46{,}7\ \text{J} \tag{25}$$

$$Q_{(AISI316)} = 0{,}00172\ \text{kg}\cdot 275\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\cdot(296{,}15\ \text{K} - 80\ \text{K}) = 97{,}5\ \text{J} \tag{26}$$

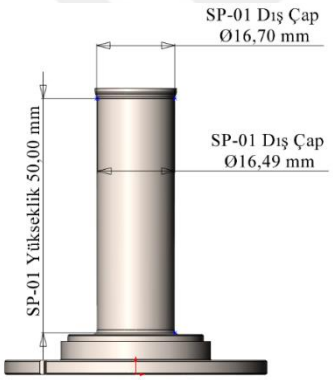
$$Q_{(AISI316)+(Al203)} = 144{,}2\ \text{J} \tag{27}$$

$$Q_{(Ti-6Al-4V)} = 0{,}00172\ \text{kg}\cdot 325\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\cdot(296{,}15\ \text{K} - 80\ \text{K}) = 63{,}9\ \text{J} \tag{28}$$

$$Q_{(Ti-6Al-4V)+(Al203)} = 116\ \text{J} \tag{29}$$

Soğuk Parmak-1 için Isıl Yük Hesaplamaları;

Çizelge 4.2 SP_105µm_AISI 316 için ısıl yük hesaplamalarında kullanılan veriler



SP ismi	SP_105µm_AISI 316 (SP1)
Malzeme	AISI 316
Isıl iletkenlik (*k*)	$k_{ortalama}$ = ~11,7 W/(m·K)
Kesit alanı	5,47 mm^2
Cidar dış çapı	Ø 16,70 mm
Cidar iç çapı	Ø 16,49 mm
Cidar yükseklik	50 mm
Tip sıcaklığı	80 K
Flanş sıcaklığı	296,15 K
Yayıcılık (ε_1) @ ~ 80K	0,074
Dış yüzey alanı	0,0027 m^2
Vakum odası sıcaklığı	296,15 K
Vakum odası yayıcılığı (ε_2) @ ~ 300K	0,1
Vakum odası iç yüzey alanı	0,049 m^2

Çizelge 4.2’daki yayıcılık ve ısıl iletkenlik, Çizelge 2.2 ve Çizelge 3.3’den alıntıdır.

Eşitlik (15) dikkate alınarak;

$$q_{(Iletim)_{SP_1}} = 11{,}711 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m{\cdot}K}} \frac{5{,}47{\cdot}10^{-6}\ \mathrm{m}^2}{50{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m}}\ 216{,}15\ \mathrm{K}\ = 0{,}277\ \mathrm{W} \tag{30}$$

Soğuk parmak-1 (SP1) üzerine ışınım etkisi ile ısıl yük;

$$q_{(ışınım)_{SP_1}} = \frac{5{,}67{\cdot}10^{-8}\ \mathrm{W{\cdot}K^{-4}}{\cdot}m^{-2}\ (296{,}15\ \mathrm{K}^4 - 80\ \mathrm{K}^4)}{\frac{1-0{,}074}{0{,}074{\cdot}0{,}0027\ \mathrm{m}^2} + \frac{1}{0{,}0027\ \mathrm{m}^2} + \frac{1-0{,}1}{0{,}1{\cdot}0{,}049\ \mathrm{m}^2}} = 0{,}084\ \mathrm{W} \tag{31}$$

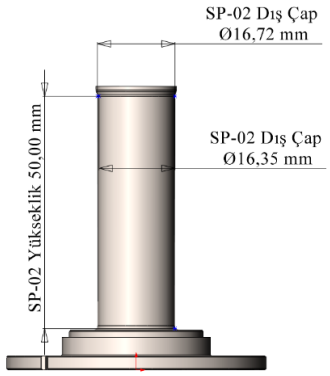
Test sistemi geometrisi sebebiyle hesaplamalarda F_{12}, 1 kabul edilmiştir. SP1 toplam ısıl yükünü hesaplanmak amacıyla $q_{(İletim)SP1}$ ve $q_{(Işınım)SP1}$ Eşitlik (32)'de toplanmıştır.

$$q_{(toplam)_{SP_1}} = 0{,}277\ \mathrm{W} + 0{,}084\ \mathrm{W} = 0{,}361\ \mathrm{W} \tag{32}$$

SP1 için en düşük et kalınlığına sahip, 50 mm uzunluğundaki ısı köprüsü kısmı üzerinden iletim yoluyla oluşan ısıl yük değeri 277 mW olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamaya, yaklaşık oda sıcaklığında (~ 296,15 K) olan test vakum odasının iç duvarlarından soğuk parmak üzerine etkiyen ışınım hesabı (84 mW) eklenmiş ve 361 mW olarak bulunmuştur. Işınım hesaplamaları Eşitlik (19) ve (20) dikkate alınarak ve Çizelge 4.2'de yer alan veriler kullanılarak Eşitlik (31)'de hesaplanmıştır. Çizelge 2.2'te verilen yayıcılık değerlerine bakıldığında; vakum odası malzemesi parlatılmış alüminyum yüzey için ~ 300 K'de yayıcılık ~ 0,1 iken soğuk parmak malzemesi paslanmaz çelik için ~ 80 K'de yayıcılık ~ 0,074'tür. Malzemelerin ışınım yüzey alanları ise 3D çizim program verileri kullanılarak, soğuk parmak dış yüzey alan A_1 = 0,0027 m^2 ve vakum odası iç yüzey alan A_2 = 0,049 m^2 olarak belirlenmiştir.

Soğuk Parmak-2 için Isıl Yük Hesaplamaları;

Çizelge 4.3 SP_185µm_AISI 316 için ısıl yük hesaplamalarında kullanılan veriler



SP ismi	SP_185µm_AISI 316 (SP2)
Malzeme	AISI 316
Isıl iletkenlik (*k*)	$k_{ortalama}$ = ~11,7 W/(m·K)
Kesit alanı	9,61 mm^2
Cidar dış çapı	Ø 16,72 mm
Cidar iç çapı	Ø 16,35 mm
Cidar yükseklik	50 mm
Tip sıcaklığı	80 K
Flanş sıcaklığı	296,15 K
Yayıcılık (ε_1) @ ~ 80K	0,074
Dış yüzey alanı	0,0027 m^2
Vakum odası sıcaklığı	296,15 K
Vakum odası yayıcılığı (ε_2) @ ~ 300K	0,1
Vakum odası iç yüzey alanı	0,049 m^2

Çizelge 4.3'teki yayıcılık ve ısıl iletkenlik, Çizelge 2.2 ve Çizelge 3.3'den alıntıdır.

Eşitlik (15) dikkate alınarak;

$$q_{(iletim)_{SP_2}} = 11{,}711 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m{\cdot}K}} \frac{9{,}61{\cdot}10^{-6}\ \mathrm{m}^2}{50{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m}} 216{,}15\ \mathrm{K} = 0{,}487\ \mathrm{W} \tag{33}$$

Soğuk parmak-2 (SP2) üzerine ışınım etkisi ile ısıl yük;

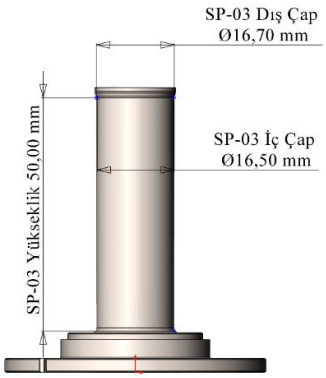
$$q_{(ışınım)_{SP_2}} = \frac{5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot K^{-4} \cdot m^{-2}}\ (296{,}15\ \mathrm{K}^4 - 80\ \mathrm{K}^4)}{\frac{1-0{,}074}{0{,}074 \cdot 0{,}0027\ \mathrm{m}^2} + \frac{1}{0{,}0027\ \mathrm{m}^2} + \frac{1-0{,}1}{0{,}1 \cdot 0{,}049\ \mathrm{m}^2}} = 0{,}084\ \mathrm{W} \tag{34}$$

SP2 toplam ısıl yükünü hesaplanmak amacıyla $q_{(İletim)SP2}$ ve $q_{(Işınım)SP2}$ Eşitlik (35)'te toplanmıştır.

$$q_{(toplam)_{SP_2}} = 0{,}487\ \mathrm{W} + 0{,}084\ \mathrm{W} = 0{,}571\ \mathrm{W} \tag{35}$$

Soğuk Parmak-3 için Isıl Yük Hesaplamaları;

Çizelge 4.4 SP_100µm_Ti-6Al-4V için ısıl yük hesaplamalarında kullanılan veriler



SP ismi	SP_100µm_Ti-6Al-4V (SP3)
Malzeme	Ti-6Al-4V
Isıl iletkenlik (*k*)	$k_{ortalama}$ = ~5,5 W/(m·K)
Kesit alanı	5,22 mm^2
Cidar dış çapı	Ø 16,70 mm
Cidar iç çapı	Ø 16,50 mm
Cidar yükseklik	50 mm
Tip sıcaklığı	80 K
Flanş sıcaklığı	296,15 K
Yayıcılık (ε_1) @ ~ 80K	0,08
Dış yüzey alanı	0,0027 m^2
Vakum odası sıcaklığı	296,15 K
Vakum odası yayıcılığı (ε_2) @ ~ 300K	0,1
Vakum odası iç yüzey alanı	0,049 m^2

Çizelge 4.4'teki yayıcılık ve ısıl iletkenlik, Çizelge 2.2 ve Çizelge 3.3'den alıntıdır.

Eşitlik (15) dikkate alınarak;

$$q_{(iletim)_{SP_3}} = 5{,}54 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m{\cdot}K}} \frac{5{,}22{\cdot}10^{-6}\ \mathrm{m}^2}{50{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m}} 296{,}15\ \mathrm{K} = 0{,}125\ \mathrm{W} \tag{36}$$

Soğuk parmak-3 (SP3) üzerine ışınım etkisi ile ısıl yük;

$$q_{(ışınım)_{SP_3}} = \frac{5{,}67{\cdot}10^{-8}\ \mathrm{W{\cdot}K^{-4}{\cdot}m^{-2}}\ (296{,}15\ \mathrm{K}^4 - 80\ \mathrm{K}^4)}{\frac{1-0{,}08}{0{,}08{\cdot}0{,}0027\ \mathrm{m}^2} + \frac{1}{0{,}0027\ \mathrm{m}^2} + \frac{1-0{,}1}{0{,}1{\cdot}0{,}049\ \mathrm{m}^2}} = 0{,}090\ \mathrm{W} \tag{37}$$

Çizelge 2.2'ye göre Ti-6Al-4V için yayıcılık değeri 0,08'dir. Diğer soğuk parmaklarda olduğu gibi dış yüzey alan A_1 = 0,0027 m^2 ve vakum odası iç yüzey alan A_2 = 0,049 m^2 olarak alınmıştır. SP3 toplam ısıl yükünü hesaplanmak amacıyla $q_{(İletim)SP3}$ ve $q_{(Işınım)SP3}$ Eşitlik (38)'de toplanmıştır.

$$q_{(toplam)_{SP_3}} = 0{,}125\ \mathrm{W} + 0{,}090\ \mathrm{W} = 0{,}215\ \mathrm{W} \tag{38}$$

Soğuk Parmaklar için Diğer Isıl Kayıpların Hesaplamaları;

Kaynama test düzeneği en temel ısıl yük kayıpları iletim ve ışınımdır fakat sistem içerinde bazı ısıl kayıplar da bulunmaktadır. Bunlar; sıcaklık sensörünü sürmek için gerekli güç ve sıcaklık sensörünün hermetik konnektör ile bağlantısının sağlandığı iki adet teldir.

Sıcaklık sensörü, başlık 3.1.3'te detaylıca anlatıldığı gibi çalışmaktadır. LN_2 beslemesi sonrasında, sabit akım ile en fazla okunan gerilim değeri yaklaşık 1,05 V olmaktadır. Bu değer ~ 80 K'e denk gelen sensör tepkisidir. Sıcaklık sensörünün bulunduğu ortamdan,

dış dünyaya verilerin aktarılabilmesi için kullanılan tel çapı, 34 AWG (Ø 0,16 mm), ısıl iletkenliği 62 W/m·K (Web sitesi: https://www.matweb.com) ve boyu yaklaşık 100 mm'dir. Diğer kayıplar mW seviyesinde oldukça düşük kayıpladır fakat hassas yük hesaplamaları yapılırken diğer kayıplar da hesaba dahil edilmelidir.

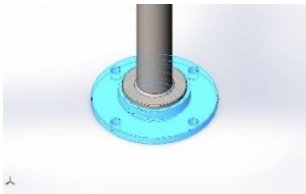
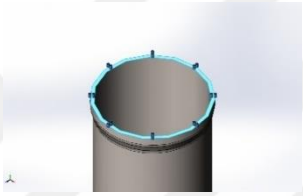
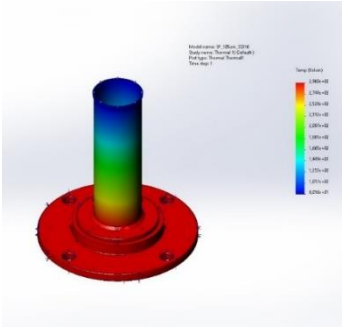
4.2 Isıl Yük için Sonlu Elemanlar Analizi

Kaynama testleri ile elde edilen sonuçların, teorik sonuçlar ile karşılaştırılabilmesi amacıyla soğuk parmak katı modellerine, CAD programı içerisinde yer alan simülasyon modülü ile ısıl yük analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler; teorik ve kaynama testleri sonucunda elde edilen veriler ile karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 4.5 Soğuk parmak-1 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları

	Model ismi	SP_105µm_AISI 316
	Model fiziksel özellikleri	
	Kütle	0,0750652 kg
	Hacim	9,3832E-06 m^3
	Yoğunluk	8,0 kg/m^3
	Ağırlık	0,735639 N
Birimler		
Birim sistemi	SI (MKS)	
Uzunluk	mm	
Sıcaklık	kelvin	
Açısal hız	rad/sec	
Basınç/Stres	N/m^2	
Malzeme özellikleri		
	Malzeme tanımı	AISI 316 Annealed stainless steel customized
	Isıl iletkenlik	11,711 W/ (m·K) (customized)
	Özgül ısı	500 J/(kg·K)
	Yoğunluk	8,0 kg/m^3

Çizelge 4.5 Soğuk parmak-1 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları (devamı)

Soğuk parmak-1 analiz çalışma özellikleri			
Analiz çalışma ismi	SP_105µm _AISI 316 Heat load		
Analiz tipi	Kararlı ısıl analiz (steady-state thermal analysis)		
Mesh tipi	Katı mesh (solid mesh)		
Termal yükler			
Yük tanımı	**Yük görseli**	**Yük detayı**	
Sıcaklık-1		**Tanımlama unsurları**	30 Yüzey
		Sıcaklık	296,15 K
Isıl güç-1		**Tanımlama unsurları**	1 Yüzey
		Isıl güç değeri	**-0,274 W**
Mesh			
Mesh tipi		Standard katı mesh	
Otomatik geçiş		Kapalı	
Yüksek kalite mesh için Jacobian noktaları:		16 Nokta	
Element ölçüsü		1,08375 mm	
Tolerans		0,0541876 mm	
Mesh kalitesi		Yüksek	
Soğuk parmak-1 analiz sonuçları			
Analiz ismi	**Analiz tipi**	**En düşük**	**En yüksek**
Termal-1	Temperature	80,16 K (Düğüm: 3572)	296,15 K (Düğüm: 5847)
			
SP_105µm_AISI 316-Heat load-Thermal-Thermal1			

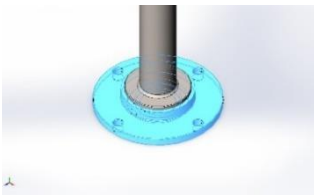
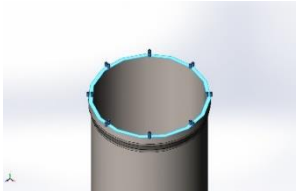
Çizelge 4.6 Soğuk parmak-2 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları

	Model ismi	SP_185µm_AISI 316
	Model fiziksel özellikleri	
	Kütle	0,0769977 kg
	Hacim	9,6247E-06 m^3
	Yoğunluk	8,0 kg/m^3
	Ağırlık	0,754578 N

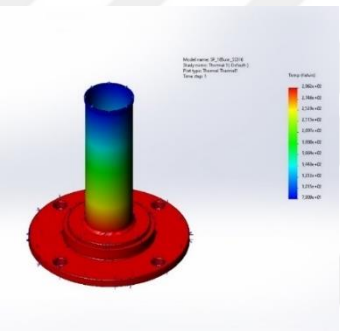
Birimler	
Birim sistemi	SI (MKS)
Uzunluk	mm
Sıcaklık	kelvin
Açısal hız	rad/sec
Basınç/Stres	N/m^2

Malzeme özellikleri		
	Malzeme tanımı	AISI 316 Annealed stainless steel customized
	Isıl iletkenli	11,711 W/ (m·K) (customized)
	Özgül ısı	500 J/(kg·K)
	Yoğunluk	8,0 kg/m^3

Soğuk parmak-2 analiz çalışma özellikleri	
Analiz çalışma ismi	SP_185µm_AISI 316 Heat load
Analiz tipi	Kararlı ısıl analiz (steady-state thermal analysis)
Mesh tipi	Katı mesh (solid mesh)

Termal yükler			
Yük tanımı	**Yük görseli**	**Yük detayı**	
Sıcaklık-1		**Tanımlama unsurları**	27 Yüzey
		Sıcaklık	296,15 K
Isıl güç-1		**Tanımlama unsurları**	1 Yüzey
		Isıl güç değeri	**-0,482 W**

Çizelge 4.6 Soğuk parmak-2 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları (devamı)

Mesh			
Mesh tipi		Standard katı mesh	
Otomatik geçiş		Kapalı	
Yüksek kalite mesh için Jacobian noktaları		16 Nokta	
Element ölçüsü		1,08271 mm	
Tolerans		0,0541354 mm	
Mesh kalitesi		Yüksek	
Soğuk parmak-2 analiz sonuçları			
Analiz ismi	**Analiz tipi**	**En düşük**	**En yüksek**
Termal-1	Temperature	79,899 K (Düğüm: 5501)	296,200 K (Düğüm: 3996)
			
SP_185µm_AISI 316-Heat load-Thermal-Thermal1			

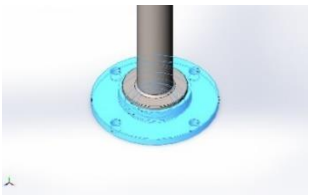
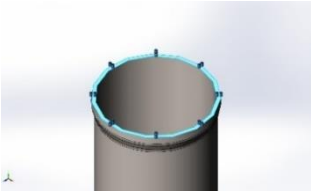
Çizelge 4.7 Soğuk parmak-3 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları

	Model ismi	SP_100µm_Ti-6Al-4V
	Model fiziksel özellikleri	
	Kütle	0,0415 kg
	Hacim	9,3698E-06 m^3
	Yoğunluk	4,428 kg/m^3
	Ağırlık	0,40666 N

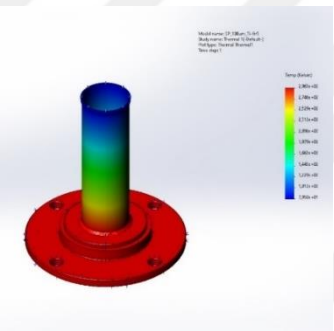
Birimler	
Birim sistemi	SI (MKS)
Uzunluk	mm
Sıcaklık	kelvin
Açısal hız	rad/sec
Basınç/Stres	N/m^2

Malzeme özellikleri		
	Malzeme tanımı	Ti-6Al-4V Titanium grade-5 customized
	Isıl iletkenlik	5,54 W/(m·K) (customized)
	Özgül ısı	586 J/(kg·K)
	Yoğunluk	4,428 kg/m^3

Soğuk parmak-3 analiz çalışma özellikleri	
Analiz çalışma ismi	SP_100µm_Ti-6Al-4V Heat load
Analiz tipi	Kararlı ısıl analiz (steady-state thermal analysis)
Mesh tipi	Katı mesh (solid mesh)

Termal yükler			
Yük tanımı	**Yük görseli**	**Yük detayı**	
Sıcaklık-1		**Tanımlama unsurları**	29 Yüzey
		Sıcaklık	296,15 K
Isıl güç-1		**Tanımlama unsurları**	1 Yüzey
		Isıl güç değeri	**-0,125 W**

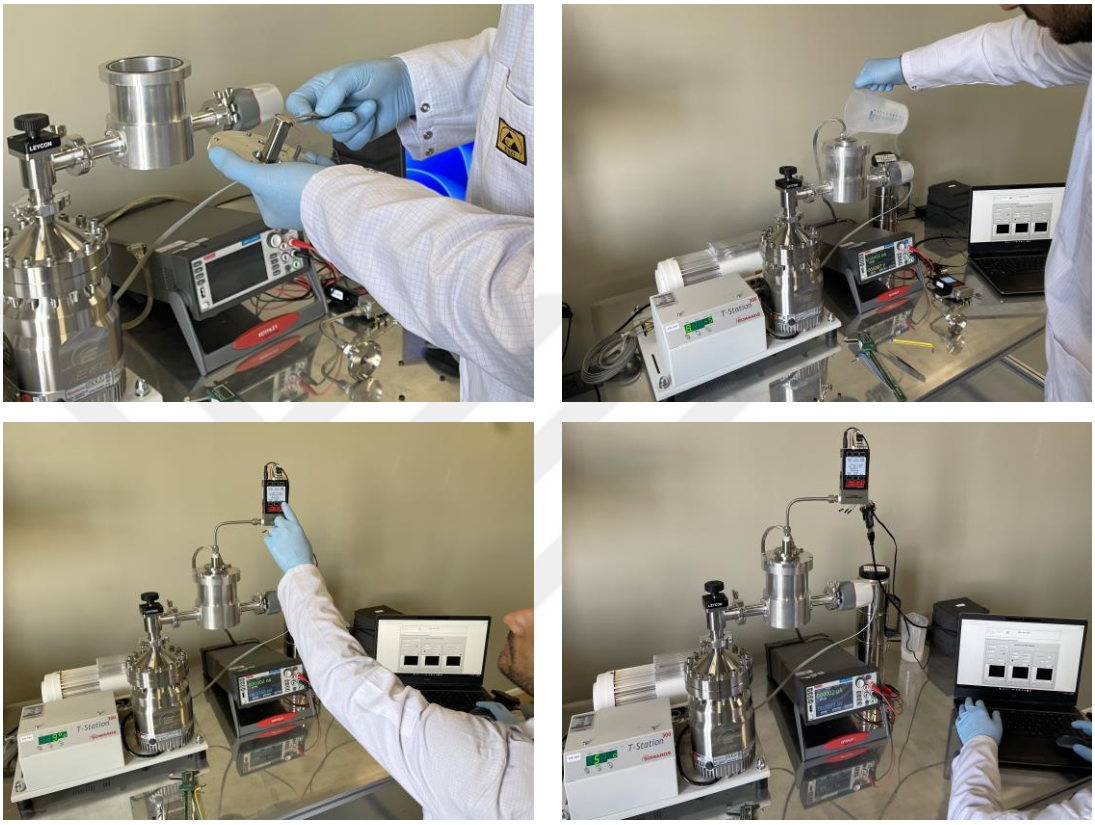
Çizelge 4.7 Soğuk parmak-3 için katı model bilgileri ve analiz sonuçları (devamı)

Mesh			
Mesh tipi		Standard katı mesh	
Otomatik geçiş		Kapalı	
Yüksek kalite mesh için Jacobian noktaları		16 Nokta	
Element ölçüsü		1,08369 mm	
Tolerans		0,0541847 mm	
Mesh kalitesi		Yüksek	
Soğuk parmak-3 analiz sonuçları			
Analiz ismi	**Analiz tipi**	**En düşük**	**En yüksek**
Termal-1	Temperature	79,500 K (Düğüm: 3572)	296,200 K (Düğüm: 5847)
			
SP_100µm_Ti-6Al-4V-Heat load-Thermal-Thermal1			

4.3 Kaynama Testleri

Hermetik konnektör ve soğuk parmak, vakum odası üzerinde yer almaktadır. Soğuk parmak uygun bir O-ring ile kapak merkezindeki açıklığa yerleştirilmektedir. Sinyal uçları hermetik konnektöre lehimlenen sıcaklık sensörü, soğuk parmağın uç kısmına, ısıl iletkenliği 9,2 W/(m·K) olan termal pasta ile yapıştırılmaktadır. Sonrasında vakuma almaya hazır hale gelen vakum odası kapak yapısı, vakum odasına O-ring kullanılarak vidalar ile sabitlenmektedir. Test yazılımı uygulama üzerinden çalıştırılarak, cihazlar ile haberleşme bağlantıları hazır hale getirilmekte ve yazılım üzerinden test başlatılmaktadır. Sonrasında TMP pompa çalıştırılarak, vakum odası içindeki basınç değeri vakum ölçer üzerinden okunmaktadır. En az 10^{-4} torr vakum değeri okunana kadar beklendikten sonra,

sıvı azot tankından alınan LN_2, uygun bir kap ile taşınarak soğuk parmak içerisine doldurulmaktadır. Sıcaklık değerinin düştüğü, bilgisayarda kullanıcı arayüzü üzerinden takip edilmektedir. Bu sürede soğuk parmak içerisindeki LN_2 miktarının buharlaşarak azalması sebebiyle kaynama durana kadar sürekli LN_2 takviyesi yapılmaktadır.



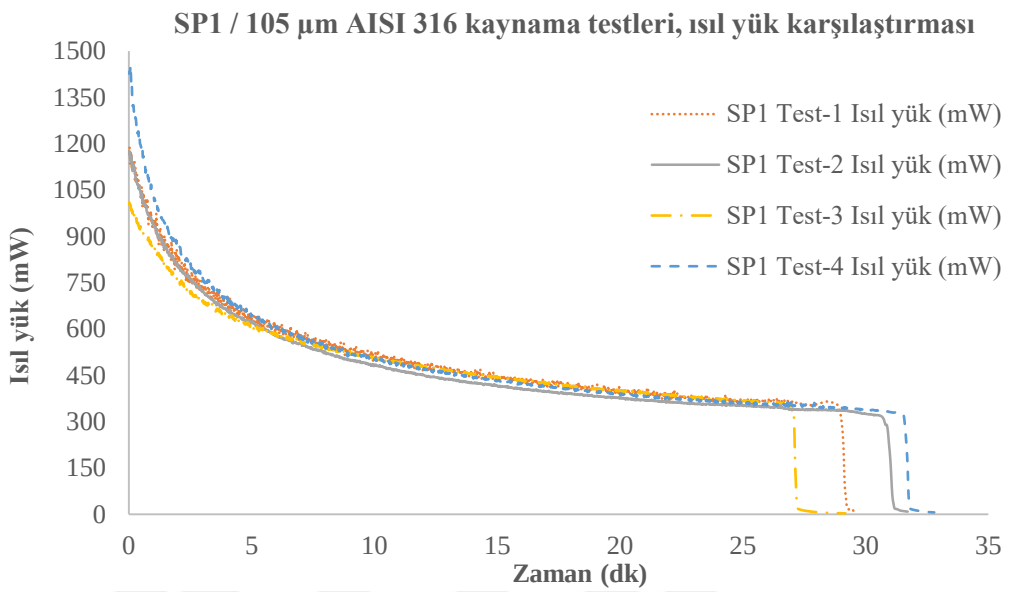
Şekil 4.3 Kaynama testinin faklı aşamalardaki görselleri

Kaynamanın durduğu gözlemlendikten ve sıcaklık ~ 80 K değerine geldikten sonra, gaz geçiş adaptörünün MFM ile bağlantısı yapılmaktadır. Bağlantı sonrasında test arayüzü ve MFM led ekranı üzerinden buharlaşan sıvı azot akış hız değeri okunabilmektedir. Test süresince buharlaşma devam etmekte ve buharlaşma hızı değeri anlık olarak azot yoğunluğu ve buharlaşma entalpisi ile Eşitlik (22)'deki gibi çarpılarak ısıl yük değerleri .csv formatında kaydedilmektedir. Soğuk parmak testleri, soğuk parmağın termal kütlesine bağlı olarak farklı sürelerde tamamlanmaktadır. Kaynama testine ait bazı adımların görselleri Şekil 4.3'te verilmektedir.

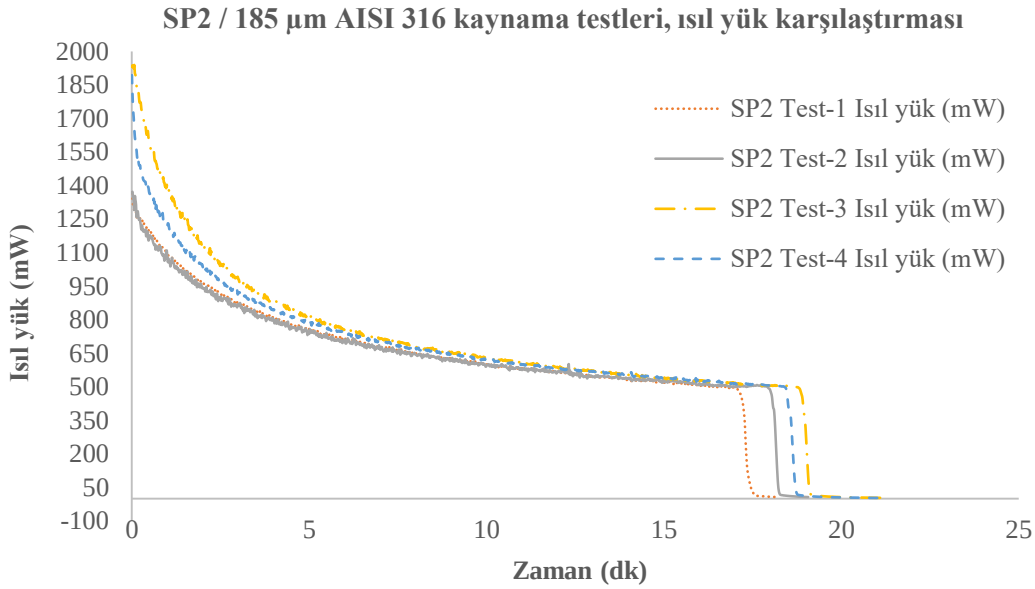
Çizelge 4.8 Tüm soğuk parmaklar ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları

Soğuk parmak-1 (SP_105µm_AISI 316)				
	SP1 / Test-1	**SP1 / Test-2**	**SP1 / Test-3**	**SP1 / Test-4**
Test süresi (dk)	29	31	28	32
Ortalama test sıcaklığı (K)	81,75	80,39	84,5	80,7
Basınç (torr)	3,20E-05	2,90E-05	4,10E-05	3,58E-05
Isıl yük (W)	0,324	0,319	0,337	0,321
Ortalama ısıl yük (W)	**0,325**			
Sapma (W)	0,001	0,006	0,012	0,004
Soğuk parmak-2 (SP_185µm_AISI 316)				
	SP2 / Test-1	**SP2 / Test-2**	**SP2 / Test-3**	**SP2 / Test-4**
Test süresi (dk)	17	18	19	19
Ortalama test sıcaklığı (K)	81,1	82,77	82,93	81,64
Basınç (torr)	5,10E-05	4,60E-05	3,90E-05	2,80E-05
Isıl yük (W)	0,493	0,496	0,492	0,497
Ortalama ısıl yük (W)	**0,495**			
Sapma (W)	0,001	0,002	0,002	0,003
Soğuk parmak-3 (SP_100µm_Ti-6Al-4V)				
	SP3 / Test-1	**SP3 / Test-2**	**SP3 / Test-3**	**SP3 / Test-4**
Test süresi (dk)	39	28	44	42
Ortalama test sıcaklığı (K)	80,43	78,5	78,35	78,43
Basınç (torr)	2,80E-05	5,70E-05	4,40E-05	4,10E-05
Isıl yük (W)	0,262	0,274	0,249	0,248
Ortalama ısıl yük (W)	**0,262**			
Sapma (W)	0,000	0,012	0,013	0,014

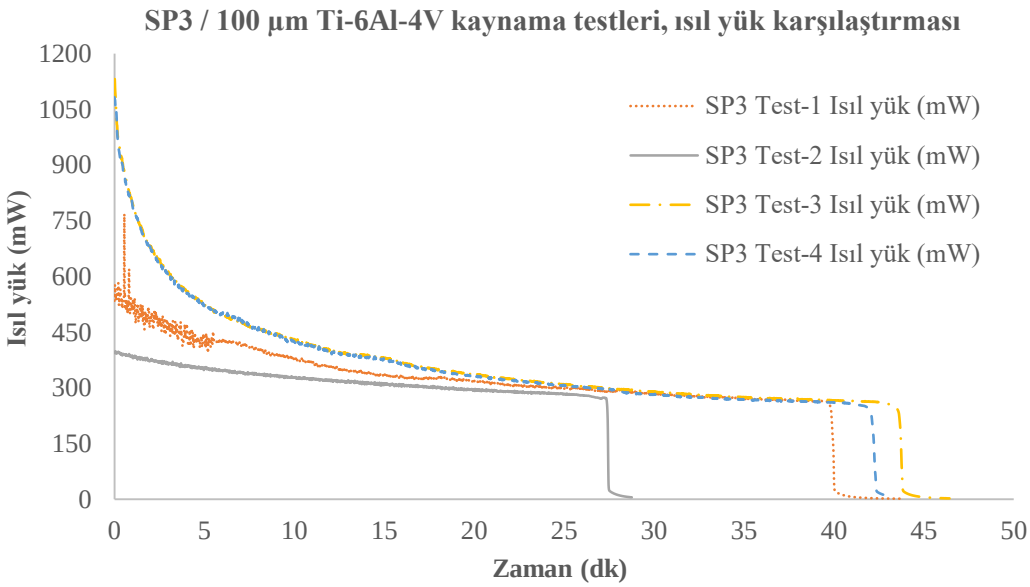
Tüm soğuk parmaklar ile gerçekleştirilen deneysel sonuçlar Çizelge 16'da ve tüm test sonuçları ile çizilen grafikler sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.4 SP1 için gerçekleştirilen ısıl yük a) Test-1 b) Test-2 c) Test-3 d) Test-4



Şekil 4.5 SP2 için gerçekleştirilen ısıl yük a) Test-1 b) Test-2 c) Test-3 d) Test-4



Şekil 4.6 SP3 için gerçekleştirilen ısıl yük a) Test-1 b) Test-2 c) Test-3 d) Test-4

Tüm soğuk parmaklar için yapılan teorik, simülasyon hesaplama sonuçları ve deneysel çalışmaların ortalama değerlerinin karşılaştırmaları Çizelge 4.9'da verilmektedir.

Çizelge 4.9 Teorik, simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılma tablosu

	Teorik toplam ısıl yük (W)	**Teorik toplam ısıl yük sapması (W)**	**Simülasyon toplam ısıl yük (W)**	**Simülasyon toplam ısıl yük sapması (W)**	**Deneysel ortalama ısıl yük (W)**	**Deneysel toplam ısıl yük sapması (W)**	**Genel toplam ısıl yük ortalaması (W)**
SP1	0,361	0,013	0,358	0,01	0,325	0,023	0,348
SP2	0,571	0,027	0,566	0,022	0,495	0,049	0,544
SP3	0,215	0,016	0,215	0,016	0,262	0,031	0,231

SP_105µm_AISI 316 isimli SP1 için yapılan teorik hesaplamalarda; iletim ve ışınımdan kaynaklanan ısıl yük, $q_{SP_1(H-toplam)} = 0{,}361$ W olarak hesaplanmıştır. Sadece iletim için sınır koşulları tanımlanmış simülasyonda çıkan ısıl yük; $q_{SP_1(S-iletim)} =$

0,274 W'tır. Bu değer teorik olarak hesaplanan ışınım ($q_{SP_1(H-ışınım)} = 0{,}084$ W) ile toplandığında, simülasyon ısıl kayıplarının $q_{SP_1(S-toplam)} = 358$ W olacağı ön görülmektedir. Simülasyon ve ısıl yük hesaplarının birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür ve bu durum tüm test edilen soğuk parmaklarda da aynıdır. Kaynama testi ile deneysel olarak elde edilen toplam ısıl yük değerlerinin ortalaması ise; $q_{SP_1(D-ortalama)} = 0{,}325$ W olarak ölçülmüştür. SP1 için teorik, simülasyon ve deneysel sonuçların ortalamadan sapma değerleri sırasıyla; 13 mW, 10 mW ve 23 mW olduğu görülmüştür.

SP2 için gerçekleştirilen testlerde, iletim ve ışınım kaynaklı ısıl yük değerlerinin toplamı, $q_{SP_2(H-toplam)} = 0{,}571$ W olarak hesaplanmıştır. Simülasyon iletim ısıl yük; $q_{SP_2(S-iletim)} = 0{,}482$ W'tır. İletim ısıl yüküne, teorik ışınım ısıl yükü ($q_{SP_2(H-ışınım)} = 0{,}084$W) dahil edildiğinde simülasyon ısıl kayıplarının $q_{SP_2(S-toplam)} = 566$ W'tır. SP2 ile yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen ısıl yük değerlerinin ortalaması ise $q_{SP_2(D-ortalama)} = 0{,}495$ W olarak ölçülmüştür. SP2 için teorik, simülasyon ve deneysel sonuçların ortalamadan sapma değerleri sırasıyla; 27 mW, 22 mW ve 49 mW olduğu görülmüştür.

Soğuk parmak-3 için ise iletim ve ışınım kaynaklı ısıl yük değerlerinin toplamı, $q_{SP_3(H-toplam)} = 0{,}215$ W olarak hesaplanmıştır. Simülasyon iletim ısıl yük; $q_{SP_3(S-iletim)} = 0{,}125$ W'tır. Teorik ışınım ısıl yükü ($q_{SP_3(H-ışınım)} = 0{,}09$ W) diğer parmaklarda olduğu gibi simülasyon iletim değeri ile toplandığında simülasyon ısıl kayıplarının toplamı $q_{SP_3(S-toplam)} = 215$ W'tır. Ti-6Al-4V malzemesinden üretilen SP3 ile yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen ısıl yük değerlerinin ortalaması $q_{SP_3(D-ortalama)} = 0{,}262$ W olarak ölçülmüştür. SP3 için teorik, simülasyon ve deneysel sonuçların ortalamadan sapma değerleri sırasıyla; 16 mW, 16 mW ve 31 mW olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ

Bu yüksek lisans tezi kapsamında; 3 farklı soğuk parmak yapısı üzerinde teorik hesaplama, bilgisayar destekli simülasyon ve kaynama testleri yapılarak ısıl yük değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda testlere tabii tutulan soğuk parmakların ve uç kısımlarına montajlanan sıcaklık sensörü-taşıyıcı seramik yapısının termal kütleleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler birbiri ile karşılaştırılarak malzemelerin ısıl iletkenliklerinin ve et kalınlıklarının ısıl yük üzerine etkileri incelenmiştir. Test işlemi uygulanamayan durumlarda teorik ya da simülasyon işlemleri ile elde edilen verilerin doğruluğu üzerine araştırma yapılmıştır.

Bir soğutmalı kızılötesi dedektör paket yapısının, ısıl yönetimi ve karakterizasyonu oldukça önemlidir. Oda sıcaklığından, dedektörün çalışma sıcaklığına (kriyojenik) kadar sıcaklık değişimini elde edebilmek için gerekli enerji (termal kütle) ve o sıcaklık değerinde tutabilmek için gereken güç (ısıl yük) değerleri oldukça önemlidir. Bu değerler soğutmalı kızılötesi dedektörün ne kadar sürede ne kadar enerjiyle soğutulacağı ve ne kadarlık bir güç ile o sıcaklık seviyesinde ısıl dengede kalacağını belirler.

Dedektör paketleme faaliyetleri sonrasında, vakum sisteminin elde edilip edilemediği oldukça önemlidir. Bu sebeple paketlemeden hemen sonra kaynama testi yapılarak, kapatma işleminde bir kaçak olup olmadığı tespit edilebilir. Paket tasarımı yapılırken belirlenen alt parça malzemeleri, ölçüleri gibi bilgiler kullanılarak teorik olarak ısıl yük hesaplanır ve paketleme süresince yapılan kaynama test sonuçlarının da hesaplanan bu değerle tutarlı olması beklenir. Paket kapatma işleminden sonra ise paket yapısının içerisinde herhangi bir vakum ölçer bulunmadığı için vakum seviyesi kaynama testi ile tespit edilebilir. Örneğin, paket yapısında sızıntı olması durumunda yapı içerisindeki vakum bozulacağı ve dolayısıyla içerisine hava gireceği için paket içerisindeki ısı geçiş mekanizmalarına taşınım da eklenecektir. Bu durumda dış cidarlardaki ısı, içeriye sızan hava sebebiyle soğutulmaya çalışılan yüzeye aktarılacaktır ve soğutmak için gereken enerji ihtiyacı artacaktır. Sonuç olarak daha düşük ısıl yüke sahip olması beklenen paket yapısının ısıl yük değeri ciddi oranda artacaktır.

Tez çalışması çıktıları karşılaştırıldığında; teorik, simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları kendi içlerinde değerlendirildiğinde sonuçlar oldukça tatmin edicidir. Deneysel çalışmalar incelendiğinde; SP1, SP2, SP3 için yapılan testlerden elde edilen sonuçların en fazla 49 mW ortalama sapma değeri tespit edilmiştir. Hazırlanan kaynama test düzeneğinin stabil olarak çalıştığı (testlerin tekrarlandığında sonuçların tutarlı olması) görülmüştür ve kendi içinde tutarlı olan sonuçlar almak mümkündür.

Isıl yük üzerine yapılan simülasyon hesaplamalarında; mevcut test ortamının karmaşık geometrik yapısı ve literatür taramasında, SP3 malzemesinin (Ti-6Al-4V) kriyojenik sıcaklıklardaki yayıcılık değeri, yüzey pürüzlülüğü gibi özgün parametreleri ile ilgili yeterli kaynak bulunamaması sebebiyle ışınım analizi için gerekli sınır koşulları belirlenememiştir. Bu sebeple simülasyon çalışmalarında ışınımdan kaynaklanan ısıl kayıplar hesaplanamamıştır fakat iletim için yapılan teorik ve simülasyon hesaplarının karşılaştırması sonucunda; iletim değerlerinin teorik ve simülasyon sonuçlarının birbiri ile çok yakın olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak teorik ışınım hesaplarının, simülasyon ile yapılacak ışınım hesaplarına yakın çıkacağı ön görülmektedir. Bu sebeple teorik ışınım ısıl yükü, simülasyon ile yapılan iletim hesaplarına eklenerek simülasyon toplam ısıl yükü tahmin edilmiştir.

Teorik ve simülasyon hesaplamaları birbiriyle karşılaştırıldığında tüm soğuk parmaklar için sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Kaynama testleri ile elde edilen deneysel ısıl yük değerlerinin ise SP1 ve SP2 için teorik ve simülasyon değerlerinden daha düşük olacak şekilde farklılık gösterdiği, SP3 için ise deneysel sonuçların teorik olarak hesaplanandan yüksek çıktığı görülmüştür.

Sapmanın sebebinin teorik ve simülasyonda kullanılan yayıcılık ve ısıl iletkenlik katsayılarının, gerçek ürün malzemesiyle aynı olmamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, deney düzeneğinde soğuk parmak yapısına LN_2 doldurulduktan sonra SP'ler ısıl dengeye geldiğinde, etkin kaynama (baloncuk oluşacak şekilde) durmaktadır. Bu aşamadan sonra LN_2, SP'lerin sahip olduğu ısıl yük sebebiyle zamanla buharlaşmakta ve SP ısı köprüsünün sıcaklığı zamanla artmaktadır. Dolayısıyla teorik ve simülasyonda sabit olarak belirlenen (50 mm) soğuk parmak ısı köprüsü yüksekliği de

deneysel ortamda zamanla değişmektedir (50 mm → 0 mm). Bu durum gerçekte ısı geçişinin karmaşıklaşmasına sebep olmaktadır. Sonuçlara bakıldığında görülen sapmanın bu sebeplerden dolayı olabileceği düşünülmektedir. Oldukça düşük kriyojenik seviyelerde soğutulmaya ihtiyaç duyan soğutmalı dedektör paket yapıları için bu değerler kabul edilemeyebilir. Soğutmalı sistemler için paket yapılarının ısıl yönetimleri yapılırken, 5-10 mW seviyelerinde değişimlerin çok kritik olduğu bilinmektedir. Bu sebeple eğer teorik hesaplama ya da simülasyon yapılacak ise öncesinde parçanın termal ve fiziksel özelliklerinin test edilerek belirlenmesi, başlık 4.1'de bahsedilen 'diğer kayıplar' dahil edilmesi daha doğru sonuç alınmasını sağlayacaktır. Soğuk parmakların ısıl iletkenlik, özgül ısı, yüzey pürüzlülüğü, yayıcılık gibi kendi malzeme yapılarına özgü değerleri; literatür taraması ile belirlenmek istendiğinde beklenen sonuçlarda sapmalar olduğu görülmüştür. Bu sebeple tez çalışmasında gerçekleştirilen kaynama testi yerine teorik veya simülasyon kullanılması planlandığında; test edilmesi planlanan soğuk parmakların ya da farklı parçaların kriyojenik ortamlardaki fiziksel, termal özelliklerini referanslama yoluyla belirlemek yerine uygun test sistemleri kurarak ölçmek daha doğru olacaktır.

Birden fazla bilinmezin olduğu kaynama testlerine alternatif olarak, son dönemde çalışmaları bulunan, ısıtma testleri de tercih edilebilir. Isıtma testi, vakum odası içerisinde soğutulan soğuk parmakların kontrollü bir şekilde ısıtılması ile gerçekleştirilen bir dizi testlerden oluşmaktadır.

Bu tez çalışması sayesinde, büyük geometriye sahip, toleransı nispeten daha yüksek cihazların ısıl yüklerinin belirlenmesinde, teorik hesaplamalar ve kaynama testlerinin birbiriyle tutarlı olacağı düşünülmektedir. Düşük seviyelerde ısıl yükü olması beklenen, hassas ısıl yönetim isteyen sistemlerde ise kaynama testinin ısıl yükü bilinen başka bir test ile doğrulanması ya da farklı bir yönteme gidilmesi daha doğru olacaktır.

Sonuç olarak, soğuk parmakların tasarım faaliyetleri esnasında yapılan teorik hesaplamaların, üretilen ürünün gerçek ısıl yük değeri için mantıklı bir sonuç verdiği görülmüştür. Kaynama test düzeneği ile yapılan tüm testler kendi içlerinde oldukça düşük farklılıklar ile tekrarlanabilmektedir fakat teorik ve simülasyon sonuçlarının, deneysel

sonuçlar ile sapma göstermesi sebebiyle kaynama test sisteminin sonuçlarının doğrulanması gerekmektedir. Bunun için ise kaynama testi yapılırken, ilk olarak örnek bir soğuk parmak; tez çalışmasındaki düzenek ile test edilerek ısıl yük sonucu not edilir. Takip eden testte ise sıcaklık sensörünün montajlandığı taşıyıcı seramik üzerine yüzey montaj, mikro paket yapılı dirençler koyulabilir ve belirli (bilinen) seviyede harici bir ısıl yük verilerek bir önceki test sonuçlarıyla karşılaştırma yapılabilir. Bu durumda tez çalışmasında hassasiyeti doğrulanamayan kaynama test sonuçları doğrulanacaktır.

KAYNAKLAR

Abraham, P. 2019. LYNRED-Infrared imaging solutions and challenges. EPIC World Photonic Technology Summit, Berlin.

Arslan, Y. 2014. High performance focal plane array technologies from short to long wavelength infrared bands. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Ankara.

Asar, T. 2014. InGaAs kızılötesi fotodedektör üretimi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fizik, Ankara.

Bartsch, K., Herzog, D. 2021. Material modelling of Ti–6Al–4V alloy processed by laser powder bed fusion for application in macro-scale process simulation. Materials Science & Engineering A, Germany.

Baudouy, B. 2015. Heat transfer and cooling techniques at low temperature. CAS- CERN Accelerator School: Superconductivity for Accelerators, pp. 329-352, France.

David, E. 2003. Materials for cryogenics applications. Research National Institute for Cryogenics&Isotopic Technologies, AMME, Romania.

Doğdu, M. F. 2013. Termoelektrik soğutucuların performansına doğrudan temaslı ısı değiştiricilerin etkilerinin deneysel incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Eker, S., U. 2010. Single and dual band quantum well infrared photodetector focal plane arrays on InP substrates. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Ankara.

Fluke, 2007. Emissivity values of common materials. USA.

Frolec, J., Kralik, T. 2019. Overview of thermal radiative properties of materials for cryogenics. Institute of Scientific Instruments of the Czech Academy of Sciences. European Cryogenics Days, Sweden.

Gibson, C. 2008. Mechanical integration of an IR-detector in a microcooler. Master Thesis, KTH, Industrial Engineering and Management Machine Design, Sweden.

Han, Y. and Zhang, A. 2022. Cryogenic technology for infrared detection in space. scientific reports. Shanghai Ocean University, China.

Incropera, F. P., Dewitt, P. D., Bergman, T. L. And Lavine, A. S. 2007. Fundamentals Of Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons, p. 2, USA.

Jain, A. and Banerjee, A. 2012. Development of state-of-the-art characterization test bench for integrated detector dewar cooler assembly based infrared focal plane arrays. ISPTS-1, India.

Kreith, F., Manglik, R. M. and Bohn, M. S. 2011. Principles of Heat Transfer, Seventh Edition. Cengage Learning, pp. 9-21, USA.

Laycook, D. and Powell, W. 1988. Assessment of the Philips USFA BV 7 mm cooling engine. Procurement Executive, Ministry of Defense. UK.

Lienhard, J. H. 2019. A heat transfer textbook. Fifth Edition. Phlogiston Press. p. 565. USA.

Marquardt, E.D., Le, J.P., and Radebaugh R. 2000. Cryogenic material properties database. National Institute of Standards and Technology Boulder. Presented at the 11th International Cryocooler Conference, Keystone.

Özbay, S. 2011. Thermal analysis of stirling cycle regenerators. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği, Ankara.

Radebaugh, R. 2000. Pulse tube cryocoolers for cooling infrared sensors. National Institute of Standards and Technology, USA.

Ravindra, N. M., Jariwala, B., Banobre, A., Maske, A. 2018. Thermoelectrics Fundamentals, Materials Selection, Properties, and Performance, p. 2, USA.

Rogalski, A. 2010. Infrared Detectors, Section Edition. CRC Press, p. 10, 34, USA.

Rogalski, A. 2012, a. Progress in focal plane array technologies, Review. Elsevier, Warsaw, Poland.

Rogalski, A. 2012, b. History of infrared detectors. Opto-electron. pp., 279–308. Warsaw, Poland.

Ross, R. G. 2016. Refrigeration systems for achieving cryogenic temperatures. CRC Press, USA.

SAES. 2007. Sintered Porous Getters Katalog. Italy.

Sharma, U. 2004. Infrared Detectors. M. Tech Credit Seminar Report, Electronic Systems Group, EE Department, Bombay.

Simon, N., J. 1994. Cryogenic Properties of Inorganic Insulation Materials for ITER Magnets, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, USA.

Teledyne FLIR. The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals.

Tumkaya, U. 2003. Performance assessment of indium antimonide photodetectors on silicon substrates. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik, Ankara.

Tummescheit, H., Tuszynski, K., Arnold, P. 2008. Simulation of peak stresses and bowing phenomena during the cool down of a cryogenic transfer system. Modelon AB, Sweden.

Veprik, A., Shlomovich, B. and Tuito, A. 2015. Warm-up calorimetry of Dewar-Detector Assemblies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 101, USA.

Vincent, J. D., HODGES E. S. 2015. Fundamentals of Infrared and Visible Detector Operation and Testing, Second Edition. John Wiley & Sons Inc., New Jersey.

Web sitesi: https://ankara.mgm.gov.tr/sondurum/turkiye.aspx Erişim Tarihi: 14.01.2023.

Web sitesi: https://cryocoolers.eu/joule-thomson-cryocoolers-actively-controlled/ Erişim Tarihi: 18.12.2022.

Web sitesi: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation Erişim Tarihi: 18.12.2022.

Web sitesi: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum Erişim Tarihi: 15.01.2023.

Web sitesi: https://insidegnss.com/understanding-cryocooled-infrared-system-reliability/ Erişim Tarihi: 24.11.2022.

Web sitesi: https://ourworldindata.org/grapher/cost-space-launches-low-earth-orbit Erişim Tarihi: 23.01.2023.

Web sitesi: https://thermalbook.wordpress.com/how-does-a-thermoelectric-cooler-tec-work/ Erişim Tarihi: 18.12.2022.

Web sitesi: https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/materialproperties.htm Erişim Tarihi: 06.01.2023.

Web sitesi: https://www.ametekinterconnect.com/products/hermetic-packages/ceramic-htcc Erişim Tarihi: 24.11.2022.

Web sitesi: https://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html Erişim Tarihi: 02.01.2023.

Web sitesi: https://www.lynred-usa.com/products/vga-resolution-cooled/scorpio-mw-infrared-detector-idca.html Erişim Tarihi: 14.01.2023.

Web sitesi: https://www.matweb.com/ Erişim Tarihi: 18.12.2023.

Web sitesi: https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/astp.html Erişim Tarihi: 23.01.2023.

Web sitesi: https://www.nicoform.com/index.cfm?Page=Infrared-Radiation-Shields Erişim Tarihi: 23.01.2023.

Web sitesi: https://www.thalesgroup.com/en/markets/market-specific-solutions/cryogenics-activities Erişim Tarihi: 15.01.2023.

Willems, D., Garcia, S., Arts, R., Ligtenberg, K., and Vasse C. 2018. Theoretical and experimental analysis of dewar thermal properties. Thales, SPIE-DCS, 2019.

Wlodek, T. 2017. Analysis of boil-off rate problem in liquefied natural gas (LNG) receiving terminals. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 214, Krakow.

Yelboğa, T. 2012. InP tabanlı kuantum kuyulu kızılötesi dedektör dizinlerinin fabrikasyonu ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.