

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN ISIL VE ELEKTRİKSEL
ÇIKIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT ÖZTÜRK

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2021

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN ISIL VE ELEKTRİKSEL
ÇIKIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT ÖZTÜRK

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2021

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

MERT ÖZTÜRK

ÖZET

TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN ISIL VE ELEKTRİKSEL ÇIKIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT ÖZTÜRK

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MEHMET FEVZİKÖSEOĞLU)

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2021

Çalışmada, ticari anlamdaki termoelektrik soğutucu modüllerin (TES) ısıl ve elektriksel performanslarını tespit etmek adına tekrarlanabilirliği ve ölçüm hassasiyeti yüksek olan bir ölçüm düzeneği geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla TES modülün termal ve elektriksel çıkış parametreleri deneysel olarak tespit edebilecek bir ölçüm düzeneği tasarlanmış ve düzenek ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Testi yapılan TES modülün, deneysel çıkış parametreleri ideal denklemler yöntemiyle çözümlenerek malzeme özellikleri ve etkin malzeme özellikleri bulunmuştur. Geliştirilen ölçüm düzeneğinin tasarımında SOLIDWORKS programı, yazılım ve algoritma oluşturulmasında ise C# dili kullanılmıştır. Isıl parametre verilerinin elde edilmesinde ise ısı transferi hesaplamaları ve bu hesaplar doğrultusundaki deney şartlarını sağlayacak test ortamı yapılmıştır. Deneysel ısıl parametre verilerinin işlenmesinde ise kararlı rejim sıcaklıklarını ve o değerdeki parametreleri tespit eden Arduino ve C# yazılımları geliştirilmiştir. Ölçüm düzeneğinin testleri C# form uygulaması üzerinden geliştirilen program aracılığı ile yapılmaktadır. Tez kapsamında P&N marka TES modülün çıkış parametreleri geliştirilen ölçüm düzeneği ile ölçülüp üretici verileri ile karşılaştırılmıştır. Test edilen TES modül için üreticinin sunduğu çıkış parametreleri ile ölçüm düzeneğinde ölçülen değerlerin kabul edilebilir seviyelerde uyduğu gözlemlenmiştir. TES modülün malzeme özellikleri ve etkin malzeme özellikleri de ayrıca test esnasında ölçülmüştür. Bu çalışmada tasarlanan ölçüm düzeneği ile TES modül geliştiricileri ve kullanıcılar için TES modüllerin tasarımı yapılabilmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Termoelektrik, Termoelektrik Soğutucu Modül, Etkin Malzeme Özellikleri, Ölçüm Düzeneği

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL AND ELECTRICAL OUTPUT PARAMETERS OF THERMOELECTRIC MODULES

MSC THESIS

MERT OZTURK

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: PROF. DR. MEHMET FEVZİ KOSEOĞLU)

DENİZLİ, AUGUST 2021

In this study, research to develop a measurement setup with high repeatability and measurement precision in order to determine the thermal and electrical performances of commercial thermoelectric cooler modules (TEC). For this purpose, a measurement device that can experimentally determine the thermal and electrical output parameters of the TEC module has been designed and measurements have been tested out with the device. Experimental output parameters of the tested TEC module were solved using the ideal equations method, and material properties and effective material properties were found. SOLIDWORKS program was used in the design of the developed measuring types of equipment, and C# language was used in the creation of the software and algorithm. In obtaining the thermal parameter data, heat transfer calculations and a test environment that will provide the experimental conditions in line with these calculations were made. Tests of the measuring setup are made through the program developed over the C# form application. Within the scope of the thesis, the output parameters of the P&N brand TEC module were measured with the developed measuring setup and compared with the manufacturer's data. It has been observed that the output parameters offered by the manufacturer for the tested TEC module and the values measured in the measuring setup agree at acceptable levels. The material properties and effective material properties of the TEC module were also measured during the test. With the measurement setup designed in this study, TES modules can be designed for TES module developers and users.

KEYWORDS: Thermoelectric, Thermoelectric Cooler Module, Effective Material Properties, Measuring Device

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	1
ABSTRACT	2
İÇİNDEKİLER	3
ŞEKİL LİSTESİ.....	5
TABLO LİSTESİ	7
SEMBOL LİSTESİ	8
ÖNSÖZ.....	10
1. GİRİŞ.....	11
1.1 Tezin Amacı	11
1.2 Termoelektrik Modülün Tarihçesi ve Uygulamaları.....	12
1.3 Literatür özeti	15
2. TERMOELEKTRİK ETKİLER VE TERMOELEKTRİK SİSTEMLER 21	
2.1 Termoelektrik Etkiler	21
2.1.1 Seebeck Etkisi.....	21
2.1.2 Peltier Etkisi.....	22
2.1.3 Thomson Etkisi	23
2.1.4 Thomson (Kelvin) İlişkisi.....	24
2.1.5 Nernst ve Ettinghausen Etkileri	24
2.1.6 Joule Etkisi.....	25
2.2 Termoelektrik Sistemler	25
2.2.1 Yarı İletkenler ve Band Diyagramları	25
2.2.2 Termoelektrik Modül ve Soğutucu Olarak Kullanımı	28
3. TERMOELEKTRİK MODÜL PARAMETRELERİ ve	
PARAMETRELERİN ELDE EDİLME YÖNTEMLERİ	31
3.1 TES Modül Parametrelerinin Matematiksel Modellenmesi	31
3.2 Harman Yöntemini Temel Alan Elde Edilme Yöntemleri	32
3.3 İdeal Denklemlerin Temel Alındığı Elde Edilme Yöntemleri	35
3.3.1 TES Modülün Maksimum Parametreleri	39
3.3.1.1 Maksimum akım (I_{max}).....	39
3.3.1.2 Maksimum sıcaklık farkı (ΔT_{max})	40
3.3.1.3 Maksimum Soğutma Yüğü (\dot{Q}_{Cmax})	40
3.3.1.4 Maksimum Voltaj V_{max}	40
3.3.2 Normalleştirilmiş parametreler	40
3.3.3 TES Modülün Etkin Malzeme Özellikleri	42
3.4 TES Modülün Çıkış Parametrelerinin Elde Yöntemleri.....	43
3.4.1 Ahıska Yöntemi	43
3.4.2 RMT Firmasının Kullandığı Elde Etme Yöntemleri	46
3.4.3 Test Düzeneginde Kullanılacak Elde Yöntemi.....	49
4. ÖLÇÜM DÜZENEGİ TASARIMI.....	52
4.1 Tez Düzeneginin Genel Mekanik Yapısının Tasarımı	53
4.2 Test Düzeneginin Termal Analizi ve Mekanik Tasarımı	61
4.2.1 Test Düzeneginin Termal Analizleri.....	62
4.2.2 Ölçüm Düzenegi Mekanik Tasarımı.....	69

4.2.2.1	Test Düzeneği Mekanik Tasarımda Kullanılan Şase Bölümü Parçaları	70
4.2.2.2	Test Düzeneği Mekanik Tasarımda Kullanılan “A-200” ve “A-300” Kodlu Parçalar	72
4.2.2.2.1	Soğutucu Bloğun Yerleşimi	73
4.2.2.2.2	Harici Isıtma Elemanlarının Yerleşimi	75
4.2.2.3	Veri Köprüleme Parçaları ve Yerleşimleri	76
4.2.2.4	Elektronik Parçalar ve Yerleşimleri	79
4.2.2.5	Tesisat Ekipmanları ve Yerleşimleri	82
4.3	Test Düzeneğin Elektriksel ve Elektronik Yapısı	87
4.3.1	Arduino Tabanlı Kontrol Birimi	88
4.3.2	Programlanabilir SMPS Güç Kaynağı	90
4.3.3	Elektronik Komponentler	91
4.3.3.1	Röle	91
4.3.3.2	Akım Sensörü	93
4.3.3.3	Voltaj Sensörü	94
4.3.3.4	Sıcaklık Sensörü	95
4.3.3.5	Solenoid Vana	97
4.4	Düzeneğin Algoritması	98
4.4.1	Kararlı Rejimdeki Denge Sıcaklık Farkının Bulunması	98
4.4.2	TES Modül Voltajının Belirlenmesi	99
4.4.3	Harici Isıl Yük Voltajının Belirlenmesi	101
4.5	Test Düzeneğin Ölçüm Yazılımı	101
4.5.1	TES Modülün Çıkış Parametreleri Eldesi İşlemleri	102
4.5.2	Malzeme Özellikleri Ve Etkin Malzeme Özelliklerin Belirlenmesi	105
4.6	TES MODÜLÜN ÇIKIŞ PARAMETRELERİNİN ÖLÇÜMÜ	109
4.6.1	Ölçü Aletleri ve Test Ekipmanlarının Kalibrasyonu	109
4.6.2	Belirsizlik Analizi	111
4.6.3	ΔT_{max} , I_{max} ve V_{max} Parametrelerin Elde Edilmesi	112
4.6.4	Q_{cmax} ve Malzeme Özellikleri Ve Elde Edilmesi	117
5.	SONUÇ VE BULGULAR	122
6.	KAYNAKÇA	124
7.	EKLER	128
8.	ÖZGEÇMİŞ	137

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Termoelektriğin Tarihçesi	15
Şekil 2.1: Klasik Seebeck etkisi uygulaması (Lee 2017)	21
Şekil 2.2: Seebeck etkisi (Lee 2017)	22
Şekil 2.3: Peltier etkisi ve Thomson etkisi (Lee 2017).....	22
Şekil 2.4: Peltier Etkisi, TE Soğutma (Rowe, D.M, 2006).....	23
Şekil 2.5: Enerji Band Diyagramı (H.J.Goldsmid 2009).....	26
Şekil 2.6: Enerji Band Diyagramları (a) yalıtkan, (b) yarı iletken, (c) n-tipi yarıiletken, (d) p-tipi yarıiletken (H.J.Goldsmid 2009)	27
Şekil 2.7: Fermi Fonksiyonunun Sıcaklığa Bağlı Değişimi (H.J.Goldsmid, 2009) 28	
Şekil 2.8: p ve n tipi Elemanların Elektrik ve Isı İletimi Mekanizması (https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers- intro.html).....	29
Şekil 2.9: p ve n tipi Elemanların Elektrik ve Isı İletimi Mekanizması (https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers- intro.html).....	30
Şekil 2.10: Termoelektrik Soğutucu Modül ve Bileşenleri (https://www.tec- microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers-intro.html)	30
Şekil 3.1: p ve n tipi ısı çift şematik gösterim (H.J.Goldsmid 2009)	31
Şekil 3.2: TES modül uçlarında görülen transient geriliminin zamana bağlı grafiği (Buist, ve diğ. 1992).....	34
Şekil 3.3: p ve n tipi termoelemanndan oluşan te soğutucu (Lee 2017).....	37
Şekil 4.1: Tez düzeneği genel izometrik gösterimi	54
Şekil 4.2: Ölçüm düzeneği yönetim paneli.....	55
Şekil 4.3: A-112 kapağı tesisat kısmına ait görünümün yer aldığı görünüş	56
Şekil 4.4: A-111 pano müdahale kapağı dıştan patlak görünüm	57
Şekil 4.5: Kapalı çevrim genel kontrol döngü diyagramı.....	57
Şekil 4.6: \dot{Q}_{cmax} ve ΔT_{max} değerlerinin limit değer altında gösterimi.....	62
Şekil 4.7: Harici ısı yükün ısı transferinin hesaplanması görseli	66
Şekil 4.8: Soğutucu blok teknik resmi görseli	68
Şekil 4.9: Yönetim paneli ekranı detay görüntüsü.....	69
Şekil 4.10: Yönetim paneli kesit görüntüsü.....	69
Şekil 4.11: Tesisat müdahale kısmı detay görüntüsü	70
Şekil 4.12: Tesisat müdahale kısmı gerçek görüntü	70
Şekil 4.13: (a) Soldaki şekilde gri renkli izolasyonun bulunduğu tasarımda görüntü, (b) sağdaki şekilde uygulamadan görüntü	73
Şekil 4.14: Bakır ısı transferi plakasının (A-204) test ortamında kalan kısmı 74	
Şekil 4.15: Soğutma sistemi ekipmanlarının yerleşimi	74
Şekil 4.16: Soğutucu Alüminyum bloğun görseli.....	75
Şekil 4.17: Harici ısıtma elemanları teknik resim görseli.....	76
Şekil 4.18: Harici ısıtma elemanları görseli	76
Şekil 4.19: Arduino uno ölçülerinin görseli	77
Şekil 4.20: Arduino mega ölçülerinin görseli.....	77
Şekil 4.21: Arduino Uno ve Mega'nın panoya yerleşimleri.....	78
Şekil 4.22: Pano bölümü görüntüsü tasarım	78
Şekil 4.23: Pano bölümü görüntüsü gerçek	79

Şekil 4.24: Donanım kutusu tasarım görseli.....	79
Şekil 4.25: A-400-M01 numaralı donanım kutusu dıştan görünümü.....	80
Şekil 4.26: Donanım Haznesi Pinleri.....	81
Şekil 4.27: Donanım kutusu, pano bölümü ve soğutucu blokların yerleşiminin görüntüsü.....	82
Şekil 4.28: Sistem giriş ekipmanları.....	83
Şekil 4.29: Soğutma Suyu Devir Daim Sistemi	84
Şekil 4.30: Su pompası	84
Şekil 4.31: Bourdon tüplü manometre.....	85
Şekil 4.32: Aitcool VP215 çift kademeli yağlı vakum kompresörü.....	85
Şekil 4.33: Vakum esnasındaki düzenek basıncı.....	86
Şekil 4.34: Tesisat bağlantısı ve yönetim paneli	86
Şekil 4.35: Tesisat bağlantısının tesisat kapağından görünümü	87
Şekil 4.36: Donanım elektronik blok diyagramı.....	88
Şekil 4.37: Bootload belleği görseli.....	89
Şekil 4.38: Meanwell CH50 Bağlantısı	91
Şekil 4.39: Çıkış gerilimi grafiği görseli	91
Şekil 4.40: Röle bobin görseli (https://components101.com/switches/5v-single-channel-relay-module-pinout-features-applications-working-datasheet)	92
Şekil 4.41: Tek kanallı SONGLE marka 10A röle içeren role kartı.....	92
Şekil 4.42: Röle kartına ait devre şeması.....	92
Şekil 4.43: Hall-Effect prosedürü	93
Şekil 4.44: ACS-712 akım sensörü.....	93
Şekil 4.45: ACS-712 akım sensörü devre şeması	93
Şekil 4.46: Gürültü filtreleme kapasitesi (CF) grafiği.....	94
Şekil 4.47: Voltaj sensörü.....	94
Şekil 4.48: Voltaj sensörü devre şeması	95
Şekil 4.49: Sıcaklık çözünürlük konfigürasyonu.....	96
Şekil 4.50: DS18B20 sıcak sensörünün veri işleyiş mekanizması	96
Şekil 4.51: Devredeki haberleşme ve zaman grafiği	97
Şekil 4.52: DS18B20 sensörünün Arduino üzerinden haberleşme devresi	97
Şekil 4.53: Selenoid vana görseli	98
Şekil 4.54: Giriş ekranı arayüzü	102
Şekil 4.55: ΔT_{max} testi arayüzü ekranı	103
Şekil 4.56: \dot{Q}_{cmax} testi arayüzü ekranı	104
Şekil 4.57: Malzeme özellikleri testi arayüzü.....	106
Şekil 4.58: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $T_c = f(I_{TES})$ grafiği.....	113
Şekil 4.59: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $T_c = f(V_{TES})$ grafiği.....	114
Şekil 4.60: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $T_c = f(W)$ grafiği.....	115
Şekil 4.61: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $\Delta T = f(I_{TES})$ grafiği.....	116
Şekil 4.62: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $V_{TES} = f(I_{TES})$ grafiği.....	117
Şekil 4.63: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $Q_c = f(\Delta T)$ grafiği.....	118
Şekil 4.64: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $Q_c = f(\Delta T)$ grafiği.....	119
Şekil 4.65: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $COP = f(I_{TES})$ grafiği.....	120
Şekil 4.66: TES1-127025 TES modülüne ilişkin malzeme özelliği hesaplanması	121

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: İdeal denklem kabulleri	36
Tablo 4.1: Test düzeneğinin genel özellikleri	58
Tablo 4.2: Test düzeneğinin doğrudan ölçümünü yapabildiği parametreler....	59
Tablo 4.3: Test düzeneğinin dolaylı olarak ölçümünü yapabildiği parametreler	60
Tablo 4.4: p&n marka tes modül çıkış parametreleri.....	63
Tablo 4.5: Harici ısıtıcı HL-00580(KQ)-E-0 teknik özellikler	64
Tablo 4.6: Test düzeneği tasarımın “a-100” grubu parça ve işlem tanımları...	71
Tablo 4.7: Arduinio Uno ve Mega teknik özellikleri (https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3 , https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3).....	90
Tablo 4.8: Test düzeneğinin doğrudan ölçümünü yaptığı parametrelerin eldesi	106
Tablo 4.9: Test düzeneğinin dolaylı ölçümünün yapıldığı parametrelerin eldesi	108
Tablo 4.10: Gerilim kalibrasyon tablosu	110
Tablo 4.11: Sıcaklık kalibrasyon tablosu	111
Tablo 4.12: TES modül parametreleri belirsizlik tablosu	112
Tablo 4.13: TES1-127025 üretici verisi ile ölçüm düzeneği sonuçları karşılaştırması	119

SEMBOL LİSTESİ

A	:	Alan (m^2)
A_n	:	n-tipi yarı iletken malzemenin kesit alanı (m^2)
A_p	:	p-tipi yarı iletken malzemenin kesit alanı (m^2)
c	:	Özgül ısı ($J/kg \cdot ^\circ C$)
COP	:	Performans katsayısı
E	:	TES modül tarafından üretilen termoemk
E_{max}	:	TES modül tarafından üretilen maksimum termoemk
I	:	TES modül akım (A)
I_{max}	:	TES modül maksimum akım (A)
k	:	Isı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
k_n	:	n-tipi yarı iletken ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
k_p	:	p-tipi yarı iletken ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
K	:	Isıl iletkenlik (W/K)
k*	:	Efektif ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
KB	:	Kilobayt
L	:	Kanat uzunluğu (m)
L_c	:	Karakteristik uzunluk (m)
L_n	:	n-tipi yarı iletken malzemenin bacak uzunluğu (m)
L_p	:	p-tipi yarı iletmen malzemenin bacak uzunluğu (m)
MHz	:	Megahertz
N	:	Isıl çift sayısı
\dot{Q}	:	Birim zamandaki ısı transferi (W)
\dot{Q}_c	:	Soğuk yüzeyden çekilen ısı hızı (W)
\dot{Q}_{cmax}	:	Birim zamandaki maksimum soğutma yükü (W)
\dot{Q}_{conv}	:	TES modülün konvansiyonel dış ısı yükü (W)
\dot{Q}_{heater}	:	TES modülün soğuk yüzeyine uygulanan toplam ısıl yük
\dot{Q}_{heat}	:	TES modülün soğuk yüzeyine uygulanan net ısıl yük
$\dot{Q}_{Peltier}$:	Peltier ısısı (W)
\dot{Q}_{rad}	:	TES modülün radyasyonla olan ısı transferi (W)
$\dot{Q}_{Thomson}$:	Thomson ısısı (W)
R	:	Elektrik direnci (Ω)
R_m	:	N çift için modül elektriksel iletkenliği (Ω)
T_H	:	TES modülün sıcak yüzey sıcaklığı (K)
T_C	:	TES modülün soğuk yüzey sıcaklığı (K)
T_{cmin}	:	TES modülün soğuk yüzeyinin en düşük sıcaklığı (K)
T_w	:	Soğutm suyu sıcaklığı (K)
T_{yal}	:	Yalıtım sıcaklığı (K)
T_{amb}	:	Çevre sıcaklığı
V	:	TES modül Voltajı (V)
V_{max}	:	TES modül maksimum Voltaj (V)
V₀	:	Transiset Yüksüz Voltajı (V)
V_r	:	Transiset Yüklü Voltajı
Z	:	TES modülün kalite katsayısı (figure of merit) (K^{-1})
Z*	:	TES modülün etkin kalite katsayısı ($1/K$)
α	:	Seebeck katsayısı (V/K)
α_m	:	N çift için termoelement Seebeck katsayısı (V/K)
α^*	:	Efektif Seebeck katsayısı (V/K)
τ	:	Thomson katsayısı (V/K)
ρ	:	Elektriksel öz direnç (Ωm)

ρ^*	:	Efektif elektriksel özdirenç (Ωm)
KB	:	Kilobayt
MHz	:	Megahertz
π	:	Peltier katsayısı (V)
ΔT	:	Sıcaklık farkı (K)
ΔT_{max}	:	Sıcaklık farkı (K)
$ N $:	Nerst katsayısı
$ P $:	Ettinhausen katsayısı
ZT	:	TES modül performans katsayısı
ϵ	:	Fermi-Dirac katsayısı
$E \rightarrow$:	TES modülün gerilim altındaki elektriksel alanı
$q \rightarrow$:	TES modülün elektriksel alan altındaki ısı akısı
$I \rightarrow$:	TES modülün elektriksel alan altındaki akımı
K_b	:	Boltzmann Sabiti

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca her konuda desteğini gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU hocama, akademik bilgisi ile yol gösteren ve yardımcı olan Doç. Dr. Gülay YAKAR hocama, Prof. Dr. Mehmet ORHAN, manevi destekleri için Arş. Gör. Dr. Osman YELER hocama ve yüksek lisans eğitimimde ilk günden son güne kadar desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Ali Kürşad ARICIOĞLU hocama teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bana manevi desteklerini esirgemeyen, sabır gösteren bu günlere gelme vesile olan annem Nuran ve babam Temel olmak üzere aileme, arkadaşım Ömer, Gökçen ve Aysun başta olmak üzere tüm arkadaşlarıma ve bünyesinde çalıştığım Alindair Soğutma Sistemleri firmasına teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

TES modül olarak bilinen n ve p tipi yarı iletken çiftlerin birbirine elektriksel olarak seri, ısıl olarak paralel bağlanmasından oluşmuş bu elektronik bileşenler; doğru akım altında soğutma için herhangi bir ısı transferi akışkanına ihtiyaç duymayan cihazlardır. Günümüzde termoelektrik soğutucu (TES) modüller ile ilgili çalışmalar ve uygulamalar gelişen teknolojiye paralel şekilde ilerlemektedir.

TES modüller için askeri, uzay, tıp gibi öncü bilimsel alanlarda çalışmalar devam etmekte olup bu çalışmalar neticesinde ticari tipteki modüller piyasada yaygınlaşmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Çalışmada, ticari anlamdaki TES modüllerin performanslarını tespit etmeye yönelik tekrarlanabilirliği ve ölçüm hassasiyeti yüksek olan bir ölçüm düzeneği geliştirilmiştir. Ticari TES modül üreticileri, TES modüllere ilişkin elektriksel ve termal performans değerlerini beyan ederken kısıtlı çalışma şartları altındaki verileri sunmaktadır. Bu durum, TES modül ile çalışan sistemlerin tasarımında birtakım belirsizliklere neden olmaktadır. Tez çalışması, TES modülün elektriksel ve ısıl parametrelerine ilişkin verilerin doğrudan tasarım şartlarında ya da parametrelerin maksimum şartlarında buldurulmasını temel almıştır. Elde edilen veriler ile de TES modüle ilişkin malzeme özelliklerinin bulunması hedeflenmiştir. Bu amaçla TES modülün elektriksel ve termal parametrelerini deneysel olarak tespit eden, TES modülün malzeme özelliklerinin de deneysel büyüklüklerden ideal denklemlerce hesaplanabildiği bir ölçüm düzeneği geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Ölçüm düzeneğinin geliştirilmesinde, önceki çalışmalar yöntemsel ve biçimsel olarak incelenip değerlendirilmiştir. Geçmiş çalışmalar ve mühendislik hesapları neticesinde tez kapsamında TES modülün performans parametrelerinin ölçümünü yapabilecek test düzeneği tasarlanmıştır ve tasarlanan test düzeneğinde TES modülün testleri gerçekleştirilmiştir. Sistem tasarımında ölçüm düzeneğinin termal hesapları yapılmış; mekanik tasarımı, elektrik ve elektronik tasarımı, ölçüm algoritması ve ölçüm yazılımı yapılmıştır. Tasarlanan test düzeneği ile deneysel olarak elde edilen

veriler termoelektrik formülüzasyon ve çıkarımlarca analiz edilip TES modülün istenen şartlardaki performans analizinin elde edilmesini sağlamaktadır.

1.2 Termoelektrik Modülün Tarihçesi ve Uygulamaları

Termoelektrik etkisi ilk olarak 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedilmiştir. Thomas Johann Seebeck, İki farklı malzemeden oluşan elektrik iletkeni arasındaki bağlantıyı ısıtarak bir elektromotor kuvvetin üretilebileceğini veya hassas bir voltmetre yardımı ile voltaj değeri saptanabileceğini göstermiştir.

Seebeck'in keşfinden sonra 1834'lere gelindiğinde, Fransız fizikçi Jean-Peltier, Seebeck Etkisi'ni araştırırken, Bir elektrik akımının bir termokupludan geçişinin, yönüne bağlı olarak küçük bir ısıtma veya soğutma etkisi oluşturduğunu buldu. Bu bağlamda Peltier olay, Seebeck etkisinin tersi olarak nitelendirilebilir. Bununla birlikte 1855 yılında W. Thomson (Daha sonralarda Lord Kelvin olarak tanınmış), Peltier ve Seebeck etkilerini tanımlayan katsayılar arasında bir ilişki kurmuştur. Teorisinde ayrıca üçüncü bir termoelektrik etkinin olması gerekliliğini göstermiştir Thomson Etkisi olarak bilinen bu etki, Joule ısısına ek olarak iki noktası arasında bir sıcaklık farkı olan iletken telden akım geçirilmesi sonucu üretilen tersinir ısı akısı olarak açığa çıkmaktadır (Goldsmid 2009).

Termoelektrik soğutucular (TES) 1834'de keşfedilmesine rağmen yarı iletken malzeme araştırmalarının gelişmemiş olması sebebiyle TES modül gelişimi 1950'li yıllara kadar ivme kaydedememiştir (Dresselhaus ve diğ. 2007). TES modül uygulama alanlarındaki çalışmalar bu süre zarfında Peltier tarafından geliştirilmek istense de uygulamalar, uygun termoeleman malzeme bulunamadığı için sınırlı kalmıştır.

TES modülün performansını etkileyen termoelemanların malzeme özelliklerine ilişkin çalışmalar Altenkirch tarafından ortaya konulup Ioffe tarafından Z kalite katsayısı tanımında ortaya çıkmıştır. Metal malzemelerde güç faktörü yarı iletken malzemelere kıyasla çok daha fazla olmaktadır ancak metal malzemelerin elektrik iletkenliğinin termal iletkenliğe oranı diğer metal malzemeler ile benzerlik göstermesi sebebi ile termoelektrik malzeme yapımında yarı iletken malzemeler kadar elverişli olmamaktadır. Bu sebeple Goldsmid ve Douglas bizmut tellürid-bizmut

(Bi₂Te₃-Bi) kullanarak geliştirdikleri TES modül ile 26 °C ΔT_{max} sıcaklığı elde edildiğini gözlemlemişlerdir (Goldsmid ve Douglas 1954).

Bu alışmalar temelinde yarı iletkenlerin TES modüllerde kullanılması teknolojisini gelişerek COP değeri iyileştirilmiş TES modüller geliştirilip soğutma uygulamalarında kullanılmaya başlamıştır. Temel uygulama alanları Elektronik aletler, medikal kullanım, otomotiv endüstrisi, klimalar ve buzdolapları olmaktadır (Lee 2015).

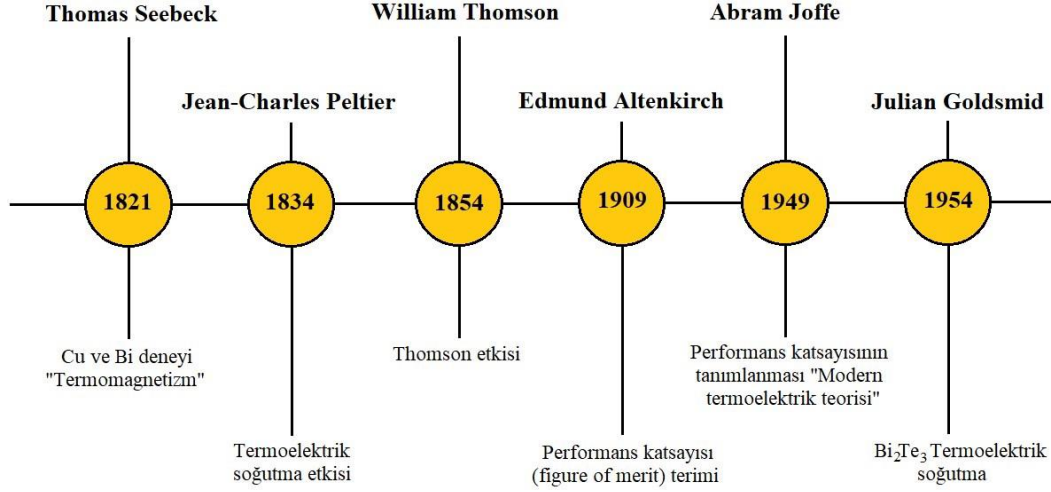
Medikal uygulamalar, TES modüllerin sağladığı hızlı ısıtma ve soğutma özelliği açısından verimlerinin düşük olmasına rağmen oldukça elverişlidir. TES modüller ilk olarak DNA ısı döngüleyicileri, ilaç soğuk muhafaza poşetleri ve medikal görüntüleme cihazlarında ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılmıştır (Chen 2011). Akım yönünün değiştirilmesi ile hızlı bir şekilde tersine ısı transfer eden TES modüller günümüzde yaygın olarak DNA polimeraz zincir reaksiyonunun (polymerase chain reaction, PCR) termal çevriminde kullanılmaktadır. 1983 yılında Kary Mullis tarafından geliştirilen ve 1993 yılında kimya alanında Nobel ödülü almasına sağlayan bu yöntem, DNA moleküllerinin kopyalanmasında kullanılmaktadır (Sambrook ve Russell 2001, Chen 2011). PCR uygulamalarının yanı sıra TES modüller kanserli hastaların termoregölasyonu (ısı düzenleme) ihtiyacının karşılanması adına konfor uygulamalarında kullanılmıştır. Gentherm Anonim şirketi geliştirdiği TES modül ile çalışan hasta yatağında hastaların ani vücut sıcaklığı değişimlerini algılayarak buna yönelik vücut sıcaklığı dengesinin korunmasına olanak tanıyan YuMe isimli yatağı üretmişlerdir (Gentherm Incorporated 2010).

TES modül uygulamalarında saklama dolapları oldukça revaçtadır. Sıcaklığın çok hassas kontrolünün gerektiği aşı, kan ve organ taşınmasında TES modülle çalışan sistemler yapı itibari ile elverişlidir. Ahıska ve Güler (2002) tasarladıkları mikroşlemci kontrollü tıbbi soğutma kitinde aşı ve kan gibi soğuk muhafaza gerektiren medikal ürünlere yönelik TES modül çözümüyle uygulama yapmışlardır. Soğuk muhafaza işlemi bittiğinde kan ve aşı gibi sıvıların kullanım sıcaklığına eriştirilmesi için ısıtma işlemini de geliştirdikleri kit ile yapılabilmektedir. Benzer bir uygulamayı Wang ve diğ. (2011) Termoelektrik kan saklama dolabı üzerinde TES modülün soğutma ve ısıtma kapasitesini artırmaya yönelik kanatçık tasarımları geliştirerek yapmışlardır. Bu hususta dış ortam sıcaklığı soğutma yükünü

etkilemektedir. Dünya Sağlık Örgütü'nün beyan ettiği sıcaklık sınır değerleri dış ortam sıcaklıklarının yüksek olduğu yerlerde sağlanamamaktadır.

TES modüllerin medikal kullanım alanlarından bir diğeri de hipertermi ve hipotermidir. İnsan beyni 30-32 °C sıcaklığa soğutulduğunda kalbin durması durumunda bile 45-60 dakika canlılığını koruyabildiği gözlemlenmiştir (Kapıdere 2005, Yavuz 2009). Sıcaklığın düşürülmesi ve tekrar yükseltilmesi söz konusu olan bu olayda TES modüller ön plana çıkmaktadır. Yavuz (2009), TES modül kullanarak 0,5 °C/dak'yı aşmayacak şekilde bulanık mantıkla kontrol ederek daha da geliştirmiştir.

Prematüre bebekler için kullanılan rezistanslı kuvözler bebeğin hayatta kalması için uygun sıcaklık şartlarına ısıtma yapmaktadır. Isıtmanın yanı sıra bebeğin yüksek ortam sıcaklıklarından etkilenmemesi için rezistanslı kuvözler soğutma yapabilme özelliği ile donatılması gerekmektedir. Yeler (2019), geliştirdiği termoelektrik prematüre bebek kuvözünde rezistans ve ilave soğutma cihazına gerek olmadan TES modül ile kuvözün sıcaklık dengesini hassas şekilde kontrol ederek bebek için gereken şartları tek bir kuvözde sağlayabilmiştir. Çalışmasında kuvöz içerisindeki havanın sıcaklık, bağıl nem ve oksijen değerlerinde herhangi bir dalgalandırma yaratmayarak bebek için gerekli şartları rezistanslı kuvözlerden daha az bir güç tüketimi ile sağlamaktadır.



Şekil 1.1: Termoelektriğin Tarihçesi

1.3 Literatür özeti

Ioffe ve diğ. (1956), TES modül, termoelektrik jeneratörler ve termoelementler üzerinde yaptıkları çalışmalarında; TES modülün ürettiği termoelektromotor kuvvetinin sıcaklığın farkıyla ve farklı metallerde arttığını ifade etmişlerdir. Oluşan termoelektromotor kuvvetinin yarıiletkenler üzerinde $1000 \mu\text{V}/\text{deg}$, metaller üzerinde $20 \mu\text{V}/\text{deg}$, metal alaşımlarında $50 \mu\text{V}/\text{deg}$ civarında olduğunu ifade etmişlerdir.

Harman ve diğ. (1958), Teorik ve deneysel araştırmalar açısından termoelektrik etki gösteren yarıiletken parametreleri olan: Seebeck katsayısı (α), elektriksel direnci (ρ), termal iletkenliği (k) ve kalite katsayısının (z) ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. TES modülün bu kalitesindeki ölçüt bu parametreler sayesinde hesaplanabilmektedir. Kalite katsayısı olarak adlandırılan z katsayısı değeri ne kadar büyükse TES modülün performansı da o ölçekte artmaktadır. Bu nedenle z parametresinin hesaplanmasında, onu belirleyen tüm parametrelerin ölçülmesi gerekmektedir. Bunun için Harman ve diğ. Termoelektriksel etki gösteren numune boyunca bir sıcaklık gradyanı oluşturmak için Peltier etkisi kullanılarak, z değerini veren tüm termoelektrik parametreleri tek bir cihazda ve tek seferde bulunabilmesine olanak tanıyan ölçüm tekniği geliştirmişlerdir. Ölçümlerinde Joule-Thomson ısı dışında adyabatik sınır şartları altında yaptıkları deneyde: Kalite Katsayısını (z), Seebeck etkisinden dolayı oluşan voltajının, akımdan dolayı oluşan voltaja oranı olarak ifade etmişlerdir. Harman ve Arkadaşları bu iki voltaj bileşenini bakır ile bipolar kare alternatif akım oluşturarak sağlamışlardır. Yöntem bütünlüğü olarak

avantajlı olarak gözükse de bu yöntem tekrarlanabilirlik ve ölçüm hassasiyeti konusunda yetersizdir.

Bowley ve diğ. (1961), TES modülün performans parametrelerinin ölçülmesinde Harman tekniğini ve denklemlerini kullanarak oluşturduğu ölçüm düzeneğinde, $\text{Bi}_2(\text{Se-Te})_3$ alaşımından yapılmış TES modülün performans parametrelerinin termoelektriksel özelliklerinin hesaplayabileceği test düzeneği geliştirmişlerdir. Geliştirilen ölçüm düzeneğinin hassasiyeti adına, termal izolasyonun kalite katsayısına etki eden parametrelerin ölçümünde daha kesin değerleri saptamakta mümkün olacağını ifade etmişlerdir.

Penn ve diğ. (1964), Harman tekniğini kullanarak TES modülün performans katsayısının (ZT) adyabatik şartlar yaratarak ölçmek istemişlerdir. Termoelektriksel malzemenin üzerinden aldığı düşük temas direnci yaratan ölçüm yöntemi sayesinde ve vakum etkisiyle performans katsayısını gerçekçi değerlerde hesaplayabilmişlerdir.

Heylen ve diğ. (1975), Yaptıkları çalışmada ise Harman tekniğindeki kullanılan vakum düzeneği olmadan TES modüller kullanarak iki farklı metotla ölçüm yapmıştır. İlk yöntemde, TES modüllere uygulanan akımı 3,6,9,12,15 A seviyelerinde vererek test edilen termoelektrik soğutucu modül için test akımını 9 A'ye sabitleyip akım altında alınan çıktılarına göre termoelektrik malzemenin; termal kondaktivitesi, elektriksel kondaktivitesi, n çift için Seebeck katsayısı ve TES modülü oluşturan termoelektrik yarı iletkenlerin kalite katsayısını hesaplamışlardır. İkinci metot da ise TES modülün sıcak ve soğuk taraflarındaki sıcaklık farkını maksimum değere ulaştırılan şartları sağlayıp o şartlardaki akım değerlerini kaydetmişlerdir. Her iki metot için akım ve sıcaklık değerlerini grafik altında incelemişler ve iki metot arasındaki sonuçları Harman'ın denklemlerine göre karşılaştırıp Bi_2Te_3 bileşiğinin malzeme özelliklerini ifade etmişlerdir.

Goldsmid ve diğ. (1986), Yarıiletkenlerin Seebeck katsayılarının hesaplanmasında ölçüm verilerinin hızlı ve sürekli oluşu ölçüm hassasiyeti açısından önemlidir. Goldsmid ve diğ. basit bir teknikle sıcaklık farkı etkisini hesaplamalara dahil edilebileceği ölçekte ölçüm yapabildikleri bir düzenek geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri düzenek, termoelektrik etki gösteren malzemenin sıcaklık gradyanını potansiyometre ile ayarlayabildikleri ısıtıcı vasıtası ile değişik voltaj değerleri altında oluşan ısı değerlerinde, p tipi ve n tipi iletkenler için Seebeck katsayılarındaki değişimi hızlı şekilde saptayabilmiştir.

Buist, ve diğ. (1992), Yarı iletkenlerin ve termoelektrik soğutucu (TES) modüllerin Seebeck katsayısı (α), elektriksel direnci (ρ), termal iletkenliği (k) ve yarı

iletken kalite katsayısının (z) özellikleri pellet ve TES modül mertebesinde incelemişlerdir. Farklı geometriler ve farklı lokasyonlardan ölçümlerle deneysel olarak TES modülün ΔT_{\max} , I_{\max} , V_{\max} , ve Q_{\max} üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Prensibi Harman tekniğine dayanan, tekrarlanabilir ve enstürmental anlamda daha modern olabilecek transiet gerilim ölçümü ve yüksek çözünürlüklü darbe gelirim ölçümü metotları ile deneysel olarak (1000 iterasyonda topladıkları verilerle) ölçüm yapmışlardır. Transient gerilim ölçümünde, Seebeck voltajının (V_o), daha hassas elde edilmesi amaçlanmaktadır. Harman tekniğindeki kullanılan düşük frekanslı akımın (10mV) oluşturduğu; voltaj değerinin artırması sebebiyle her bir yarım çevrimdeki hazırda devam eden peltier etkisi voltaj ölçümlerini etkilemektedir. Bu etki, transient gerilim ölçümü yöntemi ile engellenmiş olup uygulanan lineer voltaj içerisindeki V_o , V_r değerlerinin düzgün şekilde hesaplanmasına olanak tanımıştır.

Paul (1999), Geliştirdiği TES modülün transiset geriliminin ölçümünü yapabilen test düzeneğinde, TES modülün geometrik faktörlerini belirttiği p ve n yarı iletken çiftlerinden oluşan termoelektrik soğutucu (TES) modül için ΔT_{\max} , I_{\max} , V_{\max} , \dot{Q}_{\max} maksimum parametrelerini oluşturup, TES modülün kalite katsayısını (Z) hesaplamışlardır. TES modülünü oluşturan malzemelerin özelliklerinin çıkarımının yapılacağı denklemlere; iletim, taşınım ve ışınım ile olan ısı transferlerini değişken olarak tanımlanmıştır ve bu girdi sayesinde kalite katsayısına ölçüm düzeneğince bir düzeltme faktörü getirmiştir. Doğal taşınım ile olan ısı transferinin vakumsuz ortamda hata oranını arttırdığını; vakumlu ortamda ise 2 Pascal değerinden düşük vakum altı basınç değerlerinin ise ölçüm sonuçları etkilemediğini saptamıştır.

Kin-ichi (1995), Ticari anlamdaki TES modüllerini çok çeşitli boyutlarda, şekillerde, çalışma akımlarında, çalışma voltajlarında ve soğutma gücü aralıklarında üretebilmek mümkündür. Çeşitli özelliklerdeki modüllerin her birinin kıyaslanabilir büyüklükteki performansını ifade etmek için TES modülün geometrik faktörü ve maksimum performans parametreleri tanımlarından yararlanmıştır. TES modülü üreticilerinin termoelement uzunluklarını ve optimum çalışma akımlarını tanımlayan geometrik faktörler cinsinden belirtilen maksimum parametreleri: Isınan yüzeydeki sıcaklık ile soğuyan tarafındaki sıcaklık farkının mümkün olan en yüksek değerini ΔT_{\max} 'ı oluşturmaktadır ve bu durum her zaman \dot{Q}_c sıfır değerinde gerçekleşir. ΔT_{\max} değerinde çekilen akım; I_{\max} , modüle uygulanan gerilim ise V_{\max} 'dır. Maksimum soğutma kapasitesi ise ΔT_{\max} sıfır değerindeki $\dot{Q}_{c\max}$ olmaktadır. Çalışmada, Ticari TES modülün karakteristik özellikleri yorumlamak için gerçek değerlerin maksimum değerlere bölünerek boyutsuzlaştırıldığı $\Delta T/\Delta T_{\max}$, I/I_{\max} ,

\dot{Q}_c/\dot{Q}_{cmax} , V/V_{max} ifadelerini de belirtmiştir. Ticari TES modüllerin performans özelliklerinin ifade edilmesinde, üretici firmanın beyan ettiği TES modülü oluşturan etkin malzeme özellikleri; termoelektrik soğutucu modülün seebeck etkisi (α), termoelektrik soğutucu modülün elektriksel direnci (ρ), termoelektrik soğutucu modülün termal iletkenliği (k) gibi deneysel metot ve ölçüm özelliklerine bağlı verilerden türetilen değerler olduğundan birtakım farklılıklar göstermesi mümkündür.

Huang ve diğ. (2000), TES modül tasarımcıları, etkin malzeme özelliklerini modül için elde etmekte çeşitli deneysel düzeneklerden yararlanmışlardır. Huang ve diğ. geliştirdikleri düzenekte, TES modülün maksimum parametrelerini elde ederek TES modülün etkin malzeme özelliklerini ampirik olarak hesaplamışlardır. Deneysel düzeneğin belirtilen sınır şartlarında ölçtüğü verileri kayıt altına alabilmesi bu hususta önem arz etmektedir.

Ticari TES modül üreticilerinden olan Marlov firmasının yayımladığı, TES modül sistem elemanlarının ısı dirençlerinin hesaba katılmadan bulunduğu performans eğrilerinin doğruluğunu, geliştirdikleri ölçüm cihazı ile test etmek isteyen Huang ve diğ; ideal denklemleri kullanarak Firmanın öne sürdüğü maksimum parametre verilerini ve modülün etkin malzeme özelliklerini deneysel verilerden aldıkları sonuçlarla teorik ve ampirik olarak kontrol edip bu sonuçlarını, farklı tipteki hava soğutmalı ısı atıcı kanatçıkların iletim dirençlerine göre irdelemişlerdir. Marlov firmasının öne sürdüğü TES modül özellikleri ile deneysel verilerden elde edilen sonuçlar tamamiyle aynı değildir. Bu durumun, ideal denklemlerde hesaba katılmayan elektriksel ve termal temas dirençlerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Lineykin ve Ben-Yaakov (2007), Ticari modül üreticilerin paylaştığı TES modüle ait maksimum parametre değerlerini ideal denklemler kullanarak, teorik maksimum parametre denklemlerinde çözdürüp TES modülün fiziksel özelliklerini çıkartmışlardır. TES modülün fiziksel özelliklerini ise belirli bir malzeme çiftine karşılık gelen n çift için belirlenmiş; Seebeck katsayısını (α_m) termal iletkenliği (k_m) elektriksel direnci (R_m) değerleri ile maksimum parametrelerin ve TES modül sıcak yüzey sıcaklığını dahil edildiği (ΔT_{max} , I_{max} , U_{max} , T_h) denklemleri kullanarak termoelement çiftlerinin sayısı ve geometrik oran hakkında bilgi içeren bir çalışma yapmışlardır.

Luo (2008), Termoelektrik soğutucu (TES) modülün fiziksel malzeme özelliklerini üretici firmanın verilerine göre oluşturmak için Lineykin ve Ben-Yaakov'dan farklı olarak maksimum sıcaklık farkı parametresinin (ΔT_{max}), ölçümle

elde edilip kullanıldığı şekliyle işleme almış (ΔT_{\max} , I_{\max} , V_{\max} , \dot{Q}_{\max}), kullandığı yöntemde ise aynı şekilde sıcaklıklardan birinin ölçüldüğü (ΔT_{\max} , I_{\max} , U_{\max} , T_h) parametreleri üzerinden fiziksel malzeme özelliklerini hesaplamıştır. Üreticiden elde edilen değerler ile iki farklı parametreyi dahil ederek hesapladığı modülün fiziksel malzeme özelliklerinden hata oranlarını karşılaştırmıştır.

Zhang ve diğ. (2010), Bir elektronik soğutma sistemine uygulamak için ΔT_{\max} , I_{\max} , V_{\max} parametrelerini kullanarak ticari modülün fiziksel malzeme özelliklerini elde etmişlerdir. Geliştirdikleri sistemdeki ısı alıcılarının tasarım ve optimizasyonunu ayrıntılı şekilde işlemişlerdir. Lineykin ve Ben-Yaakov'un çalışmalarında, soğuk yüzeye uygulanan termal direnç yaklaşımları temsil edilmemiştir. Bu çalışmalarında ölçümü yapılacak sıcak ve soğuk taraftaki termal dirençleri ideal denkleme dahil ederek termoelektrik modülün etkin malzeme özelliklerini Lineykin ve Ben-Yaakov'un ve Luo'nun formülize ettiği şekillerde maksimum parametreleri ile analiz etmişlerdir.

Simons (2008), Test edilecek modüle ilişkin fiziksel özelliklerin maksimum parametrelerle türetilmesini araştırmışlardır. Maksimum parametreleri deneysel olarak tespit ederek TES modülün fiziksel özelliklerini n çift için (α_m), (k_m) ve (R_m)) araştırmıştır. Yaptığı çalışmada, kullandığı TES modüle ilişkin modül özelliklerini gözlemlemiştir.

Tan (2008), Farklı firmalar tarafından üretilen ticari termoelektrik modüller arasından maksimum parametrelerin kullanıldığı verilere göre seçim yapmaya yarayacak bir yazılım programı üzerinde çalışmıştır. Bu sayede ticari TES modülün istenen sistem özellikleri için kolaylıkla seçimine imkan tanınmıştır. Geliştirdiği yazılım programında maksimum parametre eğrilerinin firmaların beyan ettiği değerlere göre doğruluğunu yine firmanın beyan ettiği malzeme özelliklerine göre ideal denklemlerden karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma sonucu artan akım ve sıcaklığın hata oranlarını arttırdığını gözlemlemiştir.

Ahiska (2010), Yük altındaki termoelektrik soğutucu (TES) modülün malzeme özelliklerini elde edilmesinde, V_{\max} ve I_{\max} maksimum parametrelerini doğrudan ölçüp ΔT_{\max} maksimum parametresini de soğuyan ya da ısınan yüzeylerdeki sıcaklıkların herhangi birinden aldığı değerle; diğer yüzey sıcaklığını ise maksimum termoelektromotor kuvveti cinsinden türetilmiş bağıntıdan çekerek TES modülün maksimum parametrelerini, ideal denklemler özeline dayandığı yeni bir formül türetmiştir. Kullandığı bu parametrelerin yarıiletkenlerin geometrik özelliklerine bağlı olmadığını ve modülün makro büyüklüklerini oluşturduğunu ve elde edilen bu

eşitliklerin çalışan bir modülün parametrelerini karakterize edebildiğini ifade etmiştir. Oluşturduğu formüle dayanarak ölçüm yapan test düzeneğiyle (TEPAS) doğruluğunu farklı bir deneysel düzenek kullanarak karşılaştırıp kabul edilebilecek sonuçlar elde etmiştir.

Lee (2015), TES modülün performans parametrelerini ifade etmekte kullanılan yöntemler arasında yukarıda bahsedilen çalışmaların çoğu, fiziksel modül özelliklerini (α_m , R_m , k_m) üç maksimum parametreden (V_{max} , I_{max} ve ΔT_{max}) veya soğutma gücü tahminindeki belirsizlikleri empoze eden diğer maksimum parametrelerden (V_{max} , I_{max} ve \dot{Q}_{max}) çıkarmaya çalışmıştır. Öte yandan, mevcut çalışma, üreticilerin maksimum parametrelerinden (V_{max} , I_{max} ve \dot{Q}_{max}), TES modülün etkin malzeme özelliklerini (α , ρ , k) çıkarmaktadır. TES modül özellikleri, belirli modülün kullanımı için geçerliliğe sahip olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Etkin malzeme özellikleri TES modüller için doğrudan kıyas imkanına sahip büyüklükleri de belirtmektedir. Lee yaptığı çalışmasında ticari modül üreticilerine ait performans eğrilerini kullanarak, etkin malzeme özelliklerinin tespitinde TES modülün sıcak yüzey sıcaklığını sabit tutup; termal ve elektriksel temas dirençleri değerlerini sabit olarak denklem çözümüne almıştır. Çalışma, TES modülün çıkış parametrelerini tutarlı bir şekilde ortaya koyan maksimum parametreler üzerinden normalleştirilmiş formülleri incelemektedir.

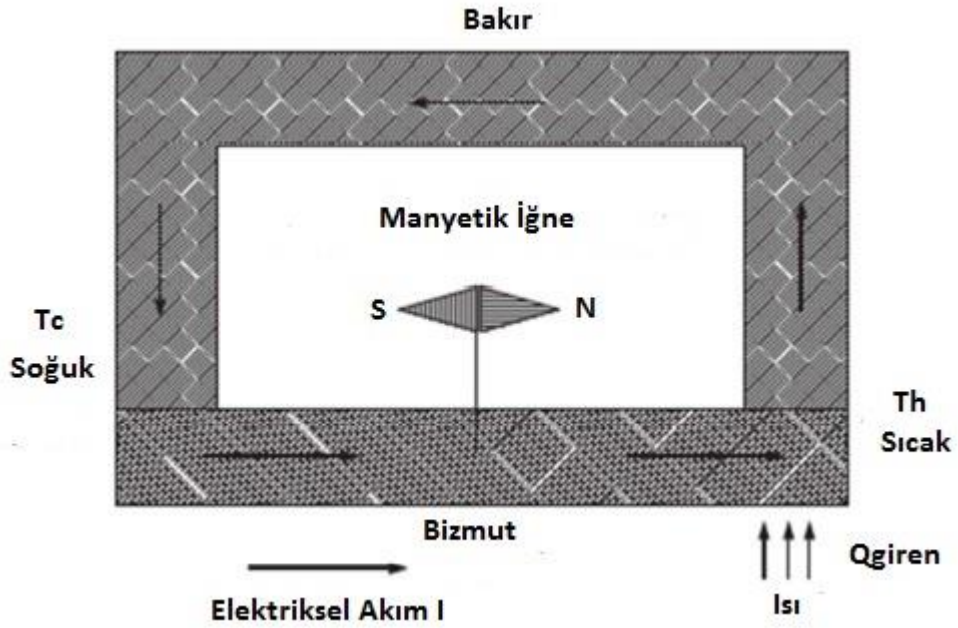
2. TERMOELEKTRİK ETKİLER VE TERMOELEKTRİK SİSTEMLER

2.1 Termoelektrik Etkiler

Termoelektrik etki üç etkiden oluşur: Seebeck etkisi, Peltier etkisi ve Thomson etkisi (Lee 2017).

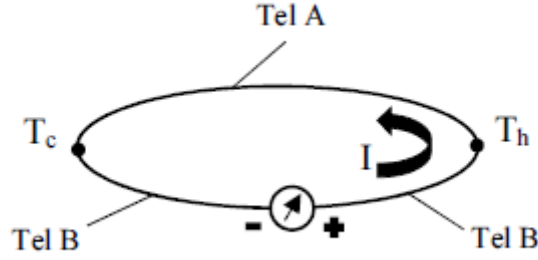
2.1.1 Seebeck Etkisi

Termoelektrik etki ilk olarak 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından gözlemlenmiştir. Seebeck, iki farklı metalden yapılmış ve bir uçları birleştirilerek oluşturulan kapalı bir devre kurarak, devrede birleştirilen noktanın ucunu ısıtmıştır. Isının etkisiyle pusula iğnesinin bir miktar sapma yaptığını gözlemlemiştir. Şekil 2.1’de klasik Seebeck etkisi uygulaması gösterilmiştir (Lee 2017).



Şekil 2.1: Klasik Seebeck etkisi uygulaması (Lee 2017)

Bu olay termoelektrikte Seebeck etkisi olarak bilinir. Seebeck etkisi, sıcaklık farkının bir potansiyel fark oluşturmasıyla elektrik akımı meydana getirip elektrik enerjisine dönüşümü olarak adlandırılır.



Şekil 2.2: Seebeck etkisi (Lee 2017)

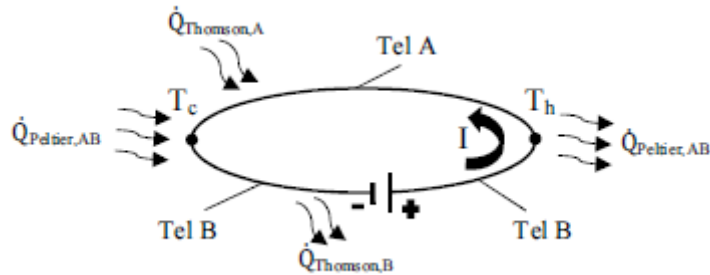
Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, A telinin uçları B teliyle birleştirilmiştir. B telinin arasına bir voltmetre yerleştirip kapalı bir devre oluşturulmuştur. Devrenin herhangi bir birleşim noktasına ısı uygulayarak uçlar arasında sıcaklık farkı oluşturulduğunda voltmetrede bir V voltajı elde edildiği görülür. Bu potansiyel fark sıcaklık farkıyla orantılıdır ve büyüklüğü;

$$V = \alpha_{ab} \Delta T \quad (2.1)$$

Eşitliği ile belirlenir. Burada; $\Delta T = T_h - T_c$, $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$ ve α_{AB} , ısıtıl çift malzemesinin seebeck katsayıları (thermoemk) farkı olup, birimi V/K ’dir (Lee, 2017).

2.1.2 Peltier Etkisi

İlk kez 1834 yılında Charles Peltier tarafından keşfedilen ve Seebeck etkisinin tam tersi şekilde oluşan bu etki, akımı iki farklı kablo arasındaki bir bağlantı noktasından geçirdiğinde, Şekil 2.3’te gösterildiği gibi, ısının bir bağlantı noktasından sürekli absorbe edildiği ve bir diğer bağlantı noktasından ısının ortama atıldığını gözlemlemiştir.



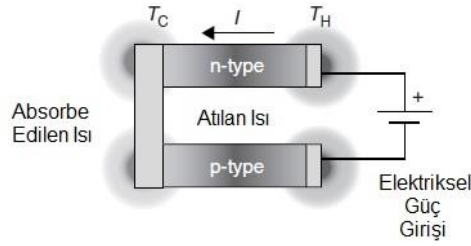
Şekil 2.3: Peltier etkisi ve Thomson etkisi (Lee 2017)

Oluşan ısı, akım ile orantılıdır. Absorbe edilen ısı ya da atılan ısı, akım ters çevrildiğinde işaret de değişir. Peltier ısısının (\dot{Q}_{Peltier}) birimi Watt olup Eşitlik (2.2)'de verilmiştir.

$$\dot{Q}_{\text{Peltier}} = \pi_{\text{AB}} I \quad (2.2)$$

Burada; π_{AB} Peltier katsayısıdır ve Peltier ısıtma veya soğutma ısı ve elektrik arasında tersinirdir. Yani ısıtma veya soğutma ile direkt olarak herhangi bir enerji kaybı olmadan elektrik üretilebilir ya da tam tersi de gerçekleşebilir. Eğer akımın A teline girdiği bağlantı noktası ısıtılır ve akımın A telini bıraktığı bağlantı noktası soğutulursa π_{AB} işareti pozitifdir. (Lee, 2017).

n ve p tipindeki yarı iletkenler üzerine elektriksel potansiyel uygulandığında, akımın yönü değiştirilerek Peltier etkisi ile ısının absorbe edildiği bölgeler değiştirilebilir. Şekil 2.4'te Peltier etkisi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Peltier Etkisi, TE Soğutma (Rowe, D.M, 2006)

2.1.3 Thomson Etkisi

Peltier ve Seebeck etkilerine ek olarak, bir iletkenin herhangi iki nokta arasında sıcaklık gradyanı varsa ve aynı zamanda bu iletkenin akım geçirilirse Thomson etkisi ortaya çıkar. Thomson etkisi akım yönüne ve malzemeye bağlı olarak uçların birinde ısı açığa çıkarır diğesinde ısıyı soğurur. Thomson etkisi, hem sıcaklık gradyanıyla hem de elektrik akımıyla orantılıdır ve (2.3) eşitliğiyle ifade edilir.

$$\dot{Q}_{\text{Thomson}} = -\pi_{\text{AB}} I \Delta T \quad (2.3)$$

Burada; τ_{AB} Thomson katsayısıdır ve bu katsayı diğer termoelektrik katsayılarından farklı olarak tek bir malzeme için ölçülür. Ayrıca Thomson ısısı, ısı ve elektrik arasında tersinirdir (Lee 2017).

2.1.4 Thomson (Kelvin) İlişkisi

Thomson, termodinamiğin I. ve II. kanunlarını uygulayarak (2.4) ve (2.5)'teki eşitliklerini elde etmiştir. Thomson etkisi Peltier etkiyle kıyaslandığında oldukça küçüktür. Ancak bu etki, Thomson ilişkisinin iyi bir şekilde anlaşılmasına önemli bir rol oynamaktadır (Lee 2017).

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad (2.4)$$

$$\pi_{AB} = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (2.5)$$

(2.5) eşitliği kullanılarak Peltier ısısı için (2.6) eşitliği elde edilir. Burada; T birleşme noktasındaki sıcaklıktır.

$$\dot{Q}_{\text{Peltier}} = \alpha_{AB} TI \quad (2.6)$$

2.1.5 Nernst ve Ettinghausen Etkileri

Bahsedilen bütün termoelektrik katsayılar, genel olarak bir B manyetik alanına bağlıdır. Nernst etkisinde, bir manyetik alan B_z varlığında boylamasına sıcaklık gradyanı dT/dx tarafından enine bir elektrik alanı E_y üretilir. Seebeck ve Peltier etkilerinin, sırasıyla Nernst ($|N|$), Ettinghausen ($|P|$), termomanyetik katsayılarıyla ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Sırasıyla Nernst $|N|$, Ettinghausen $|P|$, katsayıları (2.7) eşitliği vasıtası ile elde edilir (Rowe 2006).

$$|N| = \frac{E_y}{\frac{B_z}{dT}}, |P| = \frac{1}{\frac{I_x \cdot B_z}{dy}} \quad (2.7)$$

2.1.6 Joule Etkisi

İçerisinden akım geçen bir iletkenin ürettiği ısı, üzerinden geçen akımın karesiyle ve iletken malzemesinin direnci ile doğru orantılıdır. Birim zamandaki Joule ısıısının miktarı, (2.8) eşitliği ile ifade edilir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_{\text{Peltier}} = I^2 \cdot R \quad (2.8)$$

Termoelektrik modüllerin Z kalite katsayısı (2.9) ile ölçülür ve birimi 1/K'dir.

$$Z = \frac{\alpha_0^2}{\rho \cdot k} = \frac{\alpha_0^2 \cdot \sigma}{k} \quad (2.9)$$

Burada; α Seebeck katsayısı ($\mu\text{V/K}$), ρ özdirenç (Ωcm), σ elektriksel iletkenlik ($1/\Omega\text{cm}$), k ısı iletkenlik (W/mK) olmaktadır.

Boyutsuz ZT performans katsayısı, Z değerini fiziksel olarak tanımlamakta kullanılmaktadır. Buradaki T mutlak sıcaklıktır. TES modülden yüksek performans alınmasında: istenen gerilimin sağlanabilmesi için yüksek Seebeck katsayısına, istenmeyen Joule ısıısının azaltılması için yüksek bir elektrik iletkenliğe ve ısı kayıplarının azaltılması içinde düşük bir ısı iletkenliğe sahip olması beklenmektedir. Ticari olarak kullanılan TES modüllerde $ZT \approx 1$ civarındadır. ZT değeri ne kadar büyürse, TES modülün enerji dönüşüm verimliliği de o kadar artmaktadır (Lee 2017).

2.2 Termoelektrik Sistemler

Termoelektrik sistemler yarı iletkenlerin ısı ve elektriksel özellikleri ile yakından ilişkilidir. Yarı iletkenlerin iletim mekanizmalarının anlaşılması termoelektrik sistemlerin çözümlenmesinde yol gösterici olmaktadır.

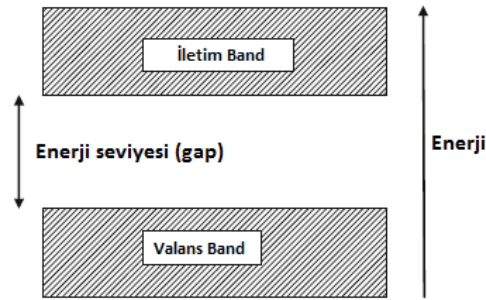
2.2.1 Yarı İletkenler ve Band Diyagramları

Maddeler elektrik iletimine göre iletken, yarı iletken ve yalıtkan olmak üzere üçe ayrılırlar. Elektrik akımını oluşturan yük taşıyıcıları; elektrolitlerde iyonlar, metallerde elektronlar, yarı iletkenlerde ise elektron ve deliklerdir. n tipi yarı

iletkenlerde negatif yük taşıyıcıları p tipi yarı iletkenlerde ise pozitif yük taşıyıcıları çoğunluktadır. (H.J.Goldsmid 2009).

Malzemelerin sınıflandırılmasında kullanılan parametrelerden biri de elektriksel iletkenliktir. Metaller yüksek elektriksel iletkenliğe sahipken yalıtkanların elektriksel iletkenliği oldukça düşüktür hatta normal şartlarda sıfır olarak alınabilir. Elektriksel iletkenlik termoelektrik yük taşıyıcı konsantrasyonunun bir göstergesidir. Elektriksel iletkenliğin gerçekleşebilmesi için, elektronların bir enerji seviyesinden başka bir enerji seviyesine hareket edebilmesi gerekir. Dolayısıyla boş bir bantta elektron olmadığı için elektriksel iletkenlik olmaz, tamamen dolu bir bantta da elektronun hareket edebileceği serbest seviyeler olmadığından yine iletkenlik olmaz. Dolayısıyla iletkenlik yarı dolu bölgedeki elektronlar sayesinde gerçekleşir. (H.J.Goldsmid 2009).

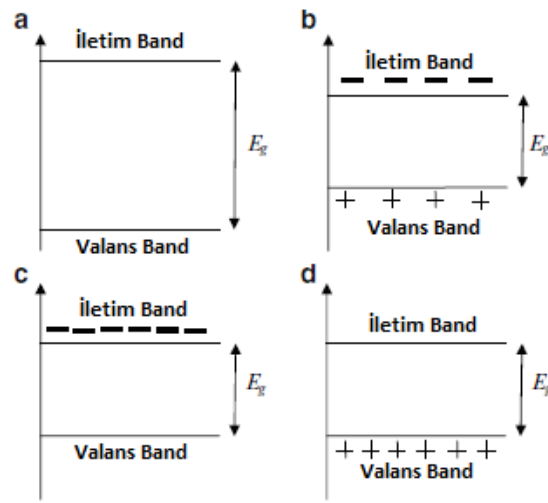
Band diyagramında, 0 K sıcaklığında elektronlarla dolu olan en yüksekteki banda valans bandı, bir üstteki band'a iletim bandı ve valans bandı ile iletim bandı arasındaki enerji farkına enerji aralığı denilmektedir. Atomun dışındaki kabukta bulunan elektronlara da valans elektronları denilmektedir. Valans elektronun serbest hale getirilebilmesi için gereken enerji Band Teoris'iyle açıklanabilmektedir. (Şekil 2.5) (H.J.Goldsmid, 2009).



Şekil 2.5: Enerji Band Diyagramı (H.J.Goldsmid 2009)

İletim bandındaki elektronların varlığı iletim işlemindeki en büyük ölçüttür. Valans bandı ile iletim bandı arasındaki bu boşluk yalıtkan malzemelerde oldukça büyüktür. İletken metallerde valans ve iletim bandının birbirine geçmesiyle oluşan kesişim bölgesinde (overlap) valans elektronları serbestçe hareket edebilir. Bu hareket metallerin iyi iletken oluşunun bir göstergesidir. Silikon ve Germenyum gibi doğal yarı iletkenlerde Fermi seviyesi valans ve iletim bandlarının ortasında konumlanmıştır. Doğal yarı iletkenlerin kristal yapıları içerisinde küçük ölçekte eklenen atomlar,

elektriksel özelliklerini değiştirmekte ve n tipi diye adlandırılan elektron fazlalığı p tipi diye adlandırılan boşluk fazlalığı olan yarıiletkenler elde edilebilmektedir. n tipi malzemelerin katkılanmasıyla Fermi seviyesi, iletim bandı ile ekstra enerji seviyeleri arasında meydana gelir. Açığa çıkan bu enerji ile ana akım taşıyıcı elektronlar (majority) iletim bandından malzeme içerisinde hareket edebilmektedir. p tipi malzemelerin katkılanmasıyla Fermi seviyesi, valans bandı ile ekstra boşluk seviyeleri arasında konumlanır. Ekstra boşluk seviyeleri band aralığının en alt kısmındadır. Bu sayede kolayca uyarılan elektronlar valans bandında hareketli boşluklar meydana getirir. Katkılama sonucunda p ve n tipi yarı iletkenlerde katkılama sonucu ekstra boşluk ve enerji seviyeleri oluşturulmuş olur. (H.J.Goldsmid 2009), (Şekil 2.6).

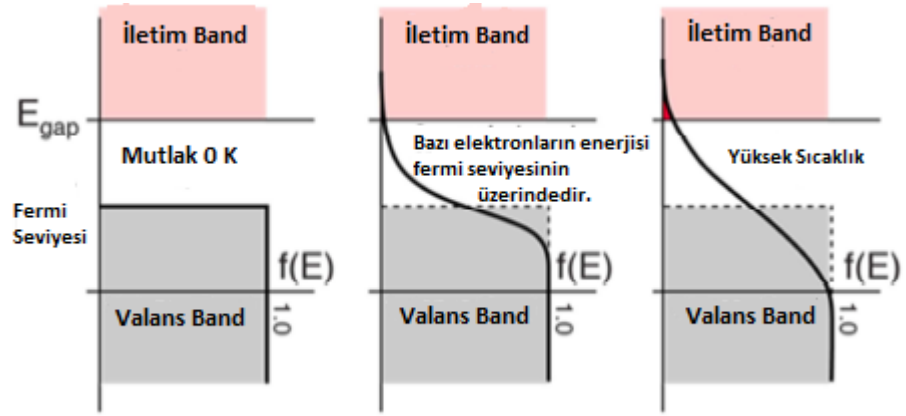


Şekil 2.6: Enerji Band Diyagramları (a) yalıtkan, (b) yarı iletken, (c) n-tipi yarıiletken, (d) p-tipi yarıiletken (H.J.Goldsmid 2009)

n ve p tipi yarı iletkenlerin katkı ile oluşturulmasındaki temel mantık Fermi seviyesinin yerinin değiştirilmesindedir. Fermi enerji kavramı belli bir sıcaklıkta, izinli bir elektron enerji seviyesinin dolu olma olasılığının tespitini yapmada kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda elektronun Fermi fonksiyonu Eşitlik (2.10) bir enerji durumunun dolu olma olasılığını verir. Bu fonksiyonun, izinli durum yoğunluğu ile çarpılması sonucu iletim bandına ulaşacak elektron sayısı belirlenebilir. (H.J.Goldsmid 2009) (Şekil 2.7).

$$f(\epsilon)_{\text{Fermi-Dirac}} = \frac{1}{\frac{e^{-\epsilon - \epsilon_F}}{e^{k_B T} + 1}} \quad (2.10)$$

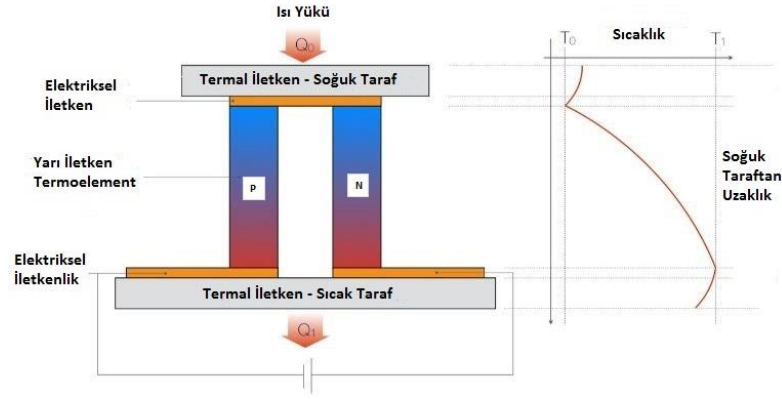
Burada; $f(\epsilon)$ termodinamik denge durumunda bir enerji durumu olasılığı, bir elektron ϵ enerjisine sahip bir durum işgali, T mutlak sıcaklık, K_b Boltzmann sabitidir.



Şekil 2.7: Fermi Fonksiyonunun Sıcaklığa Bağlı Değişimi (H.J.Goldsmid, 2009)

2.2.2 Termoelektrik Modül ve Soğutucu Olarak Kullanımı

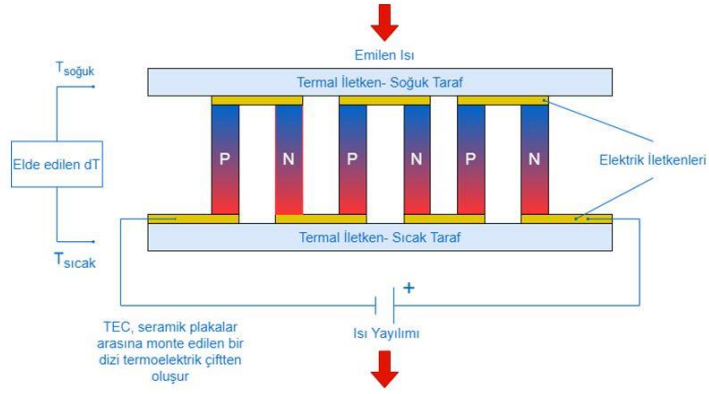
Herhangi bir TES devre veya sistemin temelinde, ısı pompası olarak çalışan bir TES modül (Peltier Soğutucu) yer almaktadır. TES modülün yapısını elektriksel yönden seri termal yönden paralel olarak bağlantılı yarı iletkenler oluşturmaktadır. n tipi yarı iletken, DC gerilim uygulandığında yük taşıyıcı elektronlar negatif kutup tarafından itilip pozitif kutup tarafından çekilecektir. Bu durum saat yönünde bir elektron akışına sebep olacaktır. Elektronlar n tipi malzemede aşağıdan yukarıya doğru akarken, ısı alt birleşim noktasından emilmekte ve aktif bir şekilde üst birleşim noktasına transfer edilmektedir. Dolayısıyla ısı yarı iletkendeki yük taşıyıcılar vasıtasıyla pompalanmaktadır. Termoelektrikte p tipi yarı iletkenlerde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. p tipi malzemeler yük taşıyıcılar pozitif (boşluk-hole) olacak şekilde üretilen malzemelerdir. Bu boşluklar p tipi kristal yapının elektriksel iletkenliğini artırır ve bir voltaj uygulandığında elektronların malzeme içinde serbest hareketine müsaade eder. Pozitif yük taşıyıcılar, güç kaynağının pozitif kutbu tarafından itilir ve negatif kutbu tarafından çekilir. Dolayısıyla boşluk akımı elektron akımının tersi yönde gerçekleşir. Isı yük taşıyıcılar tarafından taşındığından, p tipi malzemede ısı yukarıdan aşağıya yani artı kutuptan eksi kutba doğru taşınmaktadır. p ve n tipi malzemelerin bu birbirine zıt ısı pompalama karakteristikleri termoelektrik soğutucuların tasarımında kilit rol oynamaktadır (H.J.Goldsmid 2009).



Şekil 2.8: p ve n tipi Elemanların Elektrik ve Isı İletimi Mekanizması
(<https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers-intro.html>)

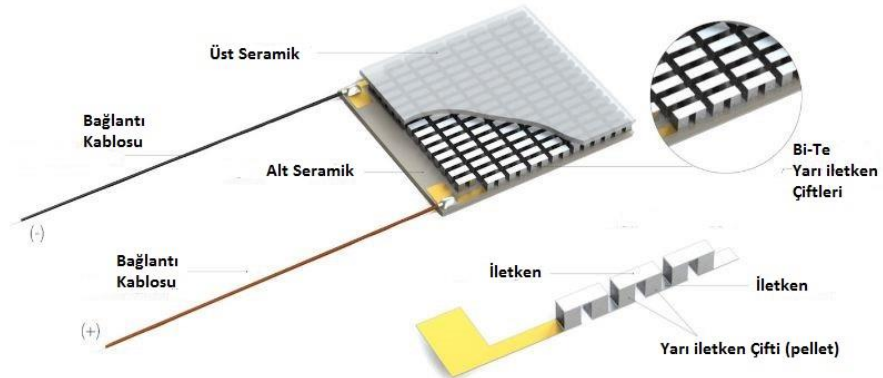
Şekil 2.8’de görüldüğü gibi p ve n tipi yarı iletken elemanlar çift olarak kullanılmakta ve aralarında bakır iletkenle bir birleşme noktası oluşturulmaktadır. Bu şekilde ısı yükünü seramik termal iletkenler üzerinden aynı yönde aktığı elektriksel bir seri devre oluşturulabilir ve birçok p ve n çiftleri birlikte kullanılabilir (H.J.Goldsmid 2009).

p tipi yarı iletkenin serbest ucu negatif terminale, n tipi yarı iletkenin serbest ucu da negatif terminale bağlanmaktadır. Bu sayede p malzemesindeki pozitif yük taşıyıcılar pozitif voltaj tarafından itilip negatif voltaj tarafından çekilmektedir. n malzemesindeki negatif yük taşıyıcı elektronlar ise negatif potansiyel tarafından itilmekte, pozitif potansiyel tarafından çekilmektedir. Bakır bağlantı ve teldeki yük taşıyıcılar elektronlardır. Bu elektronlar p malzemesine ulaştığında, p tipi malzemenin kristal yapısı içindeki boşluklardan akarlar. Dolayısıyla elektronlar sürekli olarak voltaj kaynağının negatif ucundan n malzemesine oradan bakıra oradan da p malzemesine geçerek oradan da kaynağın pozitif kutbuna ulaşırlar. İki farklı özellikte yarı iletken malzeme kullanıldığı için yük taşıyıcılar ve ısı termo elemanlarda aynı yönde akmaktadır (H.J.Goldsmid 2009) (Şekil 2.9).



Şekil 2.9: p ve n tipi Elemanların Elektrik ve Isı İletimi Mekanizması (<https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers-intro.html>)

Bu şekilde çok sayıda p ve n çiftini mekanik olarak bir arada tutabilmek için Şekil 2.10'daki yapıdaki gibi, iletken bakır şeritler iki seramik plakalar arasına monte edilip p ve n (Bi-Te Posts matrix) çiftleri elektriksel olarak birbirlerine seri bağlantı şeklinde sıkıştırılır (<https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers-intro.html>).



Şekil 2.10: Termoelektrik Soğutucu Modül ve Bileşenleri (<https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers-intro.html>)

3. TERMOELEKTRİK MODÜL PARAMETRELERİ ve PARAMETRELERİN ELDE EDİLME YÖNTEMLERİ

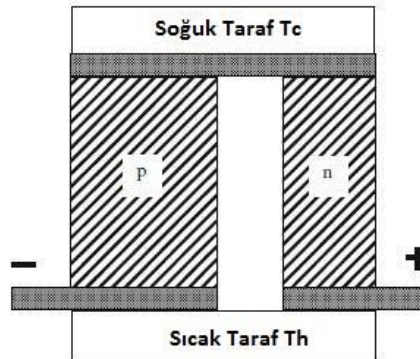
3.1 TES Modül Parametrelerinin Matematiksel Modellenmesi

Termoelektrik etkiler tersinir olmaları sebebiyle herhangi bir termodinamik kayıplara sebep olmazlar. Uygulamada termoelektrik etkiler her zaman joule ısınması ve ısı iletimi gibi tersinir olmayan fiziksel mekanizmalarla eş zamanlı olarak gerçekleşmektedirler. TES sistemlerin performansı her iki termoelemanın Seebeck katsayıları, ısı ve elektriksel dirençlerine bağlıdır. Sözkonusu dirençlerde öz direnç ve ısı iletkenlik katsayısına ve uzunluk kesit alanı oranına bağlıdır. Eşitlik (3.1) ve (3.2) (H.J.Goldsmid, 2009).

$$I = \frac{\rho \cdot V \cdot A}{L} \quad (3.1)$$

$$q = -\frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L} \quad (3.2)$$

Seebeck katsayısı (α), elektriksel iletkenlik (ρ) ve ısı iletkenlik katsayısı (k) sıcaklığın fonksiyonlarıdır. Sadece bir p&n tipi termoelemanları ele alarak matematiksel bir model oluşturulacaktır (Şekil 3.1) . Tek bir çift için elde edilen sonuçlar, çok sayıda p&n çifti bulunduran konfigürasyonlara kolayca uyarlanabilir. (H.J.Goldsmid 2009).



Şekil 3.1: p ve n tipi ısı çifti şematik gösterim (H.J.Goldsmid 2009)

Devreden akım geçirildiğinde aşağıdaki p&n çiftinin soğuk tarafından (T_1) Peltier etkisi ile Eşitlik (3.3)'teki kadar ısı çekilir. Bu soğutma etkisinde ters yönde eşitlik (3.4)'teki kadar ısı iletimi gerçekleşir. K_p ve K_n , p ve n tipi termoelemanların ısıl iletkenliğidir. Bu etkilere ek olarak toplam Joule ısınmasının yarısı da soğutma etkisine ters yönde gerçekleşir Eşitlik (3.5). R_p ve R_n , p ve n tipi termoelemanların ısıl dirençleridir. Sonuç olarak soğuk taraftan çekilen ısının net miktarını eş zamanlı olarak etkileyen bu üç fiziksel mekanizma tarafından eşitlik (3.6)'daki gibi belirlenir (H.J.Goldsmid 2009).

$$(\alpha_p - \alpha_n) \cdot I \cdot T_1 \quad (3.3)$$

$$(T_2 - T_1) \cdot (K_p + K_n) \quad (3.4)$$

$$\frac{I^2 \cdot (R_p + R_n)}{2} \quad (3.5)$$

$$\dot{Q} = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot I \cdot T_1 - (T_2 - T_1) \cdot (K_p + K_n) - \frac{I^2 \cdot (R_p + R_n)}{2} \quad (3.6)$$

3.2 Harman Yöntemini Temel Alan Elde Edilme Yöntemleri

İdeal modülü model olarak klasik hale gelmiş ölçüm ve test yönteminin temeli Harman yöntemine dayanmaktadır (Ioffe 1957).

$$\dot{Q}_C = n \cdot \left[\alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot (T_H - T_C) \right] \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_H = n \cdot \left[\alpha \cdot T_H \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot (T_H - T_C) \right] \quad (3.8)$$

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (3.9)$$

$$R = \frac{\rho_p \cdot L_p}{A_p} + \frac{\rho_n \cdot L_n}{A_n} \quad (3.10)$$

$$K = \frac{k_p \cdot A_p}{L_p} + \frac{k_n \cdot A_n}{L_n} \quad (3.11)$$

$$P = I^2 R + \alpha(T_H - T_C)I \quad (3.12)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{P} \quad (3.13)$$

$$Z = \frac{\alpha^2}{R \cdot K} \quad (3.14)$$

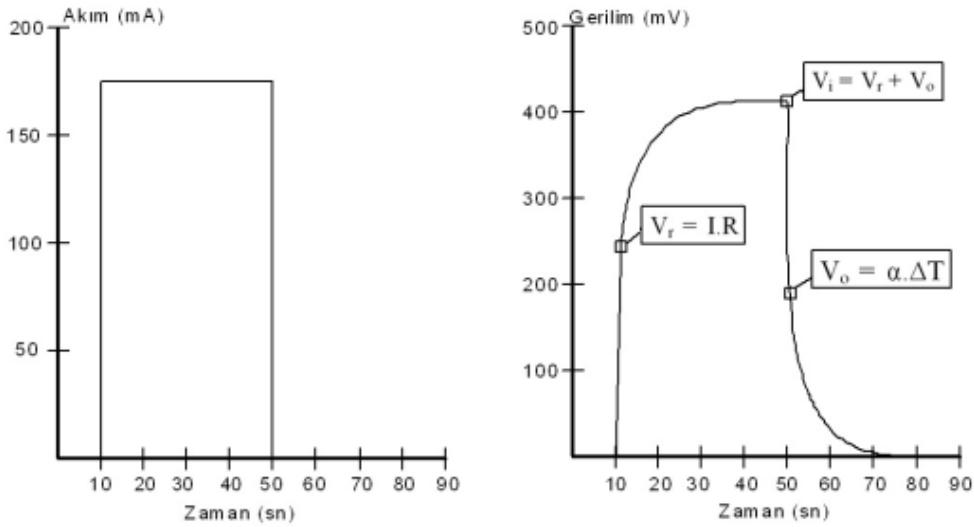
Burada \dot{Q}_c modülün soğuyan yüzeyinden soğurulan toplam ısı yükü (W), \dot{Q}_H modülün ısınan yüzeyinde açığa çıkan toplam ısı miktarı (W), I modüle uygulanan akım şiddeti (A), R termoelementin direnci (Ω), K modülün termal iletkenlik katsayısı ($W \cdot K^{-1}$)'dir. α_p p tipi yarıiletkenin Seebeck katsayısı (V/K), ρ_p p tipi yarı iletkenin elektriksel öz direnci ($\Omega \cdot cm$), k_p p tipi yarıiletkenin ısı iletkenlik katsayısı (W/cm K), α_n n tipi yarı iletkenin Seebeck katsayısı (V/K), ρ_n n tipi yarı iletkenin elektriksel öz direnci ($\Omega \cdot cm$), k_n n tipi yarıiletkenin ısı iletkenlik katsayısı (W/cm K), L yarıiletkenin yüksekliği (cm), A yarı iletkenin kesit alanı (cm^2), $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$ termoelementin toplam Seebeck katsayısı. $\Delta T = T_h - T_c$ yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı, T_c soğuk yüzeyin katsayısı, T_h sıcak yüzeyin sıcaklığı, $\dot{Q}_L = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv}$ (W) \dot{Q}_{rad} radyasyon dışısı yükü (W), \dot{Q}_{conv} konvansiyonel dış ısı yükü (W), P TES modülün tükettiği güç (W), COP TES modülün ısıl performans katsayısı ve Z kalite katsayısı (1/K) (Harman 1958).

Harman, Termoelektriksel etki gösteren numune boyunca bir sıcaklık gradyanı oluşturmak için Peltier etkisi kullanılarak, Z değerini veren tüm termoelektrik parametreleri tek bir cihazda ve tek seferde bulunabilmesine olanak tanıyan ölçüm tekniği geliştirmişlerdir. Yöntem bütünlüğü açısından avantajlı olarak gözüke de bu yöntem tekrarlanabilirlik ve ölçüm hassasiyeti konusunda yetersizdir (Harman 1958).

Ölçüm hassasiyetindeki net sonuçların elde edilebilmesi için ölçüm teknikleri üzerinde araştırmalar devam etmiştir. Ölçüm hassasiyetinde ve tekrarlanabilirlik konusunda birtakım iyileştirmelerin denendiği Harman yöntemini temel alan çalışmalarda ortaya konulan sonuçlar, ölçüm metotlarındaki değişkenliklerle

parametrelerin daha kesin değerlerde ölçülebileceğinin mümkün olacağını göstermektedir (Bowley ve diğ. 1961), (Penn ve diğ. 1964), Heylen ve diğ. (1975), Goldsmid ve diğ. (1986).

Buist (1992), TES materyal ve elementlerin parametrelerinin test edilmesi amacıyla Harman tarafından geliştirilen yöntemle aynı temele dayanan ancak tekrarlanabilirlik ve doğrulukta daha iyi olan yeni bir yöntem ortaya koymuştur. TES modüle yönelik gerilim (V_i), akım (I) ve sıcaklık farkı (ΔT) değerleri kolaylıkla ölçülebilirken; Seebeck voltajı (V_o) ve ohm kanunundan gelen gerilim (V_r) değerlerinin birbirinden ayrılması kolay değildir. Buist, bu iki değerin birbirinden ayrılmasını Harman metodundan daha modern şekildeki transiset ölçüm ile sağlamıştır (Şekil 3.2) (Buist, ve Ark diğ.).



Şekil 3.2: TES modül uçlarında görülen transient geriliminin zamana bağlı grafiği (Buist, ve diğ. 1992)

Transient gerilimin ölçümü yöntem ile, uygulanan lineer voltaj içerisindeki V_o , V_r değerlerinin düzgün şekilde hesaplanmasına olanak tanınmıştır. (Buist, ve diğ. 1992).

Bu yöntemde elde edilen yarı iletkenin parametreleriyle ısıl parametrelerin hesaplanması işleminde sadece TES modül çalışmazken yüksüz halin parametreleri elde edilebilmektedir. Bu şekilde de elde edilecek verilerin değerlendirilmesinde hatalar meydana gelmektedir. TES modülün yük altında sergilediği parametrelerin hesaplanmasındaki önem yalnızca sıcaklığın fonksiyonu olmayan aynı zamanda

yarıiletkenin boyutlarının da hesaba katılması gerekli olan denklemlerden gelmektedir (Dikilitaş 2009).

3.3 İdeal Denklemlerin Temel Alındığı Elde Edilme Yöntemleri

Uçları arasında sıcaklık farkı olan bir termoelektrik elemandan akım geçtiğinde oluşan elektrik alan hem elektrik akımından hem de sıcaklık farkından etkilenir. (3.15) eşitliğindeki; elektriksel alan (\vec{E}), Ohm Kanunu ($\vec{I} R$) ve Seebeck etkisi ($\alpha \vec{\Delta T}$) (2.1) Eşitliği ile ifade edilebilir. Benzer bir şekilde (3.16)'deki eşitlikle ısı akısı (\vec{q}) da hem elektrik alandan hem de sıcaklık farkından etkilenir. Isı akısı, Peltier Etkisi ($\alpha T \vec{I}$) (2.7) eşitliği ve Fourier Yasası ($-k \vec{\Delta T}$) toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu iki fiziksel mekanizma termoelektriğin en önemli 2 denklemini ortaya çıkarır.

$$\vec{E} = \vec{I} \rho + \alpha \vec{\Delta T} \quad (3.15)$$

$$\vec{q} = \alpha T \vec{I} - k \vec{\Delta T} \quad (3.16)$$

Bu iki denkleme ek olarak genel ısı iletim denklemini düşünürsek Eşitlik (3.17) elde edilir.

$$-\vec{\Delta q} + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.17)$$

Genel ısı iletim denklemi Eşitlik (3.18)'deki gibi sürekli rejim için yazılırsa zamana bağlı sıcaklık değişimi gözlemlenmez.

$$-\vec{\Delta q} + \dot{q} = 0 \quad (3.18)$$

Joule ve Thomson ısı üretimleri için de denklemler düzenlenirse eşitlik (3.19) ve (3.20)

$$\dot{q} = \vec{E} \vec{I} = (\vec{I} \rho + \alpha \vec{\Delta T}) \vec{I} \quad (3.19)$$

$$\dot{q} = I^2 \cdot \rho + \vec{I} \cdot \alpha \cdot \vec{\Delta T} \quad (3.20)$$

Seebeck katsayısının da sıcaklığa bağlı olduğu hesaba katılarak sürekli rejimde ısı üretimi (3.20) eşitliği ve ısı akısı (3.16) eşitliği ısı iletim denklemi (3.18)'de yerine yazılırsa aşağıdaki (3.21) eşitliği elde edilir.

$$\bar{\Delta}(k\bar{A}T) + I^2\rho - T \frac{da}{dT} I\bar{A}T = 0 \quad (3.21)$$

Burada ilk terim ısı iletimi, ikinci terim Joule ısısı ve üçüncü terim Thomson ısısıdır (Şekil 3.3).

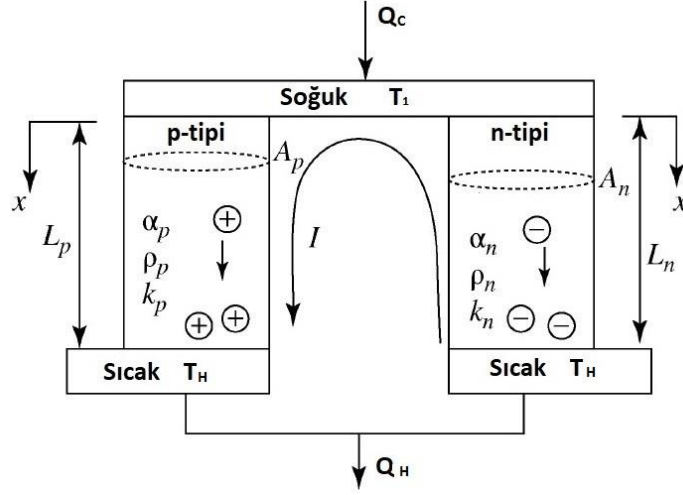
Seebeck katsayısı sıcaklıktan bağımsız olarak alınır ve Thomson ısısı sıfır olur. Buna ek olarak bir boyutlu bir modül düşünülürse ve sabit olan kesit alanı ile çarpılırsa eşitlik (3.22)'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{d}{dx} \left(kA \frac{dT}{dx} \right) + \frac{I^2\rho}{A} = 0 \quad (3.22)$$

Eşitlik (3.22)'deki denklem kullanılarak her bir termoeleman için sıcaklık dağılımı elde edilebilir, sıcaklık gradyanları bulunabilir. Bu sayede de soğuk yüzeyden çekilen ve sıcak yüzeyden atılan ısılar transport katsayıları ve geometrik parametreler cinsinden elde edilebilir. Tablo 3.1'deki kabuller kullanarak Eşitlik (3.22) düzenlenirse p ve n tipi termoelementten oluşan TES soğutucu üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil (3.3)'teki sınır şartlarına göre çözümlenebilir.

Tablo 3.1: İdeal denklem kabulleri

Kabuller	
1	Sürekli Rejim
2	Bir Boyutlu Isı Transferi
3	p ve n çiftlerinin temas noktalarında elektriksel ve termal dirençler ihmal edilmiştir.
4	Seebeck katsayısı sıcaklıktan bağımsızdır.
5	p ve n çifti arasındaki yüzeylerden ışıyım ve taşınım ile olan ısı transferleri ihmal edilmiştir.



Şekil 3.3: p ve n tipi termoelemanndan oluşan te soğutucu (Lee 2017)

Eşitlik (3.22), $T_{x=0}=T_c$ ve $T_{x=L}=T_L$ sınır şartlarına göre çözümlenirse eşitlik (3.23) elde edilir.

$$T(x) = -\frac{I^2 \cdot \rho \cdot x^2}{2 \cdot k \cdot A^2} + \left[\frac{T_H - T_C}{L} + \frac{I^2 \cdot \rho \cdot x^2}{2 \cdot k \cdot A^2} \right] \cdot x + T_C \quad (3.23)$$

Sıcaklık dağılımı bulunduktan sonra soğuk bağlantı yüzeyinde birim zamanda çekilen ısı eşitlik (3.24) olarak yazılıp, çözüldüğünde eşitlik (3.25) elde edilir.

$$\dot{Q}_C = n \cdot \left[(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_C \cdot I + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \Big|_p \right) + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \Big|_n \right) \right] \quad (3.24)$$

$$\dot{Q}_C = n \left[(\alpha_p - \alpha_n) T_C I - \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) - \left(\frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right) (T_H - T_C) \right] \quad (3.25)$$

Eşitlik (3.25)'e aşağıdaki (3.26), (3.27) ve (3.28) Eşitlikleri yerlerine yazılırsa soğuk bağlantı yüzeyinde birim zamanda çekilen ısı Eşitlik (3.29)'daki gibi elde edilmektedir.

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (3.26)$$

$$R = \frac{\rho_p \cdot L_p}{A_p} + \frac{\rho_n \cdot L_n}{A_n} \quad (3.27)$$

$$K = \frac{k_p \cdot A_p}{L_p} + \frac{k_n \cdot A_n}{L_n} \quad (3.28)$$

$$\dot{Q}_C = n \cdot \left[\alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot (T_H - T_C) \right] \quad (3.29)$$

Burada, α Seebeck katsayısı, R elektriksel direnç ve K ısı iletkenliktir. Modülde p-tipi ve n-tipi ısı çiftlerin benzer olduğunu kabul edilerek, $R = \rho \cdot L/A$ ve $K = k \cdot A/L$ yazılabilir. Bu eşitliklerde $\rho = \rho_p + \rho_n$ ve $k = k_p + k_n$ 'dir. Benzer bir şekilde sıcak bağlantı yüzeyindeki birim zamanda atılacak olan ısı Eşitlik (3.30)'un, Eşitlik (3.22), $T_{x=L} = T_L$ sınır şartlarına göre çözümlenirse Eşitlik (3.31) elde edilir.

$$\dot{Q}_H = n \left[(\alpha_p - \alpha_n) T_H I + \left(-kA \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} \Big|_p \right) + \left(-kA \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} \Big|_n \right) \right] \quad (3.30)$$

$$\dot{Q}_H = n \left[\alpha T_H I - \frac{1}{2} I^2 R - K (T_H - T_C) \right] \quad (3.31)$$

Termodinamiğin I. Yasasına göre harcanan güç, N tane çiftten oluşan TES modül için (3.32)'deki gibi bulunabilmektedir.

$$\dot{W} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C \quad (3.32)$$

Güç aynı zamanda gerilim ve akımın çarpımına ($\dot{W} = IV$) eşittir. Gerilim Eşitlik (3.33)'deki şekliyle düzenlenebilir.

$$V = n \left[\alpha (T_H - T_C) + IR \right] \quad (3.33)$$

Termodinamiğin I. Kanunundan TES modülün soğutma katsayısı Eşitlik (3.34)'deki gibi ifade edilebilir.

$$COP = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}} = \frac{n \left[\alpha T_C I - I^2 R - K (T_H - T_C) \right]}{n \left[I^2 R + \alpha I (T_H - T_C) \right]} \quad (3.34)$$

TES modülün \dot{Q}_C değerini maksimum yapan akım (I_{max}) Eşitlik (3.35)'deki gibidir.

$$I_{\max} = \frac{\alpha T_C}{R} \quad (3.35)$$

COP değerini maksimum yapan (I_{COP}) akım ise Eşitlik (3.36)'daki gibidir. Burada $\Delta T = T_2 - T_1$, $Z = \alpha^2 / \rho \cdot k$ ve $\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2$ olarak tanımlanmaktadır.

$$I_{\text{COP}} = \frac{\alpha \Delta T}{R \left(\sqrt{1 + Z \bar{T}} - 1 \right)} \quad (3.36)$$

$$ZT = ZT_H \left(1 - \frac{\Delta T}{2T_H} \right) \quad (3.37)$$

ZT değeri T_H sıcaklığına göre türetilirse Eşitlik (3.37) elde edilir (Lee 2017).

3.3.1 TES Modülün Maksimum Parametreleri

TES modülün ideal denklemleri, tablo (3.1)'deki kabul şartları altında TES modülün sergilediği maksimum; akım, sıcaklık, gerilim ve soğutma kapasiteleridir (Lee, 2017).

3.3.1.1 Maksimum akım (I_{\max})

TES modülde mümkün olan en yüksek sıcaklık farkı yani $(\Delta T)_{\max}$ olduğunda oluşan akımdır. Bu her zaman $\dot{Q}_C = 0$ olduğunda gerçekleşir. (3.29) ifadesinde $\dot{Q}_C = 0$ ve $T_C = T_H - \Delta T$ yazılarak $d(\Delta T) / dI = 0$ çözümlenmesi yapıldığında Eşitlik (3.38) elde edilir.

$$I_{\max} = \frac{\alpha}{R} \cdot \left(\sqrt{\left(T_H + \frac{1}{Z} \right)^2 - T_H^2} - \frac{1}{Z} \right) \quad (3.38)$$

Burada kalite katsayısı, $Z = \alpha^2 / \rho k$ veya $Z = \alpha^2 / RK$ şeklinde tanımlanır.

3.3.1.2 Maksimum sıcaklık farkı (ΔT_{\max})

Maksimum sıcaklık farkı, $\dot{Q}_C=0$ ve $I=I_{\max}$ olduğu durumda gerçekleşir. Sıcaklık farkının maksimum olduğu ($\Delta T=\Delta T_{\max}$) değerinde (3.29) eşitliğinde $I=I_{\max}$ yazılarak yerine konulursa Eşitlik (3.39) elde edilir.

$$\Delta T_{\max} = \left(T_H + \frac{1}{Z} \right) - \sqrt{\left(T_H + \frac{1}{Z} \right)^2 - T_H^2} \quad (3.39)$$

Denklem (3.39) ifadesi düzenlenip Denklem (3.38) ifadesinde yerine yazıldığında I_{\max} ifadesi Denklem (3.40) olarak daha basit halde elde edilebilir.

$$I_{\max} = \frac{\alpha \cdot (T_H - \Delta T_{\max})}{R} \quad (3.40)$$

3.3.1.3 Maksimum Soğutma Yüğü ($\dot{Q}_{C\max}$)

$\Delta T=0$ ve $I=I_{\max}$ şartlarında elde edilen soğutma yüküdür. Denklem (3.29)'da $\Delta T=0$ ve $I=I_{\max}$ elde etmek için $T_C=T_H$ yazılırsa Eşitlik (3.41) elde edilir.

$$\dot{Q}_{C\max} = \frac{n \cdot \alpha^2 (T_2^2 - \Delta T_{\max}^2)}{2 \cdot R} \quad (3.41)$$

3.3.1.4 Maksimum Voltaj (V_{\max})

$I=I_{\max}$ akımında maksimum sıcaklık farkını $\Delta T=\Delta T_{\max}$ veren voltajdır. Eşitlik (3.33)'te yerine konulursa Eşitlik (3.42) elde edilir. (Lee 2017).

$$V_{\max} = n \cdot \alpha \cdot T_2 \quad (3.42)$$

3.3.2 Normalleştirilmiş parametreler

TES modülde gerçek değerler maksimum değerlere bölünerek TES'nin karakteristikleri normalize edilebilmektedir. $\Delta T/\Delta T_{\max}$, I/I_{\max} ve ZT_H

fonksiyonlarıdır. Bu üç parametreye bağlı olarak normalize edilmiş grafikler elde edilerek TES modülün karakteristikleri yorumlanabilir (Lee 2017).

$$\frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_{C_{\max}}} = \frac{n \cdot \left(\alpha \cdot (T_H - \Delta T) \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T \right)}{n \cdot \alpha^2 \cdot (T_H^2 - \Delta T_{\max}^2) / 2 \cdot R} \quad (3.43)$$

$$\frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_{C_{\max}}} = \frac{2 \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right) \frac{I}{I_{\max}} - \left(1 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right) \left(\frac{I}{I_{\max}} \right)^2 - \frac{2 \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \frac{\Delta T_{\max}}{T_H}}{Z T_H \left[1 - \left(\frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right)^2 \right]}{1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} - \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} + \frac{\Delta T_{\max}}{T_H}} \quad (3.44)$$

Eşitlik (3.44)'deki $\Delta T/T_H$ ifadesi (3.45)'deki gibidir.

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_H} = \left(1 + \frac{1}{Z T_H} \right) - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{Z T_H} \right)^2 - 1} \quad (3.45)$$

Normalize edilmiş COP değeri (3.46)'da gösterilmiştir.

$$\text{COP} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right) \frac{I}{I_{\max}} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right) \left(\frac{I}{I_{\max}} \right)^2 - \frac{\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} - \frac{\Delta T_{\max}}{T_H}}{Z T_H \left(1 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right)}}{\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \frac{I}{I_{\max}} + \left(1 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right) \left(\frac{I}{I_{\max}} \right)^2} \quad (3.46)$$

Normalize edilmiş Voltaj değeri (3.47)'de gösterilmiştir.

$$\frac{V}{V_{\max}} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \cdot \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} + \left(1 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right) \cdot \frac{I}{I_{\max}} \quad (3.47)$$

Maksimum COP değeri için normalize edilmiş akım değeri (3.48)'de gösterilmiştir.

$$\frac{I_{\text{COP}}}{I_{\max}} = \frac{\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \cdot \frac{\Delta T_{\max}}{T_H}}{\left(1 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right) \cdot \left(\sqrt{1 + Z \cdot T} - 1 \right)} \quad (3.48)$$

Eşitlik (3.37) kullanılarak $Z\bar{T}$ değeri (3.49) gibi yazılabilmektedir (Lee, 2017).

$$Z \cdot \bar{T} = Z \cdot T_H \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta T_{\max}}{T_H} \right) \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \right) \right) \quad (3.49)$$

3.3.3 TES Modülün Etkin Malzeme Özellikleri

TES modül üreticileri I_{\max} , V_{\max} , ΔT_{\max} ve $\dot{Q}_{c,\max}$ değerlerini kataloglarında paylaşmaktayken malzeme özelliklerine bağlı olan Seebeck katsayısı (α), elektrik özdirenci (ρ) ve ısı iletim katsayısı (k) değerlerini genellikle vermemektedir. Bu durum, TES tasarım uygulamalarında ideal denklemleri kullanarak matematiksel modelleme yapmakta zorluk yaratmaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmak için Lee (2017), maksimum parametrelerin fonksiyonu olan etkin malzeme özellikleri yöntemini geliştirmiştir.

Maksimum parametreler, malzeme özelliklerinin (α , ρ , k), geometrinin (A/L) ve iki bağlantı yüzey sıcaklıklarının (T_H , T_C) fonksiyonudur. Aynı zamanda TES sistemler için ideal denklemleri ve malzeme özellikleri kullanılarak elde edilen performans eğrileri, ticari modüller çalıştırılarak ve ölçülerek elde edilen eğrilerden sapmalar göstermektedir. Bunun nedeni, ideal denklemler elektriksel ve termal dirençler, Thomson etkisi ve ısı kayıplarını içermeyen belli kabuller yapılarak türetilmiştir. Bu kayıpların hesaba katılması ideal denklemlerin çözümlemesinde tasarımı daha da zorlaştırmaktadır. Bu durumu gidermek için etkin malzeme özellikleri kullanılarak (ρ^* , α^* , k^* ve Z^*), ticari modüllerin katalog değerlerinden alınan maksimum parametreler kullanılarak matematiksel olarak malzeme özellikleri elde edilebilmektedir. Etkin malzeme özelliklerinin; elektriksel ve termal dirençleri, Thomson etkisini ve ısı kayıplarını da içerdiği unutulmamalıdır. Ayrıca bulunan etkin malzeme özelliklerinin, bir ısıl çift için hesaplanan değerler olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Sadece p-tipi veya n-tipi termoelemanın etkin malzeme özelliğinin bulunması isteniyorsa, bulunan değer ikiye bölünmesi gerekmektedir (Lee 2017).

. Eşitlik (3.38), (3.39), (3.40) ve (3.41)'deki maksimum parametre denklemleri kullanılarak bir çift termoelement için (p-tipi ve n-tipi) etkin malzeme özellikleri sırasıyla α^* , ρ^* , Z^* , k^* (3.50), (3.51), (3.52) ve (3.53) için ifade edilmiştir (Lee 2017).

$$Z^* = \frac{2 \cdot \Delta T_{\max}}{(T_H - \Delta T_{\max})^2} \quad (3.50)$$

$$\alpha^* = \frac{2 \cdot \dot{Q}_{C\max}}{n \cdot I_{\max} \cdot (T_H + \Delta T_{\max})} \quad (3.51)$$

$$\rho^* = \frac{\alpha^* \cdot (T_H - \Delta T_{\max}) \cdot A / L}{I_{\max}} \quad (3.52)$$

$$k^* = \frac{(\alpha^*)^2}{\rho^* \cdot Z^*} \quad (3.53)$$

3.4 TES Modülün Çıkış Parametrelerinin Elde Yöntemleri

Çalışan TES modüle ilişkin ısı ve elektriksel parametrelerin eldesinde çeşitli denklem ve yöntemler kullanılmaktadır. Parametrelerin elde işleminde, kullanılan yöntem, enstürmantal altyapı ve formülüzasyon; sonuçların doğruluğu için büyük önem taşımaktadır.

3.4.1 Ahıska Yöntemi

AHISKA tarafından geliştirilmiş, yük altındaki TES modülün etkin malzeme özelliklerinin elde edilmesinde, I_{\max} , ve V_{\max} maksimum parametrelerini doğrudan ölçerek ΔT_{\max} maksimum parametresini de soğuyan ya da ısınan yüzeylerdeki sıcaklıkların herhangi birinden aldığı değerle; diğer yüzey sıcaklığını ise maksimum termoelektromotor kuvveti E_{\max} cinsinden ölçerek türettiği bağıntıdan çekmesiyle TE modülün maksimum parametrelerini harman eşitlikleri özeline dayandığı yeni bir formülle türetmiştir. Kullandığı bu parametrelerin yarı iletkenlerin geometrik özelliklerine bağlı olmadığını ve modülün makro büyüklüklerini oluşturduğunu ve elde edilen bu eşitliklerin çalışan gerçek bir modülün parametrelerini karakterize edebildiğini ifade etmiş. TES modülün toplam performansına etki edecek tüm etkileri, deneysel olarak ölçebildiği TEPAS adını verdiği düzenekle I_{\max} , V_{\max} ve E_{\max} değerlerinde doğrudan hesaplanabildiğini ifade edilmektedir (Şekil 3.4) (Ahıska 2007), (Dişlitaş 2008), (Dişlitaş 2009).

Harman tekniğindeki transiset ölçümü ile elektriksel parametrelerden yukarıdaki eşitliklerde bahsedildiği gibi TES modülün ısı parametreleri tespit edilmektedir. AHISKA yöntemin temelini; (3.7), (3.8) ve (3.14) Eşitliklerinden oluşturulduğu ifade edilmektedir. Bu denklemleri akım ve termoelektromotor kuvveti cinsinden ölçebildiği büyüklüklerle ifade edebileceği şekilde değişikliklere uğratmıştır. Bu sayede yük altındaki TES modülün tüm ısı parametrelerini deneysel olarak hesaplayabildiğini ifade etmiştir (Ahıska 2007).



Şekil 3.4: TEPAS ölçüm cihazı görseli (Dişlitaş 2009)

Yüksüz çalışan TES modülün iken $\dot{Q}_C=0$ şartında sıcaklık farkı ΔT_{max} 'a eşit olduğunu bu durumda TES modülden çekilen akım I_{max} ve TES modülün uçları arasındaki gerilim değeri de V_{max} olmaktadır (Ahıska 2007).

$$0 = \alpha I_{max} T_{cmin} - 0,5 I_{max}^2 R - K \Delta T_{max} \quad (3.54)$$

Isıl denge Eşitlik (3.54)'deki gibi türetilmiştir. Buradan R'değeri Eşitlik (3.55)'deki, T_{cmin} değeri eşitlik (3.56)'daki gibidir.

$$R = \frac{V_{max} - E_{max}}{I_{max}} \quad (3.55)$$

$$T_{Cmin} = T_H - \frac{E_{max}}{\alpha} \quad (3.56)$$

TES modüle uygulanan akım şiddeti I ve ısı yük \dot{Q}_C 'nin değerlerindeki değişimler T_H değerini çok az etkilediği yaklaşımla soğuk yüzeye gelen toplam ısı yükü (3.57)'de ve ısınan yüzeyden atılan ısıyı da Eşitlik (3.58) ile ifade edilmiştir.

$$\dot{Q}_C = V_{max} I - \frac{0,5 I^2 (V_{max} - E_{max})}{I_{max}} - \left(I + \frac{0,5 (V_{max} - E_{max}) I_{max}}{E_{max}} \right) E \quad (3.57)$$

$$\dot{Q}_H = V_{\max} I + \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \left(\frac{0,5(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}} \right) E \quad (3.58)$$

Aynı yaklaşımla TES modülün tükettiği güç (P) değeri Eşitlik (3.59), TES modülün COP değeri Eşitlik (3.60) ve kalite katsayısı da eşitlik (3.62)'deki gibidir.

$$W = \frac{I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} + EI \quad (3.59)$$

$$COP = \frac{V_{\max} I - \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \left(I + \frac{0,5(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}} \right) E}{\frac{I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} + EI} \quad (3.60)$$

$$Z = \frac{V_{\max} E_{\max}}{0,5(V_{\max} - E_{\max})^2 T_H} \quad (3.61)$$

T_H sıcaklığı ve TES modülün termoemk (E) değerlerinden T_C sıcaklığını hesaplayarak farklı akımlardaki \dot{Q}_C değişimleri Eşitlik (3.62)'de ifade edilmiştir.

$$E = \frac{V_{\max} I - \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \dot{Q}_C}{I + \frac{0,5(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}}} \quad (3.62)$$

Elde edilen Eşitlik; (3.55), (3.57), ve (3.63) çalışma anında TES modüle ait tüm parametreleri verdiği ifade edilmiştir (Ahıska 2007). Çıkarımlara göre; klasik yöntemlerde kullanılan TES yarı iletkenin α , ρ , k ve z parametrelerinin yerine I_{\max} , V_{\max} ve E_{\max} deneysel parametreler kullanılmıştır. Bu eşitliklerin kullanılabilmesi için hem her modül için farklı olan I_{\max} , V_{\max} ve E_{\max} deneysel parametre değerlerinin hem de T_C veya T_H sıcaklıklardan birinin doğrudan ölçülmesi gerekmektedir. Burada V_{\max} ve E_{\max} TES modülü oluşturan TES yarı iletkenleri karakterize ettiği için, bu parametrelerin yarı iletkenlerin geometrik özelliklerine bağlı olmadığı ve modülün makro büyüklüklerini oluşturdukları, bu niceliklerin çok büyük hassasiyetle kolayca ölçülebileceği ifade edilmiştir.

3.4.2 RMT Firmasının Kullandığı Elde Etme Yöntemleri

RMT firmasının geliştirdiği DX8020 modeli test cihazında TES modüle ilişkin ısı ve elektriksel parametrelerin vakum altında yüksek hassasiyetle ölçümü yapılmaktadır (Şekil 3.5). RMT firmasının ilk olarak 2009 yılında geliştirdiği bu ölçüm cihazında TES modüle ilişkin ısı ve elektriksel parametre çıktıları, maksimum parametreler üzerinden ölçüp, kalite katsayısı Harman yöntemi ile formülize edilmiştir. Ölçüm çıktılarının polinomal interpolasyon yöntemi ile de malzeme özellikleri elde edilmektedir.



Şekil 3.5: RMT DX8020 test cihazı görseli (RMT Ltd. 2019)

TES modülün çıkış parametrelerine yönelik ölçüm cihazında kullandığı kabuller; sürekli rejimdeki TES modülün bir boyutlu ısı transferi, p ve n çiftlerinin temas noktalarındaki elektriksel ve termal dirençlerinin dahil edildiği, Seebeck katsayısının sıcaklıkla değişimi ihmal edilmediği (Sıcak yüzey sıcaklığı sabit tutulmuştur) ve çiftler arasındaki yüzeylerden ışınım ve taşınım ile olan ısı transferleri hesaplandığı şeklindedir. Bu kabuller ile parametreler, Bu kabullere göre parametreler yapılan ölçümlerin doğrultusunda bulunmuştur (RMT Ltd. 2019).

RMT firmasının geliştirdiği ölçüm düzeneğinde, yük altındaki TES modülün maksimum parametrelerini test ettiği değerlerin polinomal interpolasyonu bulunmaktadır. Malzeme özelliklerinin ise Harman metodundaki performans katsayısının (ZT) buldurulması ile hesaplandığı ifade edilmiştir.

Ölçülebilir maksimum parametrelerin elde edilmesinde doğrudan ölçülen değerler ters polinom yaklaşımı ile sağlanmış, polinomal interpolasyon ile de parametrelerin stabilize sıcaklıkta elde edildiği ifade edilmiştir. $\Delta T(I)$ grafiğinde ters parabol eğrisinin tepe noktası, I_{\max} akımındaki sıcaklık farkı ΔT_{\max} sıcaklığını verirken, eğriye ait üç noktanın değerlerinin test edilmesi ile ölçümler Cramer yöntemi

ile hesaplatılıp ΔT_{\max} , I_{\max} ve V_{\max} değerlerinin bulunduğu ifade edilmiştir. \dot{Q}_{\max} değerinin ölçülmesi işleminde ΔT 'yi sıfır yapan şartlar I_{\max} iken sağlatılıp \dot{Q}_{\max} değerinin ölçüm düzeneği tarafından ölçüldüğü belirtilmiştir. Bulunan parametreler polinomal interpolasyon yaklaşımları ile de doğrulanmıştır. Kullanılan polinom interpolasyon yaklaşımı, en küçük kareler yöntemine dayanmaktadır. İki boyutlu N nokta kümesi $y_i(x_i)$ için n mertebeli kuvvet polinomu Eşitlik (3.63).

$$y(x)=A_0+A_1x+A_2x^2+\dots+A_{n-1}x^{n-1}+A_nx^n=\sum_{j=0}^n A_jx^j \quad (3.63)$$

Polinomun katsayıları aşağıdaki gibidir;

$$a_0=N, a_1=\sum_{i=1}^N x_i, a_2=\sum_{i=1}^N x_i^2, \dots, a_{2n-1}=\sum_{i=1}^N x_i^{2n-1}, a_{2n}=\sum_{i=1}^N x_i^{2n} \quad (3.64)$$

$$b_0=\sum_{i=1}^N y_i, b_1=\sum_{i=1}^N x_i y_i, \dots, b_{n-1}=\sum_{i=1}^N y_i x_i^{n-1}, b_n=\sum_{i=1}^N y_i x_i^n \quad (3.65)$$

Eşitlik 3.66 ve Eşitlik 3.67'yi (n+1)'e göre çözüp A_j katsayısı bulunur.

$$A_n \cdot a_n + A_{n-1} \cdot a_{n-1} + \dots + A_1 \cdot a_1 + A_0 \cdot a_0 - b_0 = 0 \quad (3.66)$$

$$A_n \cdot a_{n+1} + A_{n-1} \cdot a_n + \dots + A_1 \cdot a_2 + A_0 \cdot a_1 - b_1 = 0 \quad (3.67)$$

....

$$A_n \cdot a_{2n-1} + A_{n-1} \cdot a_{2n-2} + \dots + A_1 \cdot a_{2n-1} + A_0 \cdot a_{n-2} - b_{n-1} = 0 \quad (3.68)$$

$$A_n \cdot a_{2n} + A_{n-1} \cdot a_{2n-1} + \dots + A_1 \cdot a_{2n-n} + A_0 \cdot a_{n-1} - b_n = 0 \quad (3.69)$$

Buradan kök ortalama kare sapması Eşitlik (3.70)'deki gibidir.

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(P(x_i) - y_i)^2}{N}} \quad (3.70)$$

İkinci dereceden polinom için N nokta kümesi değerlerinde polinomun katsayılarının çözümü Eşitlik (3.71)'deki gibidir.

$$y(x)=Ax^2+Bx+C \quad (3.71)$$

$$a= \sum_{i=1}^N x_i^4, b= \sum_{i=1}^N x_i^3, c= \sum_{i=1}^N x_i^2, d= \sum_{i=1}^N x_i, f=N \quad (3.72)$$

$$aa= \sum_{i=1}^N y_i x_i^2, ab= \sum_{i=1}^N y_i x_i, ac= \sum_{i=1}^N y_i \quad (3.73)$$

Aşağıdaki denklem setinin çözümü ile A, B ve C kat sayıları bulunmaktadır.

$$A.a+B.b+C.c-aa=0 \quad (3.74)$$

$$A.b+B.c+C.d-ab=0 \quad (3.75)$$

$$A.c+B.d+C.N-ac=0 \quad (3.76)$$

$y(x)=Ax+B$ polinomuna eşitlikteki değerler atanıp katsayı çözümüne gidilerek Lineer interpolasyon işlemi yapılmaktadır.

$$a= \sum_{i=1}^N x_i^2, b= \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.77)$$

$$aa= \sum_{i=1}^N y_i x_i, ab= \sum_{i=1}^N y_i \quad (3.78)$$

Aşağıdaki denklem setinin çözümü ile A, B sayıları bulunmaktadır.

$$A.a+B.b-aa=0 \quad (3.79)$$

$$A.a+B.c-ab=0 \quad (3.80)$$

Polinomal interpolasyon yöntemi ile deneysel parametre ölçümlerinin sağlanmasının yapıldığı ifade edilmiştir (RMT Ltd. 2019). TES modüle ilişkin performans katsayısı (ZT) Harman Tekniği ile düzenek tarafından ölçülen değerler neticesinde bulunup etkin malzeme özelliklerinin saptanmasında kullanılmıştır (RMT Ltd. 2019).

3.4.3 Test Düzenğinde Kullanılacak Elde Yöntemi

Test düzeninde çalışan tek kademeli TES soğutucu modülün çıkış parametreleri, doğrudan ve dolaylı olarak ölçülen test değerleri ile ideal denklemler kullanarak sağlanmaktadır (Lee 2017). TES modülün malzeme özelliklerinin bulunması için maksimum parametre değerleri doğrudan ölçülerek etkin malzeme özellikleri hesaplanacaktır (Lee 2017). Test düzeninde bu yöntemle etkin malzeme özelliği eldesi işlemi benzer ölçüm cihazlarına göre ölçülebilirliği ve kontrol edilebilirliği düşük maliyetli olup yüksek doğruluk avantajı sağlamaktadır. Ayrıca geliştirilen test düzeninde soğutucu akışkanın sıcaklık ve debi kontrolü yapılabildiğinden yüksek kapasitedeki TES modüllerin ölçüm işlemleri de rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir.

Ölçüm işleminde; Sürekli rejimde bir boyutlu ısı transferi, p ve n çiftlerinin temas noktalarında elektriksel ve termal dirençlerin ihmal, Seebeck katsayısının sıcaklıktan bağımsız tutulması ve p ve n çifti arasındaki yüzeylerden ışınım ve taşınım ile olan ısı transferleri ihmal edilmesi kabulleri yapılmıştır (Tablo:3.1’de kabuller belirtilmiştir).

Deneysel parametrelerin eldesinde, kararlı rejimdeki sıcaklıkların belirlenmesi gerekmektedir. Kararlı rejim sıcaklıklarını tespit edebilmek için sıcaklıkların dengelenmesini sağlayan Arduino yazılımı geliştirilmiştir. TES modülün uçlarına lineer artırımlı sabit DC voltajlar uygulanarak $\Delta T = \Delta T_{max}$ sıcaklığında TES modülün, $I = I_{max}$ akımını ve $V = V_{max}$ voltajını ürettiği andaki maksimum parametrelerin ölçülmesi mümkündür. Bu parametrelerin eldesinde; T_C ve T_H sıcaklıkları, DS18B20 sıcaklık sensörlerinin yazılım programındaki veri işleme yöntemi ile deneysel olarak buldurulmaktadır. TES modülün çektiği I akımı hall efekt yöntemi ile çalışan ACS712 akım sensörü verilerin işlenmesi ile tespit edilmektedir. TES modülün I akımını oluşturan V voltajı değeri ise oransal direnç hesaplaması yöntemi kullanılan voltaj sensörü verilerinin işlenmesi ile deneysel olarak elde edilmektedir.

TES modülü, $I = I_{max}$ akımında $\Delta T = \Delta T_{max}$ sıcaklığında soğutma yükü sıfıra eşit olmaktadır. TES modülün soğuk yüzeyine harici bir ısı kaynağı ile $I = I_{max}$ akımı altında $\Delta T = 0$ sıcaklığına getirildiğinde, harici ısıtıcının TES modüle aktardığı ısı (\dot{Q}_{heat}), \dot{Q}_{cmax} değerine eşittir.

$$\dot{Q}_{\text{cmax}} = \dot{Q}_{\text{heat}} \quad (3.81)$$

Ölçüm düzeneğinde TES modülün malzeme özelliklerini ideal denklem kabulleri ile numerik olarak üreticinin beyan ettiği değerler altında da incelenmiştir. İdeal denklemlerdeki Thomson ısı ve ısı kayıplarının hesaplanmadığı şartlardaki değerlerin, etkin malzeme özellikleri ile bulunan değerlerle farklı incelencektir. Malzeme özelliklerinin bulunmasında aşağıdaki denklemlerce ısı ve elektriksel parametreler, C# yazılım programına eklenmiştir.

Seebeck katsayısının (α) bulunmasında Eşitlik (3.42)'deki V_{max} değerinde Seebeck katsayısı yalnız bırakılırsa Eşitlik (3.82) elde edilir.

$$\alpha = \frac{V_{\text{max}}}{nT_H} \quad (3.82)$$

TES modülün elektriksel direncinin (R) bulunmasında Denklem (3.40)'daki I_{max} ifadesinden R değeri yalnız bırakılarak eşitlik (3.83) elde edilir.

$$R = \frac{\alpha(T_H - \Delta T_{\text{max}})}{I_{\text{max}}} \quad (3.83)$$

Yarı iletkenin kalite katsayısının (Z) elde edilmesinde, Eşitlik (3.39)'daki ΔT_{max} ve T_H sıcaklıkları kullanılarak Z değeri yalnız bırakılırsa Eşitlik (3.84) elde edilir.

$$Z = \frac{1}{\frac{\Delta T_{\text{max}}}{2} + \frac{T_H^2}{2\Delta T_{\text{max}}} - T_H} \quad (3.84)$$

TES modüle ait elektriksel direnç ifadesi, sıcaklık ve I_{max} akımına bağlı olarak elde edildikten sonra yarı iletkenin öz direnci (ρ), R elektriksel direncine göre bulunabilmektedir. Eşitlik (3.27)'deki TES modüle ait elektriksel direnç ifadesinde n ve p tipi yarı iletkenler için kesit alan ve uzunluk cinsinden öz dirençler ifade edilmiştir. Isıl çiftlerin benzer özelliklerde olduğunu kabul edilip yar iletkene ait öz direnç ifadesi Eşitlik 3.85'deki gibi yazılır.

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (3.85)$$

Benzer şekilde yarı iletkenin termal iletkenlik katsayısı; kalite katsayısı, Seebeck katsayısı ve yarı iletkenin öz direnci eşitliğinden öz direncin yalnız bırakılması ile Eşitlik (3.86) ve (3.87)'deki gibi çekilir.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (3.86)$$

$$k = \frac{\alpha^2}{Z\rho} \quad (3.87)$$

Eşitlik (3.87)'deki yarıiletkenin termal iletkenlik katsayısı değeri; Eşitlik (3.28)'deki TES modül özelliklerinin eklenmesi ile TES modüle ait termal iletkenlik katsayısı, K elde edilir. Benzer şekilde sıcak bağlantı noktasından atılan ısı, \dot{Q}_H Eşitlik (3.31)'den elde edilir. TES modülün harcadığı güç \dot{W} Eşitlik (3.32)'den, TES modülün COP değeri eşitlik (3.34)'den ve COP değerini maksimum yapan I_{COP} akımı Eşitlik (3.36)'dan elde edilmiştir.

Eşitlik (3.50), (3.51), (3.52) ve (3.53)'deki; etkin kalite katsayısı, etkin Seebeck katsayısı, etkin öz direnç ve etkin ısı iletkenlik katsayısı değerleri T_H değerine bağlıdır. Ölçüm düzeneğinde, T_H sıcaklığı farklı değerlerde sabit tutulabildiği gibi test işlemi boyunca 25,5 °C'de sabit sıcaklıkta tutulmaktadır.

4. ÖLÇÜM DÜZENEĞİ TASARIMI

TES modülün yük altındaki çıkış parametrelerinin ölçülüp kayıt alınmasını sağlayan test düzeneğin hazırlanmasında, ölçüm cihazının test gereksinimlerini karşılayacak bir alt yapıda olması hedeflenmiştir. Test şartlarının yerine getirilmesi ve yapının kararlı olması test düzeneğini işlevsel kılmaktadır. Test yapılacak ortamın şartlandırılması, hedef cisimlere verilen ve atılan ısı miktarı, ısı dengelerinin takibi, ölçümlerin tutarlılığı ve ölçümlerin tekrarlanabilirliği konusu test düzeneğinin amaçlarındandır. Tez kapsamında üretilen düzeneğin işleyişi, üç temel proses fonksiyonunu modüler bir yapıda yerine getirilebilmesi için modellenmiştir.

Test ölçümü düzeneğinin tasarım kriterini: Ortam basıncının kontrol altında tutmak, ölçüm altındaki TES modülün termal açıdan değişkenlikleri için ısı kuyusu oluşturulması ve hassas ölçüm yapabilmeye olanak tanıyan mikroişlemci kontrolü belirlemiştir.

Test ortamındaki ısı transferi yapan elemanların ısı transferleri hesaplanmaktadır. Termal denge senaryoları için hesaplanan miktardaki ısı transfer edilebilmesi için cisimlerin ısı transferlerinin yalnızca birbirleri arasında olması elzemdir. Bu kapsamda test düzeneğinde ortam havası kalması transferde istenmeyen girdilere sebep vereceğinden ortamı vakum altında tutarak hava kütlesinin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda test ortamı havasını tahliye edebilecek şekilde düzenek tasarlanmıştır.

Test işleminde test elemanlarının açığa çıkardığı atık ısıyı uzaklaştırılması ve harici ısı yükü ısısının atılması için sistemde kullanılacak ısı kuyusu için su soğutmalı blokların ısı transfer hesapları yapılmış ve soğutma yükünü karşılayacak soğutucu blok tasarlanıp üretilmiştir.

Ölçüm düzeneğinin elektrik, elektronik ve tesisat alt yapısının müdahale edilebilir oluşu konusunda donanım, yazılım ve tesisat malzemelerinin olduğu yalıtılmış test iş parçaları bölümü tasarlanmıştır.

4.1 Tez Düzeneğinin Genel Mekanik Yapısının Tasarımı

Ölçüm düzeneğinin mekanik tasarımında en önemli kriter, testinin yapılacağı TES modülün piyasada bulunan ticari modüllerin birçoğunun testine imkan tanıyabilecek şekilde olmasıdır. Test işlemini yapacak kullanıcı açısından kolay ölçüm yapılabilen anlaşılır, kontrol paneli olan modüler bir yapı oldukça avantaj sağlayacaktır.

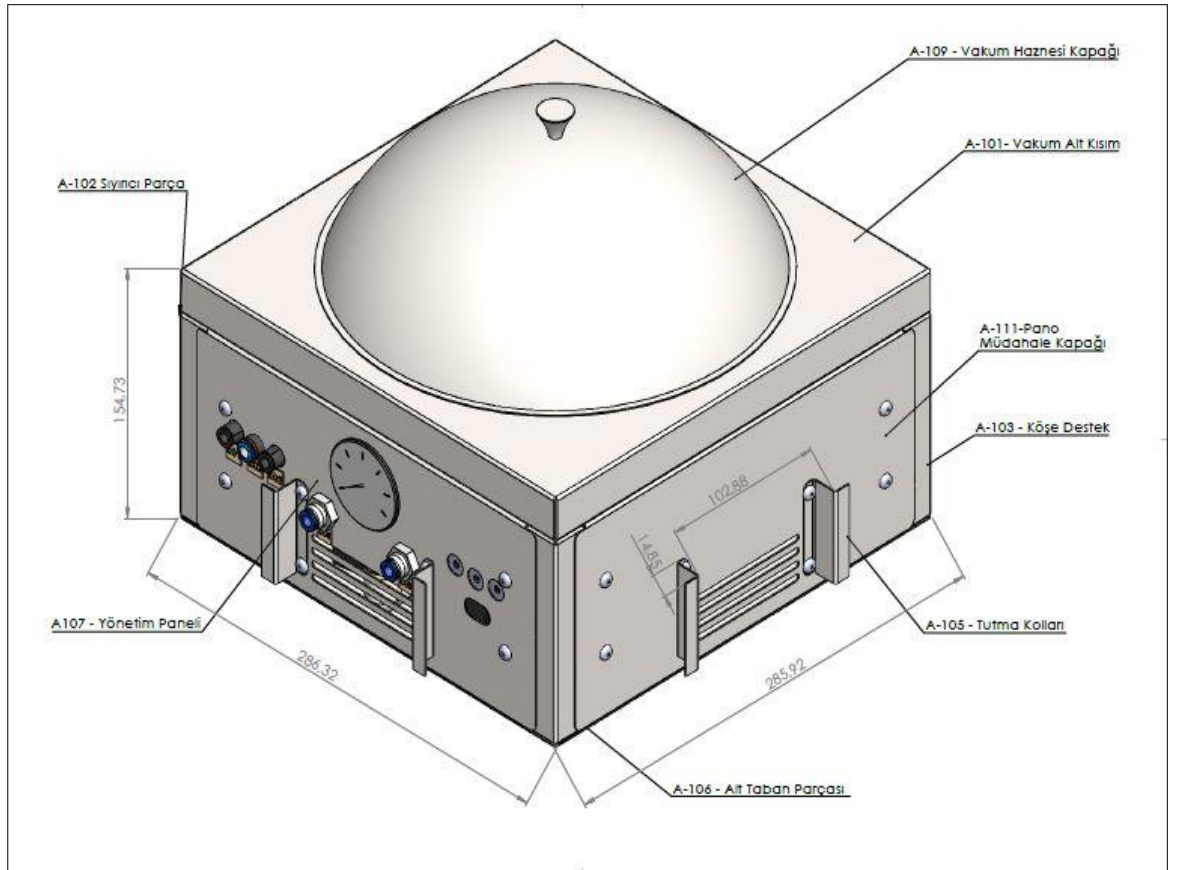
Kurulum ve kullanım bakımından ölçüm düzeneğinin olabildiğince küçük ebatlarda olması düzeneğin kullanımını kolaylaştıracaktır. Ölçüm düzeneğinin çalışmasında gerekli olan akışkan, elektrik ve vakum girdilerin temini için piyasada bulunan tiplerdeki konektör ve soketler olması istenmektedir. Bir diğer tasarım beklentisi ise test düzeneğinin aynı fonksiyonlardaki elemanlarının gruplandırılarak alt bölümler oluşturulabilmesi ve bu sayede kullanıcı karşılaştığı bir sorunda lokal olarak ilgili kısma müdahale edebilmesidir.

Tasarım parametrelerinin değerlendirmesi neticesinde, tasarımı şekillendiren temel etmenler, mekanik tasarım için girdiler oluşturulmaktadır. TES modülün test edileceği kısım vakum altında tutulacağı için ayrı bir bölmede olmalı ve test işleminde kolayca değiştirilebilmesi için TES modülün ölçüm kısmı parçalı yapıda olmalıdır. TES modülün fark sıcaklığının sabitlenmesi için soğuk yüzeyi üzerinde harici ısıtıcı, sıcak yüzeyinde soğutucu bloklar yer alacaktır. Soğutucu blokların soğutma yüzeylerin vakum hacmini sınırlaması gerekmektedir ancak mekanik olarak yüzeyler arası temas çizgisinin vakum hacmini sınırlaması zor olacağından soğutucu blokların belirli bir bölümü vakum yapılacak kısmın arasında, bir bölümü ise dışında kalmalıdır. TES modülün test işlemlerinin gerçekleşeceği vakum bölümü birinci kısım, soğutucu bloğun diğer yarısı bulunduğu ikinci kısım olmaktadır. Soğutucu bloğun ve üzerindeki vakum kısmının tesisat bağlantıları bu bölümde olmalıdır ve tesisat bağlantılarının olduğu bu bölümde vakum ortamının sıcaklığının diğer bölümden etkilenmemesi için vakum bölümünü altına termal iletkenliği düşük yalıtım malzemesi uygulanmalıdır. Donanım ve yazılım bölümleri kendi içlerinde mekanik olarak kapalıdır ve donanım ve yazılım kısımları ikinci bölüm içerisine yerleştirilebilir. Komponentlerin yazılım ve donanımlarla bağlantısını kurmak için düzenek üzerinden kolayca müdahale edilebilir bir pano yapılması yönetim ve kontrol açısından kolaylık yaratacaktır. Pano bölümü ikinci kısım içerisine yerleştirilerek dışarıdan müdahaleye imkan tanıyan bir kapağın

arkasına konumlanmalıdır. Tesisat ekipmanları ve göstergelerin bağlantı girişleri ise birbirine olacakları şekilde bir kapak üzerine takılarak konumlandırılmalıdır.

Ölçüm düzeneğinin vakum bölümünün ve altında kalan ölçüm bölümü şekil itibari ile dikdörtgen prizması formunda olması; kontrol paneli, pano kısmı, donanım kısmı ve tesisat kısımlarının yerleştirilmesi açısından işlevsel olacaktır. Ölçüm düzeneğinin şasesinde ise tasarımın kolay ve yaygın teknolojiye sahip olmasından dolayı sac metal parçalar tercih edilmiştir.

Ölçüm düzeneğinin mekanik tasarımı için bahsedilen girdileri oluşturmak adına bilgisayar destekli çizim programlarından faydalanarak düzeneğin genel izometrik gösterimi şekil Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Tez düzeneği genel izometrik gösterimi

Test düzeneğinin şasesi, DKP sac ile üretilmiş parçalardan oluşmaktadır. Vakum altında ölçümü yapılacak TES modülün vakum haznesi, “A-109” parça numaralı A304 paslanmaz çelikten yapılmış vakum kapağı ile “A-101” parça numaralı vakum haznesinin tabanını oluşturan ve yalıtım bölümünün çevresini saran parçalardan oluşturulmuştur. Vakum esnasındaki hava kaçaklarının sızdırmazlığını,

vakum kapağının çevresine uygulanan poliüretan silikon sağlamaktadır. Yalıtım olduğu bölümünü, düzenek iş parçalarının konumlandığı bölümden sıyrıran “A-102” parçası yer almaktadır. Şase panellerinde dört adet “A-103” parça numaralı; köşe taşıyıcı unsuru, “A-107”, “A-111”, “A-112” ve “A-113” parça numaralı dört adet de müdahale kapağı yer almaktadır. Müdahale kapakları civatalı birleştirme ile müdahale esnasında sökülüp takılabilmektedir. Müdahale kapaklarını tutmaya yarayan “A-105” parça numaralı ikişer çift tutma kolu yer almaktadır. Tutma kolları kapaklara perçin ile monte edilmiştir. Ölçüm düzeneğin alt tabanında “A-106” parça numaralı sac parça yer almaktadır ve “A-106” parçası alt tabanındaki kauçuk takozlar ile düz zemin üzerinde çalışabilir vaziyette yapılmıştır.

Ölçüm düzeneğin iş parçalarının konumlandığı bölümde: donanım yazılım kısmı, pano bölümü, tesisat elemanları ve yönetim paneli bulunmaktadır. Ölçüm düzeneğinin modüler yapısı sayesinde her bir müdahale kapağı, düzeneğin test fonksiyonlarını sağlayan bölümlerine doğrudan müdahaleyi imkanı kılmaktadır. Yönetim paneli “A-107” parça numaralı kapaktadır. Üzerinde test düzeneğinin vakum basıncını gösteren göstergesi, kablo giriş portları ve One-Touch bağlantı tipindeki girişler yer almaktadır (Şekil 4.2).

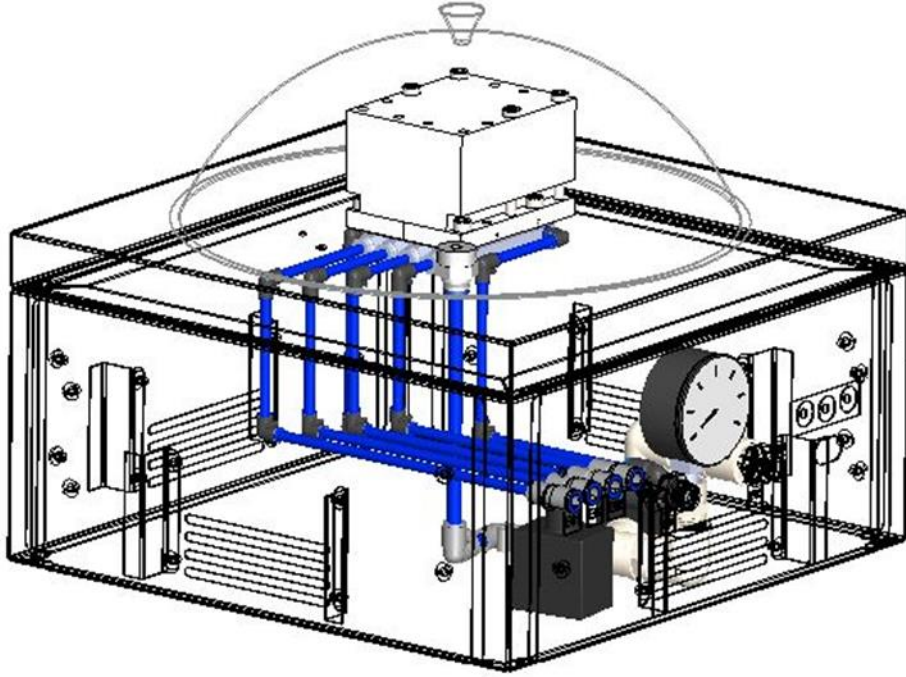


Şekil 4.2: Ölçüm düzeneği yönetim paneli

Donanım kısmına “A-113” parça numaralı kapak ile müdahale edilmektedir. Donanım kısmında geliştirici kartlar ile uyumlu komponentler yer aldığı “A-400-

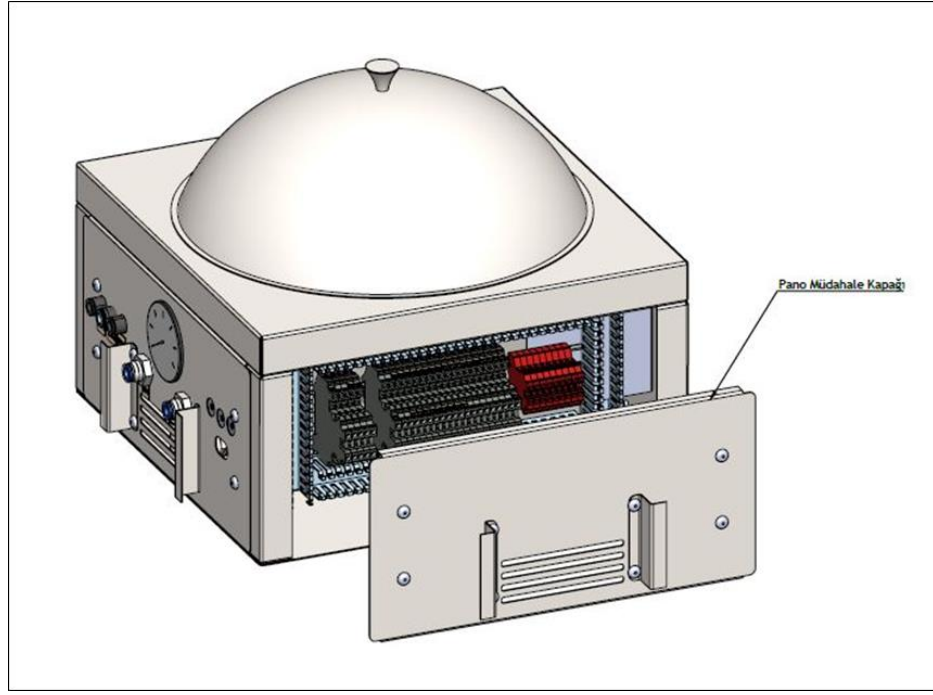
M01” parça montaj koduna sahip donanım haznesi bulunmaktadır. Donanım haznesi, galvanizli sacdan imal edilmiş olup 284x105x100 mm ölçülerindedir. Donanım haznesinin amacı, üzerindeki kablo-kablo bağlantılı klemensler yardımı ile test düzeneği ekipmanlarından gelen ve giden verileri içerisinde işleyerek iş sinyalleri üretmektir. Bu iş sinyallerini panoya doğrudan ya da test düzeneği ekipmanları aracılığı ile alıp göndermektedir.

Tesisat kısmına “A-112” parça kodlu kapaktan müdahale edilmektedir. Su tesisatı malzemelerini “E01”, “E02”, “E03” ve “E04” soğutma suyu hortumları ve “E05” numaralı dönüş suyu hortumları oluşturmaktadır. Basıncı hava tesisatı malzemelerini ise vakum havası hortumu, selenoid valfler ve basınç göstergesi oluşturmaktadır (Şekil 4.3).



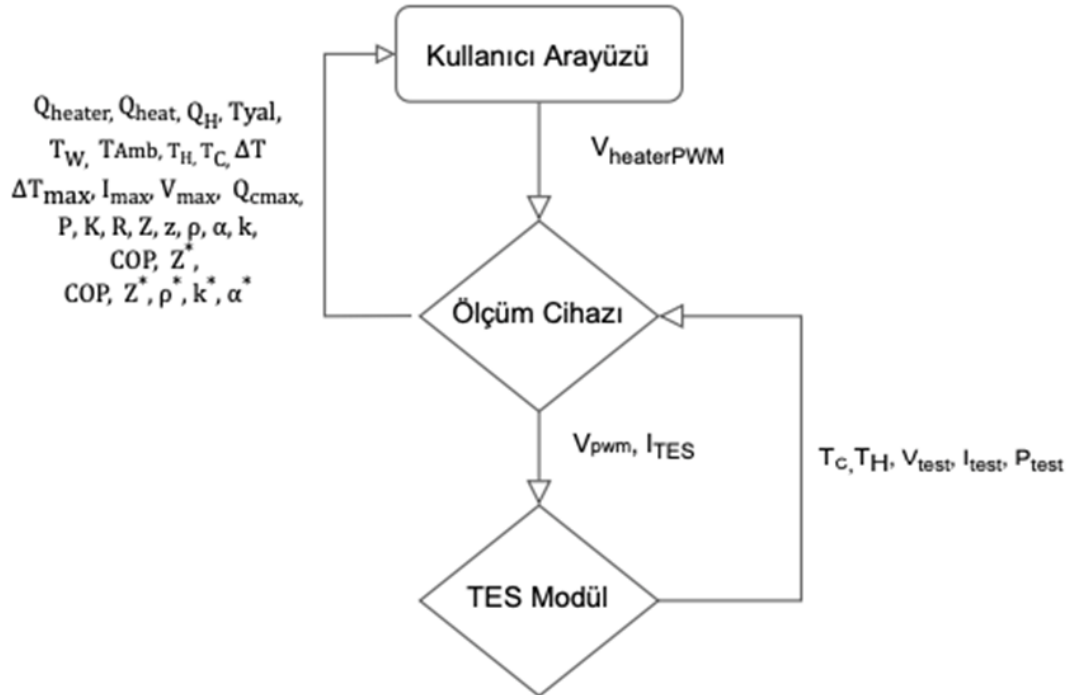
Şekil 4.3: A-112 kapağı tesisat kısmına ait görünümün yer aldığı görünüş

Pano kısmına “A-111” parça kodlu kapaktan müdahale edilmektedir. İşlevi, donanım haznesi ile test düzeneği ekipmanları arasında ve pano kısmına birleşik yazılım kısmından gelen verileri birbirleri ile köprülemektir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: A-111 pano müdahale kapağı dıştan patlak görünüm

Ölçüm düzeneğine ait bölümler genel olarak belirtilmiştir. Mekanik tasarım bölümünde bileşenlerinin detayları verilecektir. Ölçüm düzeneğinin ölçeceği parametrelere ilişkin tanımlar ve terimler belirlenerek girdi ve çıktılar Şekil 4.5'teki kontrol blok şemasında ifade edilmiştir.



Şekil 4.5: Kapalı çevrim genel kontrol döngü diyagramı

Kararlı rejim sıcaklık ölçüm prosedürleri baz alınıp ölçümü yapılan TES modülüne yazılımda belirtilen şekillerde elektriksel yük uygulanmaktadır. Burada test yükü potansiyeli V_{PWM} , test akımı I_{TES} , test süresince uygulanacak harici ısı yük \dot{Q}_{Heater} ile gösterilmektedir. Ölçümü yapılan TES modülünün bu şartlar altında sergilediği; test TES modülün sıcak yüzey sıcaklığı T_H test TES modülün soğuk yüzey sıcaklığı T_C , test TES modülün uçları arasındaki elektriksel potansiyel (V_{test}), test TES modülün bu elektriksel potansiyelindeki çektiği akım (I_{test}), test TES modülün test şartları altındaki gücü P_{test} 'ne ait değerlerin test düzeneğinin ölçüm bölümüne gönderilir ve işlenip kullanıcı arayüzüne gönderilir (\dot{Q}_{heater} , \dot{Q}_{heat} , \dot{Q}_H , T_{yal} , T_W , T_{Amb} , T_H , T_C , ΔT , ΔT_{max} , I_{max} , V_{max} , \dot{Q}_{cmax} , \dot{Q}_c , P , K , R , Z , z , ρ , α , COP , Z^* , ρ^* , k^* , α^*).

Ölçüm düzeneğine ait teknik özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Test düzeneğinin genel özellikleri

Numara	Kullanım Detayları	Teknik Açıklama
1	Makine ölçüleri	500x500x1500 mm
2	Elektrik tüketimi	<2000W
3	Gerilim	220V
4	Frekans	50Hz
5	Su tüketimi	240 L/h
6	Negatif Basıncılı Çalışma	Var
7	Pozitif Basıncılı Çalışma	Var
8	Ağırlık	40 kg
9	Ölçümü yapılan değerleri	Akım, Gerilim, sıcaklık, basınç
10	Kullanım yeri	TES modüllerin ilgili ebatlarında (40x40 cm)

11	Kullanılan yöntem	TES modülün etkin malzeme özelliklerini ideal denklemleri kullanarak maksimum parametrelerle ölçülmesine dayanır.
12	Ölçüm ve deneyler	TES modülün harici ısı yükü ΔT_{max} testi.
13		TES modülün harici ısı yükü altında Q_{cmax} testi.
14		TES modülün performans parametrelerinin eldesi testi.

Tablo 4.2: Test düzeneğinin doğrudan ölçümünü yapabildiği parametreler

Numara	Ölçülen Parametre	Açıklama	Simge	Birim	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
1	Ölçüm sıcaklığı		T	K	120...85	$\pm 0,1$ K
2	Sıcaklık Farkı	Harici ısı yükü dahil değil iken $\dot{Q}_{heat}=0$, TES modülün T_H ve T_C değerlerini farkı. $\Delta T=f(I)$	ΔT	K	0...150	$\pm 0,1$ K
3	Maksimum Sıcaklık Farkı	Harici ısı yükü dahil değil iken $\dot{Q}_{heat}=0$, TES modülün mümkün olan en yüksek sıcaklık farkı	ΔT_{max}	K	0...150	$\pm 0,1$ K
4	Maksimum Akım	TES modül mümkün olan en yüksek sıcaklık farkındayken ($\Delta T=\Delta T_{max}$) elde edilen akım	I_{max}	A	0...14	± 1 mA
5	TES modülün Uçlarına Düşen Gerilim	Harici ısı yükü dahil değil iken $\dot{Q}_{heat}=0$, TES modülün uçlarına düşen gerilim. $V=f(I)$	V	V	0...24	± 1 mV

6	TES modülün Uçlarına Düşen Maksimum Gerilim	TES modül mümkün olan en yüksek sıcaklık farkındayken ($\Delta T = \Delta T_{max}$) uçlarına düşen gerilim	V_{max}	V	0...24	± 1 mV
7	TES modülün soğuk yüzeyine uygulanan harici ısı yükü	Sabit ΔT değerlerinde modülün soğuk yüzeyini ısıtılan ısı yükü. Soğutma sistemi ile ısıyı kuyuya pompalar $\Delta T = 0$ durumunda $\dot{Q}_c = \dot{Q}_{heat}$	\dot{Q}_{heat}	W	0...120	
8	TES modülün Soğutma Kapasitesi	Harici ısı yükü dahil iken (\dot{Q}_{heat}) sabit akımdaki TES modülün soğutma kapasitesi. $\dot{Q}_c = f(\Delta T)$	\dot{Q}_c	W	0...120	
9	TES modülün Maksimum Soğutma Kapasitesi	Harici ısı yükü dahil iken (\dot{Q}_{heat}), $\Delta T = 0$ ve $I = I_{max}$ 'da sabit akımdaki TES modülün soğutma kapasitesi \dot{Q}_{cmax}	\dot{Q}_{cmax}	W	0...120	

Tablo 4.3: Test düzeneğinin dolaylı olarak ölçümünü yapabildiği parametreler

Numara	Ölçülen Parametre	Açıklama	Simge	Birim	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
1	TES modülün Sıcak Yüzeyinden Üretilen Isı Miktarı	Sabit akımdaki TES modülün sıcak yüzeyinin üretilen soğutma sistemine pompaladığı ısı miktarı $\dot{Q}_h = f(\Delta T)$	\dot{Q}_h	W	0...120	-
2	TES modülün Elektrik Gücü	TES modülün elektriksel tüketimi	P	W	0...200	-
3	TES modülün elektriksel direnci	İdeal denklemler kullanılarak	R	Ω	0...100	-
4	TES modülün ısı iletkenliği	İdeal denklemler kullanılarak	K	W/K	0...10	-

5	TES modül kalite katsayısı (Figure-of-Merit)	İdeal denklemler kullanılarak	Z	1/K	(1...5)x10 ⁻³	-
6	Yarı iletkenin Seebeck katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	α	V/K	(1...5)x10 ⁻⁴	-
7	Yarı iletkenin öz direnci	İdeal denklemler kullanılarak	ρ	Ωcm	(1...5)x10 ⁻³	-
8	Yarı iletkenin termal iletkenlik katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	k	W/(c m.K)	(1...5)x10 ⁻²	-
9	Yarı iletkenin kalite katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	z	1/K	(1...5)x10 ⁻³	-
10	Yarı iletkenin etkin kalite katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	z*	1/K	(1...5)x10 ⁻³	-
11	Yarı iletkenin etkin Seebeck katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	α^*	V/K	(1...5)x10 ⁻⁴	-
12	Yarı iletkenin etkin öz direnci	İdeal denklemler kullanılarak	ρ^*	Ωcm	(1...5)x10 ⁻³	-
13	Yarı iletkenin etkin termal iletkenlik katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	k*	W/(c m.K)	(1...5)x10 ⁻²	-

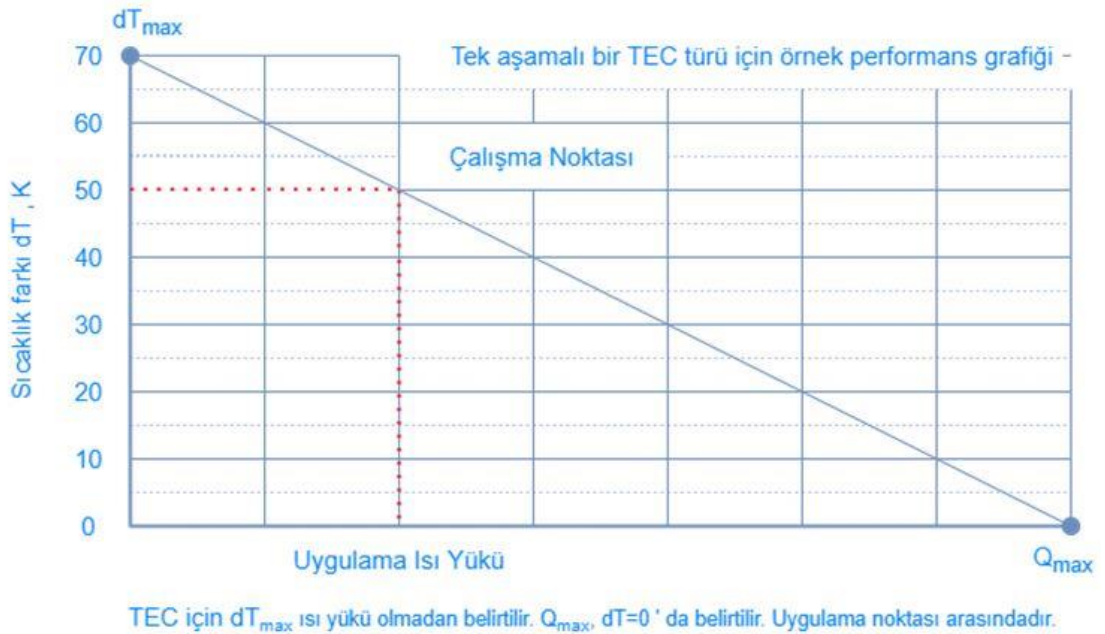
4.2 Test Düzenineğinin Termal Analizi ve Mekanik Tasarımı

Yük altındaki TES modülün ısı sistem karakteristiklerinin ve ölçümü yapılan değerlerin doğruluğunun sağlanması adına çeşitli yöntemler ve bu yöntemleri uygulayabilecek bir tasarım yapılmıştır.

4.2.1 Test Düzeninin Termal Analizleri

TES modüle uygulanan voltaj değeri arttıkça yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı artmaktadır. Test ortamındaki ısı transferi yapan test elemanların, ısı transferleri analiz edilerek termal denge senaryoları için hesaplanan miktardaki ısının transfer edilebilmesi gerekmektedir. TES modülün toplam ısı yükü arttıkça yüzeyler arasında elde edebileceği ΔT sıcaklığı azalır. Bu ısı yükü arttıkça yani Joule ısı Peltier ısına eşit olduğu durumdaki ısı yükünde sıcaklık farkı elde edilemez, $\Delta T=0$ ve $\dot{Q}_c = \dot{Q}_{cmax}$ olmaktadır.

TES modül, $\Delta T = \Delta T_{max}$ sıcaklığında $I = I_{max}$ akımını üretmektedir. I_{max} akımı, ΔT_{max} 'ın üretildiği akım değeridir. I_{max} ve V_{max} aynı andaki çalışma noktasında okunur. Uygulanan akım I_{max} değerini geçtiği durumlarda Joule ısı, Peltier ısısının üzerine çıktığı için üretilen ısı sebebiyle soğuk yüzey sıcaklığı artar daha düşük ΔT değeri elde edilir. Uygulanan akım, I_{max} değerinden daha düşük ise Peltier ısı sebebiyle ΔT_{max} değerinden daha düşük sıcaklık değeri elde edilir. TES modülün soğutma yükü; \dot{Q}_c değeri sıfır olduğunda elde edilen ΔT değeri ΔT_{max} 'dır. ΔT_{max} değeri aynı zamanda sıcak yüzeyin sıcaklığına da bağlıdır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: \dot{Q}_{cmax} ve ΔT_{max} değerlerinin limit değer altında gösterimi

TES modül çalışması esnasında peltier etkisi ile ısı soğuk taraftan sıcak tarafa pompalanır. Bu ısı hem soğu taraftan çekilen ısı hem de modül içerisinde üretilen ısıyı içermektedir. Test düzeneğinde I_{max} akımı altındaki \dot{Q}_{cmax} değeri eldesi için TES modülün T_c sıcaklığının okunacağı yüzeye harici ısıl yük kaynağı ile ısıl yük uygulanması gerekmektedir. Harici ısıl yükün TES modüle aktardığı ısı enerjisi miktarı, $\dot{Q}_{heat} = \dot{Q}_{cmax}$ olmaktadır. Bu işlem esnasında harici ısıl yükün açığa çıkarttığı ısı TES modül üzerinden soğutucu bloğa iletilirken de TES modülde ekstra ısıl direnci meydana gelmektedir. Ölçüm esnasında TES modülün sıcak yüzey sıcaklığı sabit tutulmaktadır. Soğutucu bloğun soğutma kapasitesi, ısı birikmesinden kaynaklanacak sıcaklık artışlarının önüne geçmek için ısı geçişini rahatlıkla karşılayacak şekilde tasarlanacaktır.


Test edilecek TES modül herhangi bir ölçüde ve özelliklerde olabileceği gibi test için P&N marka yüksek performans serili HP-161060 TES modülü seçilmiştir. Test P&N modülü için üretici firma tarafından paylaşılan veriler ve modülün çıkış parametreleri Tablo:4.4’de gibidir.

Tablo 4.4: p&n marka tes modül çıkış parametreleri

TES1-127025 Çıkış Parametreleri		
T_h	25 °C	50 °C
ΔT_{max}	67 °C	75 °C
V_{max}	15.4 V	16.4 V
I_{max}	2.5 A	2.5 A
\dot{Q}_{cmax}	21.4 W	23.6 W
R TES Modül	5.38 Ω	6.07 Ω
Tolerans yüzdesi	% \pm 10	% \pm 10

Ölçüm düzeneğinde kullanılacak harici ısıtıcı, test edilecek TES modülün \dot{Q}_{cmax} değerinden fazla olacak şekilde 100W seçilmiştir. Bunun sebebi harici ısıtıcının ısı kayıpları karşılamak ve ısıtıcıyı daha düşük kapasitedeki voltajla kontrol edebilmektir. 40x40 mm ölçüleri için 100W’lık ısıtma Harici ısıtıcı Jiangyin firmasına ait, HL-00580(KQ)-E-0 seri numaralı ürünüdür. Teknik özellikler Ek-1’deki ve Tablo 4.5’deki gibidir.

Tablo 4.5: Harici ısıtıcı HL-00580(KQ)-E-0 teknik özellikler

HL-00580(KQ)-E-0 Teknik Özellikler		
Malzeme	Mika	
Ölçüler	40x40x1 mm	
Efektif Isıtma Alanı	16 cm ²	
Isıtıcı İç Direnci	7.82 ~ 7.88 Ω	
Isıtma Kapasitesi	$P(\text{Watt})=V^2/R$ $28^2/7.82 \cong$ 100W	
Watt Yoğunluğu	$100/16=6.25$ W/ cm ²	
Dielektrik Direnci	$\geq 100 \text{ M}\Omega$	
Dielektrik Dayanımı	1500V/dk	

TES modülün soğuk yüzeyine uygulanacak harici ısıl yük ısısının (\dot{Q}_{heater}) modüle transfer olan miktarını maksimum tutmak için ısı kayıplarını etkileyen faktörler minimize edilmek istenmiştir. Harici ısıl yükün ürettiği ısının iletim ile test TES modüle olanı $\dot{Q}_{\text{heatiletim}}$, taşınım ile kapak hacmine olanı $\dot{Q}_{\text{heattaşınım}}$, üzerinden tüm hacme ışıyım ile olan ısı transferi de $\dot{Q}_{\text{heatışıyım}}$, olarak gösterilmiştir.

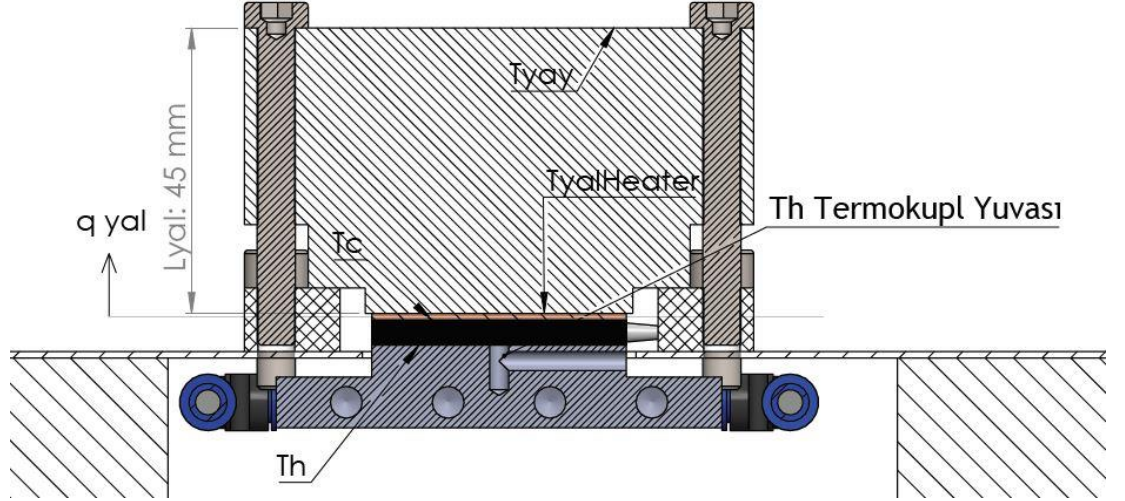
Harici ısıl yükün transfer ettiği ısının test TES modül üzerine aktarılması ve soğutma sistemi aracılığı ile ısının çekebilmesi için harici ısıl yük üzerine yapılan teflon yalıtım malzemesi konulmaktadır. Isı iletim direnci düşük olan yalıtım malzemesi, ısıl yükün meydana getirdiği ısının büyük ölçüde modüle aktarılması için ısı iletim yönünü TES modüle doğru çevirecektir. Isı iletim katsayısı teflon

malzemeden daha düşük olan yalıtım malzemesinin seçilmeme sebebi, ısı transferi halindeki parçaların birbirleri ile fikstürlenme işinin yalıtım parçası aracılığı ile yapılmasındandır. Gerekli yalıtım kalınlığı en üst seviyede hesaplanmıştır. Yalıtımın sıcaklığının ölçülerek harici ısıtıcıdan transfer olan ısı miktarı testler esnasında formüllere eklenecektir. Yalıtımın üzerine “K tipi” termokupl konularak yalıtım çıkış yüzey sıcaklığı ölçülecektir. Sıcaklık farklarına göre yalıtım kaçağı olan transfer edilmiş ısı miktarı hesaplanıp harici ısı yükünün transfer ettiği ısıdan çıkartılarak TES modüle aktarılan (\dot{Q}_{heat}) ısı miktarı hesaplanacaktır.

Bu yalıtım kalınlığına uygun “A-208” parça numarası olan üst fikstür modelenerek üretilmiştir. İçerisinde harici ısı yük oluşturacak “HK5956P” tipli ısıtıcı yer almaktadır. TES modül test edileceği zaman yine aynı malzemedен oluşan “A-207” parça numaralı alt fikstür parçası üzerine konulmaktadır ve üzerine üst fikstür parçası civatalanarak monte edilmektedir. Test bitiminde civata açılarak TES test modül değiştirilebilmektedir.

Taşınım ile ısı transferini engellemek adına yapılan ortam havasının vakumlama işlemi yazılım ile kontrol edilen vakum kompresörü ile yapılmaktadır. Vakum ortamı basıncı 0.2 bar gösterge basıncına kadar vakumlanabilmektedir. Bu basınç altında taşınım ile ısı transferi ihmal edilecek seviyede olmaktadır (Paul 1999).

Harici ısı yükünün ürettiği ısının TES modüle aktarılamayan kısmı, yalıtıma transfer olup yalıtım üzerinden daha soğuk yüzeylere ışınlama ile transfer olmaktadır. Test işleminde ölçülen yalıtımın sıcaklığı ile vakum haznesi kapağı sıcaklığı arasında ısı transferinde tesir yaratabilecek düzeyde ısı geçişi olmadığından taşınım ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Böylece harici ısı yükünün ürettiği ısının tamamının iletim ile transfer olduğu kabul edilmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Harici ısı yükünün ısı transferinin hesaplanması görseli

Hesaplamalarda yapılan kabuller:

- 1-) Bir boyutlu iletim.
- 2-) Isı taşınım katsayısı sabit.
- 3-) Sürekli rejim.
- 4-) Işınım ve taşınım ile olan ısı transferi ihmal edilmiştir.
- 5-) Temas ısı direnci ihmal edilmiştir.

Yapılan hesaplamada turuncu renkte taranmış harici ısı yükünün ürettiği ısının yalıtım cismine (A208-Üst Fikstür) ve TES modüle geçen ısı transferi miktarı hesaplanmıştır. Yalıtım cisminden, alt yalıtım cismine (A207-Alt Fikstür) olan iletim ile ısı transferi ve civatalara geçen ısı transferi ihmal edilmiştir. Yalıtım malzemesi PTFE telfon olup kalınlığı L_{yal} : 45 mm, kesit alanı A_{yal} : 0,0008 m², ısı iletimi katsayısı k_{yal} : 0,25 W/mK'dir. İçinde ısı üretimi olan harici ısıtıcı levhası, ısı iletimi katsayısı k_{heater} : 0,75 W/mK olan 1 mm kalınlıktaki mika malzemesinden kaplanmıştır. Harici ısıtıcıda üretilen ısı miktarı, yalıtım cismine ve TES modüle iletilmektedir. Yalıtım cisminden geçen ısı akışı Eşitlik 4.1'deki gibidir.

$$q_{yal} = \frac{T_{h,heater} - T_{yal}}{\frac{L_{yal}}{k_{yal}}} \quad (4.1)$$

Burada; $T_{h,heater}$ ve T_{yal} sıcaklıkları deney düzeneğinden ölçülerek hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.1'deki ısı iletim katsayısı ve levha kalınlığına düzenlenirse eşitlik 4.2'deki gibi olmaktadır.

$$q_{yal} = \frac{T_{h,heater} - T_{yal}}{\frac{0,045}{0,25}} = \frac{T_{h,heater} - T_{yal}}{0,18} \quad (4.2)$$

Yalıtım cisminden geçen ısı akısı q_{yal} , sıcaklık sensörlerinden gelen verilerle yazılım tarafından bulunmaktadır. Yalıtım cismine olan ısı geçişi eşitlik 4.4'deki gibidir.

$$\dot{Q}_{yal} = q_{yal} \cdot A_{yal} = \frac{T_{h,heater} - T_{yal}}{0,18} \cdot (A_{yal}) = \frac{T_{h,heater} - T_{yal}}{0,18} \cdot (0,0008) \quad (4.3)$$

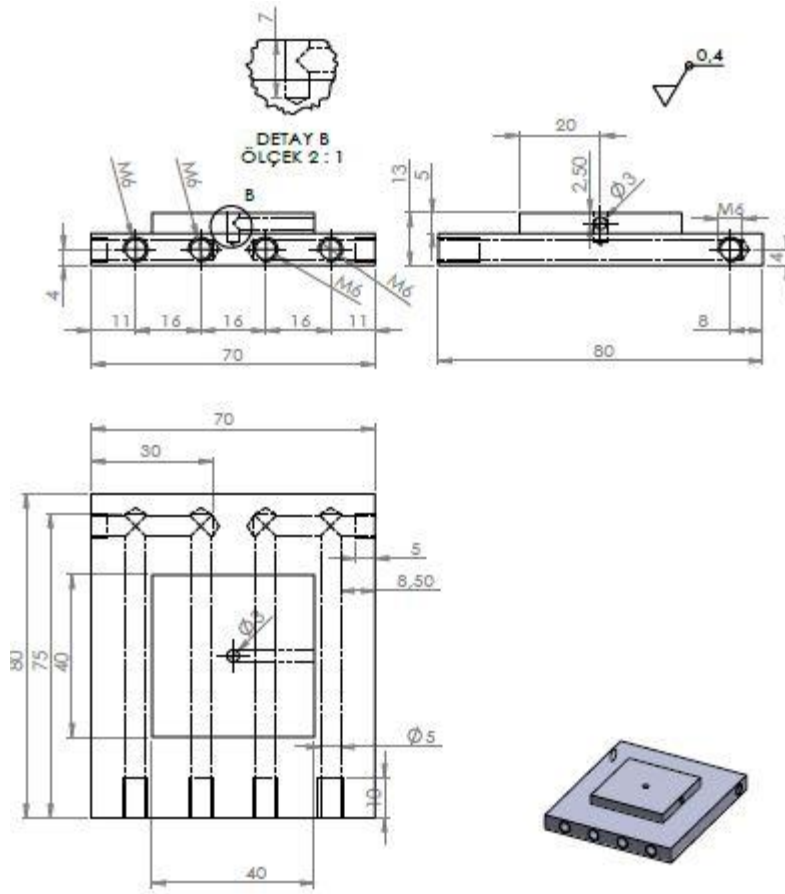
$$\dot{Q}_{yal} = (T_{h,heater} - T_{yal}) \cdot 0,0044 \quad (4.4)$$

Harici ısıtıcının mika kaplama malzeme içerisindeki rezistanslarının yerleşimi yayılı (homojen) olup ısı üretimi; elektrik akımının geçmesi ile açığa çıkan ısı enerjisi kadardır. Ohm kanununa göre üretilen ısı enerjisi (\dot{Q}_{heater}), uygulanan gerilimin (V_{heater}) karesi ile ısıtıcı iç direncinin çarpımı kadar olmaktadır. Kullanılan mika kaplı harici ısıtıcının iç elektriksel direnci $7,82 \Omega$ 'dur (Tablo 4.5) Isıtıcının elektriksel iç direnci ayrıca Fluke multimetre ile de kontrol edilmiştir. Harici ısıtıcının ısı (\dot{Q}_{heater}) Eşitlik 4.5'deki gibidir.

$$\dot{Q}_{heater} = V^2 / R = V_{heater}^2 / 7,82 \quad (4.5)$$

TES modüle transfer olan ısı (\dot{Q}_{heat}); harici ısıtıcının ürettiği ısı enerjisinin (\dot{Q}_{heater}), yalıtım cismine iletilen (\dot{Q}_{yal}) ısı enerjisiyle farkına eşittir.

$$\dot{Q}_{heat} = \dot{Q}_{heater} - \dot{Q}_{yal} \quad (4.6)$$



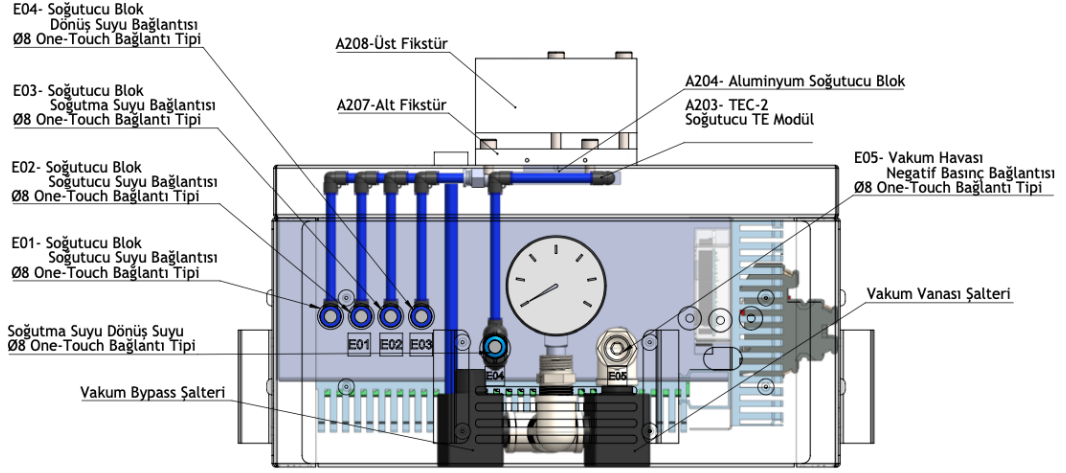
Şekil 4.8: Soğutucu blok teknik resmi görseli

\dot{Q}_{heater} ısıısının ve TEC modülden gelen \dot{Q}_h ısıısının karşılanması adına Şekil 4.8'deki soğutucu blok tasarlanmıştır. Soğutucu blok tasarımında soğutma suyunu geniş hacimlerde dolaştırarak suya olan ısı transferinin etkinliğini artırmak ve kalınlığın düşük tutularak gereksiz iletim direnci yaratılmasını engellemeye yönelik tasarım yapıp Alüminyum malzemeden üretilmiştir. Termokupl deliğine eşdeğer iletim katsayısına sahip termal macun doldurularak termokupl yerleştirilmiştir (Şekil 4.8).

Ölçüm düzeneği, bu hesaplar çerçevesindeki kabullere dayanarak tasarlanmıştır. Ölçüm düzeneği tasarımında sistemin modüler olması istenmektedir. Bu sayede müdahale imkanı olmakta ve ölçüm fonksiyonları daha rahat yönetilmektedir. Ölçüm düzeneği bu tasarım ilkelerine dayanarak bilgisayar destekli çizim programı ile modellenmiştir. Bilgisayar destekli tasarım, grup kodlaması şeklinde yedi farklı bölümden oluşmaktadır.

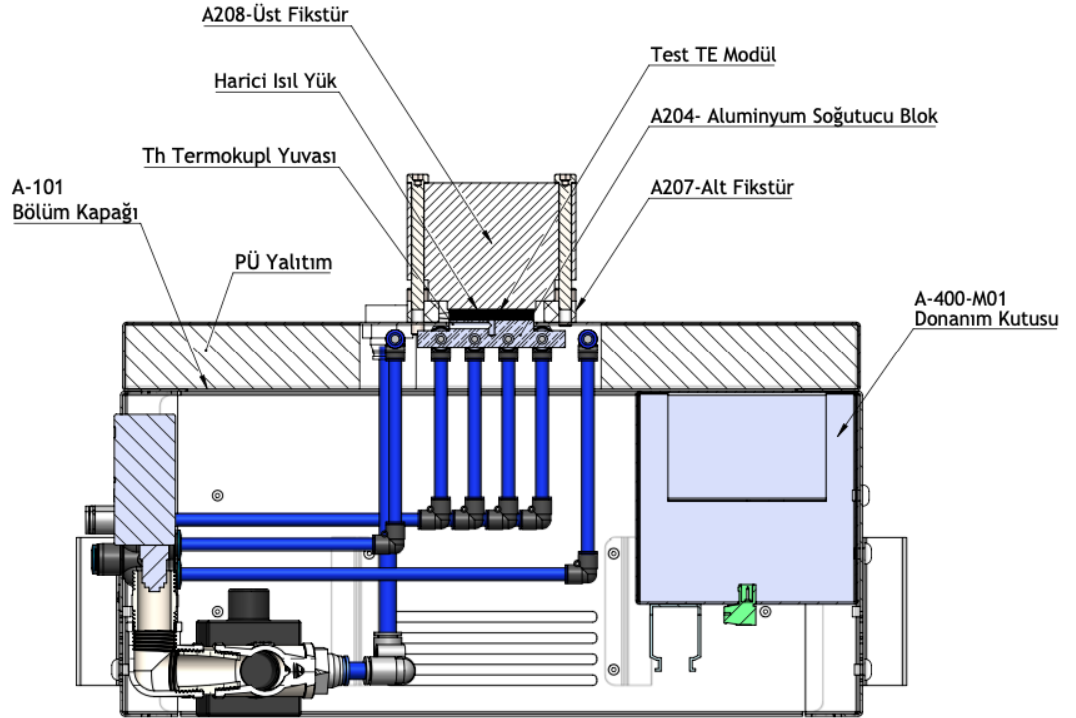
4.2.2 Ölçüm Düzeneği Mekanik Tasarımı

Ölçüm düzeneğinin mekanik tasarımının modellenmesinde birbirini takip eden bölümler bulunmaktadır. Şekil 4.9’da düzeneğin sistem elemanlarının detayı gösterilmektedir.



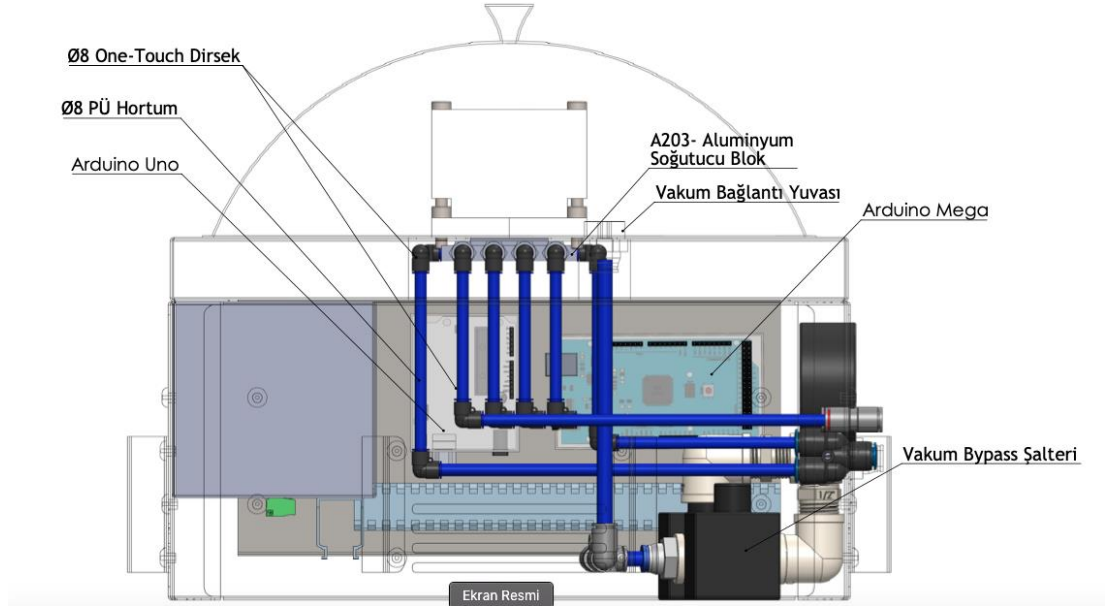
Şekil 4.9: Yönetim paneli ekranı detay görüntüsü

Şekil 4.10’da kesit görünümünde harici ısı yük ve TES modül gösterilmektedir.



Şekil 4.10: Yönetim paneli kesit görüntüsü

Aşağıdaki şekilde ise ölçüm düzeneğinin tesisat müdahale kapağında bir görüntü verilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11: Tesisat müdahale kısmı detay görüntüsü

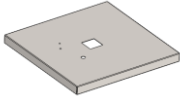



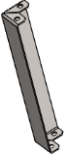
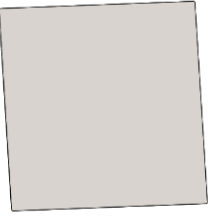
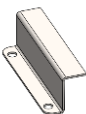
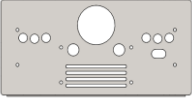



Şekil 4.12: Tesisat müdahale kısmı gerçek görüntü

4.2.2.1 Test Düzeneği Mekanik Tasarımında Kullanılan Şase Bölümü Parçaları

Bu gruptaki parçalar genel olarak test düzeneğinin şasesini oluşturan parçalardır. Düzenek tasarımı yapılırken kullanılacak şase parçalarının kolay elde edilebilir ve üzerinde şekil verilme kabiliyeti yüksek olan malzemeden seçilmesi düşünülmüştür. Gövde malzemesinin polimer yapıdaki plastik parçalardan dizayn edilmesi, tasarımı uzun ömürlü hassas ve seri üretime uygun kılabilmektedir. Ancak bu işlemi yerine getirecek plastik enjeksiyonlama ve kalıp üretim prosesleri prototip için tez kapsamında gerekli görülmemiştir. Bu yüzden mekanik tasarım şasesinin 3D olarak basılması ya da sac parçalardan yapılması olası olmaktadır. Kolay işlenebilirliği ve protipe uygun olması sebebi ile malzeme seçiminde 1 mm kalınlığındaki sac parçalar kullanılmıştır. Sac metal tasarımı yapılan parçalar, kesilip kıvrılarak ölçüm cihazı modellenip üretilmiştir. Şase bölümü parçaları şunlardır: “A-101” parça numaralı vakum haznesinin tabanın oluşturan taban sacı, yalıtım bölümünü düzenek iş parçalarının komutlandığı bölüm ile sıyıran sac “A-102” parça, köşe taşıyıcı konsol sacları “A-103” parçalar, “A-109” parça numaralı A304 paslanmaz çelikten yapılmış vakum kapağı, “A-107” parça numaralı yönetim paneli, “A-111” parça numaralı pano müdahale kapağı, “A-112” parça numaralı tesisat bölümü müdahale kapağı, “A-113” parça numaralı donanım bölümü müdahale kapağı, “A-105” parça numaralı tutma kolu sacları, “A-106” parça numaralı ölçüm düzeneğin alt tabanında taban parçası (Tablo 4.6.).

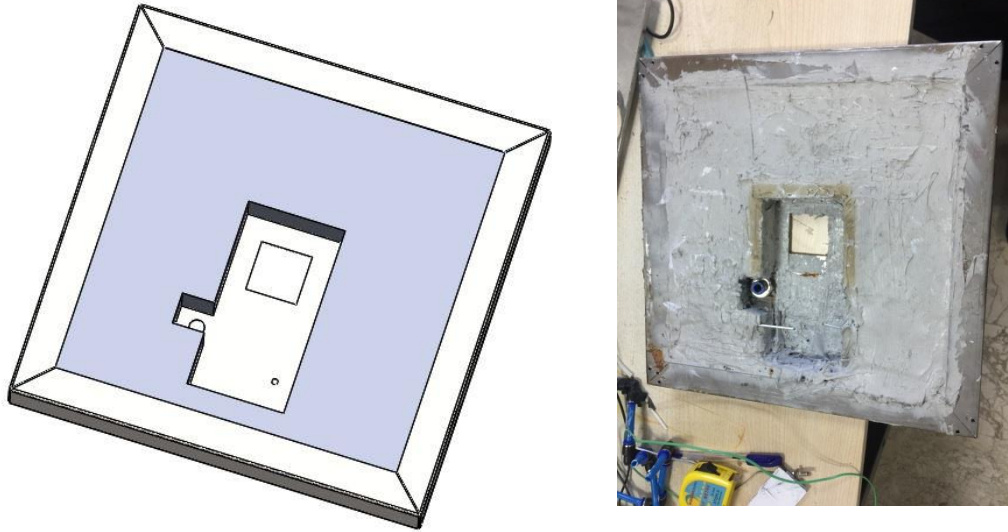
Tablo 4.6: Test düzeneği tasarımının “a-100” grubu parça ve işlem tanımları

NUMAR A	GÖRSEL	ADET	MALZEME NUMARASI	İŞLEM
1		1	A-101	LAZER KESİM + KIVIRMA
2		1	A-102	LAZER KESİM

3		4	A-103	LAZER KESİM + KIVIRMA
4		1	A-106	LAZER KESİM
5		8	A-105	LAZER KESİM + KIVIRMA
6		1	A-107	LAZER KESİM + KIVIRMA
7		1	A-109	SIVAMA
8		3	A-111, A-112, A-113	KESİM+KIVIRMA
9		1	A-110	KESİM, DELME

4.2.2.2 Test Düzeneği Mekanik Tasarımında Kullanılan “A-200” ve “A-300” Kodlu Parçalar

Mekanik tasarımda, test işleminin gerçekleştiği ve sıcaklık ölçümlerinin parçalar üzerinden alınacağı sistem bu kısımda yer almaktadır. Ölçüm sistem ekipmanları tasarımında farklı fonksiyonel bölümlere rastlanmaktadır: test işlemi için gerekli vakum altı ortamı, test TES modülün bulunacağı ortam, test TES modülün sıcak yüzeyindeki ısıyı pompalayacak soğutma blokları ve TES modülün soğuk yüzeyini ısıtacak harici ısıtma elemanları. Test sistemi vakum altında olacağından ve test TES modülün kalınlığı baz alındığında, ısı attığı yüzeyinin soğutma gereksinimini karşılayacak soğutma ekipmanlarının test düzeneğinin ısını etkilemesi açısından ayrı bir izoleli bölümde yer almalıdır. Bu şartlar altında düzeneğin modellemesinde 1 mm kalınlığındaki sacın üzerinde kalan kısma vakum altı bölümü, sacın altındaki kısma yalıtım ve soğutma bölümü yapılmıştır. Test TES modülü, vakumlanacak test ortamını soğutma bloklarının olduğu ortamdaki ayrıran “A-101” parçası içerisinde “A-300” parça kodu numaralı yalıtım malzemesi yer almaktadır. Yalıtım malzemesi, soğutma suyu bloklarının çevresine sac parça boyunca uygulanmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13: (a) Soldaki şekilde gri renkli izolasyonun bulunduğu tasarımda görüntü, (b) sağdaki şekilde uygulamadan görüntü

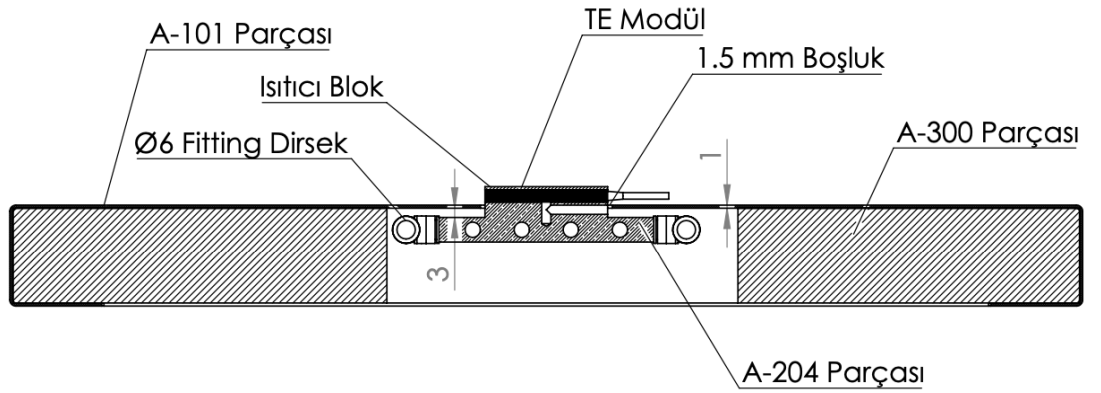
4.2.2.2.1 Soğutucu Bloğun Yerleşimi

Şekil 4.13'deki izolasyon parçası içerisindeki boşluğa soğutucu blok yerleştirilmiştir. Alüminyum soğutucu bloğun vakum kısmında kalan yeri Şekil 4.14'de gösterilmiştir ve Şekil 4.15'te soğutucu blok, test TES modülü ile harici ısı

yükün ısıtıcısının montajı gösterilmiştir. Isı transferini artırmak için yüzeyler arasında ısı termal iletkenlik katsayısı $5,0 \text{ W/mK}$, Termal empedans katsayısı $0,009 \text{ }^\circ\text{C in}^2/\text{W}$, özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$ olan Crosair CT-9010002-WW XTM50 Marka termal macun uygulanmıştır.



Şekil 4.14: Bakır ısı transferi plakasının (A-204) test ortamında kalan kısmı



Şekil 4.15: Soğutma sistemi ekipmanlarının yerleşimi

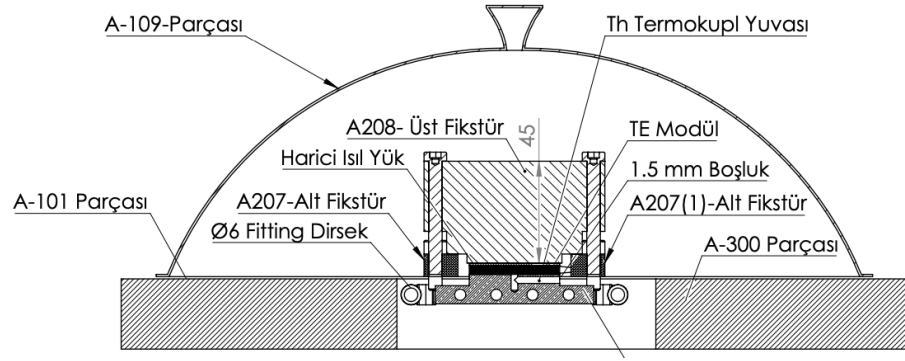
Şekil 4.15'deki kesitte gösterilen 1.0 mm vakum ortamı ile boşluklar yer almaktadır. Bu kısımlara ve bloğun altında kalan 3 mm boşluklara ısı iletimi düşük yalıtım malzemesi uygulanmıştır. Soğutucu blok ile test ortamının altında kalan ara boşlukta hava bulunmaktadır. Boşluk havasından soğutucu bloğa olan ısı transferleri ihmal edilecek seviyededir (Şekil 4.16).



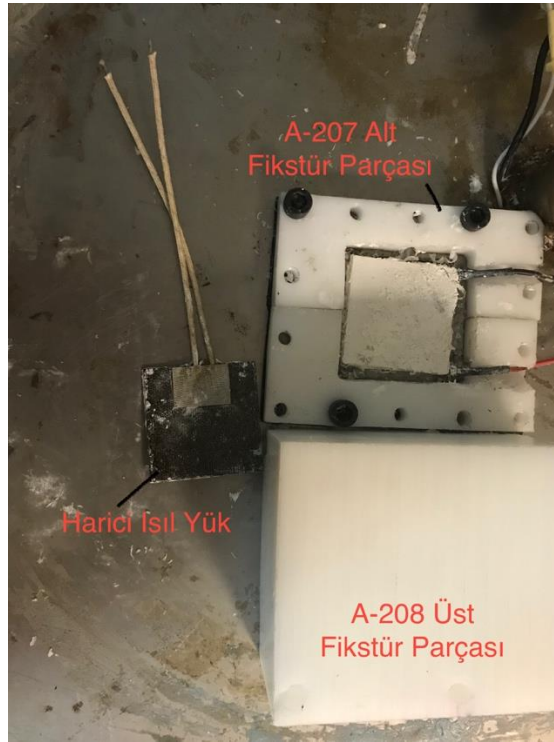
Şekil 4.16: Soğutucu Alüminyum bloğun görseli

4.2.2.2.2 Harici Isıtma Elemanlarının Yerleşimi

Vakum ortamında test TES modülünü rahatça fikstürlemek için “A-207” parça numaralı telfondan yapılmış alt fikstür parçası tasarlanmıştır. Bu parça üzerine test TES modülü yerleştirilmektedir. “A-209” parça numaralı harici ısı yükünü taşıyan teflon malzemeden yapılmış “A-208” numaralı üst fikstür parçası modülün üzerini kapatıp alt fikstür ile civatalanmaktadır. Üst fikstür üzerinde yer alan yuvaya T_{yal} sıcaklığını ölçecek termokupl yerleştirilecektir. Test TES modülün T_c sıcaklığını ölçecek termokupl da bu aralıktadır (Şekil 4.17 ve 4.18).



Şekil 4.17: Harici ısıtma elemanları teknik resim görseli

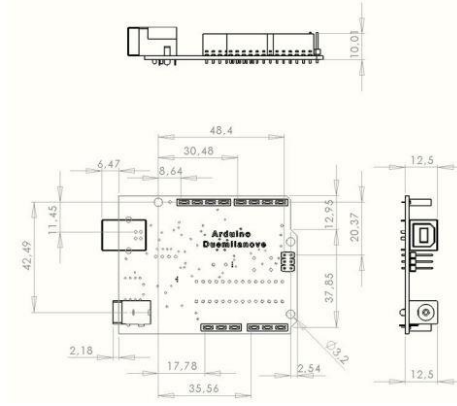


Şekil 4.18: Harici ısıtma elemanları görseli

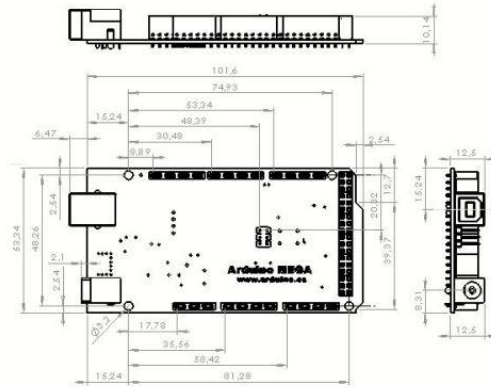
4.2.2.3 Veri Köprüleme Parçaları ve Yerleşimleri

Ölçüm düzeneğinin yazılım bölümünün yer aldığı kısımdır ve sinyallerin iletimi bu bölümde gerçekleşmektedir. Düzeneğinin test işlemini gerçekleştirmesi için birden çok fonksiyonu aynı anda yerine getirip işleyebilmesi gereklidir. Bunun için mikrokontrolcü ile programlanmaya ihtiyaç duymaktadır. Temel yazılım bilgisi ile programa yapılabilmesi ve birkaç algoritmadan oluşan veri işleme beklentisi sebebi ile 32-bit ARM mimarisi yerine 8-Bit'lik RISC mimarisine sahip AVR mikrodenetleyicisi seçilmiştir. Geliştirici kartlarının piyasada yaygın olması nedeni

ile Atmel firmasının AVR Atmega “ATMEGA8A-PU” tipindeki 8-Bit 16MHz mikrodenetleyiciye sahip Arduino Uno ve Arduino Mega kullanılmıştır. Ölçüleri Şekil 4.19 ve 4.20’de gösterilmiştir.

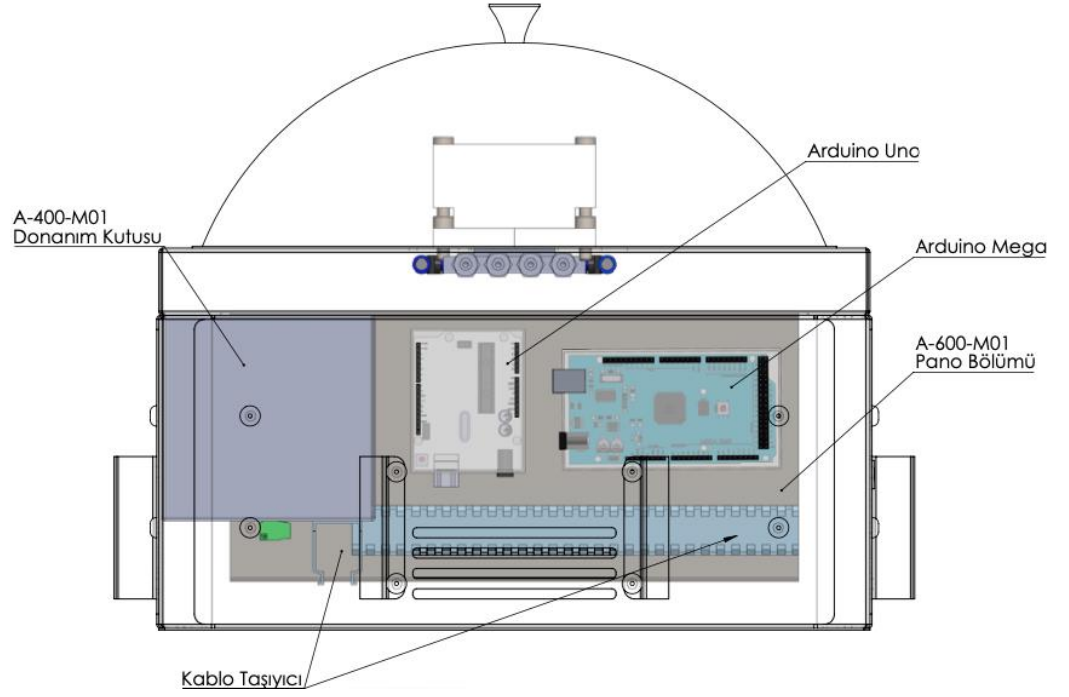


Şekil 4.19: Arduino uno ölçülerinin görseli



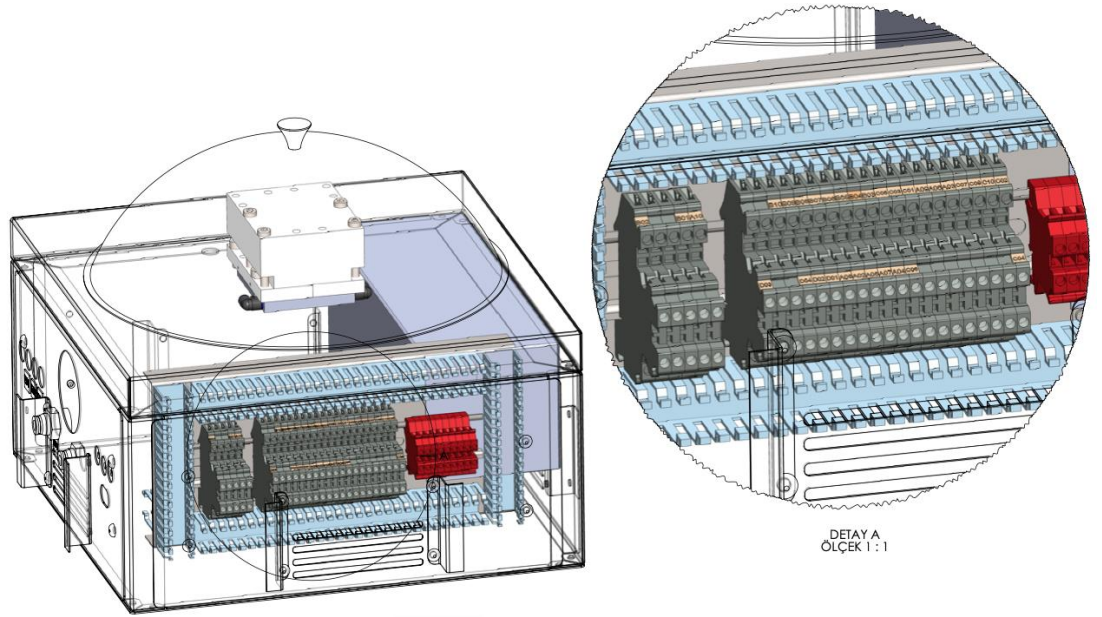
Şekil 4.20: Arduino mega ölçülerinin görseli

Yazılım sinyallerinin geliştirici kartlara gönderileceği, test düzeneğinden gelen data ve sinyallerin yazılım bölümüne ya da doğrudan geliştirici kartlara iletmesi konusundaki veri köprülemesi için pano tasarlanmıştır. Arduino geliştirici kartları, pano bölümünün arkasında plexi glass içerisinde muhafaza edilmektedir. Pano kısmına “A-111” parça kodlu kapaktan doğrudan müdahale edilebilmektedir. Bileşenlerin tasarımdaki konumları Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

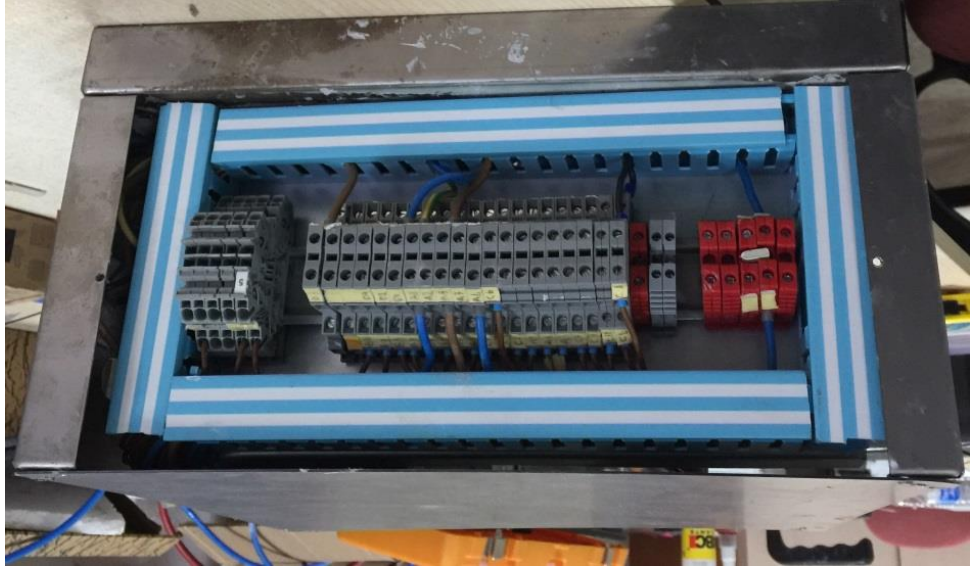


Şekil 4.21: Arduino Uno ve Mega'nın panoya yerleşimleri

Pano da sac parça üzerine konumlandırılmış ONKA marka 2,5 mm vidalı çift sıralı ray klemensleri, ONKA marka 2,5 mm yaylı çift sıralı ray klemensleri ve KAİM marka tek sıralı ray klemensleri mevcuttur. Çevresinde kablo yolları bulunmaktadır. Şekil 4.22'de pano bölümü görüntüsü tasarımı gösterilmiştir. Şekil 4.23'te ise pano bölümü görüntüsü gerçek görüntüsü gösterilmiştir.



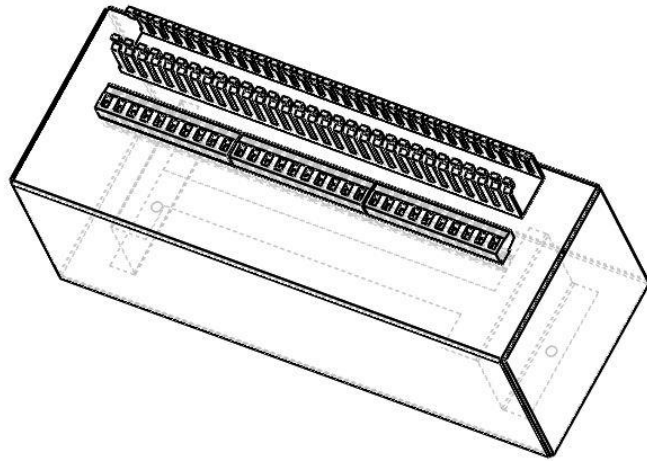
Şekil 4.22: Pano bölümü görüntüsü tasarım



Şekil 4.23: Pano bölümü görüntüsü gerçek

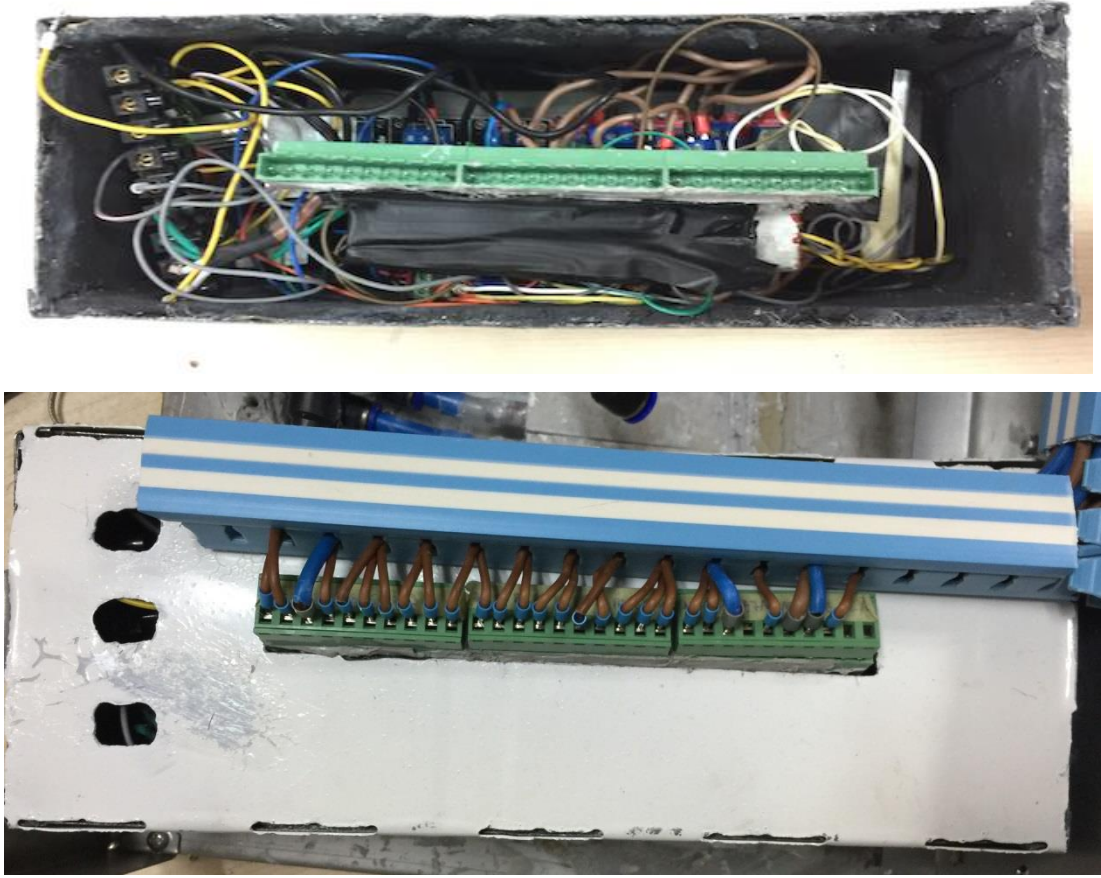
4.2.2.4 Elektronik Parçalar ve Yerleşimleri

Ölçüm düzeneğinin donanımsal komponentlerini bir arada tutabilmek için ve herhangi bir müdahale durumunda doğrudan erişimin olanaklı olduğu bir yapı tasarlanmıştır. Buradaki amaç, test düzeneği ekipmanlarından gelen ve giden verileri içerisinde işleyerek, iş sinyalleri üretebilmek ve bu iş sinyallerini panoya doğrudan ya da test düzeneği ekipmanları aracılığı ile alıp göndermektedir (Şekil 4.24).



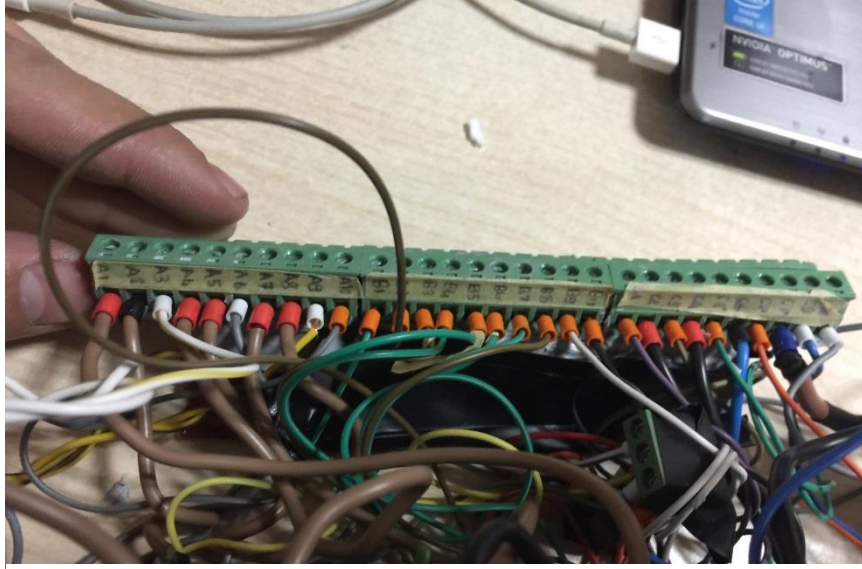
Şekil 4.24: Donanım kutusu tasarım görseli

“A-400-M01” parça montaj kodlu donanım kutusu, galvanizli sacdan imal edilmiş olup 284x105x100 mm ölçülerindedir.



Şekil 4.25: A-400-M01 numaralı donanım kutusu dıştan görünümü

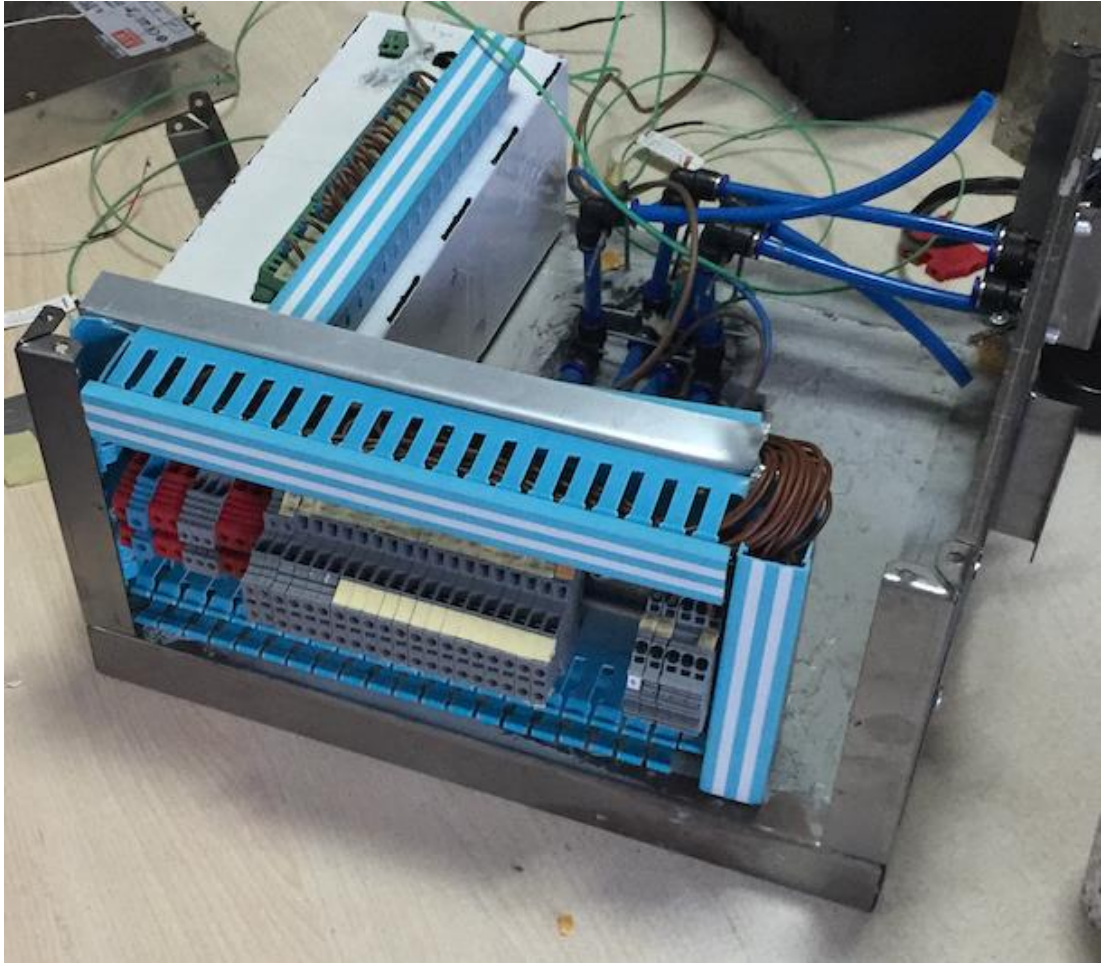
Bu komponentler üzerlerinde kod numaraları bulunan klemenslere bağlanmıştır (Şekil 4.25).



Şekil 4.26: Donanım Haznesi Pinleri

İçerisinde 30A ve 10A röleler, TES modülün ve harici ısı yükün akım ve voltajının ölçümü için ACS-7121 30A sensörleri ve voltaj ölçerler yer almaktadır (Şekil 4.26).

Donanım kutusu, pano bölümü ve soğutucu blokların yerleşiminin görüntüsü Şekil 4.27'deki gibidir.



Şekil 4.27: Donanım kutusu, pano bölümü ve soğutucu blokların yerleşiminin görüntüsü

4.2.2.5 Tesisat Ekipmanları ve Yerleşimleri

Elektrik, su ve hava tesisatta kullanılacak parçalar düzeneğe Şekil 4.28’de gibi yerleştirilmiştir. Soğutma suyu bloklarının besleme soğuk suları ve dönüş sıcak suları yönetim paneline bağlanmaktadır. Alüminyum bloklara Ø8 ve Ø6 poliüretan hortum ile bağlantı yapılmıştır. Bağlantı elemanları (dirsek ve konnektörler) one-touch tipindedir. Yönetim paneli üzerinde kodlanmış olan E01, E02 ve E03 girişlerine soğutma suyu bağlantıları yapılmıştır. E04 girişine ise dönüş suyu bağlantıları yapılmıştır. Giriş ve çıkış su sıcaklıklarının ölçümü soğutucu bloğa yakın uçtan yapılmaktadır. Sistemin kapalı çevrim su döngüsü bulunmaktadır.



Şekil 4.28: Sistem giriş ekipmanları

Depo edilen su sisteme “Lifepump” marka paletli dikey tipdeki pompa ile sirküle edilmektedir. 0 bar’da 12 L/dk debili 40W’lık pompa kullanılmıştır. Pompanın tesisat kayıpları altındaki debi değeri soğutucu blok girişinde sensörden okunmaktadır. Çevrim suyu 120 L hacmindeki su tankında depolanmaktadır. Şekil 4.29’de devir daim sisteminin, Şekil 4.30’da ise pompanın görseli verilmiştir.



Şekil 4.29: Soğutma Suyu Devir Daim Sistemi



Şekil 4.30: Su pompası

Vakum tesisatı elemanlarında, test düzeneğinin iç basıncının istenen seviyede olması için yazılım kontrollü basınç kontrol elemanları kullanılmıştır. Yönetim paneli üzerindeki bourdon tüplü manometre, 0-1 bar aralığında test ortamının basıncı manuel olarak göstermektedir. Bourdon tüplü manometreler, elastik olan bükümlü Bourdon tüpünün bağlantı deliğine vakum uygulandığı zaman tüp deforme olmaya başlar. Vakum şiddeti arttıkça eğrilme yarıçapı da küçülür. Deformasyonun miktarı, bir mekanizma vasıtasıyla kalibre edilmiş sıkalaya aktarımı yoluyla ölçülür (Hanna, 2020).



Şekil 4.31: Bourdon tüplü manometre

Negatif basınç hattı, test düzeneğinin “A-101” parçasındaki 3/4" genişliğindeki delikten one-touch tipindeki bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Test düzeneğindeki ortam havası Şekil 4.32'deki vakum kompresörü ile alınmaktadır.



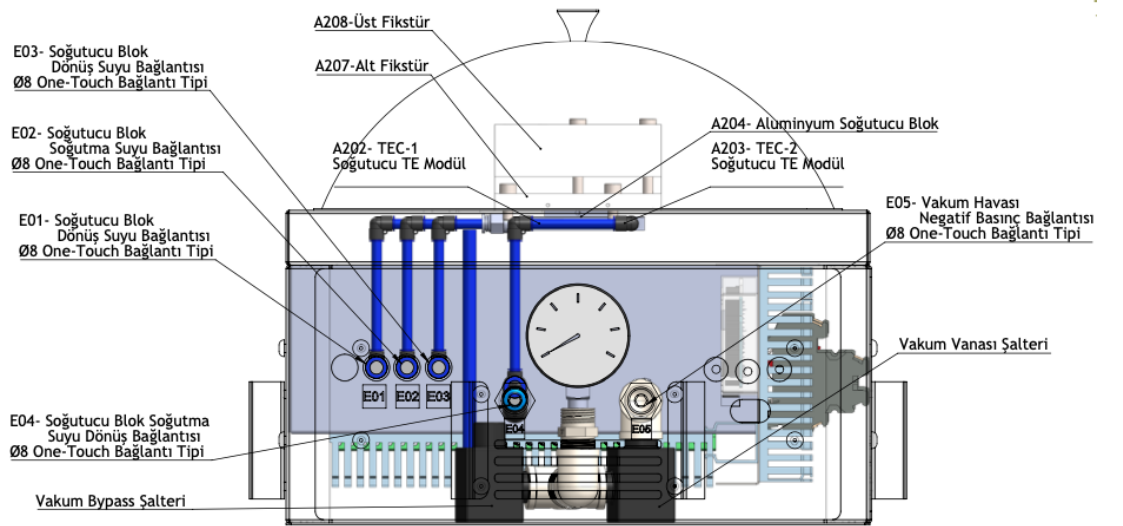
Şekil 4.32: Aitcool VP215 çift kademeli yağlı vakum kompresörü

Bu vakum kompresörü, yönetim panelindeki “E05” girişine bağlanmış selenoid valf vakum basıncı üreteç poması ile aynı kontakta çalışmaktadır. Vakum kompresörü çalışmaya başladığında selenoid valf açık konumda kalmakta, test düzeneğinin ortam havası vakumlanmaktadır. Test ortamının vakum basıncı istenen seviyeye geldiğinde vakum kompresörü durmakta, selenoid valf de kapalı konuma gelmektedir. Böylece ortamdaki basınç yazılım kontrolüyle sabit tutulmaktadır Şekil (4.33).

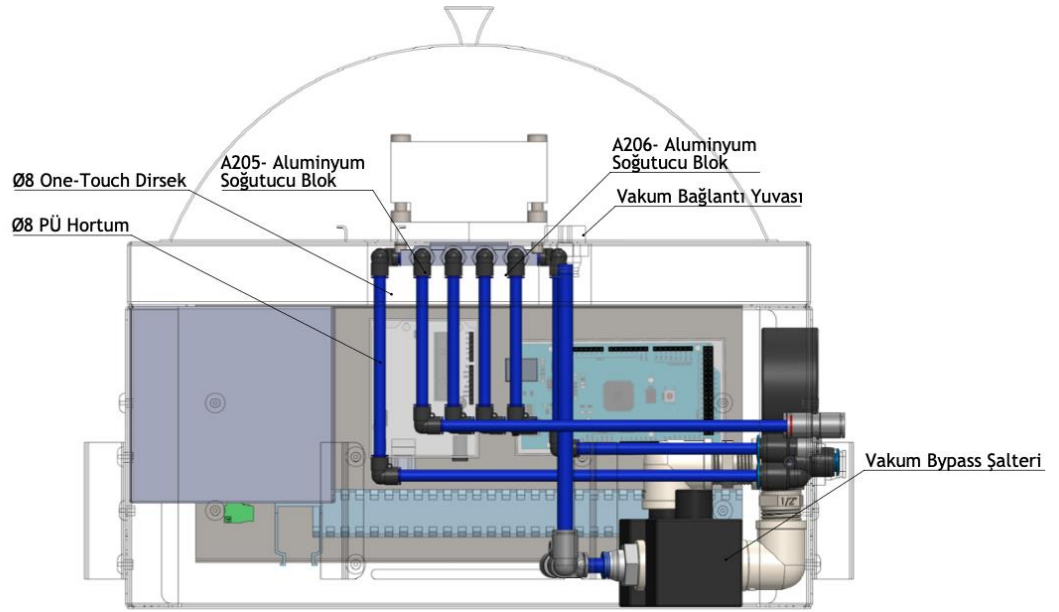


Şekil 4.33: Vakum esnasındaki düzenek basıncı

Test bittiğinde test ortamın basıncını atmosfer seviyesine getirmek için by pass selenoid valfi normaldeki kapalı konumundan açık konuma geçmektedir, atmosfer basıncındaki havayı vakumlu test ortamına alıp test ortamını test ortamını pozitif basınçlandırmaktadır. Bu işlemler için vakum hattı tesisatında 1/2" ölçüsünde prindenden dirsek, manşon, nipel ve 4 yollu konektör elemanları kullanılmıştır. Tesisat elemanlarının dış aralarına teflon bant ve sızdırmazlık sağlayıcı kimyasallar uygulanmıştır (Şekil 4.34 ve 4.35).



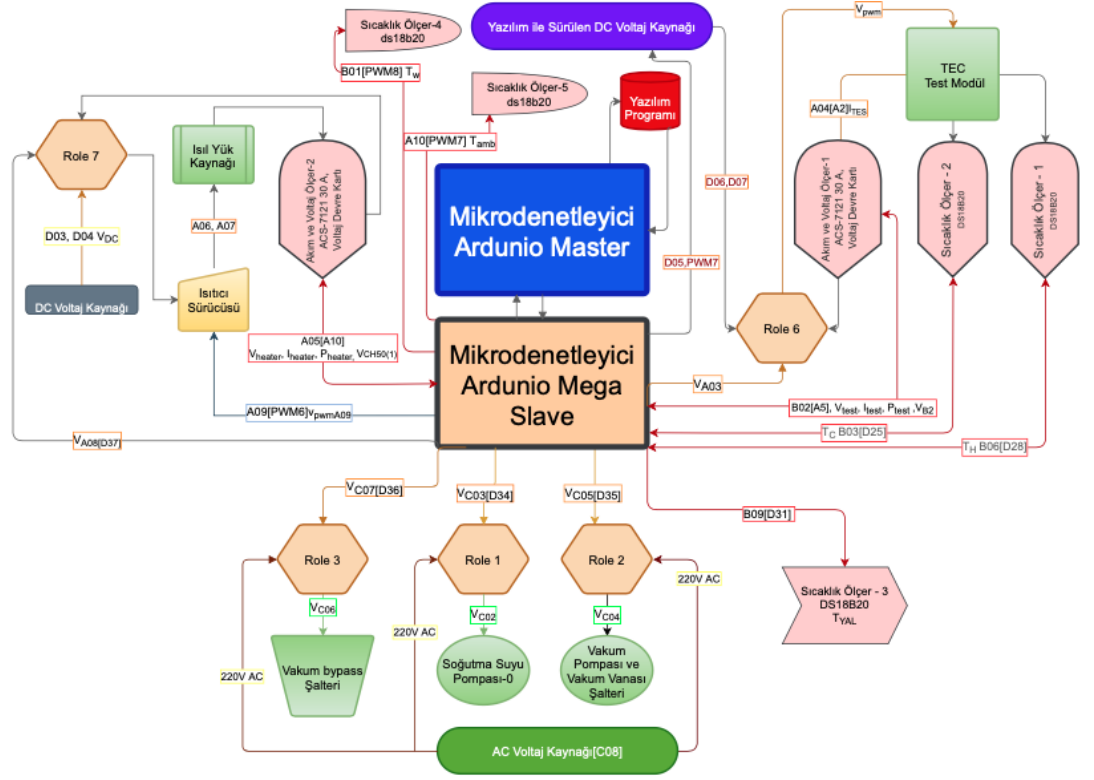
Şekil 4.34: Tesisat bağlantısı ve yönetim paneli



Şekil 4.35: Tesisat bağlantısının tesisat kapağında görünümü

4.3 Test Düzeneğinin Elektriksel ve Elektronik Yapısı

Test düzeneğinin kontrol yapısını Arduino kartı sağlamaktadır. Arduino yazılımı ile test işlemi için gerekli olan komutlar oluşturulmaktadır. Algoritma ve kodların iş sinyallerine dönüştürülmesi, Arduino geliştirici kartları vasıtası ile yapılmıştır. Arduino geliştirici kartları, yazılımdan gelen sinyalleri işleyip komut haline dönüştürerek role, sensör ve sürücülere okuma, yazma işleri yaptırmaktadır. Şekil 4.36'da verilen blok şemasında, düzeneğin devre elemanları ve pano pin kodlamasına ilişkin detay verilmiştir. Blok şemasında bahsedilen komponentlere ilişkin detay ve açıklamalar bölümün alt başlıklarında verilecektir.

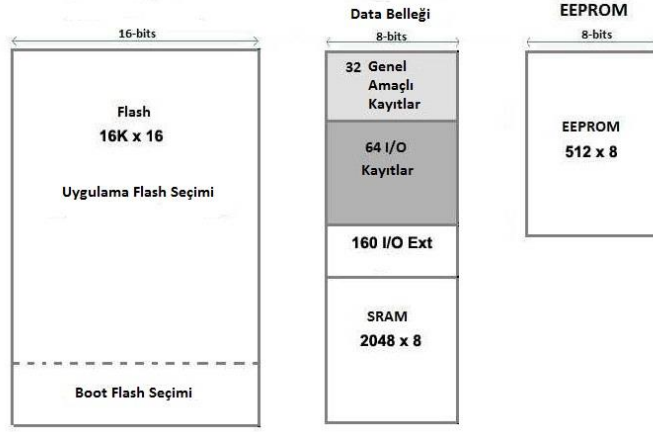


Şekil 4.36: Donanım elektronik blok diyagramı

4.3.1 Arduino Tabanlı Kontrol Birimi

Test düzeneğinin yazılım ve programlama dili olan Arduino; bir Giriş/Çıkış kartı ve Processing/Wiring dilinin bir uygulamasını içeren geliştirme ortamından oluşan popüler bir fiziksel programlama platformudur. Kolay programlanabilir ve daha geniş kütüphane desteği sayesinde kısa kodlarla karmaşık işlemleri yapabilmeyi sağlayan bir platformdur. Mikrodenetleyiciler kendi kütüphaneleri sayesinde kolaylıkla programlanabilirler ve kullanım açısından kolaylık sağlarlar (Zayif, 2015).

Arduino'nun üzerindeki mikrokontrolcüye yazılan programı yükleyebilmek için mikrokontrolcü içerisinde gelen Arduino'nun önyükleyici programı bulunmaktadır. Arduino içerisindeki önyükleyici, bilgisayardan program gelip gelmediğini kontrol eder, eğer program gelirse Arduino programlama moduna geçer. Arduino'ya her elektrik geldiğinde önyükleyici bunu kontrol eder ve bunun süresi beklenir. Şekil 4.37'de Boot Flash Selection kısmı görülmektedir (<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/BuiltInExamples/ArduinoISP>).



Şekil 4.37: Bootload belleği görseli

Test düzeneğinde Arduino kullanabilmek için çıktılarını anlık olarak takip etmek, işlemek gerekmektedir. Bunun için Arduino içerisindeki önyükleyiciyi silip yerine test düzeneğinin programı yazılmalıdır. Bu işlem için ikinci bir Arduino'ya ihtiyaç duyulmaktadır. Test düzeneğindeki fazla pin ihtiyacından dolayı programlanan Arduino, Arduino Mega olarak seçilmiştir. Tablo 4.7'de Arduino Uno ve Arduino Mega'nın Özellikleri verilmiştir.

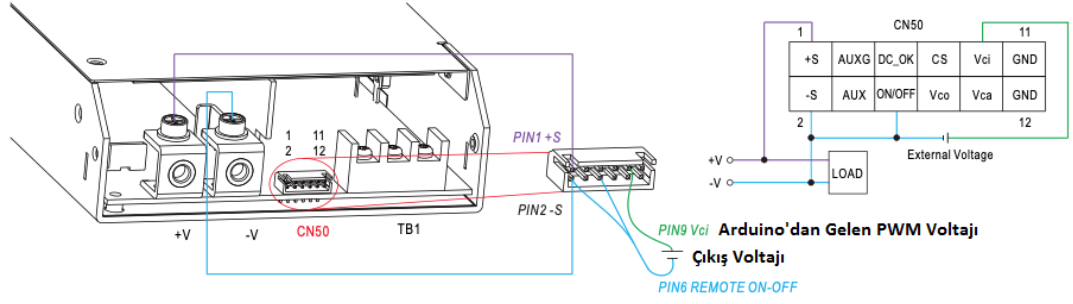
Tablo 4.7: Arduino Uno ve Mega teknik özellikleri
(<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>, <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>)

	Arduino Uno	Arduino Mega
Mikrodenetçi	ATmega328P	ATmega2560
Çalışma voltajı	5V	5V
Giriş voltajı (önerilen)	7-12V	7-12V
Giriş voltajı (limit değerler)	6-20V	6-20V
Dijital I / O Pinleri	14 (6 tanesi PWM çıkışı)	54 (bunlardan 15'i PWM çıkışı sağlamaktadır)
PWM Dijital I/O Pinleri	6	15
Analog Giriş Pinleri	6	16
I/O Pin Başına DC akım	40 mA	20 mA
3.3V Pin DC akımı	50 mA	50 mA
Flash Bellek:	32 KB (ATmega328) 0.5 KB kadarı bootloader	256 KB (ATmega2560) 8 KB bootloader tarafından kullanılır
SRAM	2 KB (ATmega328)	8 KB (ATmega2560)
EEPROM	1 KB (ATmega328)	4 KB (ATmega2560)
Saat Hızı	16 MHz	16 MHz
Uzunluk	68.6 mm	101.52 mm
Genişlik	53.4 mm	53.3 mm
Kütle	25 g	37 g

4.3.2 Programlanabilir SMPS Güç Kaynağı

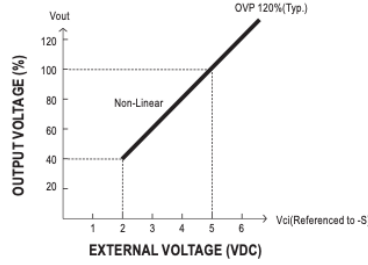
Test işlemi esnasında TES modüle ve harici ısı yüküne uygulanacak çeşitli gerilim değerleri için yüksek hassasiyetli PWM voltajlı sürülebilir sürücüye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple besleme için Meanwell RSP-1000 serisi SMPS sürücü kullanılmıştır. Çıkış voltajı doğrusal olarak ayarlanabilen 24V DC 40A, 1000W gücündeki sürücü; %90 verimle, % ± 0.5 voltaj regülasyonu ile çalıştırılabilmektedir.

SMPS sürücünün programlanması için üretici tarafından paylaşılan aşağıdaki bağlantı şekli ile köprülemeler ve besleme bağlantıları yapılmıştır. Şekil 4.38'de Arduino, 10 numaralı Vcc pini aracılığı ile sürücüyü PWM voltajıyla sürmektedir.



Şekil 4.38: Meanwell CH50 Bağlantısı

Sürücünün Arduino'dan gönderilecek 5 V DC gerilim değerlerine bağlı olarak çıkış voltajının oransal değişimi Şekil 4.39'da verilmiştir.



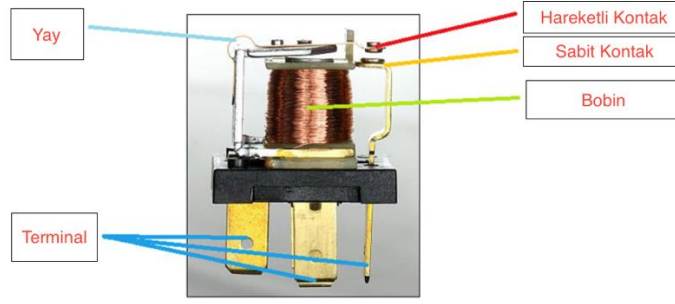
Şekil 4.39: Çıkış gerilimi grafiği görseli

4.3.3 Elektronik Komponentler

Arduino ile uyumlu devre kartları aracılığı ile sağlanan kontrol ve programlamada ölçüm sistemindeki elektriksel aygıtların işleyişi sağlanmıştır. Ölçüm sistemi hasasiyeti konusunda kontrol kartlarına ilişkin kütüphaneler ve veri dökümanlarının bilgileri genellikle üreticiler tarafından paylaşılmaktadır.

4.3.3.1 Röle

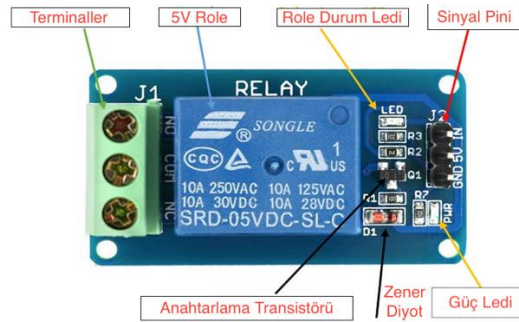
Tek kanallı röle, bir anahtarın kontaklarını açmak veya kapatmak için bir elektrik akımı kullanır. Bu genellikle, bir anahtarın kontaklarını çeker ve etkinleştirme onları birbirine çeken bir bobin yardımıyla yapılır, bobine enerji verilmediğinde ise iletken yay onları birbirinden ayırır (Şekil 4.40).



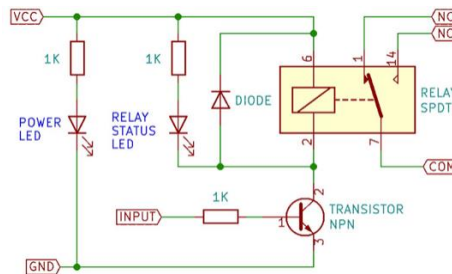
Şekil 4.40: Rölle bobin görseli (<https://components101.com/switches/5v-single-channel-relay-module-pinout-features-applications-working-datasheet>)

Kullanılacak röle 50 mA akım tüketmesine karşın doğrudan bir mikrodenetleyicinin pinlerinden sürmek mümkün değildir. 10A, 30A olmak üzere AC ve DC gerilimlerde Rölle bobini aynı zamanda endüktif bir yüküdür, bu nedenle bobin kapatıldığında, transistörün açılıp kapanmasına zarar verebilecek büyük bir geri dönüş voltajı gelişir. Bu nedenle, tek yönlü geçirgen diyot devre kartında bulunmaktadır (Şekil 4.41).

Ölçüm düzeneğinde anahtarlamalar röleler aracılığı ile yapılmıştır. COM ortak bacak olmak üzere NO bacağından normali açık şekilde bağlantı yapılmıştır.



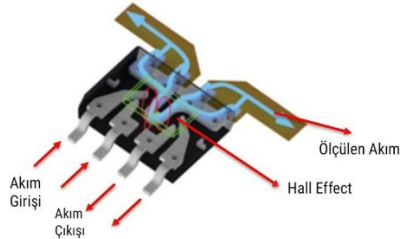
Şekil 4.41: Tek kanallı SONGLE marka 10A röle içeren role kartı



Şekil 4.42: Rölle kartına ait devre şeması

4.3.3.2 Akım Sensörü

Test düzeneğinde TE modülün ve harici ısıtıcının yük altındaki akımlarının ölçülmesinde Hall-Effect metoduyla çalışan Allegro marka ACS-712 akım izleme modülü kullanılmıştır (Şekil 4.43).

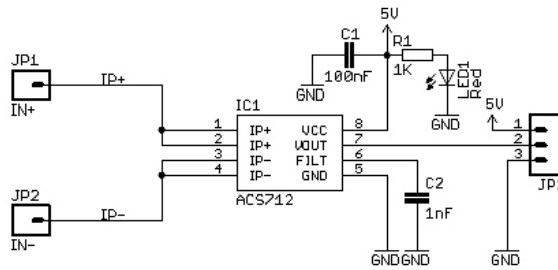


Şekil 4.43: Hall-Effect prosedürü

Hazır devre komponenti olarak satılan sensörde, akımın geçtiği bakır iletim yolu etrafında meydana getirdiği manyetik alanı Hall Devresi (Hall IC) tarafından algılatıp orantılı gerilim bilgisine çevrilmesini sağlayan Hall-Effect sensörü yer almaktadır. ACS-712 akım sensörünün, chopper-stabilize BiCMOS manyetik alan okuması; 1,2 m Ω 'luk iletken iç direnci ve manyetik alan sinyalinin Hall transdüserine yakın oluşundan Hall Devresinin ölçüm hassasiyetini artırmaktadır (Şekil 4.44).

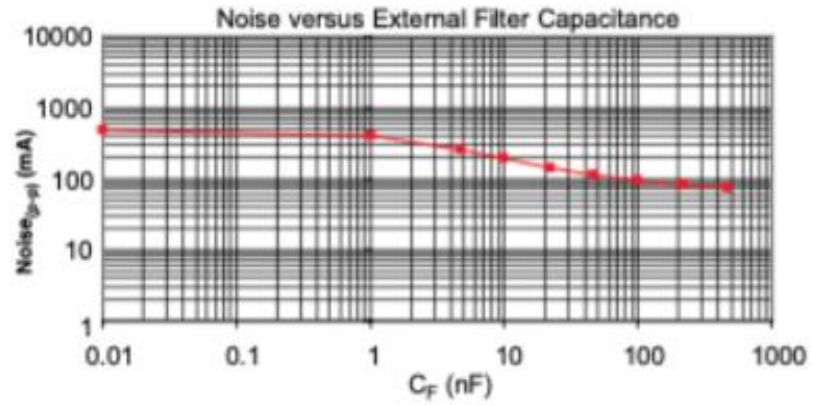


Şekil 4.44: ACS-712 akım sensörü



Şekil 4.45: ACS-712 akım sensörü devre şeması

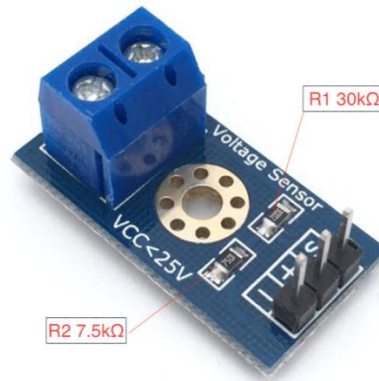
ACS-712 entegresi, doğru akımla doğrusal olarak değişebilen analog sinyali çıkışını sağlar. ACS-712 modülü, 0 ~ 30 A amper aralığında ölçüm yapılabilmesi, 25 C'de %1,5'luk toplam voltaj hatası, yüksek manyetik histerezis ve stabil çıkış offset voltajı sayesinde akımın okunması için uygundur. Analog sinyalin çözebileceği en küçük akım 66-185 mV/A civarındadır. Gürültü filtreleme kapasitesi (CF) Şekil 4.46'deki düzeydedir. 80kHz Bant aralığını düşürerek gürültü seviyesine müdahale edilebilir. Sensörün kalibrasyonu için algılama hatalarında akımı sıfır olacak şekilde set edilip belirli akım girişinin referans voltaj ile çıkış sapma voltajı farkına bölünmesi ile hesaplanır.



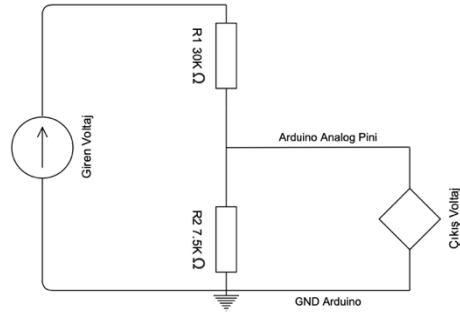
Şekil 4.46: Gürültü filtreleme kapasitesi (CF) grafiği

4.3.3.3 Voltaj Sensörü

Ölçüm düzeneğinde TES modülün ve harici ısıtıcının voltaj değerlerinin ölçülebilmesi için Arduino analog pinleri aracılığı ile voltaj değerinin okuması gerekmektedir.



Şekil 4.47: Voltaj sensörü



Şekil 4.48: Voltaj sensörü devre şeması

Sensörün ölçeceği giriş voltajına seri olarak bağlanmış 7,5 kΩ ve 30 kΩ’luk dirençler üzerinden ölçüm akımı geçirilmektedir. 30 kΩ’luk direnç üzerinden voltaj okuması yapılır, 7,5 kΩ’luk direnç ise analog okunacak voltajı tanımlamaktadır. Hesaplatılabilecek maksimum voltaj çıkış voltajının 5 V olduğundaki 25 V değeridir. I akımı aşağıdaki gibi R1 ve R2 dirençlerinde aynıdır. R1 ile bulunacak akım değeri R2 direncinden de geçtiğinden giriş voltajı değeri aşağıdaki gibi hesaplatılabilir.

$$I = \frac{V_{\text{giren}}}{R_2} ; I = \frac{5}{7500} = 0,000666\text{A} = 666\mu\text{A}$$

$$I \cdot R_1 = 666\mu\text{A} \cdot 30000\Omega = 20\text{V}$$

$$V_{\text{giren}} + V_{\text{çıkan}} = 20\text{V} + 5\text{V} = 25\text{V}$$

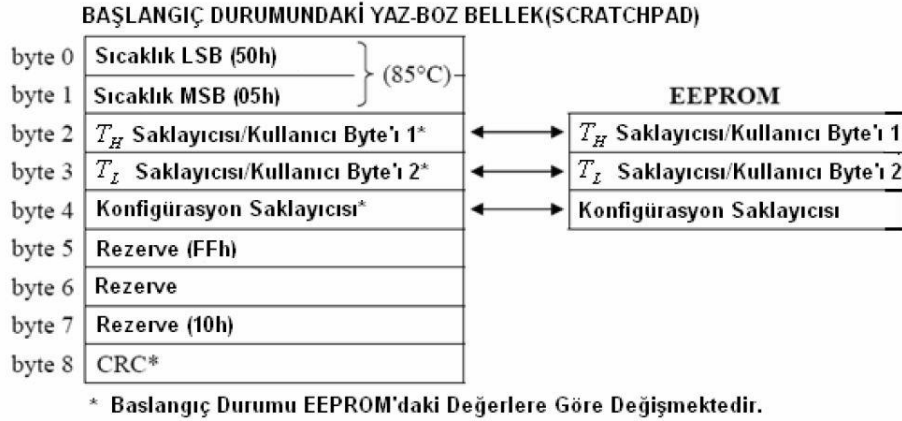
4.3.3.4 Sıcaklık Sensörü

TE modülün sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları, yalıtım sıcaklığı ve su sıcaklığının ölçümünde One Wire haberleşme protokolü ile haberleşebilen DS18B20 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. DS18B20 sıcaklık sensörü 3.0 – 5.5 V DC voltaj ile beslenmekte ve -55°C ile +125°C arasında 9, 10, 11 veya 12 bitlik çözünürlükte ölçüm yapabilmektedir. 12 bitlik çözünürlükteki hassasiyeti 0,0625°C olmaktadır. Çözünürlük değeri azaldıkça 8 bit sabit kalmakta, 4 bit ondalık kısım yüzdesel olarak azalmakta ve ölçüm çevrimi de düşmektedir (Şekil 4.49).

R1	R0	Çözünürlük	Max Çözünürlük Zamanı	
0	0	9 bit	93.75ms	$t_{CONV} / 8$
0	1	10 bit	187.5ms	$t_{CONV} / 4$
1	0	11 bit	375ms	$t_{CONV} / 2$
1	1	12 bit	750ms	t_{CONV}

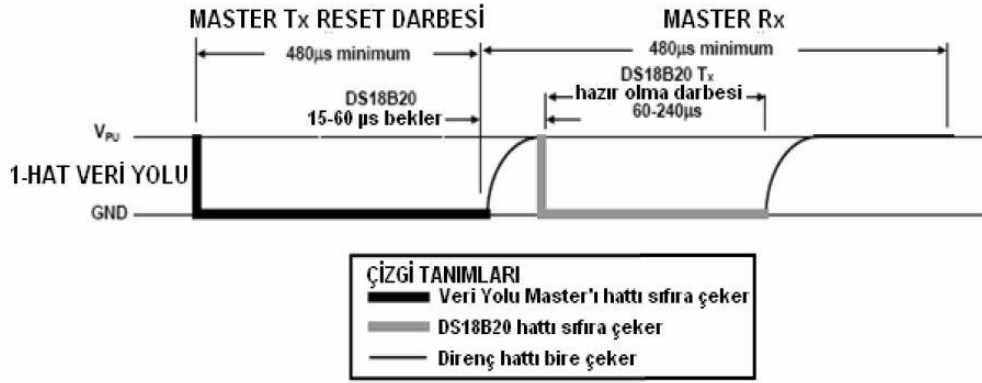
Şekil 4.49: Sıcaklık çözünürlük konfigürasyonu

DS18B20 sıcak sensörünün veri işleyiş mekanizması Şekil 4.50'deki gibidir. Sensöre sıcaklık verisini komutlayan Byte 0 (Low Byte) ve Byte 1 (High Byte) türünden iki byte değeri vardır. Low Byte ilk 4 bit değeri sıcaklık hassasiyetini ondalık olarak oluşturan BIT0, BIT1, BIT2 ve BIT3 değerleridir. Low Byte'ın son 4 bit değeri ise sıcaklık verisinin tam kısmına ait low nibble değeridir. High Byte'ın ilk 4 bit'i sıcaklık verisine ait 8 bitlik değer için ilk 4 bitini oluşturur. High Byte'ın son 4 bit'i ise sıcaklığın pozitif, sıfır ve negatif işaretlerini saklamaktadır. Byte 2 ve Byte 3 değerleri 8 bit'lik sıcaklık termostat kontrol işlemine ait verilerdir. Byte 4 değeri sıcaklık çözünürlüğü ve sıcaklık ölçüm çevrimi için kullanılmaktadır. R0 ve R1 bitleri kontrolünü kullanarak gerçekleşir. Byte 5, Byte 6 ve Byte 7 bitleri sıcaklık ölçümünde kullanılmamaktadır. Byte 8 bit'i hata kontrol algoritması CRC kodunu içermektedir.



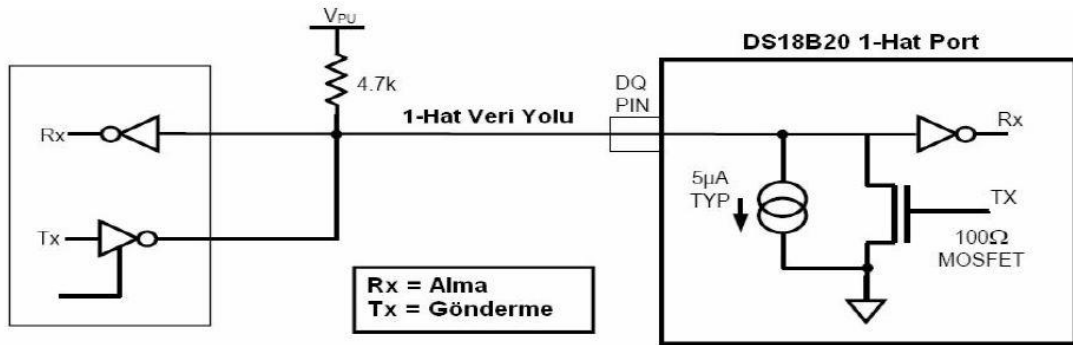
Şekil 4.50: DS18B20 sıcak sensörünün veri işleyiş mekanizması

DS18B20 sıcak sensörü sıcaklık ölçüm işlemi haberleşmesi reset komutunun gönderilmesi işlemi ile başlatılır. Hattın uygunluğu kontrol edildikten sonra daima slave durumundaki DS18B20, one wire bus protokolü ile master devreden sinyal almaktadır. Devredeki haberleşme ve zaman grafiği Şekil 4.51'deki gibidir.



Şekil 4.51: Devredeki haberleşme ve zaman grafiği

DS18B20 sensörünün Arduino üzerinden haberleşme devresi Şekil 4.52'deki verilmiştir. Sensörün kullanımı için One Wire data bacağı ile güç bacağına direnç köprülenmektedir.



Şekil 4.52: DS18B20 sensörünün Arduino üzerinden haberleşme devresi

4.3.3.5 Selenoid Vana

Vakum ortamı havası kontrolü direkt çekmeli tip selenoid vanalar ile yapılmıştır. Test ortamının vakumlanmasında vakum kompresörü ile birlikte tahriklenen normal kapalı selenoid vana test işlemi süresince açık kalır. Vakumlama işlemi başladığında vakum kompresörü motoruna ve selenoid vana bobinine 220V AC voltaj gönderilir. Kompresör basınç farkı yaratmaya başladığında selenoid vana kovanı içindeki nüveyi (çekirdeği) yukarı çekecektir. Valf gövdesindeki orifise baskı yapan nüve yukarı hareket edince, orifis girişinde bekleyen havanın önü açılmış olacaktır. Önü açılan hava valfin çıkış tarafından geçerek boru içinde ilerlemesine devam edecektir. Elektrik enerjisi kesilince bobin çekirdeği bırakır ve çekirdek kendi

ağırlığı yanında üzerindeki yay kuvveti ile beraber tekrar gövde üzerindeki orifisi baskı yaparak kapatır, hava vakumlanması durmuş olur ve selenoid vana ilk konumu normalde kapalı pozisyona geri döner. Test işlemi bitişinde normalde kapalı olan baypas selenoid vanası açılır ve basınçlandırma elemanına ihtiyaç olmadan orifis girişindeki atmosfer havası ile ortam basıncı dengelenir. Şekil 4.53'te selenoid vana gösterilmiştir.



Şekil 4.53: Selenoid vana görseli

4.4 Düzeneğin Algoritması

Ölçüm düzeneğinin yazılımı, kararlı rejimdeki denge sıcaklık farkının tespit edilebilmesi algoritması ile kontrol edilmektedir. TES modüle verilecek voltaj ve harici ısıtıcıya verilecek voltaj değeri için sürücüler Arduino tarafından PWM voltajı ile sürülmektedir. Voltaj değerlerinin artırımı, kararlı rejim sıcaklık denge prosedürünün sağlanması ile yapılmaktadır.

4.4.1 Kararlı Rejimdeki Denge Sıcaklık Farkının Bulunması

TES modülün sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları test akımı altında çalıştırıldığında anlık ölçülen T_H ve T_C sıcaklıkları, TES modül ile ilgili doğru değerleri yansıtmaz. TES modülden alınacak yüzey sıcaklıkları ölçüm sonuçların, TES modülün kararlı rejimdeyken alınması gerekmektedir. Kararlı rejimin sağlanması,

sıcaklık farkı dengesinin hesaplanması ile kontrol edilmektedir. Yani TES modülün kararlı rejimde olup olmadığına, ΔT sıcaklık farkı değerinin istenen tolerans ve sürede değişmeden kalmasına bakılarak sıcaklık dengesinin sağlanması ile karar verilir.

TES modülün T_H ve T_C sıcaklıkları (90-100 ms aralıklarda) 300 kez ölçülerek sıcaklıkların aritmetik ortalama değerleri alınıp ΔT sıcaklık farkı hesaplanmaktadır. Ölçülen ilk sıcaklıklar $T_{h,1}$ ve $T_{c,1}$ olmak üzere ΔT_1 ilk sıcaklık farkı ölçümüdür. ΔT_1 eldesi için geçen süreyi sensörlerin ölçüm çözünürlüğünden ve yazılımdaki kod geçiş işlemlerindeki sürenin toplamı olarak bulunmaktadır. ΔT Sıcaklık farkı ölçümü sayısı; $\forall n \in N^+$ olmak üzere, $\Delta T_{(n)}$ dizisinin ilk elemanı $n=1$ ve son elemanı $n=200$ olan sonlu bir dizi oluşturmaktadır. Dizinin sıralı terimleri farkının mutlak değerleri, aşağıdaki $\Delta TDenge_{(m)}$ dizisini oluşturmaktadır.

$$\Delta TDenge_{(m)} = |\Delta T_n - \Delta T_{n-1}|$$

$\forall n \in N^+$ olmak üzere $\Delta TDenge_{(m)}$ dizisi de $\Delta T_{(n)}$ 'e bağlı sonlu bir dizidir. $\Delta TDenge_{(m)}$ dizisinin elemanları sıcaklık farkı değişim miktarını göstermektedir. $\Delta TDenge_{(m)}$ dizisinin $0.00 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta TDenge_{(m)} \leq 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ tolerans şartını sağlayan terimleri sıcaklık denge şartının sağlandığı değerler kümesini ifade etmektedir. Değerler kümesine ilişkin dizi elemanları kontrol edildiğinde, $\Delta T_{(n)}$ alt dizisine karşılık gelen elemanlar, denge sıcaklığının sağlandığı değerleri ifade etmektedir. Bu değerler arasında birbirini ardışık takip eden ölçümlere ilişkin sıcaklık farkı değerleri; sıcaklık denge süresinin en yüksek olduğu, kararlı ölçümleri göstermektedir. Sıcaklık denge şartını sağlayan $\Delta T_{(n)}$ alt dizisinde: ardışıklığın en uzun devam ettiği elemanlar arasından seçilecek ardışık değerlerin ortanca terimi, kararlı rejimdeki sıcaklık farkı değerini oluşturur. Değerler arasında birden fazla sonuç ya da ardışık ilişki yok ise sıcaklık denge süresinin açıkça sağlanmadığı ortaya çıkar ve işlemler kararlı rejimdeki sıcaklık değerlerini buluncaya kadar tekrarlanır.

4.4.2 TES Modül Voltajının Belirlenmesi

TES modülün çekeceği akımı belirleyen test düzeneğinin ürettiği voltaj değeridir. TES modülü besleyen voltaj, 5 V ile sürülen SMPS güç kaynağından

sağlanmaktadır. Arduino üzerinden Pulse Width Modulation (PWM) voltajı ile 0-24 V DC voltaj TES modül voltajını oluşturulmaktadır.

PWM voltajı, 0 – 5 V DC aralığındaki voltajı kare dalga şeklinde 8 bit (2^8) çözünürlüğünde gerilim oluşturup lineer olarak SMPS güç kaynağını sürmek için kullanılmaktadır. ΔT_{\max} değerinde TES modülden çekilen akım I_{\max} , voltaj ise V_{\max} olmaktadır. I_{\max} akımının belirlenmesi testinde, SMPS güç kaynağına Arduino üzerinden 0-255 aralığındaki değerlerdeki lineer artırımlı step voltajlar uygulanmaktadır. SMPS Artırım değerleri; V_{step} voltajı, önceki voltaj değerine 0,4615 V DC voltaj artırımı ile yapılmaktadır. Lineer artırımın kontrolünde uygulanan 0,4615 V DC voltaj değeri için kararlı rejime bağlı sıcaklık denge şartlarının sağlanması gözetilmektedir. Bu nedenle sıcaklık denge şartları sağlanıncaya kadar, SMPS ile TES modüle uygulanan giriş gücü üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamaktadır. Voltaj artırım işlemi sona erdiğinde test bitmekte, TES modüle ilişkin maksimum parametreler I_{\max} değeri şartlarında elde edilmektedir.

$$V_{\text{PWM1}}=0, \quad V_{\text{step}}=5 \quad \text{ve} \quad V_{\text{PWM51}}=255 \quad \text{olmak üzere;}$$

$$V_{\text{PWM2}}= V_{\text{PWM1}}+V_{\text{step}}$$

$$V_{\text{PWM3}}= V_{\text{PWM2}}+V_{\text{step}}$$

$$V_{\text{PWM4}}= V_{\text{PWM3}}+V_{\text{step}}$$

....

$$V_{\text{PWM51}}= V_{\text{PWM50}}+V_{\text{step}}$$

TES modüle verilecek olan 0-24 V DC voltaj, I_{\max} testi boyunca %0.02 artırımla 0,4615 V DC voltaj olarak bölünmüştür.

\dot{Q}_{\max} yükünün belirlenmesi testinde ise I_{\max} akımı test değerlerinden yararlanılmaktadır. Bu işlem sırasında, SMPS ile TES modüle uygulanan $V_{\text{PWM},I_{\max}}$ değerinde I_{\max} akımı TES modül tarafından çekilirken harici ısı yük testi işlemleri yapılmaktadır.

4.4.3 Harici Isıl Yük Voltajının Belirlenmesi

TES modül ΔT_{\max} şartlarında olduğunda soğutma kapasitesi $\dot{Q}_c=0$ olmaktadır. Bu şartlar altında I_{\max} akımında çalışan modülün yüzey sıcaklıklarının aynı değere getirilmesi amacı ($\Delta T=0$) ile TES modülün soğuk yüzeyine haricen ısı yük uygulanması gerekmektedir. ΔT sıcaklık farkını azaltacak şekilde soğuk yüzeyden pompalanacak ısının tamamı harici ısıtıcı tarafından sağlanacağı için TES modülün maksimum soğutma kapasitesi \dot{Q}_{cmax} harici ısıtıcının ısısına eşit olmaktadır.

$$\dot{Q}_{\text{cmax}} = \dot{Q}_{\text{heat}}$$

Harici ısı yük voltajının belirlenmesi işleminde, ısı yük sürücüsüne Arduino tarafından 0-5V DC PWM voltajı uygulanmaktadır. Isıtıcı üzerinde ısı birikmesine bağlı yüzey sıcaklığı yükselmesinin önüne geçildiği için SMPS sürücü tarafından verilecek elektriksel gücün TES modülde ΔT sıcaklık farkı kontrolü yapılabilmektedir.

Lineer artırımlı voltaj ile TES modül, ΔT_{\max} değerinden $\Delta T=0$ değerine getirilmektedir. Bu işlemde de kararlı rejim protokolü ile sağlanmaktadır. SMPS Artırım değerleri; V_{Hstep} voltajı, 2,18 V DC voltaj artırımını ile sağlanmaktadır.

$$V_{\text{HPWM1}}=0, \quad V_{\text{Hstep}}=25 \quad \text{ve} \quad V_{\text{HPWM11}}=250 \quad \text{olmak üzere;}$$

$$V_{\text{HPWM2}} = V_{\text{HPWM1}} + V_{\text{Hstep}}$$

$$V_{\text{HPWM3}} = V_{\text{HPWM2}} + V_{\text{Hstep}}$$

$$V_{\text{HPWM4}} = V_{\text{HPWM3}} + V_{\text{Hstep}}$$

....

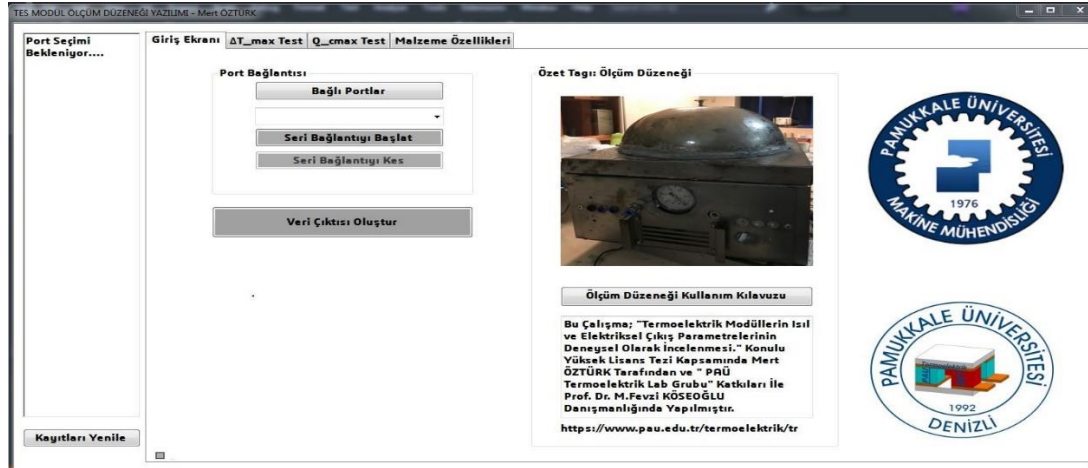
$$V_{\text{HPWM11}} = V_{\text{HPWM10}} + V_{\text{Hstep}}$$

4.5 Test Düzeneginin Ölçüm Yazılımı

Ölçüm düzeneginin yazılımı, TES modüle ait malzeme özelliklerinin bulunmasına yönelik kullanışlı ve işlevsel bir yapıda kodlanmıştır. Gelen verilerin anlık olarak işlenmesi için Arduino mikroişlemcisi bootload yapılar kullanılmaktadır.

Ölçümü yapılan parametrelerin eldesinde ve işlenmesinde Arduino programlama dili ve kütüphaneleri kullanılmakta olup, yazılımın seri haberleşmesinde C# Visual Studio programı kullanılmıştır.

C# Visual Studio ile programlanan yazılımda ölçüm verileri, test işlemi sırasında gerçek zamanlı olarak toplanıp arduino ile seri haberleşmeli bağlantı sağlanmaktadır. Ölçüm verileri, programlanan yazılımla işlenip TES modülün maksimum parametrelerini ve malzeme özelliklerini çıkartmaktadır. Şekil 4.54'te TES modül ölçüm düzeneği yazılımı giriş ekranı arayüzü gösterilmektedir.



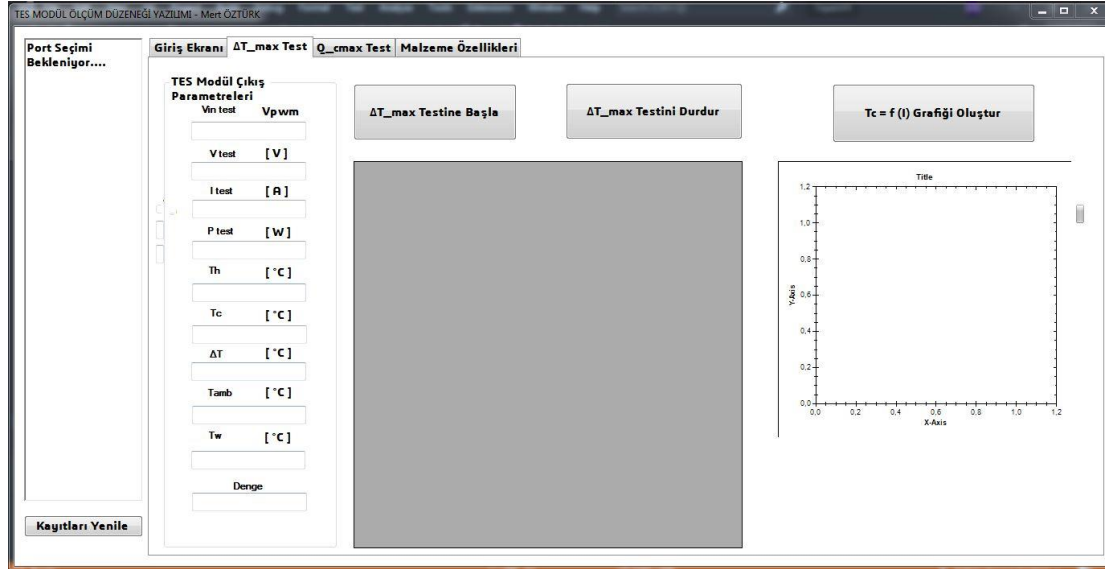
Şekil 4.54: Giriş ekranı arayüzü

Port bağlantısı groupbox içerisinde Arduino ile tanımlı seriport bağlantı durumu gösterilmektedir. Bağlantı 9600 Baudrate ile sağlanmaktadır. COM bağlantısı, bağlı portlar butonu altındaki combobox'dan seçilip seri bağlantıyı başlat butonu ile yapılmaktadır. Arayüzün sol köşesindeki richtextbox ekranından durum kayıtları gösterilmektedir. Test işlemi bittiğinde veri çıktısı oluştur butonundan ölçüm verileri excell formatında raporlanabilmektedir. Özet tagının oluşturulduğu kısımdaki ölçüm düzeneği kullanım kılavuzu, oluştur butonundan tez çalışmasının pdf formatlı dökümanına erişilebilmektedir.

4.5.1 TES Modülün Çıkış Parametreleri Eldesi İşlemleri

TES modüle ilişkin çıkış parametrelerin belirlenmesinde deneysel parametrelerin ölçümlerinden yararlanılmaktadır. Bu aşama için ölçülen deneysel parametreler ve eldeleri aşağıdaki Tablo 4.8'de açıklanmıştır. Deney işlemine, arayüzdeki “ ΔT_{max} Test” sekmesi ile geçilmektedir. Şekil 4.55'teki arayüzde

gösterilen “ ΔT_{max} Testine Başla” butonu ile ΔT_{max} testi başlatılmaktadır.



Şekil 4.55: ΔT_{max} testi arayüzü ekranı

Test işlemi boyunca TES modül çıkış parametreleri groupbox sekmesindeki değerler anlık olarak görüntülenebilmektedir. V_{intest} voltajı, Arduino'dan yazılmış TES modül step voltaj artırım değerlerini göstermektedir. V_{test} , I_{test} , P_{test} , değerleri, TES modülün sürücü tarafından üretilen voltaj değeri altındaki voltaj, akım ve elektriksel güç değerlerini göstermektedir. T_H sıcaklığı TES modülün sıcak yüzeyinin sıcaklığı, T_C sıcaklığı TES modülün soğuk yüzey sıcaklığı, ΔT sıcaklık farkı, T_{amb} dış ortam sıcaklığı, T_W su tankı sıcaklığı ve denge değeri TES modülün kararlı rejime yaklaşma durumunu ifade etmektedir.

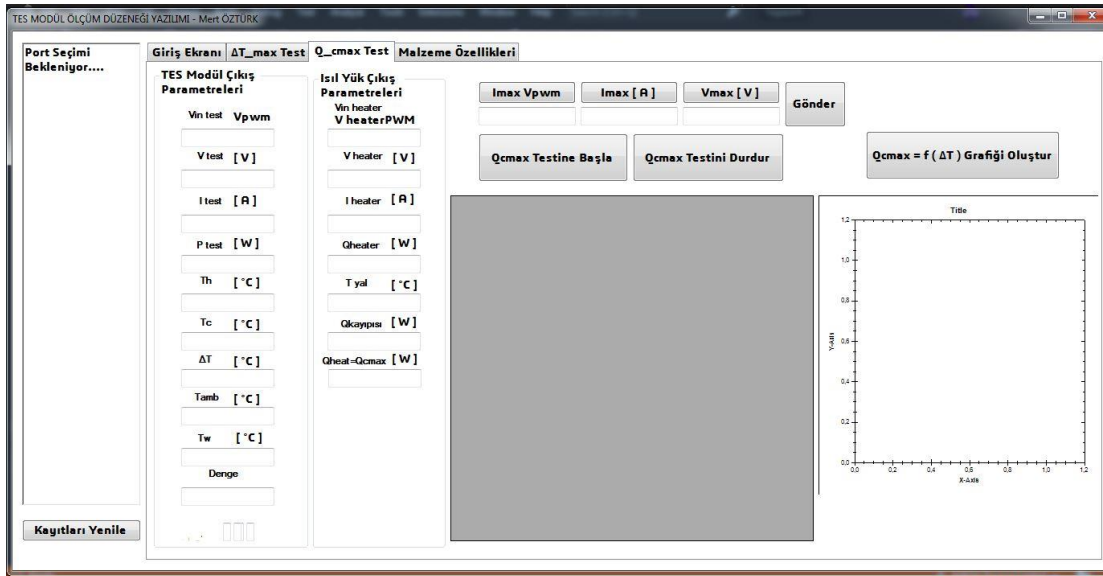
Test başlatıldığında V_{C03} klemens numaralı D34 su pompası rölesi pini açık konuma, V_{C05} klemens numaralı D35 vakum kompresörü rölesi ve vakum vanası selenoid vanası pini açık konuma, V_{C07} klemens numaralı D36 vakum baypas selenoid vanası kapalı konuma, V_{A06} klemens numaralı D37 harici ısıtıcı sürücüsü rölesi kapalı konuma ve TE modülün D_{06} klemens numaralı D_{07} PWM güç besleme rölesi açık konumuna geçmektedir

Röle konumlarının belirlenmesinin ardından kararlı rejim sıcaklık dengesi prosedürü döngüsü takip edilerek TES modül voltaj artırımı işlemleri yapılacaktır. Test verileri C# form uygulamasına veri tipine uygun değişkenlerle aktarılmaktadır. Döngü boyunca test değeri verileri; T_H sıcaklığı B06 klemens numaralı D28 pininden, T_C sıcaklığı B03 klemens numaralı D25 pininden, I_{test} akımı B02 klemens numaralı A05 pininden, T_{Amb} sıcaklığı A10 klemens numaralı D7 pininden, T_W sıcaklığı B01

klemens numaralı D6 pininden ve V_{test} voltajı V_{02} klemens numaralı D36 pininden okunmaktadır. TES modül voltaj artırımı için sürücüye D05 klemens numaralı D36 pininden PWM voltajı gönderilmektedir.

Voltaj artırım döngüsü boyunca arayüzde $T_C=f(I)$ grafiği çizilmektedir. Test tamamlandığında arayüz ekranında her step voltajı için kararlı rejim prosedürüne göre alınmış değerler gösterilmektedir. Voltaj uygulanması işlemi bittiğinde röle konumları tam tersi değere çekilerek test işlemi tamamlanır. Arayüz test çıktıları ekranına yazılan değerler arasında ΔT_{max} 'a karşılık gelen ΔT değerinde; ΔT_{max} , V_{max} ve I_{max} maksimum parametrelerin elde edildiği şartları ve maksimum parametreleri göstermektedir. Çıktı al kısmından sonuç ekranı excell formatında test ismine göre kayıt edilmektedir.

Maksimum parametreler elde edildikten sonra \dot{Q}_{cmax} test işlemi için arayüzdeki “ \dot{Q}_{cmax} Test” sekmesine geçiş yapılarak maksimum parametrelere karşılık gelen sürücü step voltajı değeri “Imax Vpwm” textine yazılmaktadır. Belirlenen step voltajı değeri C# form uygulamasından Arduino yazılımı girdisi olarak “Gönder” butonuna basılıp gönderildiğinde TES modül sürücüsünün sabit PWM değerini test işlemi boyunca oluşturacaktır.



Şekil 4.56: \dot{Q}_{cmax} testi arayüzü ekranı

Test başlatıldığında TES modüle maksimum parametrelerin yakalandığı şartlara gelinceye kadar yalnızca ilgili voltaj değeri uygulanmaktadır. Döngü başladığında V_{C03} klemens numaralı D34 su pompası rölesi pini açık konuma, V_{C05}

klemens numaralı D35 vakum kompresörü rölesi ve vakum vanası selenoid vanası pini açık konuma, V_{C07} klemens numaralı D36 vakum baypas selenoid vanası kapalı konuma, V_{A06} klemens numaralı D37 harici ısıtıcı sürücüsü rölesi kapalı konuma ve TES modülün D06 klemens numaralı D07 PWM güç besleme rölesi açık konumuna geçmektedir. Ardından step voltajı değerindeki PWM voltajı, TES modül sürücüsüne gönderilip TES modülün kararlı rejimde maksimum parametrelerini yakaladığı yazılım tarafından kontrol edilerek D37 pini harici ısıtıcı sürücüsü rölesi açık konumuna getirilip ısıtıcı sürücüsü SMPS güç kaynağına “VheaterPWM” sinyali ile voltaj gönderilir. Gönderilen voltaj değerine karşılık gelen \dot{Q}_{heater} ısısı; harici ısıtıcının akımı I_{heater} ve harici ısıtıcının V_{heater} voltajından türetilmektedir. Harici ısıtıcının sürülmesi işlemi kararlı rejim sıcaklık dengesi prosedürü döngüsü ile sağlanmaktadır. Harici ısıtıcı step voltajı Arduino tarafından artırıldıkça sıcaklık ve ısı kontrolü $\Delta T=0$ olana kadar yazılım tarafından denetlenir. $\Delta T=0$ denge anındaki \dot{Q}_{heater} ısısı hesaplanarak TES modüle aktarılan ısı miktarı; \dot{Q}_{heat} ortaya çıkar bu ısı \dot{Q}_{cmax} ısısına eşittir. Test işlemi tamamlandığında röleler ters konuma geçerek test sonlandırılır. \dot{Q}_c değeri çıktıları arayüz ekranında yazılmaktadır ve \dot{Q}_{cmax} değeri ekran üzerinden seçilmektedir.

4.5.2 Malzeme Özellikleri Ve Etkin Malzeme Özelliklerin Belirlenmesi

TES modüle ait malzeme özellikleri maksimum parametrelerin ideal denklemlerce kullanılması ile hesaplanan kodlar tarafından yapılmaktadır. Maksimum

parametre testleri bittiğinde “Malzeme Özellikleri” sekmesine geçiş yapılır.

Şekil 4.57: Malzeme özellikleri testi arayüzü

Bu kısımdaki veriler, doğrudan C# form uygulamasından parametrelerin kayıt edildiği text değerlerinin malzeme özelliği hesapla ve etkin malzeme özelliği hesapla butonu aracılığı ile hesaplatılmaktadır. Hesaplanma işlemindeki denklemler test düzeneğine ait elde edilme denklemleri kısmında belirtilmiştir. Malzeme özelliklerinin yanı sıra COP değerleri de bu sekmeden hesaplanabilmektedir. Tablo 4.8’de parametrelerin elde edilme açıklamaları detay olarak verilmiştir.

Tablo 4.8: Test düzeneğinin doğrudan ölçümünü yaptığı parametrelerin eldesi

Numara	Ölçülen Parametre	Açıklama	Simge	Birim	Parametre Eldesi
1	Ölçüm Sıcaklığı	TES modülün sıcak (T_h) ve soğuk (T_c) yüzey sıcaklıkları	T	K	DS18B20 ile TE modülün doğrudan ölçümü
2	Sıcaklık Farkı	Harici ısı yük dahil değil iken $\dot{Q}_{heat}=0$, TES modülün T_h ve T_c değerlerini farkı. $\Delta T=f(I)$	ΔT	K	T_h ve T_c Sıcaklıklarından sıcaklık farkı ΔT 'nin hesaplanması
3	Maksimum Sıcaklık Farkı	Harici ısı yük dahil değil iken $\dot{Q}_{heat}=0$, TES modülün mümkün olan en yüksek sıcaklık farkı	ΔT_{max}	K	T_h ve T_c Sıcaklıklarından sıcaklık farkı ΔT 'nin hesaplanması

4	TES modül Akımı	TES modülün çektiği akım	I_{test}	A	ACS712 sensörü ile doğrudan ölçüm
5	TES Maksimum Akım	TES modül mümkün olan en yüksek sıcaklık farkındayken ($\Delta T = \Delta T_{max}$) elde edilen akım. $I_{test} = I_{max}$	I_{max}	A	ACS712 sensörü ile doğrudan ölçüm
6	TES modülün Uçlarına Düşen Gerilim	Harici ısı yük dahil değil iken $\dot{Q}_{heat}=0$, TES modülün uçlarına düşen gerilim. $V=f(I)$	V_{test}	V	Voltaj Sensörü ile ölçülecek verilerin ısı dirençlerden gelen kayıpların düşülerek hesaplanması
7	TES modülün Uçlarına Düşen Maksimum Gerilim	TES modül mümkün olan en yüksek sıcaklık farkındayken ($\Delta T = \Delta T_{max}$) uçlarına düşen gerilim. $V_{test} = V_{max}$	V_{max}	V	Voltaj Sensörü ile ölçülecek verilerin ısı dirençlerden gelen kayıpların düşülerek hesaplanması
8	TES modülün soğuk yüzeyine uygulanan harici ısı yük	Sabit ΔT değerlerinde modülün soğuk yüzeyini ısıtan ısı yük. Soğutma sistemi ile ısıyı kuyusuna pompalar. $\Delta T=0$ durumunda $\dot{Q}_c = \dot{Q}_{heat}$	\dot{Q}_{heat}	W	ACS712 ve Voltaj sensörleri ile ölçülen değerlerin \dot{Q}_{heat} denklemiyle hesaplanması
9	TES modülün Soğutma Kapasitesi	Harici ısı yük dahil iken (\dot{Q}_{heat}) sabit akımdaki TES modülün soğutma kapasitesi. $\dot{Q}_c = f(\Delta T)$	\dot{Q}_c	W	ACS712 ve Voltaj sensörleri ile ölçülen değerlerin \dot{Q}_{heat} denklemiyle hesaplanması
10	TES modülün Maksimum Soğutma Kapasitesi	Harici ısı yük dahil iken (\dot{Q}_{heat}), $\Delta T=0$ ve $I=I_{max}$ 'da sabit akımdaki TES modülün soğutma kapasitesi. \dot{Q}_{cmax}	\dot{Q}_{cmax}	W	ACS712 ve Voltaj sensörleri ile ölçülen değerlerin \dot{Q}_{heat} denklemiyle hesaplanma

Tablo 4.9: Test düzeneğinin dolaylı ölçümünün yapıldığı parametrelerin eldesi

Numara	Ölçülen Parametre	Açıklama	Simge	Birim	Parametre Eldesi
1	TES modülün Sıcak Yüzeyinden Üretilen Isı Miktarı	Sabit akımdaki TES modülün sıcak yüzeyinin üretilip soğutma sistemine pompaladığı ısı miktarı $\dot{Q}_h=f(\Delta T)$	\dot{Q}_H	W	İdeal denklemler ile hesaplama
2	TES modülün Elektrik Gücü	TES modülün elektriksel tüketimi	P	W	Watt dönüşümü ile hesaplama
3	TES modülün elektriksel direnci	İdeal denklemler kullanılarak	R	Ω	İdeal denklemler ile hesaplama
4	TES modülün ısı iletkenliği	İdeal denklemler kullanılarak	K	W/K	İdeal denklemler ile hesaplama
5	TES modül kalite katsayısı (Figure-of-Merit)	İdeal denklemler kullanılarak	Z	1/K	İdeal denklemler ile hesaplama
6	Yarı iletkenin Seebeck katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	α	V/K	İdeal denklemler ile hesaplama
7	Yarı iletkenin öz direnci	İdeal denklemler kullanılarak	ρ	Ωcm	İdeal denklemler ile hesaplama
8	Yarı iletkenin termal iletkenlik katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	k	W/(c m.K)	İdeal denklemler ile hesaplama
9	Yarı iletkenin kalite katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	z	1/K	İdeal denklemler ile hesaplama

10	Yarı iletkenin etkin kalite katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	z^*	1/K	İdeal denklemler ile hesaplama
11	Yarı iletkenin etkin Seebeck katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	α^*	V/K	İdeal denklemler ile hesaplama
12	Yarı iletkenin etkin özdirenci	İdeal denklemler kullanılarak	ρ^*	Ωcm	İdeal denklemler ile hesaplama
13	Yarı iletkenin etkin termal iletkenlik katsayısı	İdeal denklemler kullanılarak	k^*	W/(c m.K)	İdeal denklemler ile hesaplama

4.6 TES MODÜLÜN ÇIKIŞ PARAMETRELERİNİN ÖLÇÜMÜ

TE modülün çıkış parametreleri tasarlanan, ölçüm düzeneği ile ölçülecektir. Parametrelerin ölçüleceği modül P&N markanın TES1-127025 ürünüdür. Test işlemi şartları oda sıcaklığında yapılmaktadır. Teste başlamadan önce şebekeye bağlı elemanların sigortaları açılıp vakum kompresörü yağ seviyesi kontrolü işlemleri yapılmaktadır. Vakum hacmi ve test yüzeyi alkol ile temizlenip vakum kapağı çeperlerindeki silikon tabakası altına vazelin uygulanmaktadır. İşlemler bittiğinde hacim 0,2 bar gösterge test basıncına vakumlanmaktadır.

Test edilecek TES modül alkol ile temizlenmiş yüzey üzerine ısı transfer katsayısı yüksek termal macun uygulanarak yerleştirilmektedir. Üst yalıtım parçası, alt yalıtım parçası üzerine civata ile birleştirilip test öncesi hazırlıklar tamamlanmaktadır.

4.6.1 Ölçü Aletleri ve Test Ekipmanlarının Kalibrasyonu

Test öncesi yapılacak işlemlerde ölçümlerin hata paylarının belirlenmesi gerekmektedir. Ölçümlerin doğruluğunun iyileştirmesi adına doğruluğuna güvenilen

referans ölçüm yapabilecek fluke marka multimetreden yararlanılmıştır. Multimetre verilerine göre sensör ve üreteçlerin kalibrasyonu sağlanacaktır.

TES modül ve harici ısıtıcı için voltaj üretici olarak kullanılan Meanwell markalı RSP-1000-24 modelli SMPS sürücülerinin yüksüz haldeki oluşturduğu voltaj değerleri Tablo 4.10'daki gibidir.

Tablo 4.10: Gerilim kalibrasyon tablosu

PWM Voltajı (V)	Fluke Multimetre (V)	RSP-1000-24 Çıkış Gerilimi (V)
1,00	4,909163	4,9023
1,25	6,079017	6,0912
1,50	7,365960	7,3075
2,00	9,675642	9,7145
2,25	11,016867	10,9186
2,50	12,095859	12,1201
2,75	13,327309	13,3124
3,00	14,437353	14,5245
3,25	15,610953	15,7210
3,50	16,975031	16,9327
3,75	18,043529	18,1342
4,00	19,387943	19,3261
4,25	20,451005	20,5352
4,50	21,809497	21,7291
4,75	22,903682	22,9312
5,00	24,231659	24,1640

TES modülün soğuk ve sıcak yüzeylerinin, dış ortam sıcaklığının, test suyu sıcaklığının ve harici ısıtıcının yalıtım parçası sıcaklığının ölçümünde kullanılan DS18B20 sıcaklık sensörleri için aynı çözünürlükteki ölçüm sonuçları Tablo 4.11'de verilmiştir. DS18B20'nin paslanmaz probu, farklı türden temas yüzeylerine etki etmektedir. Sıcaklık sensörlerine ilişkin ölçümler seramik yüzeyde ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Ölçülen referans seramik yüzeyde COMARK 9008 termometresi

ile değerler karşılaştırılarak ölçümlerin kabul edilebilir seviyede hatalar içerdđi gözlemlenmiştir (Tablo 4.11).

Tablo 4.11: Sıcaklık kalibrasyon tablosu

DS18B20 Sıcaklık Sensörü (°C)	COMARK 9008 Termometresi Sonuçları (°C)
70,00	70,02
60,00	60,02
50,00	49,98
40,00	40,03
30,00	30,00
20,00	20,02
10,00	10,01
0,00	0,02
-10,00	-9,99

4.6.2 Belirsizlik Analizi

Ölçüm düzeneği ölçüm enstürmental materyellerinin doğru sonuçlar altında incelenmesi oldukça önemlidir. TES modülün ölçümünü yaptığı değerlerin doğruluğu için hata analizlerinin yapılması gerekmektedir. Ölçüm belirsizliğinin saptanmasında Holman (2012) tarafından yayımlanan standart prosedürler doğrultusunda belirsizlik analizleri hesaplanmıştır. Belirsizlik analizinde kullanılan formülasyon ve sayısal değerler, Yeler ve Köseoğlu (2020) tarafından yapılan çalışmadan hareketle hesaplanmıştır.

Belirsizlik hesaplamalarına ölçümü yapılacak TES modülün, ısıl ve elektriksel parametreleri ile birlikte etkin malzeme özellikleri analiz edilmiştir. DS18B20 sıcaklık sensörü için sıcaklık ölçümündeki hata oranı, -10 °C ile 85 °C arasındaki ölçümlerde $\pm 0,5$ °C olmaktadır. Akım ölçümündeki hata oranı ACS712 sensörü için 25 °C'deki ölçümlerde %1,5 oranında olmaktadır. Bu doğrultuda ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerdeki belirsizlikler Tablo 4.12'de verilmiştir. Tablo 4.12'de hesaplanan değerlere ilişkin çözümler EK-D'de ayrıntılı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 4.12: TES modül parametreleri belirsizlik tablosu

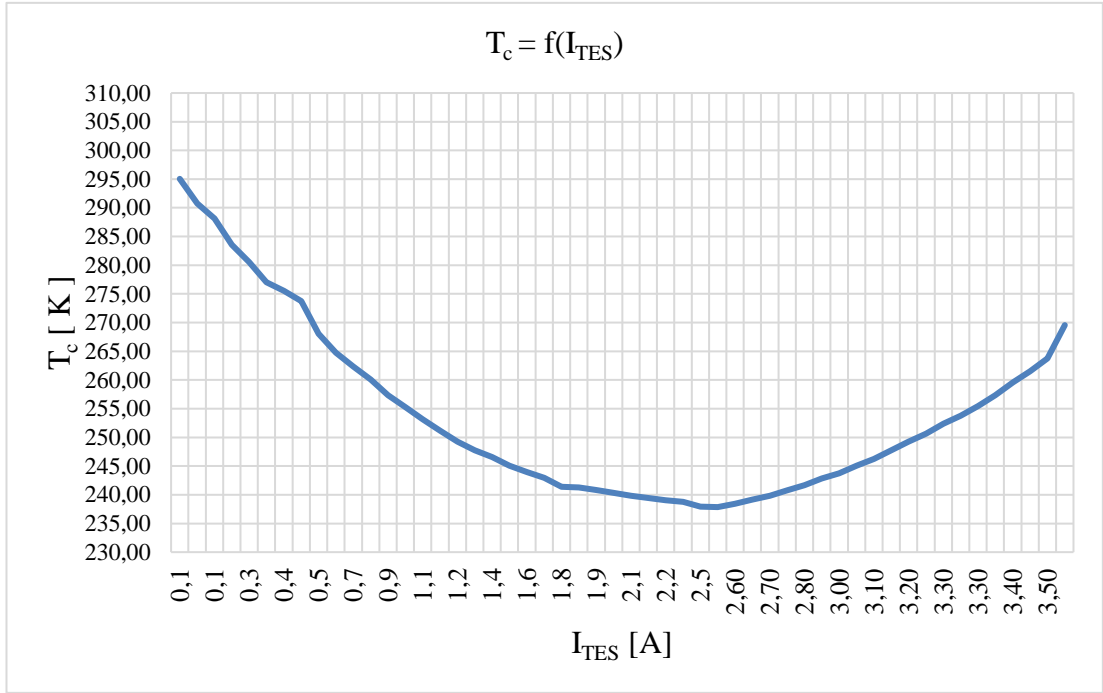
TES modül parametre ölçümlerindeki belirsizlikler	Belirsizlik (%)
Maksimum sıcaklık farkı (ΔT_{\max})	%1,16
TES modülün soğutma kapasitesi (\dot{Q}_c)	%8,37
TES modülün maksimum soğutma kapasitesi ($\dot{Q}_{c\max}$)	%2,12
TES modülün performans katsayısı (COP)	%8,63
p ve n tipi malzemelerin kesit alanı (A)	%2,00
TES modülün elektriksel direnci (R)	%4,38
TES modülün ısı iletkenliği (K)	%5,59
Yarı iletkenin etkin kalite katsayısı (z^*)	%1,24
Yarı iletkenin etkin Seebeck katsayısı (α^*)	%2,608
Yarı iletkenin etkin özdirenci (ρ^*)	%3,77
Yarı iletkenin etkin termal iletkenlik katsayısı (k^*)	%5,12

4.6.3 ΔT_{\max} , I_{\max} ve V_{\max} Parametrelerin Elde Edilmesi

Test düzeneğinin; ΔT_{\max} , I_{\max} ve V_{\max} maksimum parametrelerin eldesi işleminde arayüzden “ ΔT_{\max} Testine Başla” butonu ile maksimum parametrelerin testi yapılmaktadır. Kararlı rejim sıcaklığı prosedürünce denge sıcaklıkları tespit edilmektedir. Elde edilen denge sıcaklıklarında, T_H değeri 298,65 K de sabit tutularak her step voltaj artırımında ölçüm verileri ekrana kayıt edilmiştir.

ΔT_{\max} testi koşulları; oda sıcaklığı 300 K, bağıl nem %50, atmosfer basıncı 1025 hPa ve soğutma suyu sıcaklığı 297,45 K olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında test vakum ortamı -0.2 bar gösterge basıncına kadar vakumlanmıştır. Atmosfer basıncından vakum basıncına gelme süresi 90 s civarındadır. Test işlemi boyunca vakum kompresörü çalışmaya devam etmektedir. ΔT_{\max} 333,95 K, I_{\max} akımı 2,5 A ve V_{\max} voltajı 15,50 V'dur. Test, 150 dk'da tamamlanmıştır. Test süresince başlangıç şartlarını sabit tutmak adına su tankı hacmi şebeke suyu ile beslenmektedir.

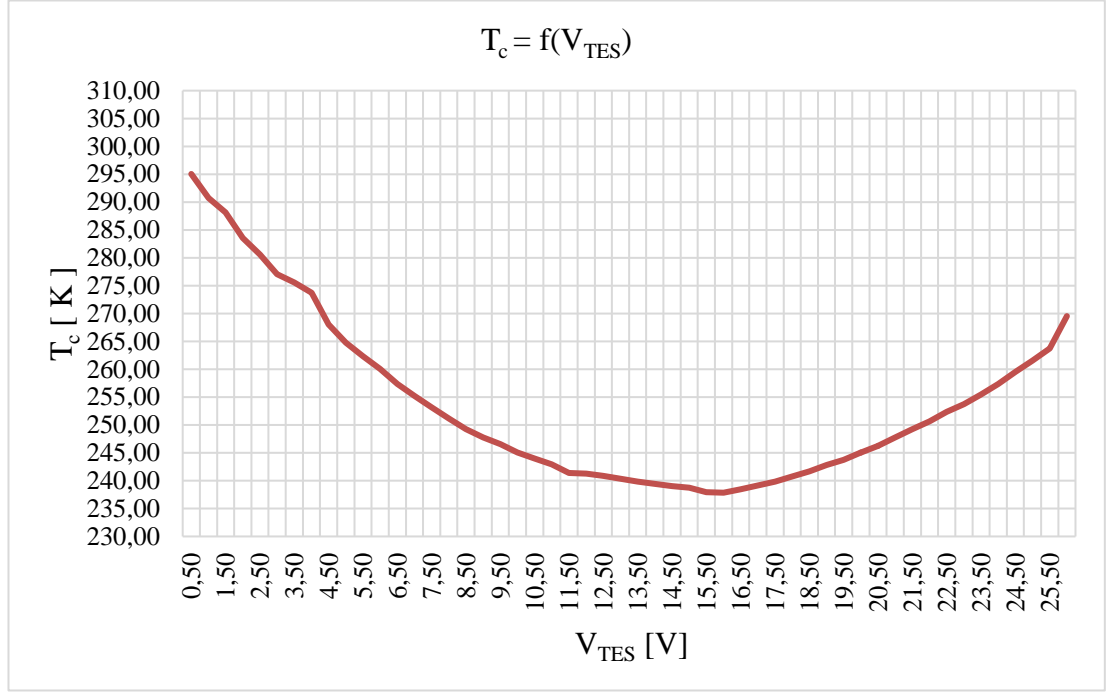
Test bittiğinde veriler arayüze kayıtlı edilmiş ve veri ekranındaki sonuçlara ait $T_c=f(I_{TES})$ grafiği ve $\Delta T=f(V)$ grafikleri programdan çizilmiştir. Ölçüm sonuçları arayüzdeki veri ekranı üzerinden izlenmektedir. Maksimum parametreler ölçüm sonuçları arasında ΔT_{max} değerine göre tespit edilmektedir. Ölçüm sonuçlarının programdan çıkan excel dökümü olarak aşağıdaki grafiklerdeki gibidir. Test işlemlerinin tamamındaki sıcak yüzey sıcaklığı T_H sıcaklıkları 298,65 K’de sabit tutulmuştur.



Şekil 4.58: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $T_c = f(I_{TES})$ grafiği

Kararlı rejim şartları altında TES modülün çektiği $I=I_{max}$ akımı değeri 2,5 A olup T_c sıcaklığı 237,95 K olmaktadır. Eğri I_{max} akım değerini geçtikten sonra

sıcaklığın ters parabol şeklinde düştüğü gözlemlenmektedir.

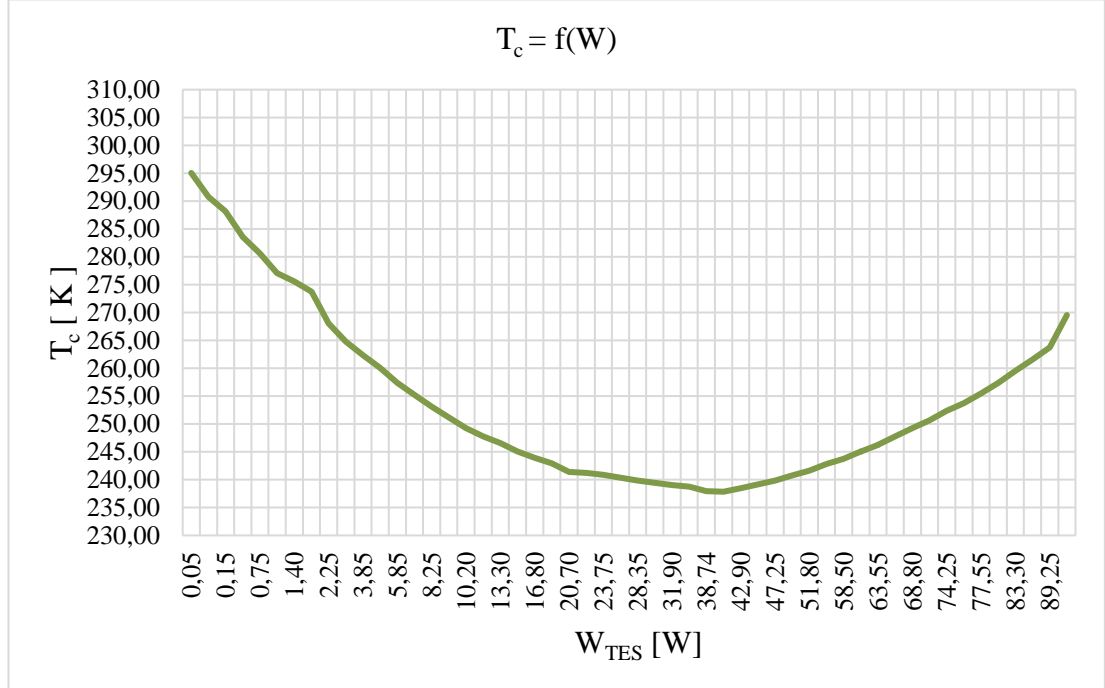


Şekil 4.59: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $T_c = f(V_{TES})$ grafiği

TES modüle uygulanan step voltaj değerleri Şekil 4.59'daki gibidir. $V=V_{max}$ voltajı $I=I_{max}$ akımında çekilmektedir. $T_c = 237,95$ K değerinde; sıcaklık farkı $\Delta T = 60,80$ K olarak ölçülmüştür. $\Delta T = \Delta T_{max}$ değerindeki akım ve voltaj maksimum olarak

ölçülmüştür. Grafikteki ters parabolün tamamlanması güç kaynağının sınır değerlerine erişildiği içindir.

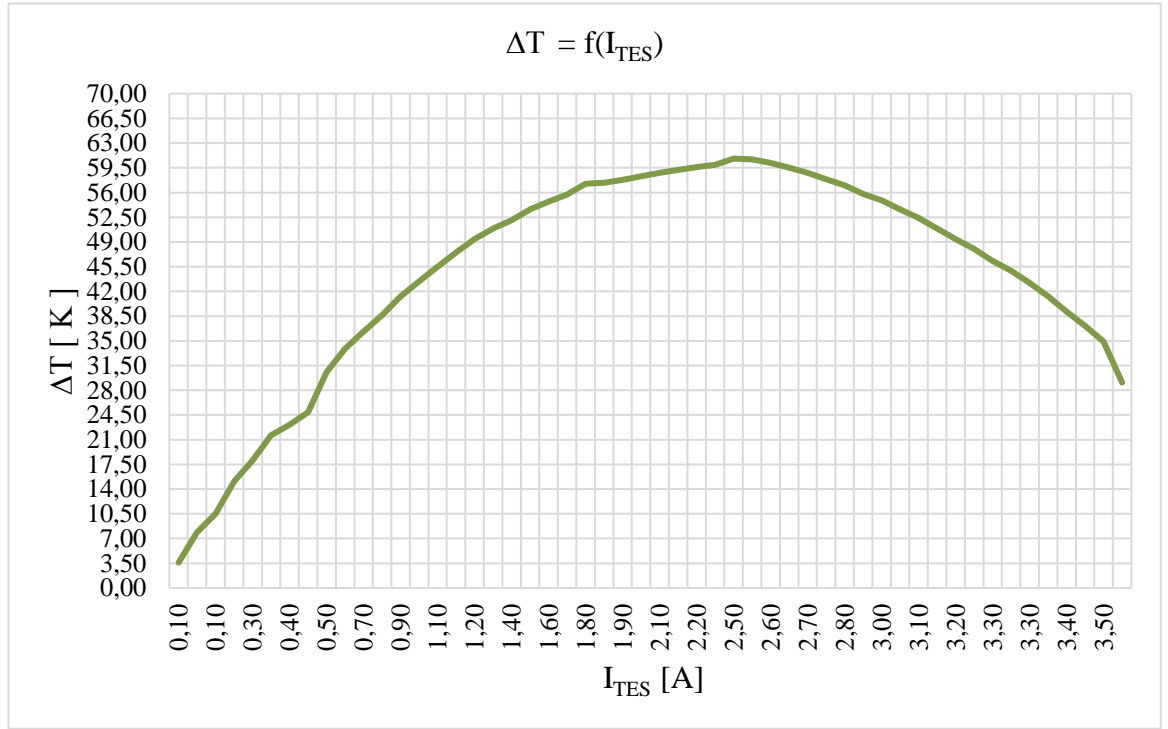
TES modül voltajı artırılmaya devam ettiğinde, değerler eğri boyunca ilerleyecektir.



Şekil 4.60: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $T_c = f(W)$ grafiği

TES modülün elektriksel gücü Şekil 4.60'daki gibi ölçülmüştür. Tüketilen enerji miktarı ile T_c sıcaklığı arasında maksimum akım değerinden sonra ters bir ilişki

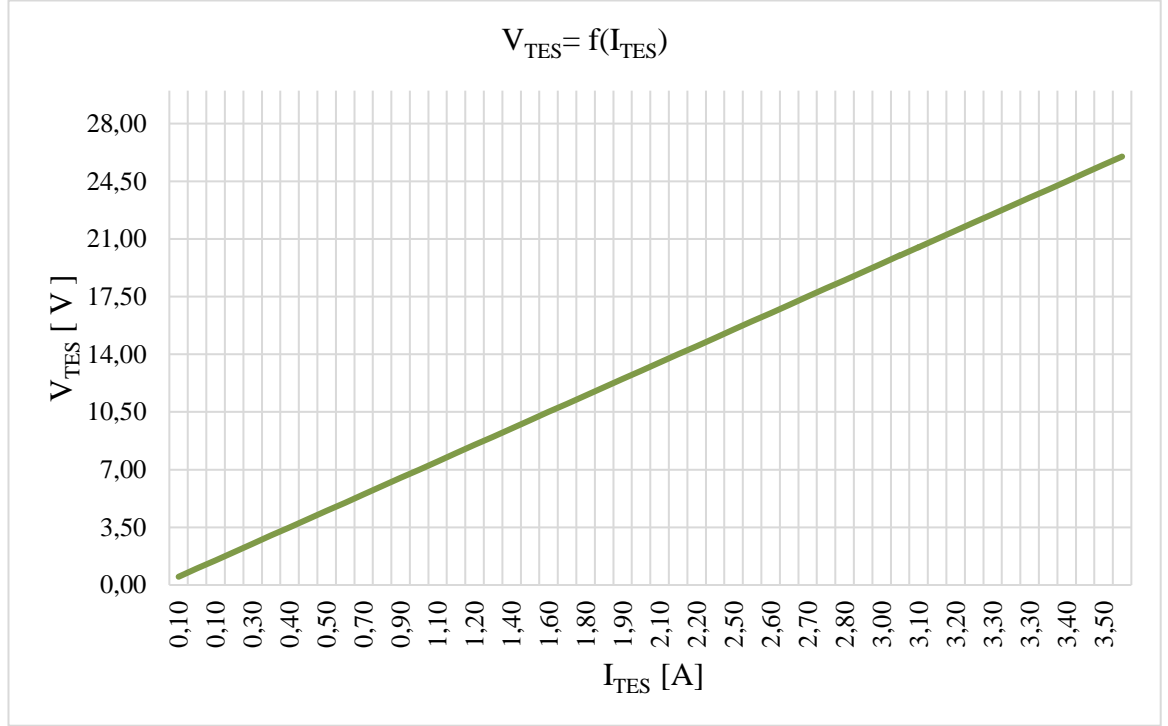
gözlemlenmektedir.



Şekil 4.61: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $\Delta T = f(I_{TES})$ grafiği

Şekil 4.61'deki sıcaklık farkının akıma bağlı ölçümlerinde $I=I_{max}$ akımında $\Delta T = \Delta T_{max}$ olmaktadır, $\Delta T_{max} = 60,80$ K'dir. Grafikteki 0,4 A ve 0,5 A değerlerindeki ani sıcaklık düşüşünün sebebi TES modülün sıcaklık farkından meydana gelen ters yöndeki voltaj yükselmesidir. Sıcaklık farkı, TES modülün iç direnci oranında voltaj

üretmektedir.



Şekil 4.62: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $V_{TES} = f(I_{TES})$ grafiği

Şekil 4.62’de TES modül uçlarına uygulanan gerilim ile akım arasındaki lineer ilişki gösterilmektedir. 0,1 A değerinde yazılım tarafından üretilen PWM voltaj aralığı, I_{TES} akımını ondalık olarak artırmamıştır ancak değer ölçüm çözünürlüğünde görünmese de I_{TES} akımı, voltaj altında değişmektedir.

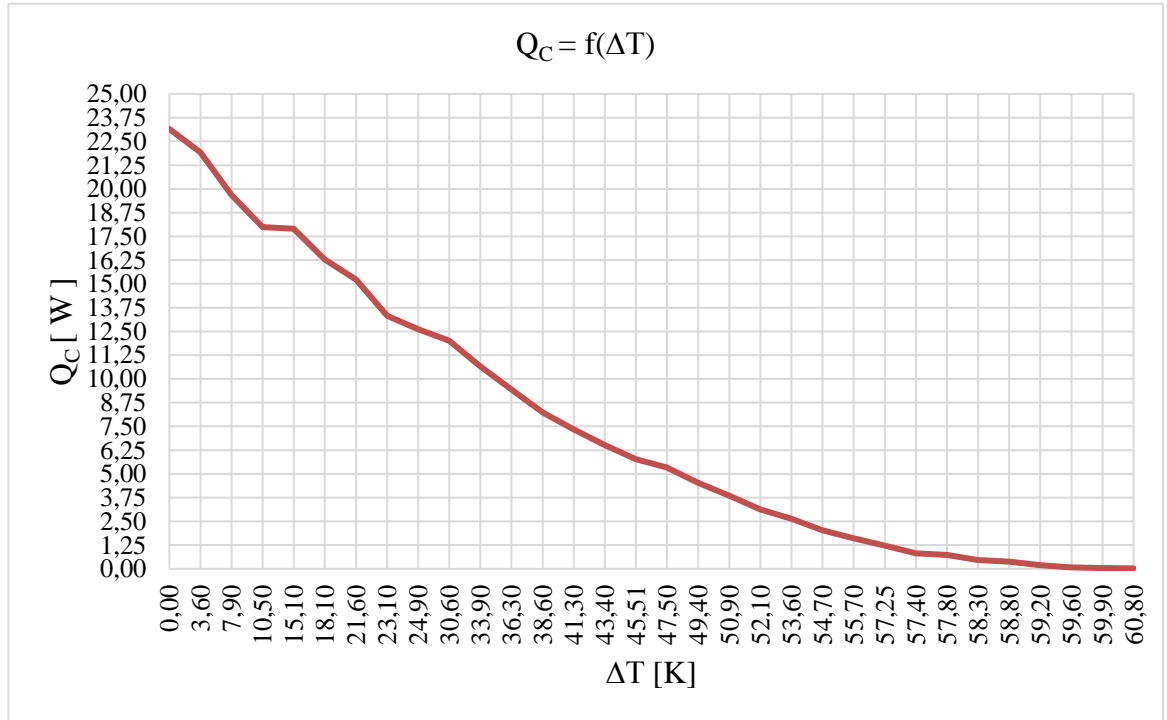
4.6.4 \dot{Q}_{cmax} ve Malzeme Özellikleri Ve Elde Edilmesi

\dot{Q}_{cmax} testi işlemlerinde I_{max} akımı altında çalıştırılan TES modül üzerine harici tarafından uygulanan \dot{Q}_{heater} ısı yüküne bağlı etkin malzeme özellikleri değişimleri gözlenmektedir. TES modülün I_{max} halindeki ölçülen \dot{Q}_c değeri sıfıra eşit, sıcaklık farkı ise maksimum olmaktadır. Harici ısıtıcının T_C yüzeyine transfer ettiği \dot{Q}_{heater} ısı, \dot{Q}_c değerine karşılık gelmektedir. $\Delta T = 0$ olana kadar test işlemi devam etmektedir. $\Delta T=0$ ve $I=I_{max}$ olduğu anda $\dot{Q}_{heat}=\dot{Q}_{cmax}$ olmaktadır. Harici ısıtıcının ürettiği ısının tamamını kayıplardan dolayı TES modüle aktaramamaktadır. \dot{Q}_{heater} ısı, harici ısıtıcının doğrudan TES modüle aktarabildiği hesaplanmış ısı miktarını göstermektedir.

\dot{Q}_{cmax} testi işlemi, kararlı rejim sıcaklığı prosedürünce denge sıcaklıkları tespit edilerek ilerletilmektedir. \dot{Q}_{cmax} testi koşulları; oda sıcaklığı 300 K, bağıl nem %55, atmosfer basıncı 1025 hPa ve soğutma suyu sıcaklığı 297,45 K olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında test vakum ortamı 0,2 bar gösterge basıncına kadar vakumlanmıştır. Test işlemi boyunca vakum kompresörü çalışmaya devam edip vakum ortamı, 0,2 bar gösterge basıncında sabitlenmiştir. Ölçülmüş 2,5 A I_{max} değerini üreten step voltaj değeri 30 'dur. Step voltajı değeri test ekranına girilir ve TES modül test boyunca bu voltaj değerinde çalıştırılmaktadır.

T_H değeri 298,65 K de sabit tutularak harici ısıtıcı sürücüsünün her step voltaj artırımındaki ölçüm verileri ve ideal denklemler kullanılarak hesaplanan malzeme özellikleri test ekranına ve excel çıktılarına kayıt edilmiştir.

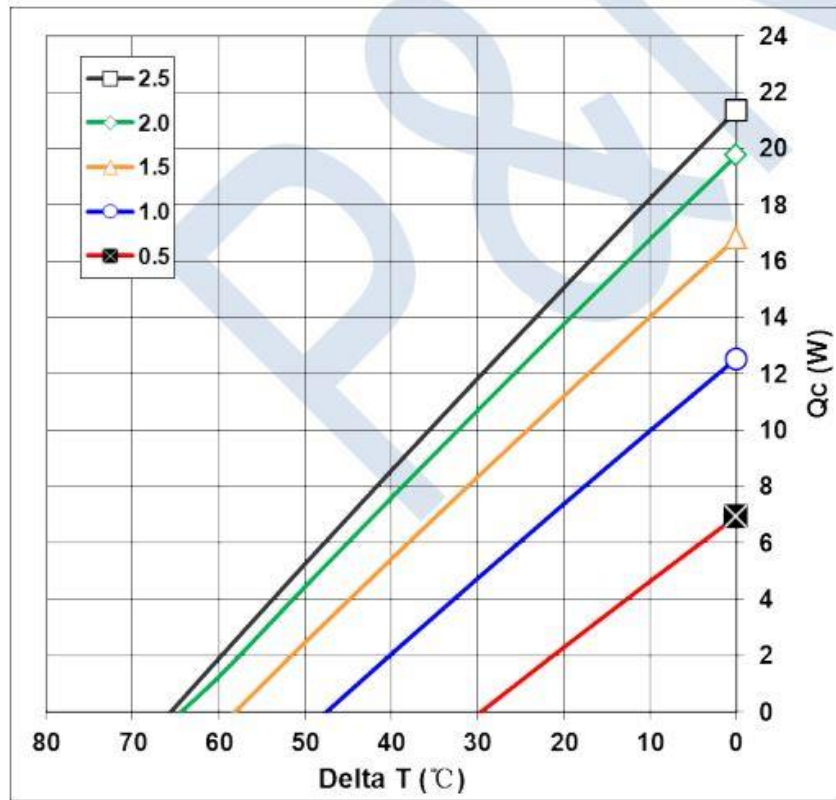
\dot{Q}_{cmax} testi 68 dk da tamamlanmıştır ve $\dot{Q}_{cmax}=23,32$ W olarak bulunmuştur. Test süresince başlangıç şartlarını sabit tutmak adına su tankı hacmi şebeke suyu ile beslenmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 4.63'deki grafikteki gibidir.



Şekil 4.63: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $Q_c = f(\Delta T)$ grafiği

$Q_c=Q_{cmax}$ değeri, $I=I_{max}$ akımında sıcaklık farkının sıfır olduğunda elde edilmiştir. Q_{cmax} değeri 23,32 W olarak hesaplanmıştır. Üretici firmanın katalog

verilerinde beyan ettiği 25 °C'lik T_H sıcaklığında $Q_{cmax} = 21,4$ W soğutma kapasitesi değeri 2,5 A I_{max} akımında beyan edilmiştir (Tablo 4.4) (Şekil 4.64).



Şekil 4.64: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün $Q_c = f(\Delta T)$ grafiği

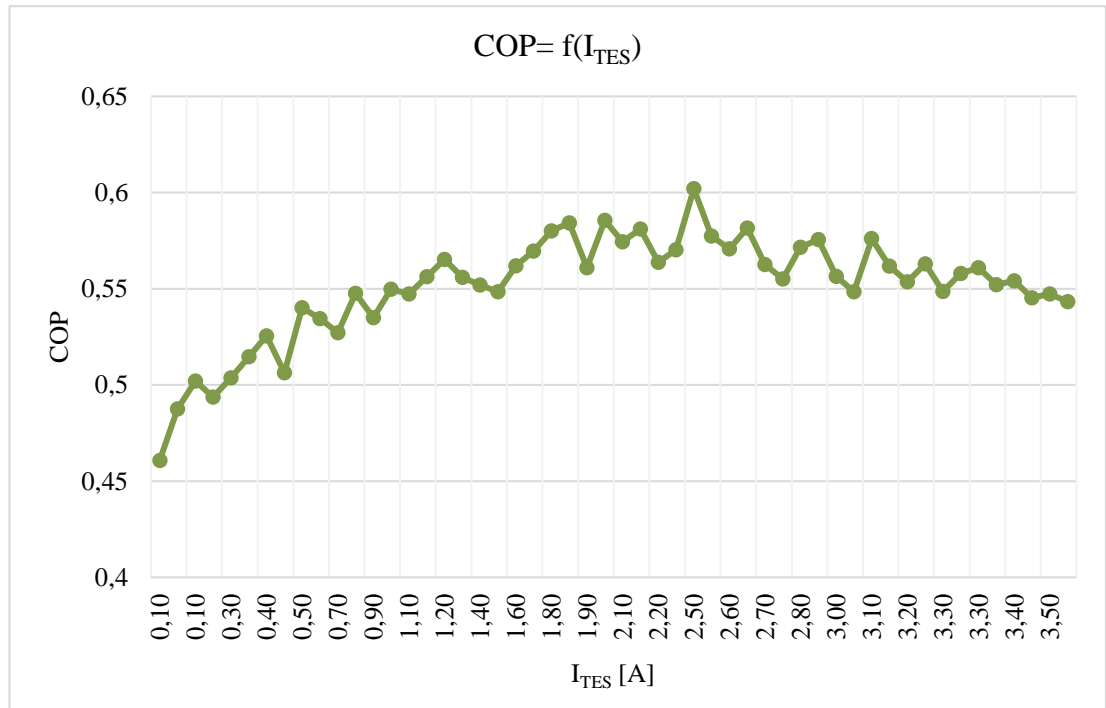
Test düzeneğinde T_H 25,5 °C sıcaklığında maksimum soğutma kapasitesi $Q_{cmax} = 23,32$ W olarak 2,5 A I_{max} akımında ve aynı sayılabilecek 15.4 V V_{max} voltajında ölçülmüştür.

Tablo 4.13: TES1-127025 üretici verisi ile ölçüm düzeneği sonuçları karşılaştırması

TES1-127025	P&N Verileri	Test Düzeneği Ölçüm Verileri	Üretici Ölçüm Toleransı	Ölçüm Düzeneği Belirsizlikleri	Ölçüm Farkının Mutlak Değeri	Ölçülen Yüzdese Doğruluk
T_H	25 °C	25,50 °C	% ±10	% ±1,16	0,50 °C	% 98,04
ΔT_{max}	67 °C	60,80 °C	% ±10	% ±1,16	6,20 °C	% 90,74
V_{max}	15.40 V	15,50 V	% ±10	% ±2,00	0,10 V	% 99,35
I_{max}	2.5 A	2.5 A	% ±10	% ±2,00	0	% 100
Q_{cmax}	21.4 W	23.32 W	% ±10	% ±2,12	1,92 W	% 91,77

Üreticinin verilerinde yayınladığı I_{max} akımını oluşturan maksimum sıcaklık farkı ΔT_{max} 67 K iken ölçüm düzeneğinde ölçülen verilerde maksimum akım ve voltajı oluşturan sıcaklık farkı ΔT_{max} 60,80 K çıkmaktadır. Düzenek tarafından ölçülen ΔT_{max} ölçümü değeri ile üretici tarafından yayımlanan değer arasındaki fark, üreticinin TES modülün yüzeyleri üzerinden atabildiği maksimum sıcak farkının daha fazla olduğunu göstermektedir. Üreticinin daha fazla sıcaklık farkı oluşturmamasının sebebi TES modülden daha fazla ısı atabilmesidir. Ölçüm düzeneğinde kullanılan soğutucu akışkanın sıcaklığının en düşük olduğu değerlerde %1,16 belirsizlikle ΔT_{max} değeri 60,80 K elde edilebilmiştir. ΔT_{max} 60,80 K değerinde iken TES modüle V_{max} voltajı verilmiştir ve modülden I_{max} akımı çekilmiştir. Karşılaştırmadaki farkları etkileyen bir diğer husus ise TES modülün sıcaklık farkından meydana gelen ters yöndeki voltaj yükselmesidir. Sıcaklık farkı, TES modülün iç direnci oranında voltaj üretmektedir.

Şekil 4.65’de TES1-127025 modüle ait COP grafiği yer almaktadır. Grafikteki maksimum COP değerinde TES modülden çekilen akım I_{max} kadardır.



Şekil 4.65: P&N firmasına ait TES1-127025 modülünün COP= f(I_{TES}) grafiği

TES1-127025 TES modülüne ilişkin malzeme özellikleri eldesi işleminde Şekil 4.66'deki gibi C# programı üzerinden çıkış parametreleri hesaplanmıştır.

The screenshot shows a software interface titled "TES MODÜL ÖLÇÜM DÜZENLEĞİ YAZILIMI - Mert ÖZTÜRK". The main window is divided into several sections:

- Input Fields:**
 - Imax [A]: 2,50
 - Vmax [V]: 15,50
 - ΔTmax [C]: 60,80
 - Qcmax [W]: 23,32
 - COP: 0,602
 - L_COP [A]: 2,50
- Buttons:**
 - Malzeme Özelliği Hesapla
 - Etkin Malzeme Özelliği Hesapla
 - COP_max Hesapla
- Output Fields:**
 - QH [W] TES modülün sıcak yüzeyinden üretilen ısı miktarı: none!
 - P [W] TES modülün elektriksel gücü: 38,73702495
 - R [Ω] TES modülün elektriksel direnci: 0,03888021
 - K [W/K] TES modülün ısı iletkenliği: 5,516150974
 - ZT [1/K] TES modül performans katsayısı: 0,576589851
 - a [V/K] yarıiletkenin Seebeck Katsayısı: 0,0004086631311
 - ρ [Ω.cm] yarıiletkenin Seebeck Katsayısı: 0,0000281707
 - k [W/(cmK)] yarıiletkenin termal iletkenlik katsayısı: 2,758075487
 - Z [1/K] yarıiletkenin kalite katsayısı: 0,00214945
 - Z* [1/K] yarıiletkenin etkin kalite katsayısı: 0,00214945
 - a* [V/K] yarıiletkenin etkin Seebeck Katsayısı: 0,000408663
 - ρ* [Ω.cm] yarıiletkenin etkin Seebeck Katsayısı: 0,0000340865
 - k* [W/(cmK)] yarıiletkenin etkin termal iletkenlik katsayısı: 2,279401229
- Left Panel:** A list of operations with checkboxes, including "Malzeme Özelliği Hesapla...", "Etkin Malzeme Özelliği Hesapla...", and "COP_max Hesapla...".
- Bottom Left:** A "Kayıtları Yenile" button and a small icon.

Şekil 4.66: TES1-127025 TES modülüne ilişkin malzeme özelliği hesaplanması

Ölçümden elde edilen malzeme özelliklerinin etkin malzeme özelliklerinden farklı bulunması ideal denklemler kabulleri ile ilişkilendirilebilir.

5. SONUÇ VE BULGULAR

Tez çalışmasında TES modülün çıkış parametrelerinin deneysel yollarla ölçülmesine yönelik araştırma yapılmıştır. Tez kapsamında TES modülün çıkış parametrelerinin elde edilmesini sağlayacak bir ölçüm düzeneği geliştirilip ölçüm yapılmıştır. Geliştirilen ölçüm düzeneğinde TES modülün deneysel olarak ölçülebilen parametreleri yüksek hassasiyetle ölçülüp TES modülün etkin malzeme özellikleri ideal denklemler kullanılarak bulunmuştur.

Geliştirilen ölçüm düzeneğinin termal ve elektriksel verilerinin elde edilmesi ve işlemede Arduino tabanlı geliştirici kartlar aracılığı ile yapılmıştır. Ölçüm düzeneğinin tasarımı parçaları üç boyutlu tasarım programı ile tasarlanıp üretilip montajlanmıştır. Ölçüm düzeneğinde kullanılan elektronik parçalar piyasada kolaylıkla temin edilebilecek güvenilir sonuçlar veren komponentlerden oluşmaktadır. Termal çıktılarının hassas elde edilebilmesi için test ortamı vakum altında tutulup TES modülün ısı transferi mekanizmaları analiz edilmiştir. Geliştirilen yazılım ile kararlı rejimdeki sıcaklıklar ölçülebilmekte olup referans değerler ile kıyaslanarak ısı transferi denklemlerinin girdilerini oluşturmaktadır. Elektriksel çıktılarının elde edilmesinde kullanılan sürücü ve sürücü kontrol voltajları düşük regülasyonlu cihazlar aracılığı ile yapılmıştır. Test sonuçlarını oluşturan sensörlerden net verilerin sağlanması için kalibrasyon ve referans Fluke multimetre ile değerler karşılaştırılmıştır. Arduino'dan yönetilen test işlemleri prosedürleri, C# form uygulamasında yazılan arayüzden kontrol edilmektedir. Ölçüm sonuçları grafik ve tablolar şeklinde veri ekranına kayıt edilip gözlemlenebilmektedir.

P&N firmasına ait TES modülün çıkış parametreleri, geliştirilen ölçüm düzeneğinde ölçülmüştür. Belirtilen test şartlarında maksimum parametreler deneysel olarak tespit edilip TES modüle ilişkin elde edilen sonuçlar üretici katalog verileriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda ölçümlerin katalog verileri ile uyumu saptanmıştır. TES modül üreticileri ürüne ait içerik beyanında TES modülün referans değerler altındaki çıktılarını paylaşılmaktadır. Bu çalışma sayesinde TES modüllerin tasarlanan çalışma şartlarındaki performans parametreleri ve etkin malzeme özellikleri güvenilir şekilde belirlenebilmektedir. Bu sayede TES modül kullanılacak sistemlerde TES modüle ilişkin çıktılarının modellenabilir deneysel sonuçları sağlanabilmektedir. TES modülün etkin malzeme özelliklerinin saptanabilir olmasından modül tasarımı

alışmalarında da tasarımcılara yol gösterici deneysel veriler sağlanabilmesine olanak tanınmaktadır.

6. KAYNAKÇA

Ahıska, R., “Termoelektrik modülün dinamik çıkış parametrelerinin araştırılması için yeni bir yöntem”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 22, No 4, 709-716, (2007).

Bowley, “Paper presented at the Conference on Thermoelectricity held by The Institute of Physics and the Physical Society”, at Durham, (1961).

Chen, A., “Thermal energy harvesting with thermoelectrics for self-powered sensors: with applications to implantable medical devices, body sensor networks and aging in place”, Ph. D. Thesis, *University of California, Berkeley, ABD*, (2011).

Dişlitaş, S., “Bilgisayar kontrollü termoelektrik performans analiz sistemi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara, (2009).

Dişlitaş, S., Ahıska, R., Yanmaz, H., “Termoelektrik modülün dinamik çıkış parametrelerinin elde edilmesi için yeni bir algoritma”, ELECO'2008 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 471-475 (2008).

Dresselhaus, M. S., Chen, G., Tang, M. Y., Yang, R., Lee, H., Wang, D., Ren, Z., Fleurial, J. P and Gogna, P., “New directions for low-dimensional thermoelectric materials”, *Adv. Mater.*, 19, 1043-1053, (2007).

Energy Conversion, 15 : 65-70 (1975).

Gentherm Incorporated, “User guide climate control sleep for You and Me[online]”, (20 Haziran 2017), http://www.gentherm.com/sites/default/files/files/Gentherm_White_MCU_Kit.pdf, (2010).

Goldsmid, H. J. and Douglas, R. W., “The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration”, *British J. Appl. Phys.*, 5, 386, (1954).

Goldsmid, H. J., “A simple technique for determining the seebeck coefficient of thermoelectric materials”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 19 : 921-922 (1986).

Goldsmid, H.J., “Introduction to Thermoelectricity”, ISBN 978-3-662-49256-7, London New York :Springer Heidelberg Dordrecht, 1-41, (2009).

Güler, N. F. and Ahıska, R., “Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit”, *Applied Thermal Engineering*, 22, 1271–1276, (2002).

Halıcı, F. ve Gündüz, M., *Örneklerle Isı Geçişi/Isı Transferi*, İstanbul: Birsen Yayınevi, (2013).

Hanna, A., MMO vakum teknolojisine genel bakış sunumu, İstanbul (2020).

Harman, T.C, “Special techniques for measurement of thermoelectric”, J. Appl. Phys, 29: 1373-1379 (1958).

Heylen, A. E. D., “Figure of merit determination of thermoelectric modules”, 102 (1975).

Huang, B.J., Chin, C.J., and Duang, C.L., Int. J. Refrig. 23, 208 (2000).

Ioffe, “Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling” London, UK: Infosearch Limited, 15-87, (1957).

Kapıdere, M., “Mikrodenetleyici kontrollü termohipoterm tıp cihazı ve gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2005).

Kin-ichi, U., “Commercial Peltier Modules” CRC Handbook of Thermoelectrics, Ed. : Rowe, D. M., CRC Pres. Inc, Florida, 621-631 (1995).

Lee, H.S., “Thermoelectrics: Design and Materials”, ISBN-13: 978-1118848951, Western Michigan University, USA: John Wiley & Sons, Inc. 1-37, (2017).

Lee, H., “Performance Prediction of Commercial Thermoelectric Cooler Modules using the Effective Material Properties”, Journal of electronic materials, 44, pages2157–2165 (2015).

Lineykin, S., Yaakov, S., B., “Modeling and analysing of thermoelectric modules”, IEEE Transactions on Industrial Applications, 43 (2) : 2019-2023 (2007).

Luo, Z, Electronics Cooling Magazine, 14, 22 (2008).

Min, G., Rowe., D. M, “Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators”, Appl. Energy, 83 (2) : 133-152 (2006).

Paul G. Lau, “ Convection Correction Factor Determination for Use with the Transient Test Method for Thermoelectric Modules”, USA: TE Technology, Inc., (1999).

Rowe, D. M., *Thermoelectric Handbook: Macro to Nano*, ABD: Taylor & Francis Group LLC, (2006).

Sambrook, J. and Russell, D., *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*, Cold Spring Harbor, NY: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 3rd ed., (2001).

Simons, R., *Electron. Cooling Mag.* 16, 4 (2010).

Tan, F.L., and Fok, S.C., *Energy Convers. Manag.* 49, 1715 (2008).

Wang, F. J., Chang, J. C., Lin, K. C. and Yau, Y. H., “Performance testing of a thermoelectric cooler for medical application”, *Advanced Materials Research*, 255-260, 1537-1540, (2011).

Yavuz, A. H., “Bulanık mantık denetimli termoelektrik beyin soğutucusu”, Doktora Tezi, *Bilişim Enstitüsü*, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2009).

Yeler, O., “Termoelektrik Isı Pompalı Prematüre Bebek Kuvözü Tasarımı, Geliştirilmesi ve Termal-Hidrolik Karakteristiklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, (2020).

Yeler, O. and Koseoglu, M. F., “Optimization and Experimental Validation of a Modular Thermoelectric Heat Pump System for a Premature Baby Incubator”, *Journal of Electronic Materials*, 49, 4053–4066, (2020).

Zhang, H.Y., *International Refrigerant*, 33, 1187 (2010).

Vakum pompası, Web adresi:

[https://www.frigoven.com.tr/Dosyalar/product/aitcool-latest-catalogue-2017%20\(7\).pdf](https://www.frigoven.com.tr/Dosyalar/product/aitcool-latest-catalogue-2017%20(7).pdf)

Akım sensörü, Web adresi:

<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>

Sıcaklık sensörü, Web adresi: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/58557/DALLAS/DS18B20.html>

Arduino, Web adresi: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3> (2021).

Arduino, Web adresi:

<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/BuiltInExamples/ArduinoISP> (2021).

Role Modülü, Web adresi: <https://components101.com/switches/5v-single-channel-relay-module-pinout-features-applications-working-datasheet> (2021).

Meanwell SMPS Sürücü, Websitesi:

<https://www.meanwell.com/Upload/PDF/RSP-1000/RSP-1000-SPEC.PDF> (2021).

P&N Technology, “Thermoelectric Module- Standart Module[online]”, (19 Eylül 2019), <http://www.pengnantech.com/thermoelectric-module-TEs1-127025.html>.

RMT Inc. "Tec expert dx8020 user guide" Web adresi <https://rmtltd.ru/products/devices/testers/tecexpert/> (2021).

HL-JS Hotlong Inc. "Mika Heater", Web adresi: <https://www.hl-js.com/> (2021).

Internet: "Thermoelectric coolers intro the basics", <https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers-intro.html> (2021).

7. EKLER

EK A – ΔT_{\max} Testi Kodlamaları

```
void deltamaxtesti()
{
    Serial.println("2");
    delay(100);
    digitalWrite(42, HIGH); // VAKUM
    digitalWrite(45, HIGH); // SU POMPASI
    digitalWrite(46, HIGH); // PELTIER
    digitalWrite(43, LOW); // HEATER
    digitalWrite(44, LOW); // BAYPASS
    for (w=0;w<=255;w=w+5) { // Voltaj atırım prosedürü
        int TESPwm=w;
        analogWrite(TESPWM, TESPwm);
        delay(100);

        for(t=0;t<=199;t=t+1){ //kararlı rejim denge prosedürü

            Diftemp0=0;

            if (Serial.available()>0)
            {
                gelenveri=Serial.readString();
                alıcı=(gelenveri.substring(0,1)).toInt();
            }
            if (alıcı==3)
            {
                digitalWrite(42, LOW); // VAKUM
                digitalWrite(45, LOW); // SU POMPASI
                digitalWrite(46, LOW); // PELTIER
                digitalWrite(43, LOW); // HEATER
                digitalWrite(44, HIGH); // BAYPASS
                alıcı=0;
                Serial.println("A");
                goto bitir;
            }
            delay(2000);
            thermocouple1.readCelsius(); // TC
            Coldtemp1 = thermocouple1.readCelsius();
            delay(100);
            thermocouple2.readCelsius(); // TH
            Hottemp1 = thermocouple2.readCelsius();
            delay(100);
            thermocouple3.readCelsius(); // Tyal
            Yaltemp1 = thermocouple2.readCelsius();
            delay(100);
            sensors1.requestTemperatures();
            delay(100);
            Ambitemp = sensors1.getTempCByIndex(0);
            Serial.println(Ambitemp);
            sensors2.requestTemperatures();
            delay(100);
            Watertemp1 = sensors2.getTempCByIndex(0);
            Serial.println(Watertemp);
            Diftemp1=Hottemp1-Coldtemp1;
            difdengestatus=Diftemp1-Diftemp0;
        }
    }
}
```

```

for (int h=0;h<50;h++){
    Iout=Iout+(p.getCurrent());
    delay(5);
}
Iout=Iout/50;

for (int h=0;h<50;h++){
    Iout2=Iout2+(m.getCurrent());
    delay(5);
}
Iout2=Iout2/50;

for (int h=0;h<50;h++)
{
    voltageSensorVal=(analogRead(voltageSensorPin));
    delay(5);
    vOut = (voltageSensorVal / 1024) * vCC;
    gerilim = vOut * factor;
    tagerilim1=tagerilim1+gerilim;
}
gerilim=tagerilim1/50;
tagerilim1=0;
Vout=gerilim;
gerilim=0;
Pout=Vout*Iout;
    for (int h=0;h<50;h++)
{
    voltageSensorVal1=(analogRead(voltageSensorPin1));
    delay(5);
    vOut1 = (voltageSensorVal1 / 1024) * vCC1;
    gerilimheater = vOut1 * factor1;
    tagerilimheater1=tagerilimheater1+gerilimheater;
}
gerilimheater=tagerilimheater1/50;
tagerilimheater1=0;
Vout2=gerilim;
Pout2=Vout2*Iout2;

Diftemp0=Diftemp1;

if (abs(difdengestatus) < 0.05 && abs(difdengestatus)>= 0.00)
{
    Serial.print("0");
    Serial.print(j);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Vout);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Iout);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Pout);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Hottemp1);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Coldtemp1);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Diftemp1);
    Serial.print("*");
    Serial.print(difdengestatus);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Yaltemp1);
    Serial.print("*");
    Serial.print(dengefloat);
}

```

```

Serial.print("*");
Serial.print(Vout2);//11
Serial.print("*");
Serial.print(Iout2);//12
Serial.print("*");
Serial.print(Pout2);//13
Serial.print("*");
Serial.println(Ambitemp);
Serial.println(Watertemp);
delay(1000);
}

}

digitalWrite(42, LOW); // VAKUM
digitalWrite(45, LOW); // SU POMPASI
digitalWrite(46, LOW); // PELTIER
digitalWrite(43, LOW); // HEATER
digitalWrite(44, HIGH); // BAYPASS
delay(5000);
Serial.println("4");
alıcı=0;
}

```

EK B – Qcmax Testi Kodlamaları

```

void qcmaxtesti()
{
Serial.println("5");
delay(100);

Vmaxstep=(gelenveri.substring(1,4)).toInt();
int TESPwm=Vmaxstep;
analogWrite(TESPWM, TESPwm);
delay(100);
digitalWrite(42, HIGH); // VAKUM
digitalWrite(45, HIGH); // SU POMPASI
digitalWrite(46, HIGH); // PELTIER
digitalWrite(43, HIGH); // HEATER
digitalWrite(44, LOW); // BAYPASS

for (j=0;j<=250;j=j+25) {
int heaterss=j;
digitalWrite(HEATERPIN, HIGH);
analogWrite(HEATERPWM, j);
delay(100);

for(t=0;t<=199;t=t+1){ //kararlı rejim denge prosedürü

Diftemp0=0;

if (Serial.available()>0) {
gelenveri=Serial.readString();
alıcı=(gelenveri.substring(0,1)).toInt();
}

if (alıcı==3){
digitalWrite(42, LOW); // VAKUM
digitalWrite(45, LOW); // SU POMPASI
digitalWrite(46, LOW); // PELTIER

```

```

digitalWrite(43, LOW); // HEATER
digitalWrite(44, HIGH); // BAYPASS

alıcı=0;
Serial.println("A");
goto bitir1;
}
delay(2000);

thermocouple1.readCelsius(); // TC
Coldtemp1 = thermocouple1.readCelsius();
delay(100);
thermocouple2.readCelsius(); // TH
Hottemp1 = thermocouple2.readCelsius();
delay(100);
thermocouple3.readCelsius(); // Tyal
Yaltemp1 = thermocouple2.readCelsius();
delay(100);
sensors1.requestTemperatures(); // Ortam sıcaklığı
delay(100);
Ambitemp = sensors1.getTempCByIndex(0);
Serial.println(Ambitemp);
sensors2.requestTemperatures(); // Su sıcaklığı
delay(100);
Watertemp1 = sensors2.getTempCByIndex(0);
Serial.println(Watertemp);
Diftemp1=Hottemp1-Coldtemp1;
difdengestatus=Diftemp1-Diftemp0;

for (int h=0;h<50;h++){
  Iout=Iout+(p.getCurrent());
  delay(5);
}
Iout=Iout/50;

for (int h=0;h<50;h++){
  Iout2=Iout2+(m.getCurrent());
  delay(5);
}
Iout2=Iout2/50;

for (int h=0;h<50;h++)
{
  voltageSensorVal=(analogRead(voltageSensorPin));
  delay(5);
  vOut = (voltageSensorVal / 1024) * vCC;
  gerilim = vOut * factor;
  tagerilim1=tagerilim1+gerilim;
}
gerilim=tagerilim1/50;

tagerilim1=0;

Vout=gerilim;

Pout=Vout*Iout;

for (int h=0;h<50;h++)
{
  voltageSensorVal1=(analogRead(voltageSensorPin1));
  delay(5);
  vOut1 = (voltageSensorVal1 / 1024) * vCC1;
  gerilimheater = vOut1 * factor1;
}

```

```

    tagerilimheater1=tagerilimheater1+gerilimheater;
}
gerilimheater=tagerilimheater1/50;
tagerilimheater1=0;
Vout2=gerilim;
Pout2=Vout2*Iout2;

if (abs(difdengestatus) < 0.05 && abs(difdengestatus)>= 0.00)
{
    Serial.print("0");
    Serial.print(j);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Vout);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Iout);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Pout);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Hottemp1);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Coldtemp1);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Diftemp1);
    Serial.print("*");
    Serial.print(difdengestatus);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Yaltemp1);
    Serial.print("*");
    Serial.print(dengefloat);
    Serial.print("*");
    Serial.print(Vout2);//11
    Serial.print("*");
    Serial.print(Iout2);//12
    Serial.print("*");
    Serial.print(Pout2);//13
    Serial.print("*");
    Serial.println(Ambitemp);
    Serial.println(Watertemp);
    delay(1000);
}

}

while (Coldtemp1==Hottemp1){
    bitir1;
    alıci=0;
    Serial.println("4");
}

Serial.println("4");
bitir1;
alıci=0;
}

```

EK C – Parametre Veri Eldesi Hesap Kodları

```

if (dongu == 40)
{
    richTextBox1.Text += "Qcmax elde edildi.." + "\n";

    try
    {

```

```

double Vmax = Convert.ToDouble(textBox26.Text);
double Imax = Convert.ToDouble(textBox22.Text);
double I = Convert.ToDouble(textBox17.Text);
double ICOP = Convert.ToDouble(textBox77.Text);
double Vout2 = Convert.ToDouble(textBox52.Text);
double Iout2 = Convert.ToDouble(textBox52.Text);
double Th = Convert.ToDouble(textBox20.Text)+273;
double Tc = Convert.ToDouble(textBox18.Text)+273;
double Tyal = Convert.ToDouble(textBox55)+273;
double Thheater = Convert.ToDouble(textBox79.Text);
double Watertemp = Convert.ToDouble(textBox11.Text);
double Ambient = Convert.ToDouble(Ambient);
double DT = Convert.ToDouble(textBox.Text16);
double n = Convert.ToDouble(textBox47.Text);
double A = Convert.ToDouble();
double L = Convert.ToDouble();
double DTdenge = Convert.ToDouble();
double Qyal = ((Thheater - Tyal) * 0.044);
double Qheater = ((Vout2 * Vout2) * 7, 82);
double COP = ( a * Tc * I - ( I * I * R ) - K * ( Th - Tc
)) / (( I * I * R ) + a * I * ( Th - Tc ) );
COP = Math.Round(COP, 3);
double Qc = ( Qheater - Qyal );
Qc = Math.Round(Qc, 3);
double Z = 1 / ( ( DT / 2 ) + ( ( Th * Th ) / ( 2 * DT ) )
- Th );

Z = Math.Round(Z, 7);
double K = ( ( a * a ) / ( Z * ρ ) ) ;
K = Math.Round(K, 3);
double R = ( a * ( Th - DT ) ) / ( Imax );
R = Math.Round(R, 3);
double α = ((Vmax) / (n * Th));
double ρ = ( ( R * A ) / L );
double Zet = ((2 * DT) / ((Th - DT)) * ((Th - DT)));
double aet = ((2 * Qc) / (n * I * (Th + DT)));
double pet = ((aet * (Th - DT) * A / L) / (I));

double ket = ((aet * aet) / (pet * Zet));

catch (Exception hata)
{
    Console.Beep(1500, 500);
    MessageBox.Show(hata.Message);

}

```


EK D – Belirsizlik Analizi Hesaplamaları

Sıcaklık ölçümlerindeki hata oranı : $\pm 0,5$ °C

Uzunluk ölçümlerindeki hata oranı : $\pm \%1$

Akım ölçümlerindeki hata oranı : $\pm \% 1,5$

Voltaj ölçümlerindeki hata oranı : $\pm \% 1,5$

$$T_h = 25,5^\circ\text{C}$$

$$I_{\max} = 2,5\text{A}$$

$$V_{\max} = 15,4\text{A}$$

$$\dot{Q}_{c\max} = 23,32\text{W}$$

$$\Delta T_{\max} = 60,80\text{K}$$

$$\dot{Q}_{c\max} = V.I$$

$$\left(\frac{W_{\dot{Q}_{c\max}}}{\dot{Q}_{c\max}} \right) = \sqrt{\left(\frac{W_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{W_I}{I} \right)^2} = \sqrt{(0,015)^2 + (0,015)^2} = 0,0212 = \%2,12$$

$$\Delta T_{\max} = T_H - T_C$$

$$\left(\frac{W_{\Delta T_{\max}}}{\Delta T_{\max}} \right) = \sqrt{\left(\frac{W_{T_H}}{\Delta T_{\max}} \right)^2 + \left(\frac{W_{T_C}}{\Delta T_{\max}} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,5}{60,80} \right)^2 + \left(\frac{0,5}{60,80} \right)^2} = 0,01163 = \%1,16$$

$$W_{\Delta T_{\max}} = 0,01163 \cdot \Delta T_{\max} = 0,01163 \cdot 60,80 = 0,71^\circ\text{C}$$

$$\alpha^* = \frac{2 \cdot \dot{Q}_{c\max}}{n \cdot I_{\max} \cdot (T_h + \Delta T_{\max})}$$

$$\frac{W_{\alpha^*}}{\alpha^*} = \sqrt{\left(\frac{W_{\dot{Q}_{c\max}}}{\dot{Q}_{c\max}} \right)^2 + \left(\frac{W_{I_{\max}}}{I_{\max}} \right)^2 + \left(\frac{W_{T_H}}{T_H + \Delta T_{\max}} \right)^2 + \left(\frac{W_{\Delta T_{\max}}}{T_H + \Delta T_{\max}} \right)^2}$$

$$\frac{W_{\alpha^*}}{\alpha^*} = \sqrt{(0,0212)^2 + (0,015)^2 + \left(\frac{0,5}{359,3} \right)^2 + \left(\frac{0,71}{359,3} \right)^2} = 0,0261 = \%2,608$$

$$A = x^2$$

$$\frac{W_A}{A} = 2 \cdot \frac{W_x}{x} = 2 \cdot 0,01 = 0,02 = \%2$$

$$\rho^* = \frac{\alpha^* \cdot (T_H - \Delta T_{\max}) \cdot A}{I \cdot I_{\max}}$$

$$\frac{W_{\rho^*}}{\rho^*} = \sqrt{\left(\frac{W_{\alpha^*}}{\alpha^*}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_H}}{T_H - \Delta T_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{W_{\Delta T_{\max}}}{T_H - \Delta T_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{W_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{W_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{W_{I_{\max}}}{I_{\max}}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{\rho^*}}{\rho^*} &= \sqrt{(0,0261)^2 + \left(\frac{0,5}{237,7}\right)^2 + \left(\frac{0,71}{237,7}\right)^2 + (0,02)^2 + (0,01)^2 + (0,015)^2} \\ &= 0,0377 = \%3,77 \end{aligned}$$

$$z^* = \frac{2 \cdot \Delta T_{\max}}{(T_H - \Delta T_{\max})^2}$$

$$\frac{W_{z^*}}{z^*} = \sqrt{\left(\frac{W_{\Delta T_{\max}}}{\Delta T_{\max}}\right)^2 + \left((-2) \cdot \left(\frac{W_{T_C}}{T_C}\right)\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,71}{60,80}\right)^2 + \left((-2) \cdot \left(\frac{0,5}{237,7}\right)\right)^2} = 0,0124 = \%1,24$$

$$k^* = \frac{(a^*)^2}{\rho^* \cdot z^*}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{k^*}}{k^*} &= \sqrt{\left(2 \cdot \frac{W_{\alpha^*}}{\alpha^*}\right)^2 + \left(\frac{W_{\rho^*}}{\rho^*}\right)^2 + \left(\frac{W_{z^*}}{z^*}\right)^2} \\ &= \sqrt{(2 \cdot 0,0261)^2 + (0,0377)^2 + (0,0124)^2} = 0,0512 = \%5,12 \end{aligned}$$

$$R = \rho^* \cdot \frac{1}{A}$$

$$\frac{W_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{W_{\rho^*}}{\rho^*}\right)^2 + \left(\frac{W_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{W_A}{A}\right)^2} = \sqrt{(0,0377)^2 + (0,01)^2 + (0,02)^2} = 0,0438 = \%4,38$$

$$K = k^* \cdot \frac{A}{I}$$

$$\frac{W_K}{K} = \sqrt{\left(\frac{W_{k^*}}{k^*}\right)^2 + \left(\frac{W_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{W_A}{A}\right)^2} = \sqrt{(0,0512)^2 + (0,01)^2 + (0,02)^2} = 0,0559 = \%5,59$$

$$\dot{Q}_c = n \cdot \alpha \cdot T_C \cdot I - n \cdot \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - n \cdot K \cdot (T_H - T_C)$$

$$x = n \cdot \alpha \cdot T_C \cdot I, \quad y = n \cdot \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R, \quad z = n \cdot K \cdot (T_H - T_C)$$

$$W_{\dot{Q}_c} = \sqrt{(W_x)^2 + (W_y)^2 + (W_z)^2}$$

$$x = n \cdot \alpha \cdot T_C \cdot I$$

$$\begin{aligned} \frac{W_x}{x} &= \sqrt{\left(\frac{W_{\alpha^*}}{\alpha^*}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_C}}{T_C}\right)^2 + \left(\frac{W_I}{I}\right)^2} \\ &= \sqrt{(0,0261)^2 + \left(\frac{0,5}{237,7}\right)^2 + (0,015)^2} = 0,0302 = \%3,02 \end{aligned}$$

$$y = n \cdot \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R$$

$$\frac{W_y}{y} = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{W_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{W_R}{R}\right)^2} = \sqrt{(2 \cdot 0,015)^2 + (0,0438)^2} = 0,0531 = \%5,31$$

$$z = n \cdot K \cdot (T_H - T_C)$$

$$\begin{aligned} \frac{W_z}{z} &= \sqrt{\left(\frac{W_K}{K}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_H}}{T_H - T_C}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_C}}{T_H - T_C}\right)^2} \\ &= \sqrt{(0,0559)^2 + \left(\frac{0,5}{60,80}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{60,80}\right)^2} = 0,0571 = \%5,71 \end{aligned}$$

$$W_{\dot{Q}_c} = \sqrt{(W_x)^2 + (W_y)^2 + (W_z)^2} = \sqrt{(0,0302)^2 + (0,0531)^2 + (0,0571)^2} = 0,0837 = \%8,37$$

$$\frac{W_{COP}}{COP} = \sqrt{\left(\frac{W_{\dot{Q}_c}}{\dot{Q}_c}\right)^2 + \left(\frac{W_W}{W}\right)^2} = \sqrt{(0,0837)^2 + (0,0212)^2} = 0,0863 = \%8,63$$