

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**VİNÇ KABİNLERİ İÇİN ISITMA SOĞUTMA SİSTEMİ  
TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Burak PALA**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN**

**Eylül 2020**

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Burak PALA

03.09.2020

## **TEŞEKKÜR**

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yűrűtűlmesinde ve oluőumunda ilgi ve desteęini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandıęım, yűnlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ıőıęında őekillendiren hocam Sayın Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN'a sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Ayrıca tűm eęitim hayatım boyunca maddi ve manevi destek olan varlıklarıyla gű veren ve bana olan inançlarını yitirmeyen bu gűnlere gelmemde en bűyűk etkiye sahip olan babam Fatih PALA'ya, annem Hacer PALA'ya, ablam Burcu PALA ve kardeőim Bűőra PALA'ya en içten ve sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Termoelektrik Genel Bilgiler.....	12
2.1.1. Seebeck etkisi.....	14
2.1.2. Peltier etkisi.....	16
2.1.3. Thomson etkisi.....	18
2.1.4. Kelvin eşitlikleri.....	19
2.2. Modülü Etkileyen Faktörler.....	19
2.2.1. Elektriksel direnç.....	21
2.2.2. Termal iletkenlik.....	22
2.2.3. Termoelektrik malzeme verimi.....	23
2.3. Yarıiletkenler.....	24
2.4. Termoelektrik Cihazların Bileşenleri.....	24

2.5. Temel Çalışma Prensipleri.....	26
2.6. Termoelektrik Modül Seçimine Etki Eden Faktörler.....	27
2.7. Termoelektrik Cihazların Uygulama Alanları.....	31
2.8. Termoelektrik Soğutucuların Avantajları.....	33
2.9. Termoelektrik Soğutucuların Dezavantajları.....	34
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. Prototip Çalışmaları.....	35
3.2. Analiz Çalışmaları.....	36
BÖLÜM 4.	
TARTIŞMA VE SONUÇ.....	53
KAYNAKÇA.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	60
EKLER.....	61

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AC	: Alternatif Akım
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum Oksit
Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	: Bimut Tellur
Bi-Sb	: Silikon Bizmut-Antimon
BMW	: Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft
CFC	: Cholorofluorocarbon ( Klorofluorokarbon )
CFD	: Computational Fluid Dymimics ( Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği )
COP	: Coefficient Of Performace ( Performans Katsayısı )
DC	: Doğru Akım
DSSKS	: Duyargalı ( Sensörlü ) Kontrol Sistemi
E <sub>a</sub>	: Valans ve İletim Bandı Arasındaki Enerji
EER	: Energy Efficiency Ratio ( Elektrik verimliliği )
EF	: Fermi Enerjisi
H	: Planck Sabiti
k <sub>B</sub>	: Boltzmann Sabiti
LCD	: Liquid Crystal Display ( Sıvı Kristal Ekran )
PbTe	: Kurşun Tellür
PCB	: Printed Circuit Board ( Baskı Devre Kartı )
RTG	: Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör
SiGe	: Silisyum-Germanyum
STK	: Termoelektrik Modül Soğutma Tesir Katsayısı
TC	: Termoçifti
TE	: Termoelektrik Modül
TEC	: Termoelektrik Soğutucu
TEG	: Termoelektrik Jeneratör
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü

ZT	: Termoelektrik Malzemelerin Kullanışlılığı
$\Delta T$	: Sıcaklık Farkı
A	: Alan
cm	: Santimetre
derece	: Derece
dk	: Dakika
E	: Elektrik Alan Şiddeti
e	: Elektron Yüğü
g	: Gram
I	: Akım
J	: Joule
K	: Kelvin
L	: Litre
m	: Metre
mm	: Milimetre
m <sup>2</sup>	: Metre Kare
m <sup>3</sup>	: Metreküp
N	: n-p Çift Sayısı
$\rho$	: Özdirenç ( $\Omega m$ )
q	: Isı
$\dot{q}$	: Hacim Başına Üretilen Isı
$\dot{Q}$	: Isı Miktarı
$\dot{Q}_C$	: Soğuk Yüzeydeki Isıl Güç
$\dot{Q}_H$	: Sıcak Yüzeyden Çevreye Atılan Isıl Gücü
R	: Elektrik Direnci
R <sub>i</sub>	: Toplam İç Direnç
S	: Seebeck Katsayısı
t	: Sıcaklık
$\tau$	: Thomson Katsayısı
v	: Volt
V	: Elektrik Potansiyeli

W : Watt  
 $\alpha$  : Seebeck Katsayısı  
 $\sigma$  : Elektriksel İletkenlik  
3D : Üç Boyutlu



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Termoelektrik çatı tipi güneş kollektörü.....	5
Şekil 2.2. Standart termoelektrik modül gösterimi [31] .....	13
Şekil 2.3. Çok ve tek katmanlı termoelektrik modül [33] .....	13
Şekil 2.4. Farklı metallere oluşmuş devrede soğutma olayının oluşumu.....	14
Şekil 2.5. Seebeck etkisini gösteren devre.....	14
Şekil 2.6. VAB potansiyeli altında oluşan peltier etkisi.....	17
Şekil 2.7. Thomson etkisini açıklayan devreli gösterimi.....	19
Şekil 2.8. Yarıiletken malzemelerin termoelektrik değerleri [51] .....	25
Şekil 2.9. a) Seebeck b) Peltier c) Termoelektrik bileşen .....	26
Şekil 2.10. Seri bağlanmış yarı iletken n-p tipi çiftler .....	26
Şekil 2.11. Classini uzay aracı ve RTG ünitesi.....	31
Şekil 2.12. BMW marka otomobilin atık ısı termoelektrik jeneratörü.....	32
Şekil 2.13. TE soğutma ünitesi şekli [56] .....	33
Şekil 3.1. Platform üstü vinç kabini 3D katı model görünümü.....	35
Şekil 3.2. Platform üstü klima prototipin 3D gösterimi.....	37
Şekil 3.3. Platform üstü vinç kabini dış ünitesi.....	38
Şekil 3.4. Platform üstü vinç kabini klima için elektrik panosu.....	38
Şekil 3.5. Platform üstü vinç kabini için kontrol kutusu.....	39
Şekil 3.6. İlk prototip çalışması kare klima izometrik görüntüsü.....	40
Şekil 3.7. İlk prototip çalışması kare klima yan ve alt görüntüsü.....	41
Şekil 3.8. İlk prototip için yapılan analiz çalışması soğutma (kare) .....	42
Şekil 3.9. İlk prototip için yapılan analiz çalışması ısıtma (kare) .....	44
Şekil 3.10. İkinci prototip çalışması dikdörtgen klima izometrik görüntüsü.....	46
Şekil 3.11. İkinci prototip çalışması dikdörtgen klima yan ve alt görüntüsü.....	46
Şekil 3.12. İkinci prototip için yapılan analiz çalışması soğutma (dikdörtgen).....	47
Şekil 3.13. İkinci prototip için yapılan analiz çalışması ısıtma(dikdörtgen).....	49

Şekil 3.14. Klima prototip patlatma görüntüsü.....	50
Şekil 3.15. Platform üstü vinç kabinine klimanın parçalarının montaj görünümü...	51
Şekil 3.16. Platform üstü vinç kabinine klimanın parçalarının montaj görünümü	52

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Platinyuma göre bazı metallerin seebeck katsayısı.....	16
Çizelge 2.2. Termoelektrik modül soğuma eğrisi.....	28
Çizelge 2.3. Sıcaklık ve besleme akımına dayalı termoelektrik modül soğutma verimliliği.....	29
Çizelge 2.4. Çeşitli DT'ler için sıcak yüzey sıcaklığına karşı TEC modülü verimliliği (COP).....	30
Çizelge 2.5. Çeşitli sıcak yüzey sıcaklıkları için soğutma gücünün (Qc) bir fonksiyonu olarak TEC modülü verimliliği (COP).....	30
Çizelge 3.1. Kare prototip için soğutma grafiği (°C, dk) .....	42
Çizelge 3.2. Kare prototip için ısıtma grafiği (°C, dk) .....	45
Çizelge 3.3. Dikdörtgen prototip için soğutma grafiği (°C, dk) .....	48
Çizelge 3.4. Dikdörtgen prototip için ısıtma grafiği (°C, dk) .....	50

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: vinç kabini, ısıtma, soğutma, termoelektrik modül, ısı verim, ısı konfor, yarı iletken malzemeler

Bu çalışmada, platform üstü vinç kabinlerini termal konfor açısından ısıtma ve soğutma yeteneği olan termoelektrik modül ile iklimlendirecek bir klima tasarımı ve enerji optimizasyonu yapılmıştır. 360 derece dönebilme kabiliyetinden dolayı soğutucu akışkan borularının yerleştirilemediği bu kabinlerde sadece ısıtma sistemi mevcuttur. Üniversite-Sanayi işbirliğinde kabinlerde uygulanabilecek bir sistem geliştirilmiştir.

Tasarım çalışmalarında CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) tekniği ile ISIL açıdan performans analizleri yapılmıştır. Aynı sayıda termoelektrik modül kullanılarak yapılan analiz ve prototip çalışmalarında en optimum çalışma dikdörtgen şekilde tasarlanan prototip soğutma açısından kare prototipe göre daha verimli olduğu lakin soğutma ve ısıtma görevi yapan alüminyum parçanın yüzey alanının artması ısı verimliliğini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Kare profilin ısıtma için daha iyi olduğu gözlemlenmesi rağmen ortamdaki havanın ısınarak 50 derece üfleme sıcaklığına çıkması termoelektrik modüllerin çalışma şartlarını zorlaştırdığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı dikdörtgen prototip tasarımının daha verimli ve daha mukavim olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında iki adet prototip geliştirilmiştir. Tasarlanan özgün platform üstü vinç kabin klima prototipleri gerçek koşullarda saha testlerine tabi tutulmuştur.

# **HEATING COOLING SYSTEM DESING AND PROTOTYPE MANUFACTURING FOR CRANE CABS**

## **SUMMARY**

Keywords: crane cabin, heating, cooling, thermoelectric module, thermal efficiency, thermal comfort, semiconductor materials

In this section, there is an air conditioner design and energy optimization that will air condition the overhead crane cabinets with thermoelectric module. Due to the ability to rotate 360 degrees, these cabinets, where refrigerant pipes cannot be placed, only have a heating system. There is a system that can be applied in cabinets in cooperation with University-Industry.

Designing ISIL with CFD (Computational Fluid Dynamics) technique in design studies is under performance analysis. It will design the most optimal operation in the analysis and prototype work done in a series of thermoelectric modules. It has been observed that the rise to 50 degrees blowing temperature makes the working conditions of thermoelectric modules difficult. Therefore, it has been determined that the rectangular prototype design is more efficient and more durable.

It is for two prototypes in the worksheet. Original platform mounted crane cabin air conditioning prototypes.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Teknolojinin ilerlemesi ile enerji tüketimini artmaktadır. Gelecekte petrol, kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtların insanların enerji ihtiyacını karşılayamayacağı, yeni enerji kaynaklarına yönelmek zorunda kalacağı (hidrojen, rüzgar, biomass, güneş enerjisi vb.) ve enerji kullanımındaki verimliliğini en üst seviyelere getirmek zorunda olacağı düşünülmektedir [1].

Küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi ve enerji verimliliği eksikliği gibi çevresel kaygılar nedeniyle, soğutucu akışkan kullanan soğutuculara alternatif soğutma teknolojilerinin araştırılması gerekmektedir [2]. Günümüzde bu enerji ihtiyacını daha temiz karşılayacak olan enerji olarak termoelektrik soğutma ve ısı pompaları dikkat çekmektedir. Termoelektrik cihazlar, geleneksel buhar sıkıştırma sistemlerindeki soğutucu akışkanlara eşdeğer olan sıvı ve katı maddelerde ısı ile elektrik enerjisinin birbirine dönüşümünü incelemektedir. Bu nedenle, uzun ömürlü ve hareketli parçaları olmayan pek çok doğal ve çekici özelliğe sahipler ve toksik gaz salınımı olmayan, hafif, bakım masrafı az ve çok güvenilirler [3-4].

Bu tez çalışmasında Ülkemizde çok sayıda yerli iş makinesi, forklift ve vinç üreticisi firma bulunmaktadır. Bu makinelerin operatör kabinlerinde kompakt bir ısıtma/soğutma sistemine ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu ihtiyacın karşılanması için firmalar halen yüksek maliyetli, sıklıkla arızalanan, servis ağı bulunmayan, yedek parçası zor bulunan, kullanımı zor, büyük hacimli ürünleri ithal edip kabinlerde ısı konforunun oluşturulmasını sağlamaya çalışmaktadır.

İş makinesi ve vinç kabinleri için ısıtma/soğutma sağlayan ve çevre şartlarına uyumlu, kolay kullanımı olan, yerli know-how ile geliştirilmiş kompakt, yenilikçi,

düşük maliyetli, bakım masrafları az ve ticarileşebilir bir cihazın tasarımı ve prototip imalatının yapılması tezimizin ana amacıdır.

Bu kapsamda geliştirilecek prototip üründe yenilikçi bir yüksek teknoloji olan “termoelektrik teknoloji” kullanılması hedeflenmektedir. Konvansiyonel ısıtma/soğutma cihazlarında bulunan hareketli parçalar, soğutma gazı veya soğutma çevrimi “termoelektrik teknoloji” kullanımında gerekmediği için yenilikçi tasarımın boyutları klasik gaz sıkıştırımalı ürünlere göre oldukça küçülecektir. Soğutma veya ısıtma performansından feragat etmeden sağlanan boyutsal küçülme bu teknolojinin kullanım alanını gün geçtikçe genişletmektedir.

Tez kapsamında yerli teknoloji ile tasarlanacak ve prototipi elde edilecek ürün Türkiye’de yerli know-how ile geliştirilen ilk tasarım ve prototip olacak, sağlayacağı avantajlarla Termoelektrik teknolojisinin ülkemizde ve dünyada yaygınlaşmasına ve gelişmesine yardımcı olacaktır.

## BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Metzger ve Huebener (1999) yaptığı araştırmada, katman sayısı 5 olan soğutma modülü tasarlayarak, yaklaşık 160 K sıcaklığında modül yüzeyinin soğuduğunu tespit etmiştir. Çalışmada, termal iletkenlik, seebeck katsayısı ve elektrik iletkenliği sıcaklıkla bağlantılı olarak ele alınmamıştır [5].

Bu çalışmalarında termoelektrik modülün etkilerini teorik olarak inceleyip ve termoelektrik modülün soğutma uygulamalarının artması için çalışmalarda bulunmuştur. Çalışmalarında 40 x 40 x 3.9 mm boyutlarına sahip termoelektrik seramik malzemesi kullanılmıştır. Modül ölçüleri 50 x 60 x 50 mm olan ve dış ortamdan izole edilmiş bir kutunun alt bölgesine yerleştirilmiştir. Modüllerin ısınan yüzeylerini fan yardımı ile soğutulmuştur. Sistemim içine 125 g su doldurulup soğuması çektiği akım ve volt arasındaki bağlantı incelenmiştir. Prototip olarak tasarlanan termoelektrik soğutma sistemi için optimum akım aralığı incelenmiştir. Sonuç olarak 125 g su 12 dakika içinde 18 °C'den 6 °C'ye kadar soğutulmuştur. Soğutma sisteminin COP'si düşük olduğu ancak elektrik enerjisinin kolay sağlandığı ortamlarda kullanımı uygun olduğu elde edilmiştir [6].

Dişlitaş ve Ahıska (2003), bu çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından jeotermal enerjide oluşan elektrik enerjisine dönüştürmek için jeneratör diye adlandırılan termoelektrik modülleri kullanarak sistemi test etmiş ve performans analizi yapmıştır. Kullanılan modüllerin iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı soğuk su ve jeotermal akışlarla sağlanmıştır. Sistem üzerinde akım ve sıcaklık dengesi için regüle devreler DC AC dönüştürücüler selenoid valf gibi malzemeler kullanılmıştır. Tasarımda mikrodenetleyici sisteme gelen sinyalleri düzenlenmiştir. Farklı kriterlerde yapılan bir çok test sonucunda elde edilen sonuçlar sistemin kullanılabilirliğini göstermiştir [7].



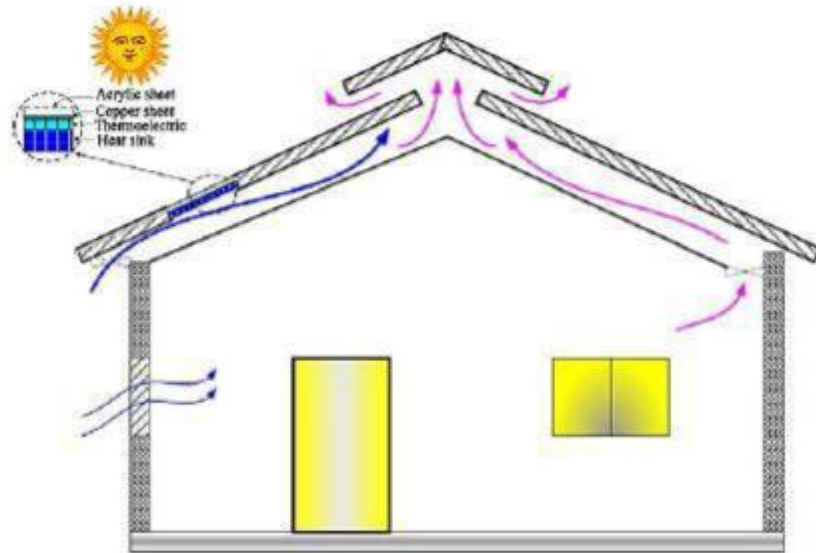
İmadoğlu (2003) malzemesi köpük olan bir kutu tabanına yerleştirilen alüminyum parçası ile monte edilmiş modüllerle peltierin sıcak yüzeyine alüminyum levha ve 12 V'lık bir fan kullanılmıştır. Prototipin içerisine istenilen yiyecek ve meşburat koyularak istenilen sıcaklığa soğutulduğu gözlenmiştir [8].

Astrain et al. (2003), yaptıkları çalışmada termoelektrik soğutmada peltierin sıcak yüzeyinden çıkan ısının dağıtımını için faz farklı termosifon prensibine dayanan bir cihaz hazırlamışlardır. Cihaz yarı deneysel formüllere ve akışkanlar mekaniği modellemesine dayanarak yapılan analitik hesaplamalar sonucu tasarlanmıştır. Deneysel en iyileme safhasında 0,110 m<sup>2</sup>K/W'lık ısı direncine sahip olan ve 40x40 mm'lik peltierin ısını dağıtan, ısı direncinde %36'lık iyileşmeye sahip olan bir termosifon prototipi oluşturulmuştur. Bu konvensiyonel kanatçıklı ısı dağıtıcısına sahip prototipin yorumlanmasında, faz değişkenli termosifon kullanılmasının COP'yi %32'lere kadar arttırdığı deneysel olarak kanıtlanmıştır. Sonuç olarak bu faz değişkenli termosifonlar peltierin sıcak yüzeyi ile çevre arasındaki ısı direncini ticari kanatçıklı ısı alıcısına göre 293 K çevre sıcaklığında % 23,8, 308 K çevre sıcaklığında ise % 51,4 düşürmüştür; en iyileştirilmiş kanatçıklı ısı alıcısına göre 293 K'de %13,8, 308 K'de %45 düşürmüştür. Termoelektrik soğutucudaki faz değişkenli bir termosifonun COP'yi 293 K'de % 26, 303 K'de % 36,5 arttırdığı deneysel olarak kanıtlanmıştır [9].

Chung et al. (2003), projesinde bölgesel emisyon sistemi ile soğutucu ünite tasarlanmıştır. Bu soğutma cihazı n-p tipinde enerji akışını sağlamak için elektriksel akım ayarlanmıştır ve testlere başlanmıştır. Sonuç olarak tasarlanan cihaz maliyet ve enerji anlamında tatmin edici olduğu gözlemlenmiştir [10].

Riffat and Ma (2003), çalışmalarında termoelektrik modüllerin küçük kapasiteli yerlerde daha çok kullanıldığını fakat yüksek kapasiteli yerlerde verimin az olmasından dolayı kullanılmadığı fakat çevre CFC salınımının azlığı sayesinde büyük alanlarda da kullanılmaya yönelmiştir [11].

Maneewan et al. (2003) “Termoelektrik çatı tipi güneş kolektörünün üretim gücü” Hazırlanan makale yeni bir çatı tasarım kavramının, “termoelektrik çatı tipi güneş kolektörü ( Te-RSC)”nin güneş enerjisinin güç üretiminde kullanılmasını araştırmaktadır. Te-RSC, şeffaf akrilik bir plakadan, hava boşluğundan, bakır bir plakadan, termoelektrik modüllerden ve bir dörtgen kanatlı soğutuculardan oluşmaktadır. Gelen güneş ışığı bakır plakayı ısıtmakta ve böylece TE modül üzerinde bir sıcaklık farkı oluşturulmakta ve bir doğru akım elde edilmektedir. Bu üretilen akım TE modülleri soğutan bir fanın işletilmesi için kullanılmaktadır. TE-RSC’nin yüzey alanı 0,0525 m<sup>2</sup>’dir. Ve 10 adet termoelektrik soğutucu modül (tianjin-lantian model TEC1-12708) kullanılmıştır. Araştırmalar, değişken güneş ışınması altında, (simülasyon için gücü 400 ile 1000 W/m<sup>2</sup> arasında değişen bir halojen ampül kullanılmıştır) yapılmıştır. Araştırma sonucunda, bu yeni çatı tasarımının, 30 °C ile 35 °C arasında değişen bir ortam sıcaklığı ve 800 W/m<sup>2</sup> gücündeki bir güneş ışınması altında 1,2 watt civarında bir güç ürettiği görülmüştür. Buna karşı gelen fan havasının hızı 1,7 m/s civarındadır. Bu nedenle önerilen TE-RSC kavramı kırsal alanda güç üretimi, çatı ısınısını azaltma ve dâhili ortam havalandırılması gibi çeşitli amaçlar için ilginç ve yeni bir alternatif oluşturmaktadır. Sistem Şekil 2.1.’de görülmektedir [12].



Şekil 2.1. Termoelektrik çatı tipi güneş kolektörü

İnan vd. (2005), laboratuvar ortamında ısı iletim katsayısı cihazı ile ısı konusundaki uygulamalı fizik deneylerinin yapılmasını amaçlamışlardır. Geliştirdikleri prototip ile kaplama malzemelerini tuğla briket gibi malzemelerin ısı katsayısının ölçülmesine yönelik endüstriyel değer taşımaktadır. Katılardaki ısı iletim katsayısının bulunması, peltierin ısıtma özelliği ve soğutma özelliği kullanılarak, ısı iletim katsayısını bulmak için cismin yüzeyi ısıya maruz bırakılmıştır. Isıya maruz kalmayan diğer yüzeyden alınan ölçümlere göre, ısı iletim katsayısı tespit edilir. Cihaz özellikle 30-120 °C ölçüm aralığında gaz beton, briket gibi cisimlerin ısı iletim katsayılarını ölçmek için kullanılabilir [13].

Bulut ise (2005), yaptığı çalışmada Riffat and Ma çalışmasına benzeyen termoelektrik soğutma teorisi, uygulama alanları, seçim ve tasarım aşamalarında ısı ve elektriksel anlamda teknik bilgiler vermiştir. Sonuç olarak Termoelektrik cihazlar güç üretimi ve soğutma uygulamalarında kullanılmaktadır. Termoelektrik soğutucular hassas ölçüm gerektiren yerlerde uzay ve askeri uygulamalarda, tıp sektöründe ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Fakat ilerleyen teknoloji sayesinde yüksek verimli modüller üretilerek ısı pompası ve iklimlendirme amaçlı soğutma sistemlerinin bu pazarlarda değerlerinin artacağı düşünülmektedir [14].

Atik ve Çakır (2006), yaptıkları çalışmada elektriğin bulunmadığı ama soğutma ihtiyacı olduğunda enerjisini güneş pillerinden karşılayan termoelektrik soğutucu imal etmişlerdir. Dış ölçüleri 29 x 29 x 29 cm boyutlarında tüm sistemin enerji ihtiyacını karşılayabilmek için güneş pilli sistem (fotovoltaik) seçimi yapılmıştır. Termoelektrik modül soğutucunun soğutma tesir katsayısı (STK) ve güneş pilinin veriminin belirlenmesi için; kabin iç ve dış sıcaklıkları, termoelektrik modülün sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları, güneş pilinden çekilen akım ve gerilim ile güneş ışınım şiddeti değerleri ölçülmüştür. Yapılan deneylerde; 17,80 °C dış sıcaklık ve 775 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde kabin iç sıcaklığı 4,90 °C'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Modül soğutma verimi 0,90 ve güneş pilinin verimi ise % 10 civarında olduğu tespit edilmiştir. Ülkemizde termoelektrik modül ile güneş pillerinin bir arada kullanıldığı bir uygulama olmuştur [15].

Ceylan ve Yılmaz (2006) termoelektrik modülün dinamik parametrelerini hesaplayabilmek için üniversal mikro işlemcili test cihazı tasarlanmış olup farklı testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda sıcak yüzey sıcaklığı modülün çalışma gerilimini ve termoelektrik değerlerini kullanan bir cihaz üretilmiştir [16].

Min ve Rowe (2006) yaptıkları benzer çalışmada, belirli sayıda termoelektrik soğutucu prototiplerini incelenmiş ve soğutma performanslarını (COP), ısı pompalama kapasitesini hesaplamıştır. Termoelektrik soğutucunun performans katsayısı tipik çalışma sıcaklığı olan 5 °C'de ve çevre sıcaklığı olan 25 °C'de 0,3-0,5 değerleri arasında bulunmuştur. Termoelektrik soğutucunun soğutma performansındaki potansiyel iyileştirme oranı bir soğutucu modelinin çalıştırılmasıyla ve deneysel dataların alınmasıyla incelenmiştir. Sonuç olarak, performans katsayısında (COP) yükselme olmasının ısı dönüştürücülerinin ısısal arayüzlerindeki, verimliliğindeki ve modül temas dirençlerindeki iyileştirmeye bağlı olarak mümkün olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın sonucunda; öncelikle DC 12 Volt ve ayarlanabilir akım uygulanarak sıcak ve soğuk yüzeylerde termokupl aracılığıyla ölçülen sıcaklık değerlerinin ve zamana göre değişimi incelenmiştir. Uygulanan akım şiddeti arttıkça modül yüzeylerinde sıcaklık farkı da artmaktadır. Uygulanan gerilim ise sıcaklık dağılımında ikinci etken olmaktadır. Burada termoelektrik modüllerin her iki kenarındaki sıcaklık farkının artması sıcak yüzeyden alınan ısının o bölgeyi kısa sürede terk etmesine bağlı olmaktadır. Bu amaçla sıcak kenar tarafına ısı aktarımını hızlandırmak için fan konmuştur. Kısa süreli dahi olsa fanların durması sıcaklık artışını hızlandırmakta dolayısıyla modüller için bu durum tehlikeli olmaktadır. Gerilimin birden kesilmesi durumunda soğuk kenar sıcaklığı hızla sıcak kenardan aktarılan ısıyla dengeye gelmektedir. Termoçiftlerin (TC) çalışma prensiplerine uygun olarak TE modüller de, aynen TC elemanları gibi, sıcaklık farkından gerilim üretebilirler. Modül sıcak yüzeyinin bir ısı kaynağıyla irtibatlandırılması ve soğuk yüzeyinin de ortam ısısında tutulması ile gerilim kaynağı olarak kullanılabilir [17].

Ravich ve Gordienko, (2007) Çift katmanlı termoelektrik modül soğutucular için kararlı hal çözümlemesi için uzun bir süre geçtiği ve geçiş zamanı içerisinde de bir

çözümleme yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. İki ve ikiden yüksek modüller için sayısal analizin analitik analize göre daha kolay olduğunu söyleyerek sayısal analiz yöntemi uygulamışlardır. Teoride ve deneylerde verilerin %10-15 arasında uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [18].

Yavuz ve Yılmaz (2008), yapmış oldukları çalışma tasarımı ve prototip, nem yoğunlaştırma sistemi olup kurutma işlemi sırasında çevrimdeki havayı dışarı atmadan önce havanın nemini tekrardan yoğunlaştırarak çevrime dahil etmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile asıl amaçlanan enerji tasarrufudur. Kurutmadaki parametre aralıklarının kontrol edilebileceği görülmüş oldu. Deneyler sonucunda 32 °C ve % 90 bağıl nemli kurutma havasından, termoelektrik modüllerle yapılan nem çekme uygulamasında, 100 W'lık güç harcaması ile saatte 193 g nem çekilebileceği tespit edilmiştir [19].

Yılmaz (2008) ise yaptığı çalışmasında 3,5 l iç hacme sahip bir soğutucu haznesini TEC1-12706 termoelektrik modül ile soğutmuştur. Bunun için gerekli olan elektrik enerjisini şebekeden sağlamaktadır. Termoelektrik modülde akımdan dolayı oluşacak sıcaklık farkından dolayı bir yüzeyin ısınması diğer yüzeyin ise soğuması gözlemlenmektedir. Bu olaydan dolayı ısınan yüzeyin soğutulması için iki farklı yöntem izlenmiştir bunlardan birinci yöntem hava ile soğutma olurken ikinci yöntem su ile soğutma olmuştur. Her iki yöntem için farklı gerilimler uygulanarak ortam sıcaklığı soğutucu modülün çektiği akım ve soğutucu iç sıcaklığı incelenmiştir. Sonuç olarak, her iki sistemde de gerilim değeri yükseldikçe, termoelektrik modüllerin çektiği akım değerleri ve soğutma gücü yekselmekte olmasına rağmen kabin içi sıcaklık ve soğutma verimi düşmektedir. 8 Voltluk gerilim değerinde hava soğutmalı modül uygulamasında sistem verimi %36 olarak, aynı gerilim değerinde su soğutmalı modül de ise %30 olarak hesaplanmıştır. Gerilim değeri 12 Volta çıkartıldığında sistem verim değerleri ise sırasıyla %31 ve %21 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak termoelektrik soğutmalı kabinde, modüllerin yüzey soğutulmasında kullanılan hava ve su soğutma uygulamaları karşılaştırıldığında, su soğutmalı sistem daha fazla soğutma gücü üreterek kabin sıcaklığını -1,5 °C kadar düşürmüştür. Ancak, sistemin verimi hava soğutmalı sisteme göre daha düşüktür. Bunun birinci

nedeni soğutma gücünün artmasından dolayı akım değerinin yükselmesi, ikinci nedeni ise su soğutma uygulamasında kullanılan su pompasının çektiği akım değerinin, hava fanının çektiği akım değerinden yaklaşık 15 kat daha büyük olması olarak yorumlanmıştır. Öneri olarak, soğutma kabini uygulamalarında düşük sıcaklık değerleri isteniyorsa modüller su ile soğutulmalıdır. Ancak su dolaşım pompasının akım değerleri düşürülmelidir. Bunu düşürmenin yolu su debisini azaltmakla mümkündür. Su debisi azaltıldığında ise su sıcaklığı yükselecektir. Su dolaşım hattı üzerine mini bir soğutma kulesi uygulaması yapılarak bu sorun da ortadan kaldırılabılır [20].

Yalçinkaya (2008) yaptığı çalışmada termoelektrik modülün soğutma, ısıtma ve elektrik üretimi için en verimli kullanım alanlarını ve çalışma şartlarını tespit etmek için bu çalışmayı yapmıştır. Peltier malzemesinin boyutları, uygulandığı yeri, dış etmenler ve soğuk-sıcak yüzeylerindeki sıcaklık değerlerine göre kapasite değişimi incelenmiştir [21].

Aruğaslan (2008) ise, bu projesinde prototip modülün elektriksel doğru akım güç kaynağı peltier element tarafından, Peltier ve seebeck etkileri sayesinde iki farklı metal farklı sıcaklıklara tabi tutarak sıcaklık farkı ile bir gerilim üretmiştir. Termoelektrik modül ile sıcaklık farkıyla gerilim elde edilerek, kapasitif ısı duyargası ve alıcı-verici ile, sıcaklık duyurunun kablosuz olarak taşınımını hedeflemiştir. Modülde yüksek sıcaklık duyumu hedeflenmesi sebebiyle eşik değeri, peltier elementin verileri doğrultusunda seçilmiştir. Modülü çalıştıracak potansiyel enerji için en az sıcaklık farkına ulaşması gerekmektedir. Bugüne kadar yapılan sıcaklık duyum devrelerinde sıcaklık ölçümü kablolu olarak gerçekleştirilmiştir. Projede sıcaklık farkının peltier element kullanılarak elektriksel enerjiye dönüştürülmesi ve bu enerji ile modülün kablosuz olarak çalıştırılması amaçlanmıştır. Devrenin DC beslemesi peltier element tarafından sağlanmaktadır. Kurulmuş olan basit deneysel düzenekler sayesinde peltier elementin sıcaklık farklılıklarına karşılık gelen elektriksel performansı gözlemlenmiştir [22].

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen standartlarına göre kanın saklanacağı koşullar 2 °C ile 10 °C arasında olması gerekmektedir. Ahıska vd. (2008), yaptıkları çalışmalarında bu standartlara uygun olarak ısıtma ve soğutma yapabilen mikro denetleyici kontrollü taşınabilir termoelektrik tıp kiti cihazının elektronik kontrol devrelerini geliştirmişlerdir. Cihazın iç sıcaklık kontrolü analog ve dijital duyarlı olarak incelenmiştir. Karşılaştırma sonuçlarına göre Dijital Sıcaklık Duyarlı (Sensörlü) Kontrol Sistemi'nin diğer sisteme göre enerji tasarrufunun yüksek olduğu gözlemlenmiştir [23].

Atik ve Gür (2009), bu çalışmalarında güneş enerjisinden yararlanarak yoğunlaştırılmalı güneş enerjisi sistemi ve termoelektrik (TE) jeneratör kullanarak elektrik üretimi yapmışlardır. Güneş enerjisinde yüksek sıcaklıklara çıkabilmek için aynalarla odaklama yapılmıştır. Modüllerin bir yüzeyi odaklanan ışınla ısıtılmakta olup diğer yüzey su dolaşımı ile soğutulmaktadır. Dört adet TE modülünün seri bağlanması ile üretilen enerji devreye bağlanan direnç ile ölçülmüştür. Sonuç olarak bulutlu havada güneş ışınlarının düşük olduğu zamanda yapılan ölçüm değerleri sonucu verimin % 1,043 olduğu hesaplanmıştır. Sıcak yüzeydeki ısı kayıpları, soğuk yüzeyin ısınması daha iyi odaklama güneş takibi gibi sistemlerin entegre edilmesi ile daha iyi bir performans yakalanacağı kanısına varılmıştır [24].

Ciylan ve Yılmaz (2009), yapmış oldukları sistemde günümüzde hızla yaygınlaşan modüllerin, kullanımı kolay, güvenilir ve evrensel olarak dinamik parametrelerinin belirlenmesine yönelik mikro denetleyici kontrollü taşınabilir bir test sistemi tasarlamış, gerçekleştirmiş ve denemişlerdir. Bu amaçla, öncelikle mevcut matematiksel analiz modeli basitleştirilerek, en az sayıda parametreyle en doğru sonuçların elde edilmesine imkan sağlayacak şekilde değiştirmeler yapmışlardır. Sonuçta modülün dinamik parametrelerini çok daha doğru ölçülebilen yeni bir model elde etmişlerdir. Sonuç olarak, ilerleyen dönemlerde termoelektrik modüllerin daha yaygın kullanılacağı düşünülmektedir. Bu kadar yaygın kullanım alanına sahip termoelektrik modüllerin kolayca test edilebilmeleri için gerçekleştirilen termoelektrik test sistemi; mikro denetleyici kontrollü, termokupllu, LCD göstergeli, hafızalı, bilgisayar bağlantılı, taşınabilir, pratik ve güvenilir bir sistem olup, her çeşit

termoelektrik modülün testini 5-10 dakikalık bir süre içerisinde kolayca yapabilen bir sistem olma özelliğini taşımaktadır. Melcor firması tarafında üretilen ve bütün parametreleri bilinen standart termoelektrik modül üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre termoelektrik test sisteminin güvenilir bir sistem olduğu tespit edilmiştir [25].

Atik (2009), çalışmasında termoelektrik (TE) soğutucu tasarımının enerji ve ekonomik yönden analizini yapmıştır. Çalışmasında yedi farklı tipte modül kullanarak birim soğutma gücü için yatırım, enerji ve maliyet hesaplanmıştır. Termoeconomik olarak en uygun (optimum) çalışma şartı her modül tipi ile değişmekle olup optimum akım değeri ile de modül optimizasyonunu etkilemektedir. Sonuç olarak, yedi farklı tipte modül için hesaplamalar yapılmış olup farklı çalışma şartlarında istenilen performans açısından modül sayıları değiştirilmiş olup en optimum çalışma aralıkları belirlenmiştir ve maksimum akım ile optimum akım değerleri arasında olduğu belirlenmiştir [26].

Bu çalışmasında 1,5 litrelik haznenin içine 1 litre su dolduruluyor ve 40 x 40 x 3,8 mm boyutunda termoelektrik modül ile soğutma yapmaktadır. Modüldeki ısınan yüzey 3 farklı hava debisi ile soğutulmaktadır. Su 1 saat içinde 25 °C'den 12 °C'ye kadar soğutulmuştur. Üç farklı hava debisinden en yüksek hava debili olan modülün performansını olumlu yönde arttırmasına rağmen fanın fazla çalışması sistem verimliliğini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Daha etkili soğutmak için kullanılan pompa ve fanlar sayesinde modül daha etkili soğumasına rağmen fazladan çekilen güç yüzünden sistem verimini etkilediği belirli bir optimum seviyeyi aşmaması gerektiği tespit edilmiştir [27].

Shan, Wu ve Tian (2010) yaptığı çalışmada sabit sıcaklıkta TEC modüllerinin ısıtma ve soğutma yeteneklerinin olmasından dolayı sabit sıcaklık uygulamalarında kullanılmasının daha iyi olacağını söylemişlerdir. Bundan dolayı hassa sıcaklık kontrolü TEC'lere gelen akımı ayarlamakla daha rahat olduğu gözlemlenmiştir [28].



David, Ramousse ve Luo (2012) termoelektrik ısı pompalarının verimini arttırmak için termoelektrik modüllere bağlı ısı değiştiricilerini optimize edebilmek için kanal çaplarını, kanal boyunu, akışkan debileri ile oynamalar yapmıştır. Sonuç olarak kanal çaplarının genişletilmesini ve kanal sayısının azaltılması gerektiğini böylelikle ısı transferinin artacağını belirlemiştir [29].

Gouws ve Eilers tarafından yapılan çalışmada, termoelektrik modüllerin seçimi, performansları, montajı yapılacak sistemler için önemli olan eşitlikler, hesaplama yöntemleri ve optimum termoelektrik modül seçimi ile ilgili hususları ortaya konmuştur. Çalışmada, termoelektrik modüllerin katı fazlı ısı pompası olmaları, hareket eden parçalarının bulunmayarak sessiz çalışmaları ve zararlı soğutucu gaz yaymamaları gibi önemli özellikleri vurgulanmıştır. Ayrıca Joule ısı, yüzeyler arası sıcaklık farkı, p ve n tipi yarıiletken malzemeler arasındaki iletkenlik ve termoelektrik modül performans katsayısı arasındaki bağıntıların önemi bilimsel eşitliklerle ortaya konmuştur [30].

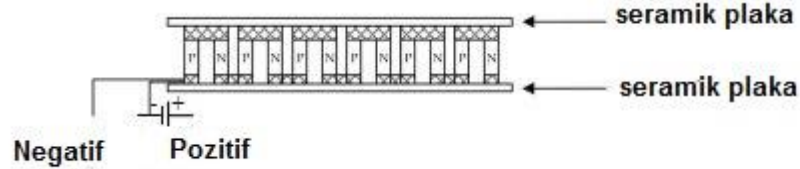
## **2.1. Termoelektrik Genel Bilgiler**

Termoelektrik sıvı ya da katı maddelerin sıcaklık değişimleri ile malzemede oluşacak elektriksel potansiyeli inceleyen bilim dalıdır. İletken malzemelerin ısınması ile elektronların elektronca zengin kısımdan elektronca fakir kısma doğru geçmesi ile elektriksel potansiyel üretmesi prensibidir.

Isı ve elektriksel etkinin birlikte bulunduğu yarı iletken malzemelere termoelektrik denir. Isıda oluşan enerjiyi elektriğe, elektrikte oluşan enerjiyi ise ısıya dönüştüren termoelektrik etkiler bilinmektedir.

Bir termoelektrik modül katı hal enerji dönüştürücüsü olarak bilinmektedir. Standart termoelektrik modüller, elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel bağlanan P-tipi ve N-tipi termo-elemanlardan (veya termoelektrik çiftlerden) oluşturulmaktadır. Bir termoelektrik çift, biri P-tipi oluşturmak için ve diğeri N-tipi malzeme oluşturmak için katkılı iki yarı iletken malzemeden meydana gelir. İki bölgeyi bir tarafa bağlamak için normalde küçük bir bakır şerit kullanılır ve daha sonra iki

seramik plaka arasına yerleştirilir. Seramik plakalar iki işlevi yerine getirir, termo-elemanı monte etmek ve aynı zamanda termo-elemanı elektriksel olarak yalıtım için bir temel görevi görürler. Şekil 2.2. standart bir termoelektrik modülün şematik bir diyagramını göstermektedir.



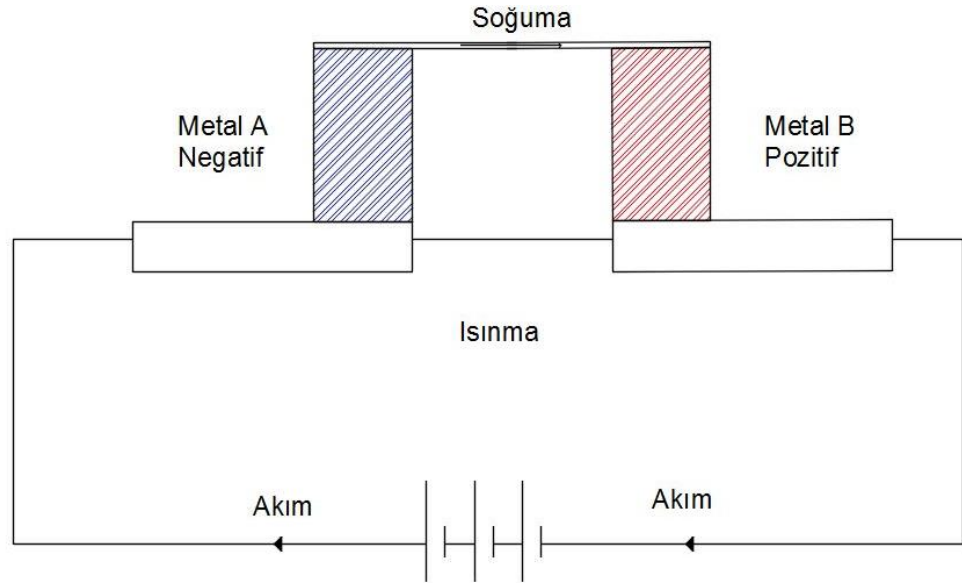
Şekil 2.2. Standart termoelektrik modül gösterimi [31]

Genelde termoelektrik modüller  $3 \text{ mm}^2 \times 4 \text{ mm}$ ,  $75 \text{ mm}^2 \times 5 \text{ mm}$  kalınlığa kadar boyutlarda olabilmektedir. Normalde, tek kademeli bir termoelektrik modülün yüksekliği 1 ila 5 mm arasındadır ve modül içindeki termokupl sayısı 3 ila 127 arasında değişebilir [32]. Bir termoelektrik modül üzerindeki sıcak ve soğuk taraf arasındaki yüksek sıcaklık farklarının gerekliliği genellikle çok aşamalı termoelektrik modüller tarafından karşılanır. Bu cihazların uygulanması mümkün olan en düşük kalınlığı gerektirse de, çok kademeli bir termoelektrik modül, kademelerin sayısına bağlı olarak 20 mm yüksekliğe kadar çıkabilir [33]. Şekil 2.3., ticari olarak temin edilebilen termoelektrik modüllerin bazılarını göstermektedir.



Şekil 2.3. Çok ve tek katmanlı termoelektrik modül [33]

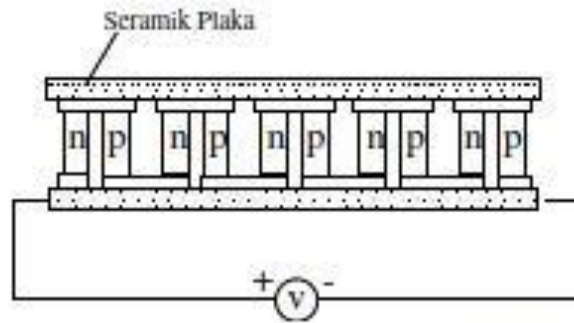
Termoelektrik etkiler seebeck, peltier ve thomson etkileridir. Thomas Johan Seebeck iki farklı metal ile oluşturduğu sistemin eklem bölgeleri arasında sıcaklık farklarını olduğunu ve pusulanın iğnesinin saptığını görmüştür. Bu olaydan 13 yıl sonra Jean Christian Athanasa Peltier peltier etkisini bulmuştur. Thomson etkisinde Wiliam Thomson 1.Lord Kelvin tarafından bulunmuştur (Şekil 2.4.) [34].



Şekil 2.4. Farklı metallere oluşturulan devrede soğutma olayının oluşumu

### 2.1.1. Seebeck etkisi

Termoelektrik enerjinin temeli termal enerjiden elektrik enerjisine dönüşüm, seebeck etkisine dayanır. Yarı iletkenlerde yük taşıyıcıları olan elektronlar, sıcak taraftan termoelektrik malzemenin soğuk tarafına doğru elektro kimyasal potansiyeli daha büyük olan elektronlar, öteki metale doğru hareket eder ve bu hareket sonucunda denge bozulur ve metaller arasında bir elektrik alanı, voltaj oluşturur. Metallerde  $\alpha < 0.00005 \text{ V/}^\circ\text{C}$ , yarıiletkenlerde ise  $0.0002 < \alpha < 0.0003 \text{ V/}^\circ\text{C}$  arasında değişmektedir. Genellikle sıcaklık ölçümünde kullanılır [35]. Şekil 2.5.'de görüldüğü gibi bir çift iki birleşme noktası ile oluşur.



Şekil 2.5. Seebeck etkisini gösteren devre

Termoelektrik etki fenomeni, yarı iletkenlerde hem şarj hem de ısı taşıyan çok fazla serbest yük taşıyıcısının sonucudur. Bir elektrik alanı, sıcak uçtan soğukta yayılan yük taşıyıcıları nedeniyle bir net yük üreten bir yarı iletken malzeme boyunca bir sıcaklık farkı  $\Delta T$  uygulaması ile sıcaklığın karşısındaki açık devre voltajının indüksiyonu ile üretilerek sonlandırılır. Bu etki seebeck etkisi olarak adlandırılır.

$$S = V/\Delta T \quad (2.1)$$

Burada, S seebeck katsayısı [ $\mu\text{V} / \text{K}$ ], V elektrik potansiyeli ve  $\Delta T$  sıcaklık farkıdır [35].

Düşük taşıyıcı konsantrasyonlu yarı iletkenlerde yüksek seebeck katsayıları bulunur ve seebeck katsayısı ile taşıyıcı konsantrasyonu arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir.

$$S = \frac{8\pi^2 k_B^2}{3eh^2} m^* T \left( \frac{\pi}{3n} \right)^{2/3} \quad (2.2)$$

Burada,  $k_B$  boltzmann sabiti, e elektron yüküdür, H planck sabitidir,  $m^*$  yük taşıyıcısının etkili kütlesi, t sıcaklıktır ve n taşıyıcı konsantrasyonudur. Ayrıca, seebeck katsayısı da;

$$S = \frac{\pi^2 k_B T}{3e} \left( \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{\varepsilon=E_F} \quad (2.3)$$

Burada,  $k_B$  boltzmann sabiti, t sıcaklıktır, e elektron yüküdür,  $\sigma$  elektriksel iletkenliktir ve  $E_F$  fermi enerjisidir [36].

Çizelge 2.1. Platinyuma göre bazı metallerin Seebeck katsayısı

Metal	Seebeck Katsayısı ( $\mu V/K$ )
Antimon	47
Nikrom	25
Molibden	10
Kadmiyum	7.5
Tungsten	7.5
Altın	6.5
Gümüş	6.5
Bakır	6.5
Radyum	6
Tantal	4.5
Kurşun	4
Alüminyum	3.5
Karbon	3
Civa	0.6
Platinyum	0
Sodyum	-2
Potasyum	-9
Nikel	-15
Konstantan	-35
Bizmut	-72

### 2.1.2. Peltier etkisi

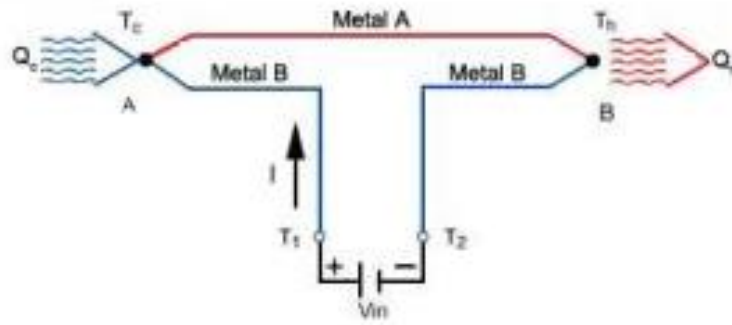
Fransız Fizikçi Jean Charlas Athanasa Peltier, 1834 yılında seebeck etkisinin tam tersi bir etki keşfetmiştir. Bileşenleri yarı iletken malzemeler arasında doğru akım geçirildiğinde bir birleşme noktasının ısı emdiğini ve diğer birleşme noktasının ısı açığa çıkardığını keşfetmiştir. Bu keşiften sonra Termoelektrik soğutucular esas olarak katı hal ısı pompaları olduğunu anlaşılmıştır. Freon tabanlı buzdolapları gibi benzer bir soğutma fonksiyonuna sahiptirler. Termal enerji, soğutulacak bir bölgeden çıkarılır, sıcaklığını düşürür ve daha sonra bir “ısı emici” bölgesine gönderilir. soğutulacak sıcak bölgeye dokunan TEC'in yüzeyine TEC'in soğuk birleşim denirken, ısı emicisine bağlı olan yüzeye sıcak birleşim denir. Buhar sıkıştırma

soğutma döngüleri gibi geleneksel soğutma döngülerinin aksine, termoelektrik soğutucuların hareketli mekanik bileşenleri veya akan bir sıvısı yoktur. Bunun yanı sıra, termoelektrik soğutma, bir soğutma sisteminin evaporatör, kompresör ve kondenser bileşenlerine benzer parçalara sahiptir.

Termoelektrik katı hal ısı pompalarının çalışma prensibi, kristal yarı iletken malzemelerden yapılmış termokuplların kullanımına dayanır [37]. Bir akımı kristalin yarı iletkeninden geçirmek, termokupllar boyunca  $70^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar sıcaklık farkı oluşturabilir.

Soğuk birleşim termal enerji, p tipi yarı iletkendeki düşük enerji seviyesinden, n tipi yarı iletkendeki daha yüksek bir enerji seviyesine geçerken elektronlar tarafından emilir. Güç kaynağı, elektronları sistem boyunca hareket ettirmek için elektrik akımı sağlar. Sıcak birleşimde, elektronlar yüksek enerji seviyesinden (n tipi) daha düşük bir enerji seviyesine (p tipi) hareket ettikçe enerji bir ısı emicisine dağıtılır.

Şekil 2.6.'da, A ve B gibi farklı metal telden geçirilen akım A noktasında ısı emilirken B noktasında ısı dışarı atıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.6.  $V_{AB}$  potansiyeli altında oluşan peltier etkisi [39]

A noktasından emilen ısı miktarı  $\dot{Q}$ , verilen akım ve peltier etkisi ile doğru orantılıdır.

$$Q = \Pi_{AB}I = (\Pi_B - \Pi_A)I \quad (2.4)$$

$$\Pi_{AB} = \dot{Q}/I \quad (2.5)$$

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB}T \quad (2.6)$$

Denklem (2.4), (2.5) ve (2.6)'da yer alan  $\pi_{AB}$ , peltier katsayısının değerini anlatmaktadır [39]. Peltier katsayısı, herhangi bir metalde bir yük başına taşınabilecek ısı gücünün bir ölçümüdür.

### 2.1.3. Thomson etkisi

İskoçyalı Bilim insanı Wiliam Thomson 1856 yılında seebeck katsayısı ile peltier katsayısı arasında bağlantı olduğunu farketmiştir.

$$\alpha = \pi/T(K) \quad (2.7)$$

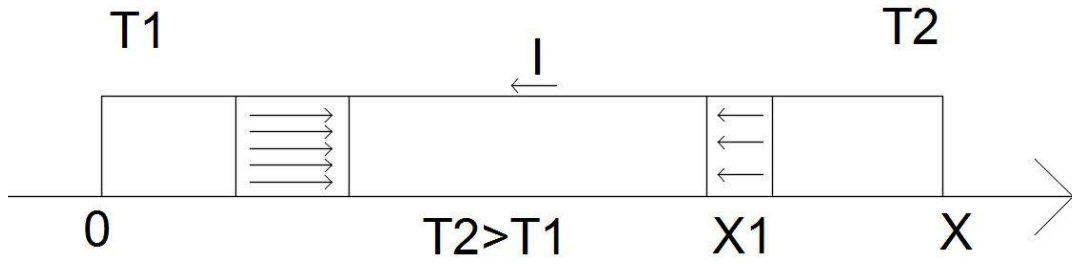
Bu eşitlikle birlikte Thomson yeni bir hipotez öne sürmüştür. İki nokta arasında sıcaklık farkı olan bir iletkenin joule ısısının yanında Thomsan ısıısı da vardır ve sıcaklık farkı ve akım şiddeti ile doğru orantılıdır.

$$Q_T = I\alpha\Delta T = \alpha(T_2 - T_1) \quad (2.8)$$

İki metalden oluşan bir devre için Thomson emk'ları arasındaki ilişki eşitlik denklem 2.9 ile aşağıda gösterilmiştir.

$$\alpha T = (\alpha_{TA} - \alpha_{TB}) * ((T_2 - T_1)/T_2) \quad (2.9)$$

Yukarıdaki formülede  $\alpha T$ , Thomson olayında açığa çıkan termoemk yi,  $\alpha_{TA}$  ve  $\alpha_{TB}$  farklı malzemelerden meydana gelen devreyi ifade etmektedir.



Şekil 2.7. Thomson etkisini açıklayan devreli gösterimi

$$q''' = \rho \vec{j}^2 - \tau \vec{j} \nabla T \quad (2.10)$$

Bir birim hacmin ürettiği ısı,  $q'''$ , denklem (2.10)'da verilmiştir. Burada  $\rho$  öz direnç, birimi  $\Omega m$ ,  $\tau$  Thomson katsayısı, birimi V/K ve  $J$  de akım yoğunluğu birimi  $A/m^2$  'dir.

#### 2.1.4. Kelvin eşitlikleri

Kelvin eşitlikleri, Seebeck, peltier ve Thomson katsayıları arasındaki eşitliklerdir.

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (2.11)$$

$$\pi = \alpha \cdot T \quad (2.12)$$

Seebeck ve peltier katsayılarını ölçmek için başka bir malzemeyi referans almak gerekir. Lakin Thomson katsayısı, tek bir materyal için ölçülebilir.

#### 2.2. Modülü Etkileyen Faktörler

Bir termoelektrik modülde beş ana başlıkla incelenmektedir: Fourier yasasına dayanan ve malzemenin termal iletkenliği " $k$ " (metre başına düşen Kelvin) ve modülün geometrisi. Bir ısı iletim denklemi;

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \approx -k \frac{A}{L} \Delta T = -\frac{\Delta T}{2\psi} \quad (2.13)$$



Burada, ısı akış yolu boyunca mesafedir,  $A / L$  bir geometri faktörüdür,  $L$  modülün yüksekliği (metre cinsinden),  $A$  modülün enine alınan kesit alanıdır (metrekare cinsinden),  $T$  sıcaklık (Kelvin cinsinden) ve  $q$  ısıdır (Watt cinsinden).  $2\psi$  (watt başına Kelvin cinsinden) termal tek bir modülün direnci (n-tipi veya p-tipi),  $\psi$  ise birkaç modülün (n-tipi ve p-tipi) ısıl direncidir ve

$$\psi = \frac{1}{k} \frac{L}{2K} \quad (2.14)$$

Termal olarak paralel bağlanan bir modülün "n" çiftlerinin toplam ısıl direnci,

$$\psi_m = \psi/n \quad (2.15)$$

Rezistif elemanlarda ısı yayılımı sürecine Joule ısıtması denir. Bir peltier çiftindeki elektrik direnci  $R$  ve ilişkili joule ısıtması şunlardır:

$$R = \rho \frac{2L}{A} \quad (2.16)$$

$$\rho_j = I^2 R_m \quad (2.17)$$

Burada,  $\rho$  malzemenin öz direncidir (ohm metrede),  $q_j$  TE modülünün (watt cinsinden) joule ısıtmasıdır,  $I$  elektrik akımıdır (Amper cinsinden) ve  $R_m$  TE modülünün  $n$  ile toplam direnç çiftleri,

$$R_m = R \cdot n \quad (2.18)$$

Termoelektrik malzemelerin kullanılabilirliği genellikle boyutsuz bir  $ZT$  parametresi ile karakterize edilir,

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (2.19)$$

Burada  $\alpha$ , seebeck katsayısıdır ( $^{\circ}\text{C}$  başına Volt cinsinden). TE modülündeki  $n$  çiftler için ise,

$$a_m = a \cdot n \quad (2.20)$$

Şeklinde ifade edilmektedir.

### 2.2.1. Elektriksel direnç

TE malzemesinin elektriksel direnci, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak önemli bir özelliktir. Bir yarı iletkenin elektrik direnci, metallerin ve izolatörlerin dirençleri arasındadır. TE malzemesi için elektriksel direnç limitleri  $10^{-3}$  ila  $10^{-2} \text{ m}^{-2}$  arasında bulunur. TE malzemesinin elektriksel direnci, taşıyıcı konsantrasyonuna bağlıdır [40].

Ayrıca, malzemelerin tane sınırı ve gözenekli yapısı elektronlar için saçılma yerleri olarak işlev görür. Böylece, sinterleme sıcaklığının artırılması, elektriksel iletkenlikte bir artışa neden olan tane sınırını ve gözenekliliği azaltır [41]. Elektriksel direncin karşılığı olan elektrik iletkenliği, bir malzemenin elektrik akımı iletme kapasitesini ölçmek için kullanılır. Elektriksel iletkenlik şu şekilde tanımlanır;

$$I = \frac{\sigma VA}{L} \quad (2.21)$$

Burada,  $I$ = elektrik akımını,  $A$  sabit kesit alanını,  $L$  uzunluk ve  $V$  uygulanan voltajı ifade etmektedir [42]. Elektriksel iletkenlik ise;

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (2.22)$$

Burada  $J$  akım yoğunluğunu [ $\text{A}/\text{m}^2$ ],  $E$  elektrik alan şiddetini [ $\text{V}/\text{m}$ ] göstermektedir [43].

### 2.2.2. Termal iletkenlik

Termal iletim, ısının, mikroskobik parçacık çarpışmalarıyla elektronların bir maddenin yüksek ve düşük sıcaklık bölgelerindeki hareketiyle aktarılmasıdır. Bir maddenin ısıyı transfer etme yeteneğine termal iletkenlik denir ve Fourier denklemi ile;

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.23)$$

Burada Q ısı gücü [W], k termal iletkenlik [W/mK], A kesit alanı [m<sup>2</sup>] ve dT/dx ise sıcaklık gradyanıdır. Katılarda ısı, fonon adı verilen kafes titreşim dalgaları ve serbest taşıyıcılar tarafından aktarılır elektron veya delik denir. Termal iletkenlik mekanizması bu iki mekanizmadan oluşur ve toplam iletkenlik, denklemlerle bu iki katılımın toplamı olarak verilir.

$$K = K_E K_L \quad (2.24)$$

Burada, K<sub>E</sub> ve K<sub>L</sub>, sırasıyla örgü titreşimi ve serbest yük taşıyıcılarından kaynaklanan elektronik ve kafes içi termal iletkenliğidir. Bir malzemenin sıcak tarafındaki serbest elektronlar kinetik enerji elde eder ve bu kinetik enerjinin bir kısmını fononlar veya diğer safsızlıklar ile etkileşerek atomlara aktararak daha soğuk bölgelere taşır. Bu tür bir etkileşim, yük taşıyıcıların toplam termal iletkenliğe katkısıdır ve elektronik termal iletkenlik olarak adlandırılır. Wiedemann-Franz Yasası'na göre, elektronik termal iletkenlik şu şekilde verilebilir:

$$K_E = L\sigma T \quad (2.25)$$

Burada,  $\sigma$  elektriksel iletkenliktir, T sıcaklıktır ve L serbest elektronlar için  $2.45 \times 10^{-8} \text{ J}^2 / \text{K}^2 \text{C}^2$  olarak verilen Lorenz sayısıdır, ancak Lorenz sayısı sıcaklık ve malzemeye bağlı olarak değişebilir. Kafes ısıl iletkenliğinin katkısı, fononların yüksek sıcaklık bölgelerinden düşük sıcaklık bölgelerine, sıcaklık gradyanı olan bir katı yoluyla

hareketlerinin sonucudur. KL, kullanılarak toplam termal iletkenlik ve elektronik termal iletkenlik arasındaki farktan hesaplanır. Bu nedenle, KE deneysel elektrik kullanılarak doğru bir şekilde değerlendirilmelidir. KE elektrik iletkenliği ile doğru orantılı olduğundan, KE değerinin düşürülmesi zT'nin azalmasıyla sonuçlanacak elektrik iletkenliğini azaltacaktır. Bununla birlikte, yük taşıyıcı konsantrasyonunun artırılması göreceli bir artışa neden olacaktır. Örgü ısıl iletkenliğini en aza indirilmesi zT'yi artıran tek parametredir. Kafes temas iletkenliği azaltmak için daha düşük termal iletkenliğe ve daha yüksek bir zT değerine yol açan diğer ağır atomları doping yoluyla boşluklar veya nokta kusurları oluşturarak birim hücrenin içindeki fononları saçmaktır [44,45,46,47].

### 2.2.3. Termoelektrik malzeme verimi

Bir termoelektrik malzemenin verimliliği, termoelektrik enerji dönüşüm performansının bir ölçüsü olan boyutsuz termoelektrik değeri (zT) ile ilgilidir.

$$zT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa} \quad (2.26)$$

Burada S, seebeck katsayısı,  $\sigma$  elektriksel iletkenlik, T mutlak sıcaklık ve  $\kappa$  toplam termal iletkenliktir. Toplam termal iletkenlik, fononlardan  $\kappa_L$  veya  $\kappa_{PH}$  ve şarj taşıyıcılarından  $\kappa_E$ 'den oluşur. TE malzemelerinin zT'sini iyileştirmek için büyük bir seebeck katsayısı, yüksek bir elektrik iletkenliği ve düşük bir ısı iletkenliği gereklidir. Bununla birlikte, bu üç TE özelliği birbirinden bağımsız değildir ve her iki şarj taşıyıcısının, elektronun veya deliklerin elektronik yapısı ve saçılması ile belirtilir. Genel olarak, seebeck katsayısındaki bir artış, taşıyıcı konsantrasyonuna göre elektrik iletkenliğinde bir azalmaya işaret eder.

Elektrik iletkenliğindeki bir artış Denklem'de verilen Wiedemann Franz yasasına göre termal iletkenlikte bir artışa neden olduğundan elektrik iletkenliğini arttırmak her zaman uygun değildir [48,49].

### 2.3. Yarıiletkenler

Yarıiletken malzemeler periyodik tablonun dördüncü grubunda bulunan silisyum, germaniyum, kalay gibi elementler yarı iletken malzemelerin en önemlileridir. Bu elementler yarıiletkenler arasında en saf elementlerdir. Si, Ge ve Sn elementleri kovalent bağlı olup kafes yapıları ise kübik ya da kompleks kübik yapıdadır. Periyodik tabloda üçüncü ve beşinci grup elemanlar, ikinci grup ve altıncı grup elemanlar arasında oluşan kovalent bağlı bileşiklerde aynı kristal ve elektron yapısına sahiptir [50].

Yarı iletkenlerde aralarında katkılı ve katkısız olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Katkısız yarı iletkenler dışarıdan yeterli enerjiye sahip olduğunda bağ yapılarından koparak üst taraftaki boş banda geçer iletim bandına geçen elektron geride elektron boşluğu bırakır.

Katkılı yarıiletkenler ise kendi aralarında 2 tipi vardır bunlardan birincisi n-tipi ikincisi ise p-tipidir. n-tipi yarıiletkenler ise kristal kafes içerisinde serbest elektron seviyesi meydana getirir. Serbest elektron az bir enerjiyle uyarılarak aktif hale getirilir. Oda sıcaklığı çoğu n tipi yarı iletken malzemeleri uyarmak için yeterlidir. P tipi yarı iletkenler ise dört A grubu yarı iletkenlerine üç A grubu atomlarının eklenmesi ile elde edilir. Dört A grubu atom kristaline üç A grubu atomlarının 3 elektronu kristalde 3 elektronu ile bağ yaparak bir elektron boşluğu kalması olayıdır.

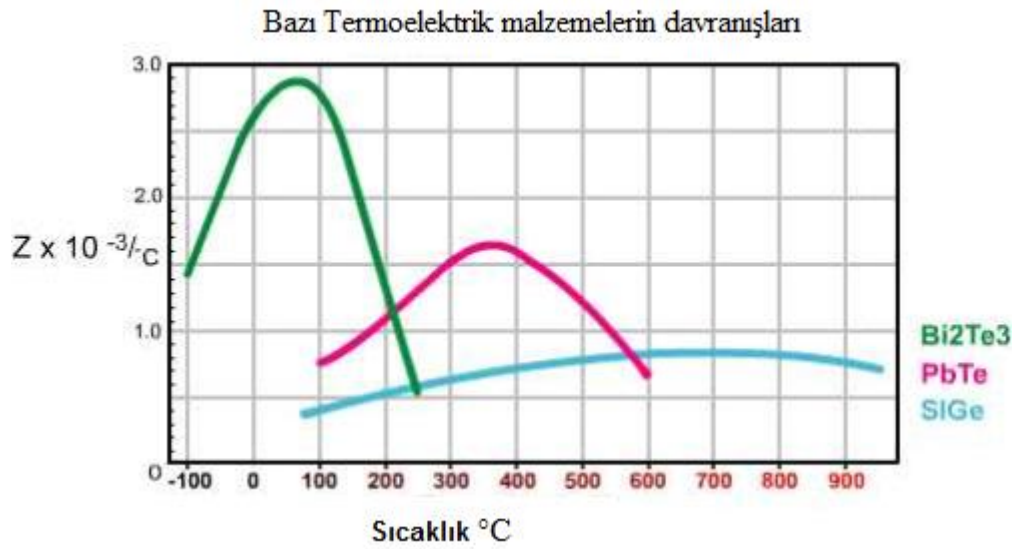
Sıcaklık arttırıldığında n-p tipi çiftlerde oluşmaya başlar. Bu durum metallerde tersine ilerleyerek sıcaklığın artması ile direnç artmakta ve iletkenlik azalmaktadır.

### 2.4. Termoelektrik Cihazların Bileşenleri

TEC'lerde en sık kullanılan yarı iletken malzeme, farklı "N" ve "P" karakteristiklerine sahip bireysel bloklar sağlayan bizmut tellür ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) alaşımıdır. Termoelektrik malzemeler genellikle ya yönlü toz metalurjisi ya da bir erimiş fazdan doğrudan kristalizasyon ile üretilir. Her imalat yöntemin kendine özgü bir avantajı

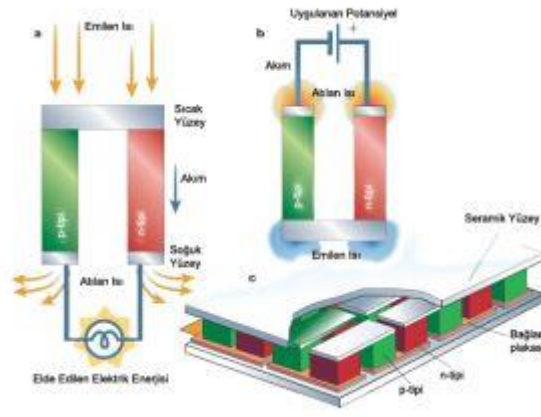
vardır, ancak malzemelerin yönelimli kristalizasyonu daha yaygındır. Farklı uygulamalarda farklı roller alan kurşun tellürür (PbTe), silikon bizmut-antimon (Bi-Sb) ve silisyum-germanyum (SiGe) alaşımları olarak listelenen diğer bazı TEC malzemeleri. Termoelektrik modüller, bimetalik malzemelere göre bazı avantajları nedeniyle yarı iletken malzemeler kullanılarak tasarlanmıştır. Düşük çalışma sıcaklığı, yarı iletkenlerin tek dezavantajıdır. Ancak bu, yüksek sıcaklık uygulamaları için nispeten yeni bir malzeme olan SiC ilavesiyle aşılabılır.

Bir sıcaklık aralığı boyunca farklı malzemelerin davranışları incelenmiştir. Şekil 2.8. de görülebilmektedir. Bizmut tellürürün performansı, çoğu soğutma uygulaması için en uygun sıcaklık aralığında zirve yapar.



Şekil 2.8. Yarıiletken malzemelerin termoelektrik değerleri [51]

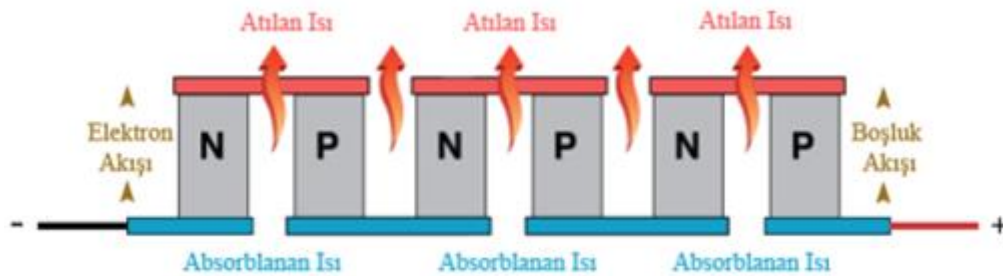
Termoelektrik jeneratör yada termoelektrik soğutucu aynı işi yapabilmektedirler. Böylelikle ihtiyaç durumunda termoelektrik jeneratör yerine termoelektrik soğutucu ya da tam tersi termoelektrik soğutucu yerine termoelektrik jeneratör kullanılabilir. Lskin aralarındaki fark jeneratör modüllerin oda sıcaklığında bile çalışabilmesi için üst kısımları termal iletkenliği daha iyi malzeme ile kaplanır.



Şekil 2.9. a) Seebeck b) Peltier c) Termoelektrik bileşen [51]

## 2.5. Temel Çalışma Prensipleri

İki ucuna akım verildiğinde n-p tipi elemanlar elektronları bir uçtan diğer uca doğru ittirir. Bundan dolayı bir yüzeyde ısınma diğer yüzeyde soğuma meydana gelir. Ayrıca modül üzerinde sıcaklık farkı oluşturulursa termoelektrik modül DC akım kaynağı gibi davranarak elektrik üretebilmektedir.



Şekil 2.10. Seri bağlanmış yarı iletken n-p tipi çiftler [51]

Termoelektrik modülde açığa çıkan ısı miktarları, termoelektrik denklemler çerçevesinde gerçekleşir. Bu denklemler ise (2.27) ve (2.28)'teki gibidir.

$$\dot{Q}_C = N\alpha_{np}IT_C - K\Delta T - \frac{1}{2}I^2R_i \quad (2.27)$$

$$\dot{Q}_{CH} = N\alpha_{np}IT_H - K\Delta T + \frac{1}{2}I^2R_i \quad (2.28)$$

$\dot{Q}_c$  (W) soğuk yüzeydenki ısı güç,  $\dot{Q}_H$  (W) ise sıcak yüzeyden çevreye atılan ısı gücünü belirtmektedir. N toplam n-p çift sayısını, K (W/K) toplam ısı iletim katsayısını,  $R_i$  ( $\Omega$ ) toplam iç direnç ve I (A) devreden geçen akımı göstermektedir. Termoelektrik modüllere uygulanan güç ifadesi ise denklem (2.29)'deki gibidir ve birimi Watt cinsindedir.

$$\dot{W} = N\alpha_{np}I\Delta T + I^2R_i \quad (2.29)$$

Termoelektrik modüllerin verimini COP değeri ile anlayabilmekteyiz. COP, soğurulan ısı gücü ile sisteme uygulanan gücün oranıdır.

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} = \frac{N\alpha_{np}IT_c - K\Delta T - 0.5I^2R_i}{N\alpha_{np}I\Delta T + I^2R_i} \quad (2.30)$$

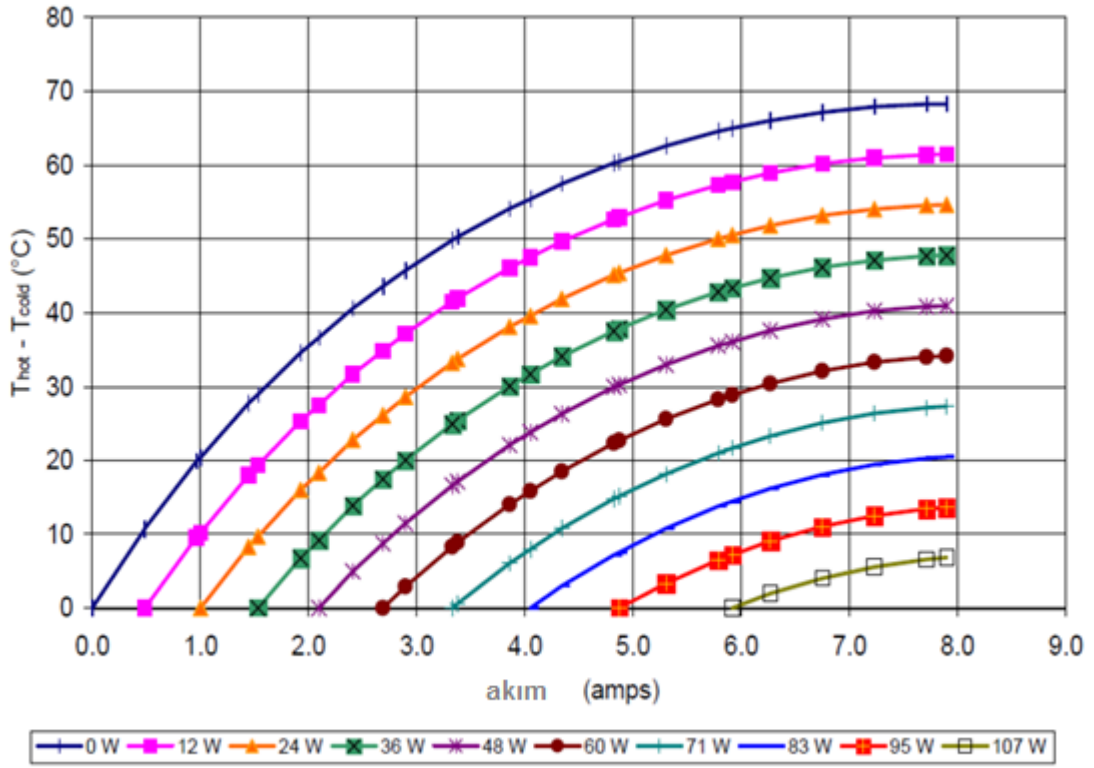
COP boyutsuz bir büyüklüktür ve sistemin verimini ölçmek için kullanılır.

## 2.6. Termoelektrik Modül Seçimine Etki Eden Faktörler

Genel termoelektrik soğutma sistemi, termoelektrik modül tedarikçileri  $\Delta T_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$  ve  $Q_c$ , ürünlerinin maksimum parametrelerini spesifikasyon olarak paylaşmaktadır.  $Q_{cmax}$ , modül yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı sıfır ve  $\Delta T_{max}$  elde edilebilecek yüzeylerin maksimum sıcaklık farkı olarak elde edilebilecek teorik maksimum soğutma gücü olarak tanımlanır.  $\Delta T_{max}$  değerine ulaşıldığında soğutma işlemi durur.

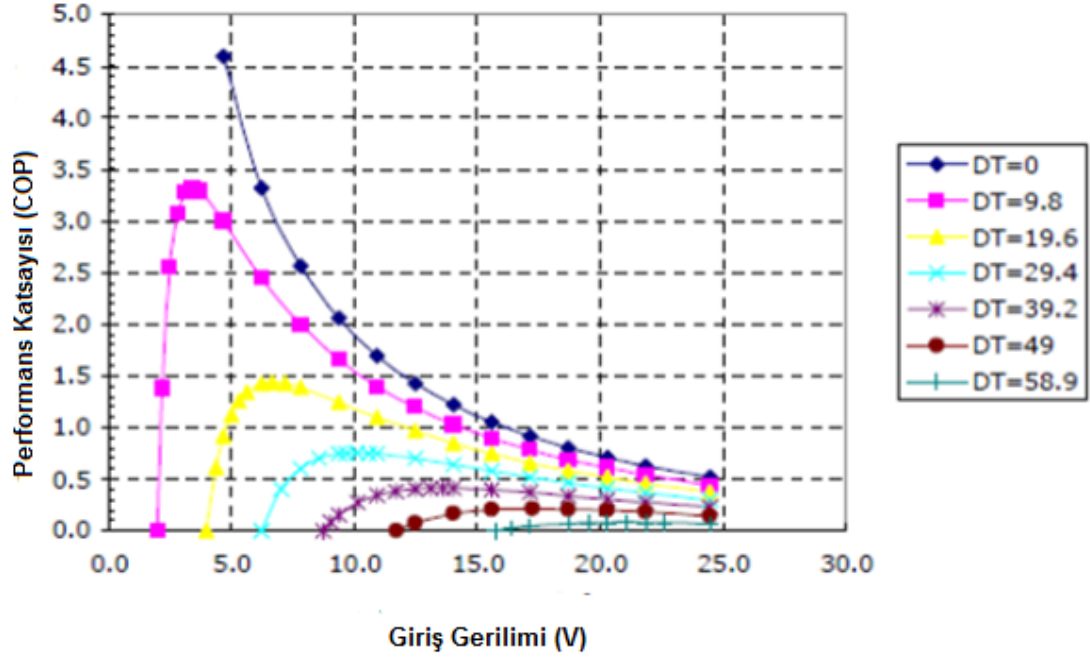


Çizelge 2.2. Termoelektrik modül soğuma eğrisi



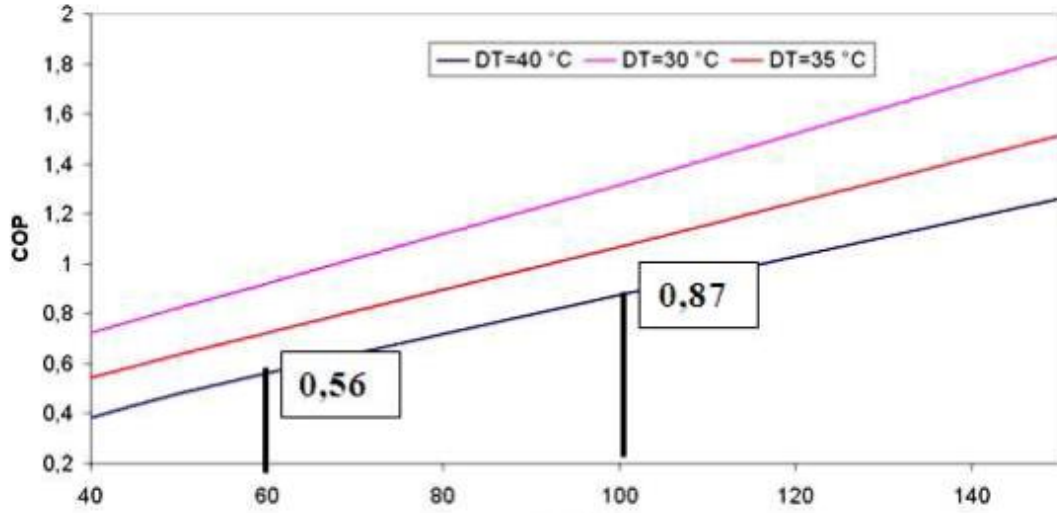
Çizelge 2.2.'de gösterildiği gibi, modülün soğutma gücü, belirli bir besleme akımı için yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının artmasıyla azalır. Ancak, modül yüzeylerindeki sabit sıcaklık farkı için artan akım ile soğutma gücü artar. Sıcaklık farkı maksimuma çıktığında soğutma gücü sıfıra ulaşır [52].

Çizelge 2.3. Sıcaklık ve besleme akımına dayalı termoelektrik modül soğutma verimliliği



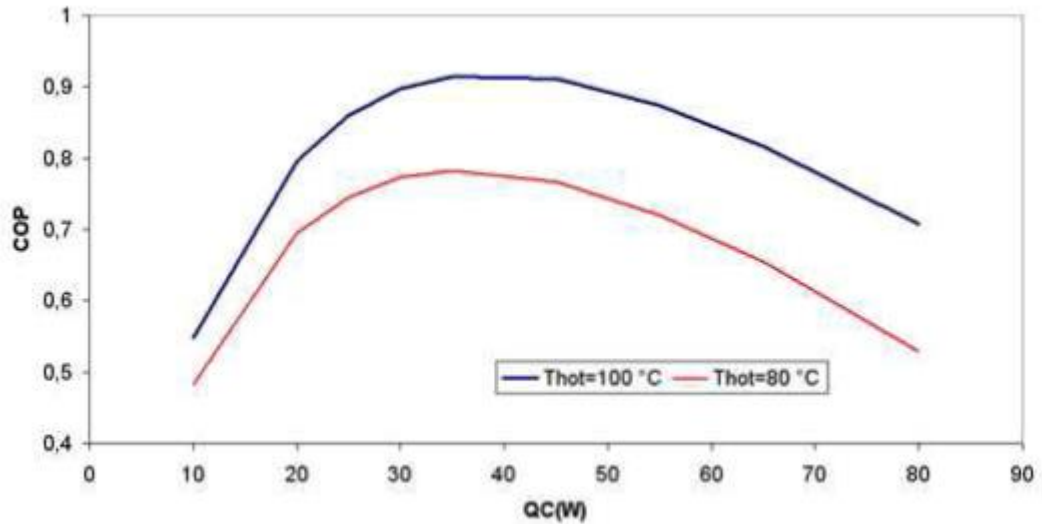
Termoelektrik soğutucunun ısı pompası verimliliğine gelince, COP değişimi Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Sıcaklık farkı ( $DT = \Delta T$ ) düştüğünde COP değerinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 2.4. Çeşitli DT'ler için sıcak yüzey sıcaklığına karşı TEC modülü verimliliği (COP)



Belirli bir sıcaklık farkı için termoelektrik modül COP değerinin arttığını göstermektedir.

Çizelge 2.5. Çeşitli sıcak yüzey sıcaklıkları için soğutma gücünün ( $Q_c$ ) bir fonksiyonu olarak TEC modülü verimliliği (COP)



Bu grafikte soğurma gücü değıştikçe maksimum COP değerinin değıştiği görölmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda COP değerinin daha yüksek olduğu görölmektedir [54].

## 2.7. Termoelektrik Cihazların Uygulama Alanları

Termoelektrik cihazlar soğutma ısıtma elektrik üretme ve sensörler olmak üzere dört ana uygulama alanı mevcuttur. Bu modüllerin başlıca uygulama alanları uzay ve havacılık, biomedikal, otomotiv gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Bu alanlarda kullanılmasının nedeni özel hassasiyet ve öneme sahip hızlı sonuç alınması istenen yerlerde kullanılmaktadır. Bahsi geçen modüllerin jeneratör olanları ilk defa 1961 yılında ABD tarafından uzay aracında denenmiştir. Uydu çalışacağı süre boyunca ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini termoelektrik jeneratörle karşılamıştır (Şekil 2.11.)



Şekil 2.11. Classini uzay aracı ve RTG üniteri [56]

Yeni tip üretilen araçlarda ise atık ısı termoelektrik jeneratör ile geri kazanılmıştır. Şekil 2.12.'de, BMW'nin geliştirdiği hibrit aracın atık ısı kazanım bölümü görülmektedir.

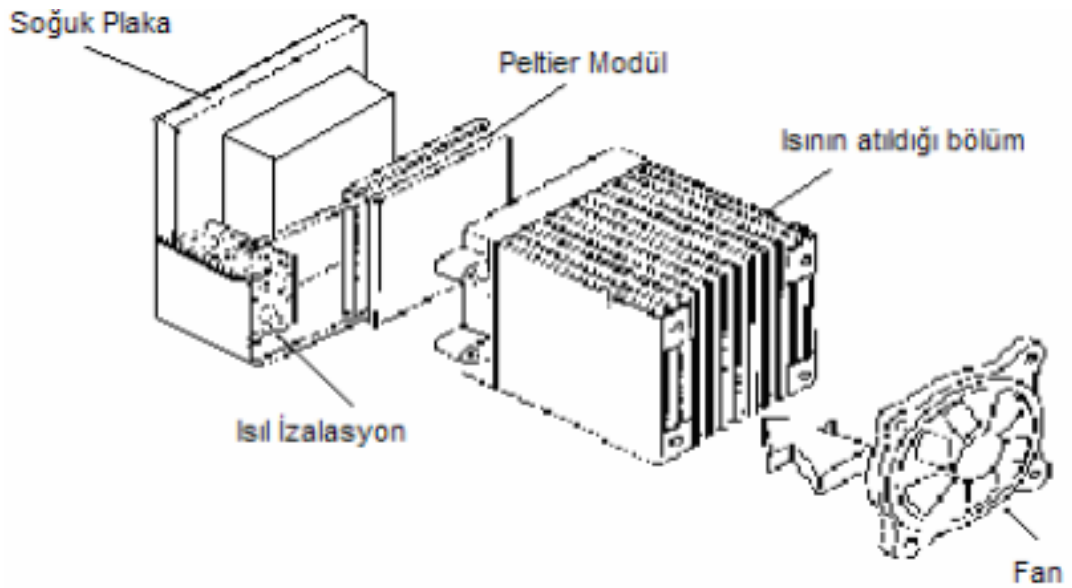


Şekil 2.12. BMW marka otomobilin atık ısı termoelektrik jeneratörü [56]

Termoelektrik jeneratör uygulamaları daha da çoğaltılabilir. Termoelektrik modüllerin diğer bir özelliği olan soğutma özelliğinin de kullanım alanı geniştir. Fakat modüllerin verimlerinin düşük olması soğutma yüklerinin küçük ya da orta ölçekli uygulamalara yönlendirmiştir. TEC'lerin kullanım alanları şöyle sıralanabilir [55].

1. Ozmometreler
2. Kızılötesi dedektörleri
3. Gece görüş cihazları
4. Lazer diyot soğutucular
5. Çiğ noktası higrometrileri
6. Devrimli soğutucular
7. Buzdolapları
8. Donma noktası referansı
9. Hassas ısıl karakterizasyon

10. Sabit sıcaklık soğutucuları
11. Silah dürbünleri
12. Parametrik büyütücüler
13. Elektronik soğutucular
14. Kısa dalga amplikatörler
15. Organ nakli soğutucuları
16. Portatif ısıtıcı/soğutucu



Şekil 2.13. TE soğutma ünitesi şekli [56]

## 2.8. Termoelektrik Soğutucuların Avantajları

Termoelektrik soğutucular ısı güç yoğunluğu fazla olan elemanlardır.

Avantajları kısaca şöyle özetlenebilir:

1. Hareketli parça içermediklerinden az bakıma ihtiyaç duyarlar.
2. Ömür testlerinde 100000 saat çalışabildikleri gözlemlenmiştir böylelikle uzun ömürlü oldukları saptanmıştır.
3. Termoelektrik soğutucular, CFC'ler gibi soğutucu akışkan içermezler böylelikle çevre dostu bir enerjidir.

4. Termoelektrik modüller ısı pompası olarak tersinirlerdir. Böylelikle akım yönü kolayca değiştirilebilir.
5.  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında çok hassas sıcaklık kontrolü sağlayabilir.
6. Termoelektrik soğutucular yatay dikey her konumlandırmada çalışabilmektedirler.
7. Alan olarak dar yerlerde çalışabilmektedirler.

## **2.9. Termoelektrik Soğutucuların Dezavantajları**

Termoelektrik modüllerin avantajlarının fazla olmasına karşın dezavantajları da mevcuttur. Bunlar;

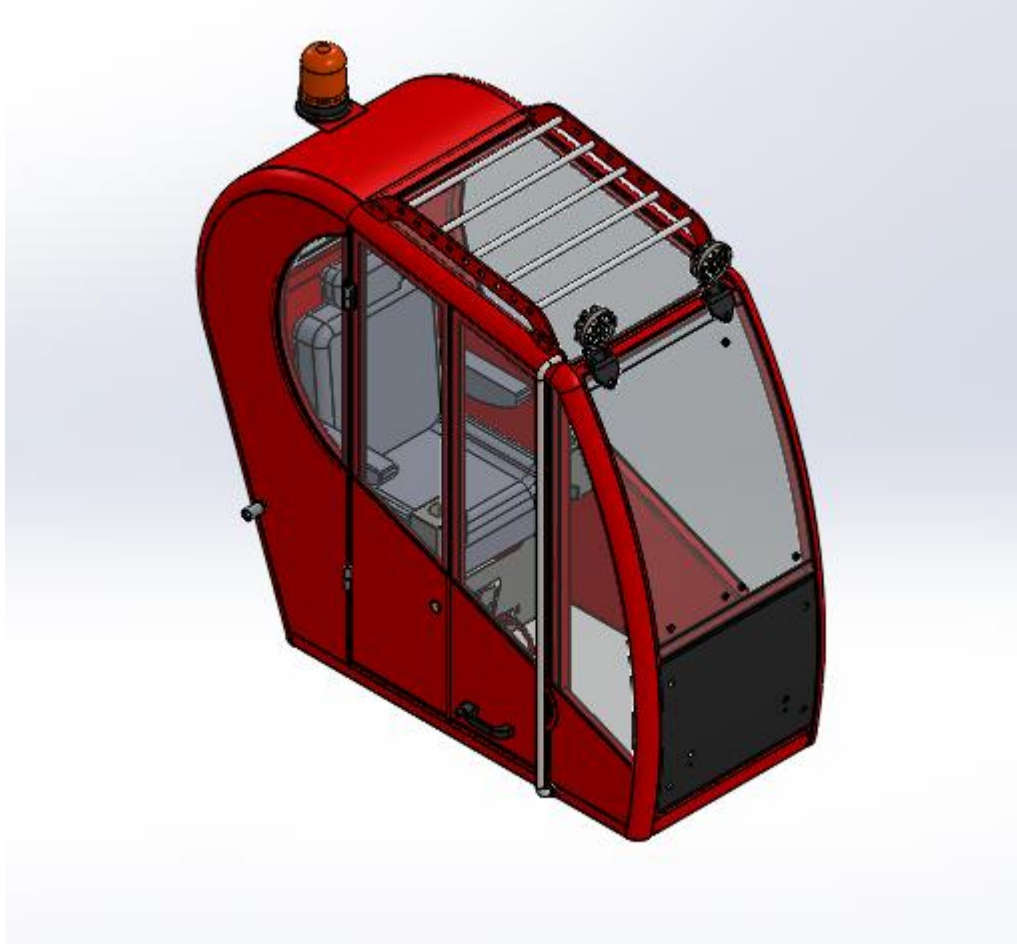
1. Termoelektrik modüller DC beslemesine ihtiyaç duyarlar.
2. Üretimi yurt dışında olmasından dolayı şuan pahalıdırlar.
3. Yüksek soğutma güçlerine çıkamadıklarından buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemleri ile yarışamazlar.
4. Yarı iletken yapılarından ve dizilimlerde kaybedilen enerjiler yüzünden ısıtma ve soğutma verimleri düşüktür. Genellikle şok soğutma uygulamalarında küçük hacimlerde kullanılmaktadır.



## BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Prototip Çalışmaları

Bu çalışmada pek çok farklı iş için kullanılabilen hareket edebilen paletli veya tekerlekli araçlar üzerinde kullanılan genel olarak 1,5m<sup>3</sup> hacme sahip platform üstü vinç kabinleri için termoelektrik teknolojisi ile klima tasarımı yapılmaktadır.



Şekil 3.1. Platform üstü vinç kabini 3D katı model görünümü

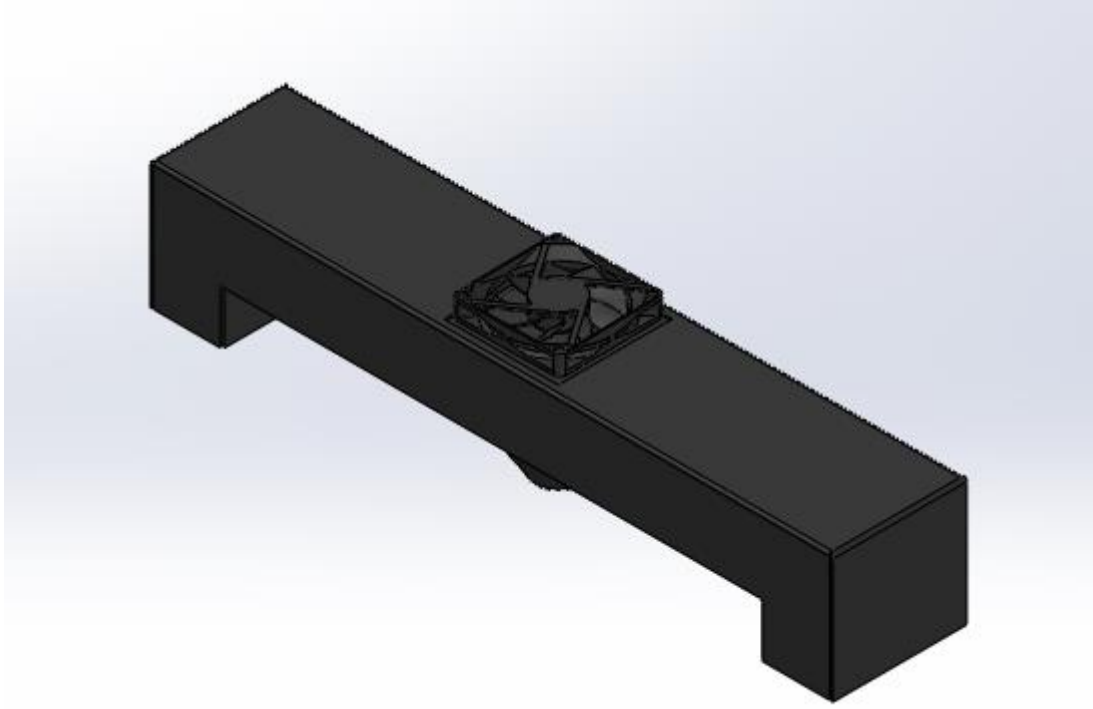


Tasarım için belirlenen başlangıç şartları platform üstü vinç kabinlerinin 360° dönebilme yeteneğinden dolayı standart klima bağlantılarının yerleştirilemeyeceği gözlemlenmekte olup termoelektrik modül teknolojisi ile özel bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarımdaki kriterleri;

1. Isıtma modun da 4 derece dış ortam hava sıcaklığında 22 derecede
2. Soğutma modunda ise dış ortam sıcaklığı 35 derece iken 23 derecede
3. Yeterli soğutma için radyatör ve fan sayıları belirlendi
4. İstenilen sıcaklığa geldiğinde sistem otomatik olarak kapanacaktır
5. Ürün iç ünite, dış ünite kontrol paneli ve elektrik panosu olmak üzere dört parçadan oluşacaktır

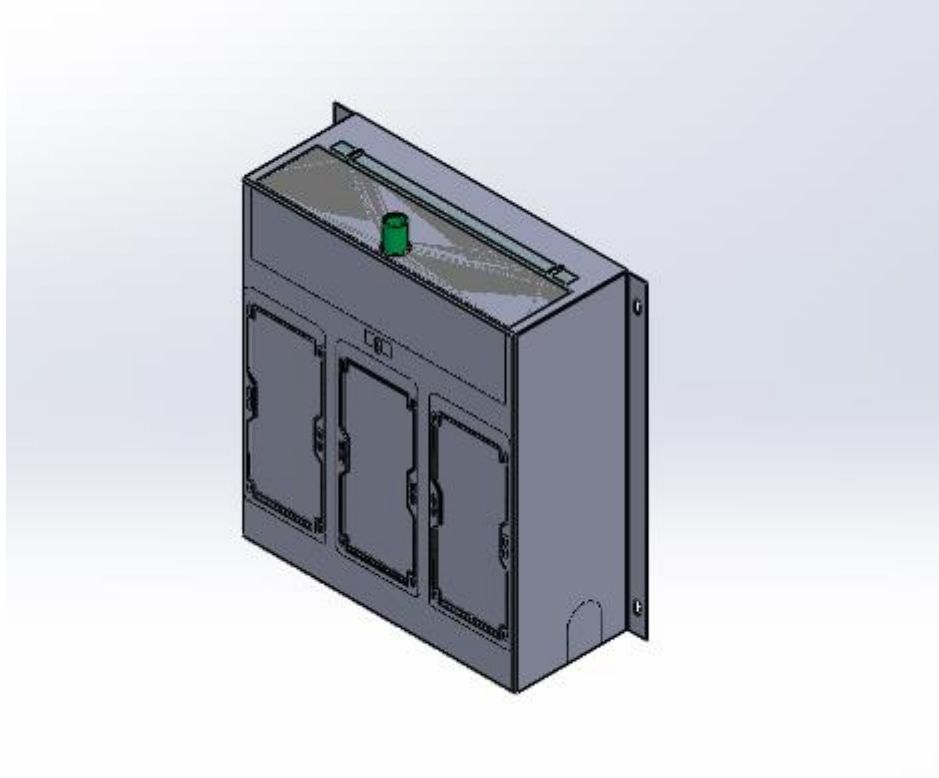
### **3.2. Analiz Çalışmaları**

Prototip özellikler belirlendikten sonra teorik olarak yapılan hesaplar Solidworks 3D programında bulunun Flow Simülasyon kısmı kullanılarak simülasyonlar yapılarak test edilmiştir. Soğutma işini yapan peltier modüllerin gücü, soğutma performansı ve konumu belirlenmiştir. Termoelektrik modüllerin ısınan yüzeyleri su blokları ile radyatörlere aktararak 12V 0.3A'lik fanlar ile soğutma sağlanmıştır.



Şekil 3.2. Platform üstü klima prototipin 3D gösterimi

Platform üstü vinç kabini kliması şekilde görüldüğü gibi üst fan kısmından ortamdaki havayı olarak iç kısmında bulunan termoelektrik modüllerin soğuttuğu veya ısıttığı alüminyum bloğa doğru hava sirkülasyonu yapmaktadır. Böylelikle termoelektrik modüllerin sayesinde soğuyan veya ısınan hava prototipin sağ ve sol kısmından kabin içerisine yayılmaktadır.



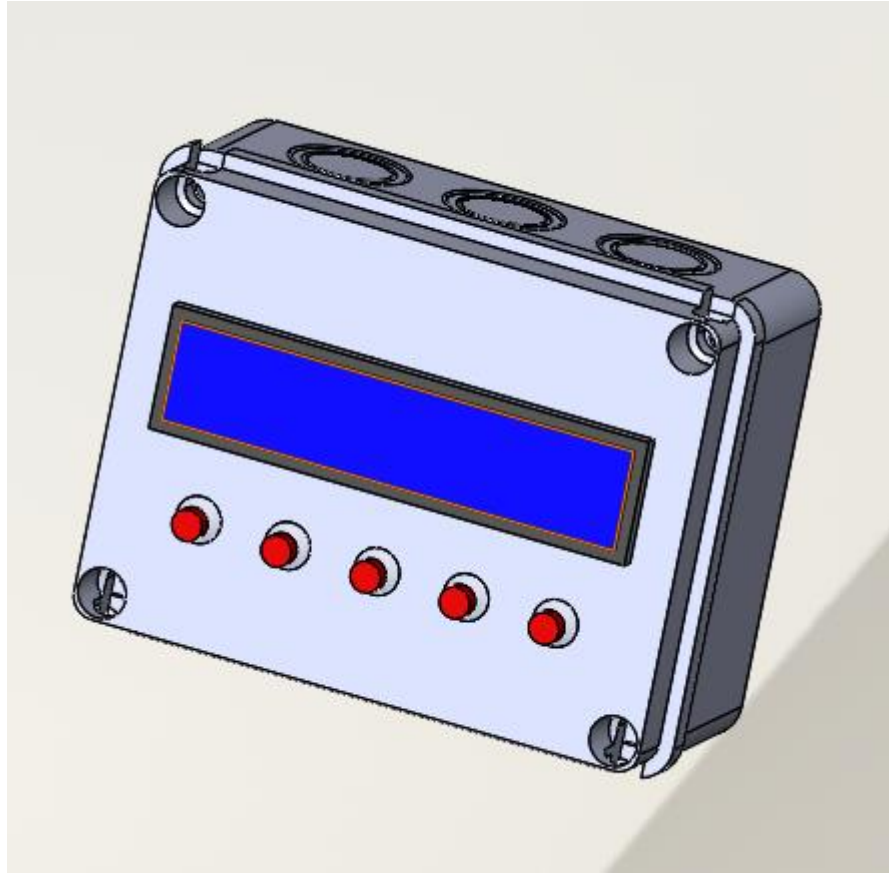
Şekil 3.3. Platform üstü vinç kabini dış ünitesi

Platform üstü vinç kabininin ısınan suyu soğutma amaçlı kullanılmaktadır. İçerisinde 3 radyatör 6 fan 1 su deposu ve 24V'luk pompa bulunmaktadır. Platform üstü vinç kabini için hazırlanan klimanın su çevrimini yapan kısmıdır.



Şekil 3.4. Platform üstü vinç kabini klima için elektrik panosu

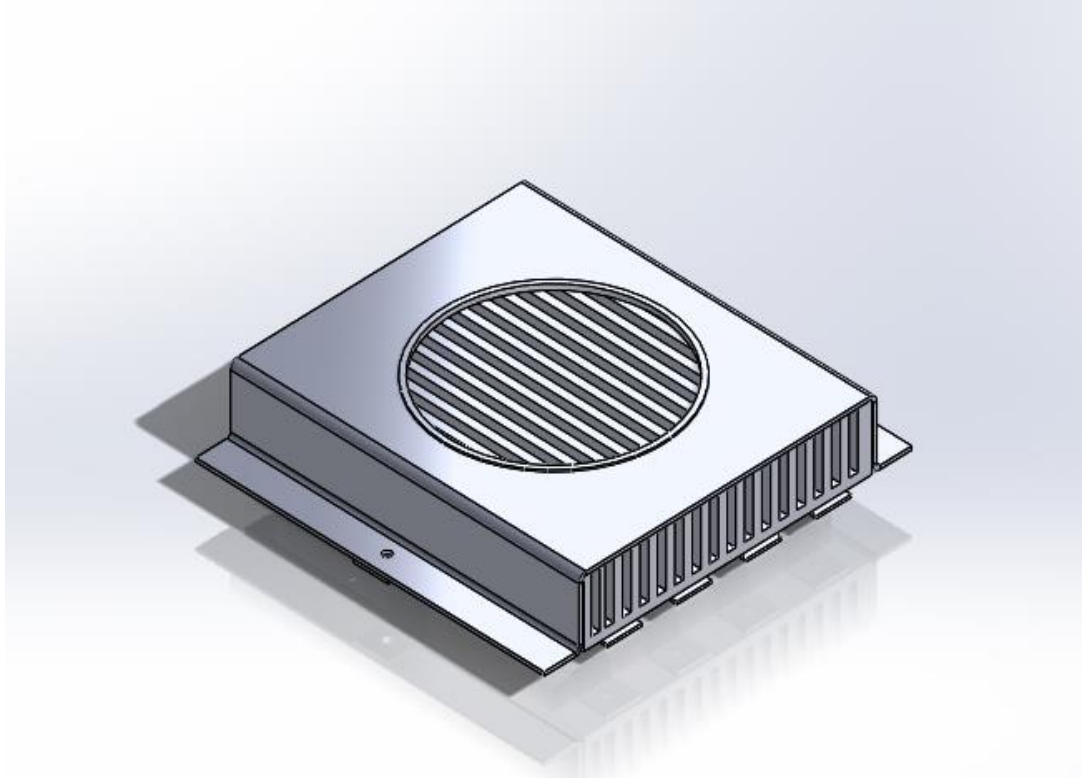
Elektrik panosu PCB tasarımı ile başlanmıştır. Termoelektrik modül akımlarını tersleyebilmek için mosfet transistör kullanılmıştır. Elektrik panosu içerisinde arduino nano, mosfet transistör, sıcaklık, sensörü bağlantıları bağlantıları için kart tasarımı yapılarak bütün elektriksel bağlantılar bir ünite içerisinde toplanmıştır. Termoelektrik modüle gelen güçler röle yardımı ile hem ısıtma hem de soğutma işlemini gerçekleştirilmektedir. Elektrik panosu ile vincin iç kısmındaki sıcaklık kontrol paneli ayarlanmaktadır.



Şekil 3.5. Platform üstü vinç kabini için kontrol kutusu

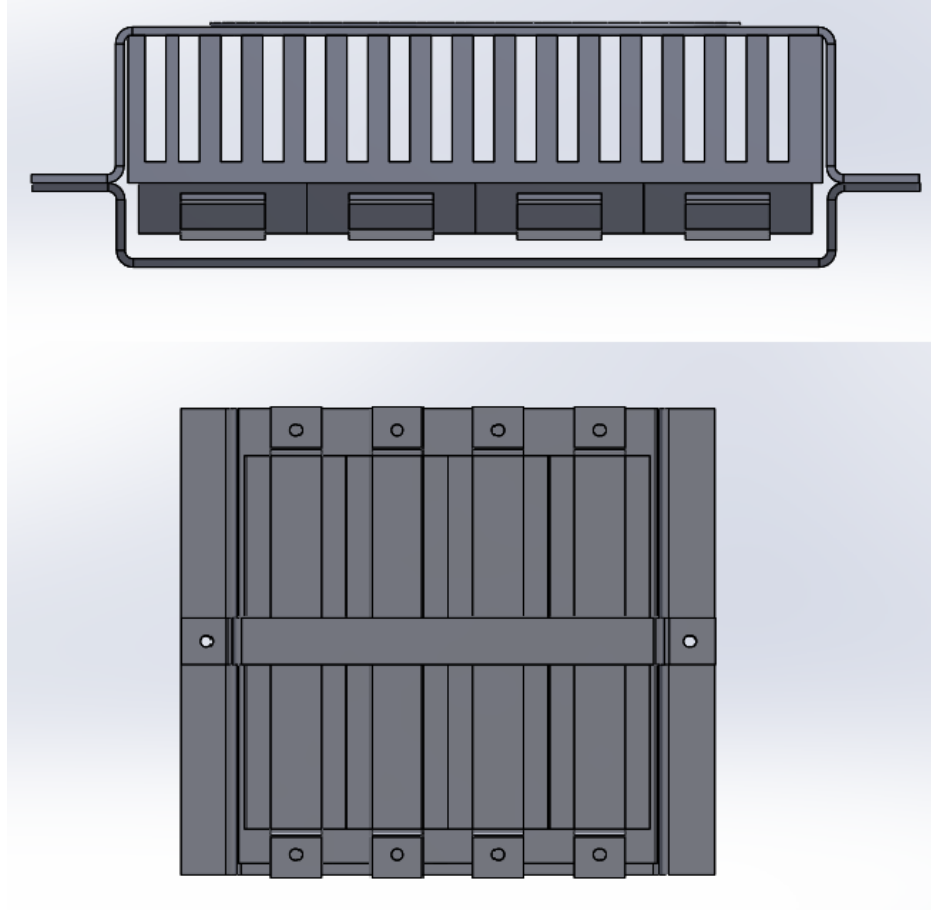
Kontrol kutusu tasarımında arduino kartı kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı ölçmek için Dallas18b20 kullanılmıştır. Buradan aldığımız verilerle ve kullanıcının belirlediği bilgileri değerlendirerek röleler vasıtasıyla termoelektrik modüllere enerji yollayarak yaz/kış modunu aktif hale getirir.

Yapılan programlama ile kontrol ünitesindeki butonlar ile yaz modu kış modu sıcaklık arttır azalt ve fan devrini ayarlayabilmekteyiz.



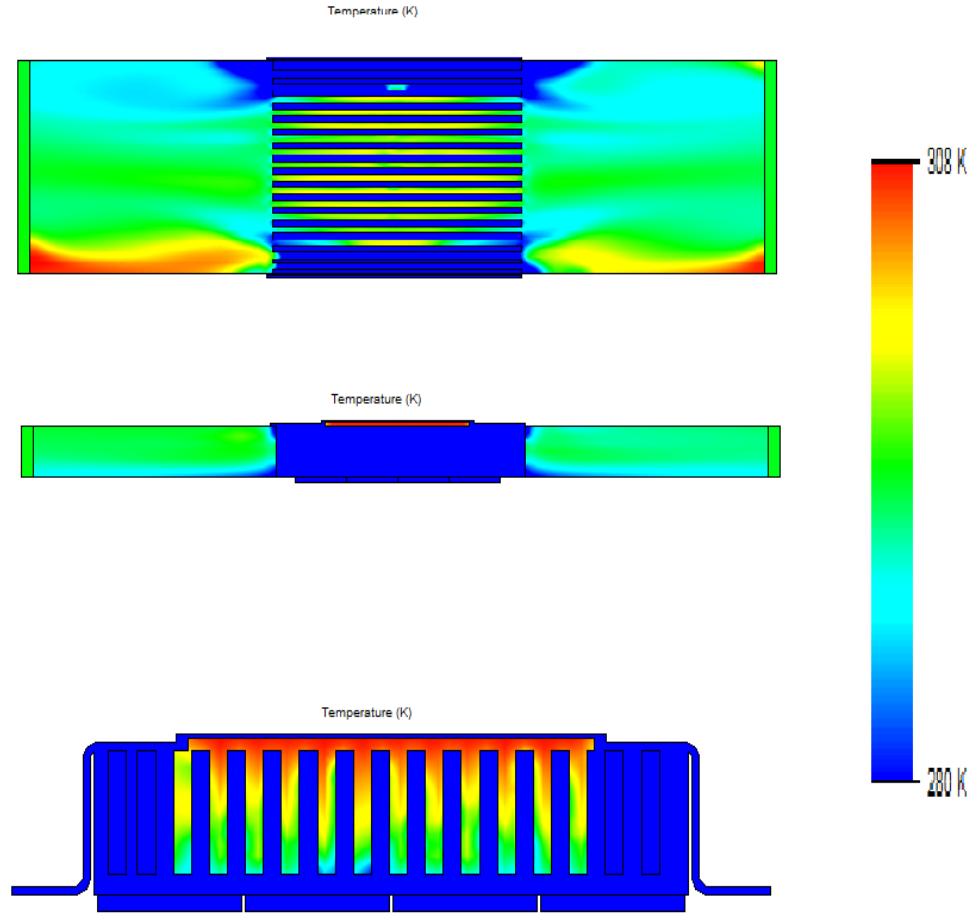
Şekil 3.6. İlk prototip çalışması kare klima izometrik görüntüsü

Hazırlanan ilk prototipte üst kısımda bulunan çember şeklindeki kesilmiş olan bölgeye fan takılacaktır. Termoelektrik modül yardımı ile soğuyan ya da ısınan alüminyum bloktaki ısının fan yardımı ile vinç kabinine aktarılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.7. İlk prototip çalışması kare klima yan ve alt görüntüsü

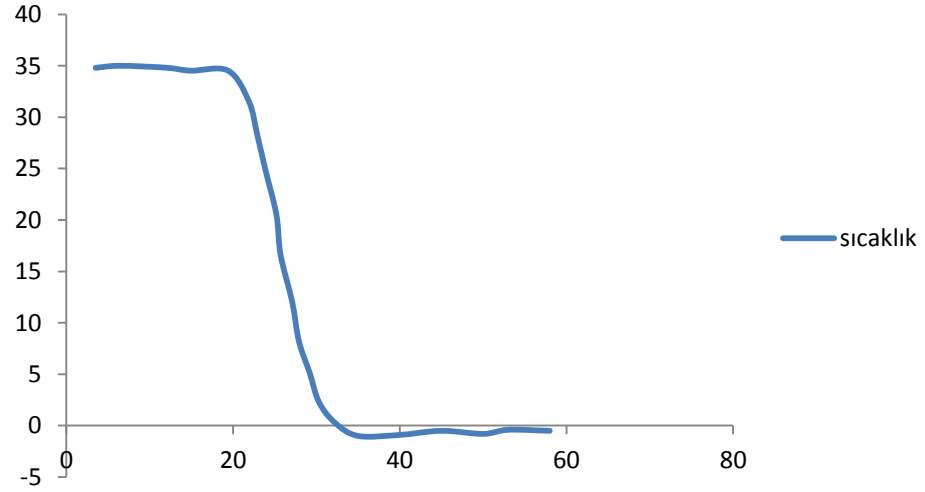
İlk prototip 16 adet termoelektrik modül, 4 adet su bloğu ve 1 adet fan ile montaj edilip gerçek çevre şartlarında test edilmiştir.



Şekil 3.8. İlk prototip için yapılan analiz çalışması soğutma (kare)

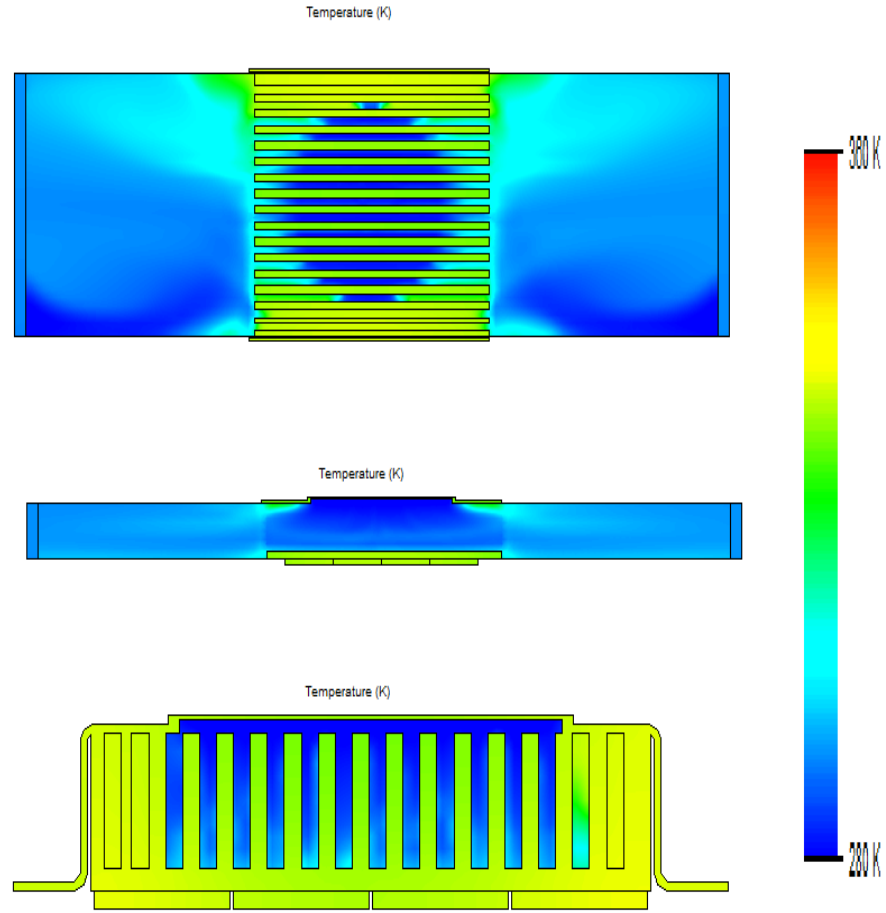
Kare profil analiz çalışmasında ortamdan fan yardımı ile alınan havanın soğutulan alüminyuma teması ile havayı soğutarak içeriye gönderdiği gözlemlenmektedir.

Çizelge 3.1. Kare prototip için soğutma grafiği (°C, dk)



Çizelge 3.1.'de görüldüğü gibi kare prototipin soğutma performansı görülmektedir. Kare prototip dikdörtgen prototipe göre daha düşük derecelere soğumasına rağmen fan çalışmasıyla kabin içerisindeki hava temasının başlaması ile soğutma performansının dikdörtgen prototipe göre daha yavaş olduğu görülmektedir. Buda tezimizin ilk hipotezi olan soğuyan alüminyum blokta havanın daha fazla kalmasını sağlayarak türbülansı arttırarak havanın alüminyum bloktaki daha fazla zaman geçirmesini sağlamak soğutma performansını olumlu yönde etkilediği gözlemlenmektedir.

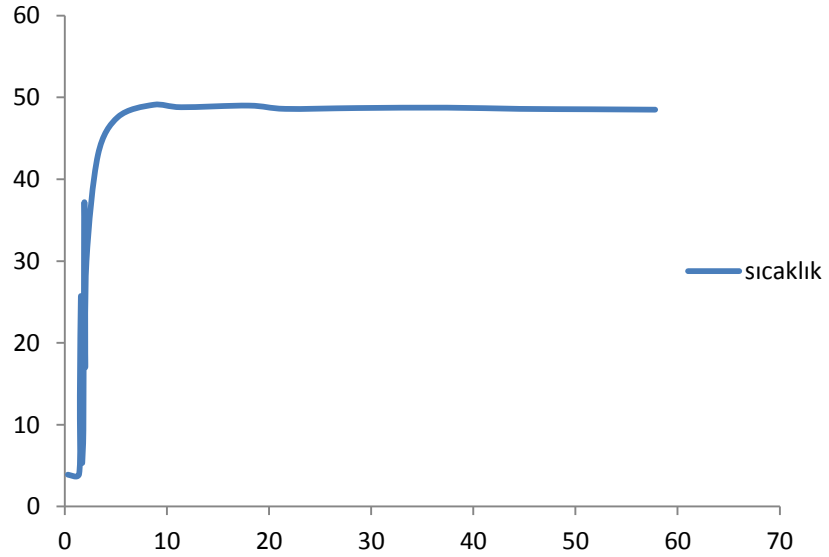




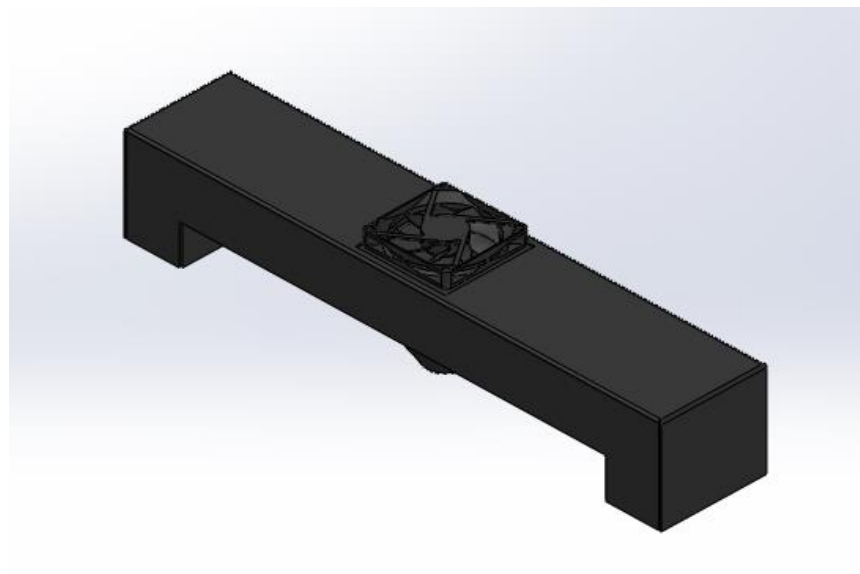
Şekil 3.9. İlk prototip için yapılan analiz çalışması ısıtma (kare)

Kare profil analiz çalışmasında termoelektrik modüllerin ısıttığı alüminyum fan yardımı ortamdaki havanın ve alüminyumun ısınarak tekrardan ortama çıktığı gözlemlenmektedir. Bununla beraber iki prototipte de ısıtma başarı kriterlerinde bir problem olmadığı gözlemlenmektedir.

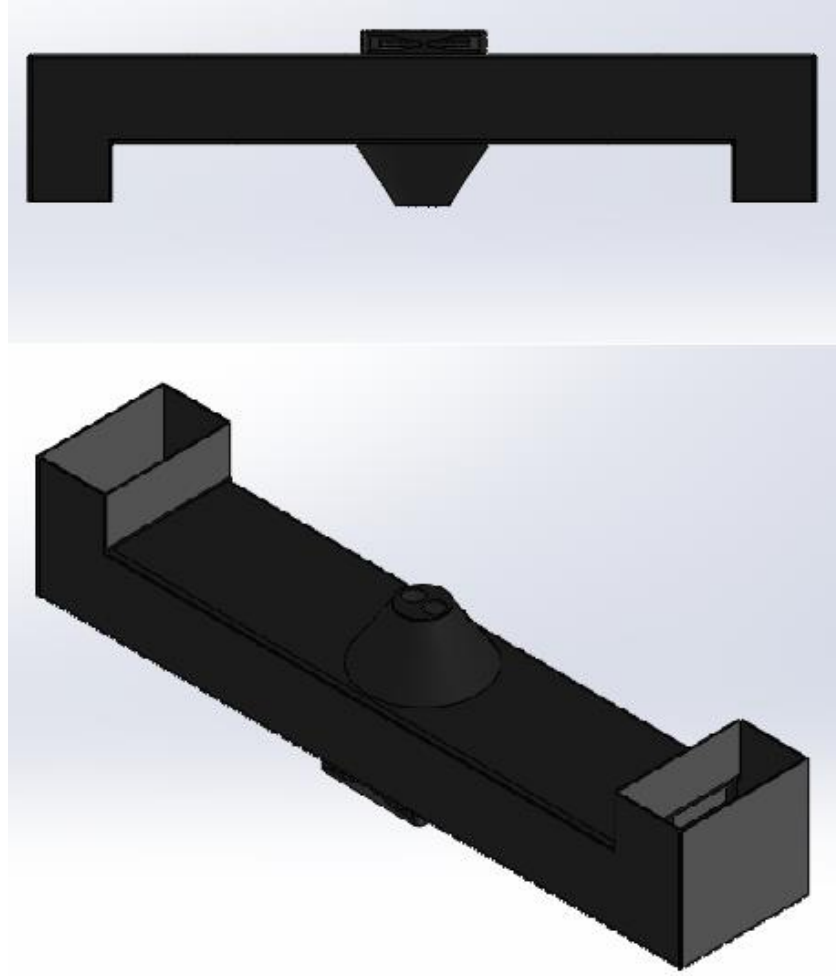
Çizelge 3.2. Kare prototip için ısıtma grafiği (°C, dk)



Kare prototip ısıtma eğrisinde ise kare prototipin içerisindeki alimünyum bloğun ısı sığasının 5 dakika içerisinde hızlı dolması ile platform üstü vinç kabinine istenilen başarı kriterinde ortam sıcaklığına getirdiği gözlemlenmiştir.

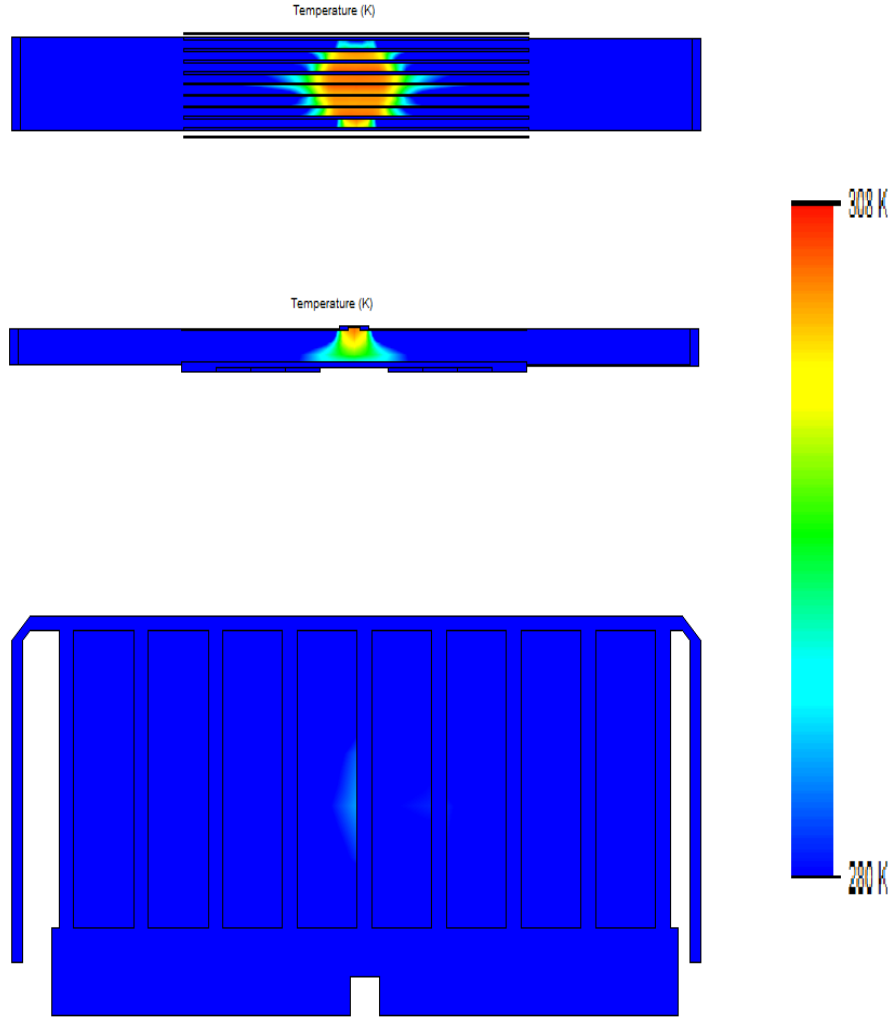


Şekil 3.10. İkinci prototip çalışması dikdörtgen klima izometrik görüntüsü



Şekil 3.11. İkinci prototip çalışması dikdörtgen klima yan ve alt görüntüsü

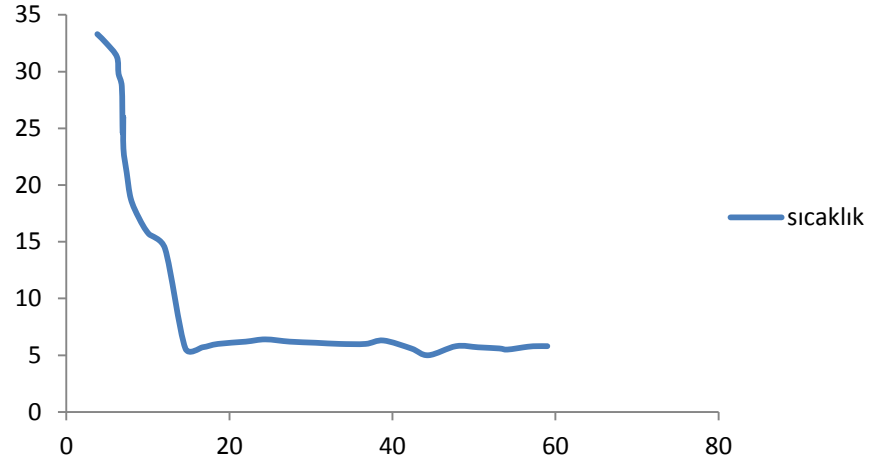
İlk prototip gibi ikinci klima prototipinde de 16 adet termoelektrik modül, 4 adet su bloğu ve 1 adet fan ile montaj edilip gerçek çevre şartlarında test edilmiştir. Dikdörtgen prototipin üst bölgesinden aldığı havayı sağ ve sol kulakçıklardan vinç kabinine yollarken daha fazla alüminyum blokta tutarak soğumaya olumlu katkı sağladığı gözlemlenmektedir



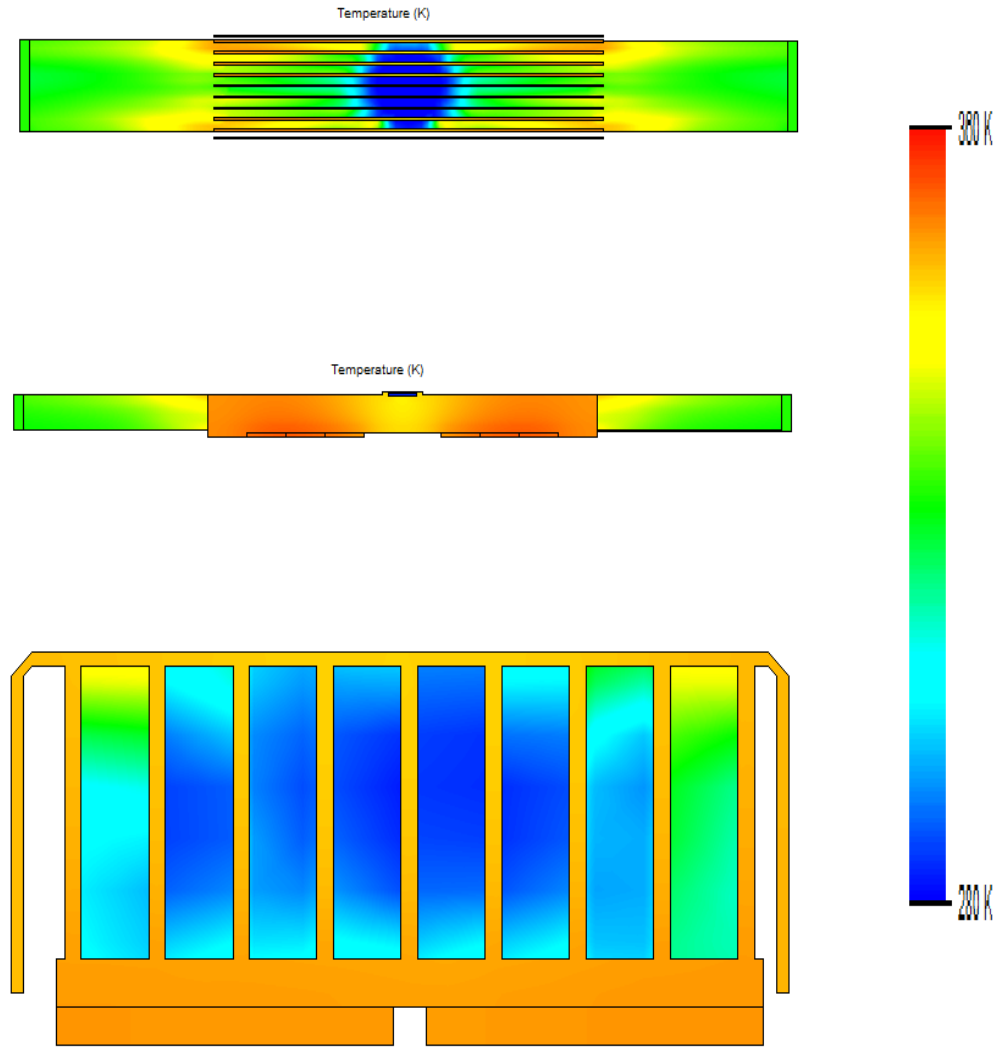
Şekil 3.12.İkinci prototip için yapılan analiz çalışması soğutma (dikdörtgen)

Dikdörtgen profil analiz çalışmasında ortamdan fan yardımı ile alınan havanın soğutulan alüminyuma temasının artması daha iyi havayı soğutarak içeriye gönderdiği gözlemlenmektedir. Dikdörtgen prototipte soğumanın ortalama 5 derecelerde olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 3.3. Dikdörtgen prototip için soğutma grafiği (°C, dk)



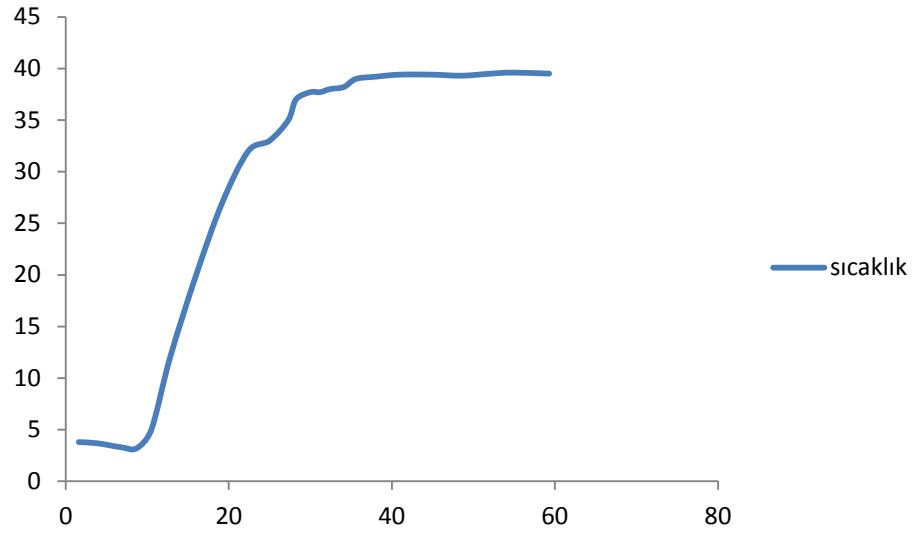
Bu çizelgeden de görüldüğü üzere dikdörtgen prototipin yüzey alanı fazla olduğundan ortamdan çektiği hava soğuk alüminyum blokta daha uzun süre kalarak platform üstü kabin kapalı hacmine yayıldığı ve kare prototipe göre daha hızlı soğuttuğu anlaşılmaktadır. Hava akışının türbülanslı bir şekilde gerçekleşerek içerde kalması 5 derecelik bir soğutma sıcaklığı için 17 dakikalık bir soğutma kazancı olduğu görülmektedir.



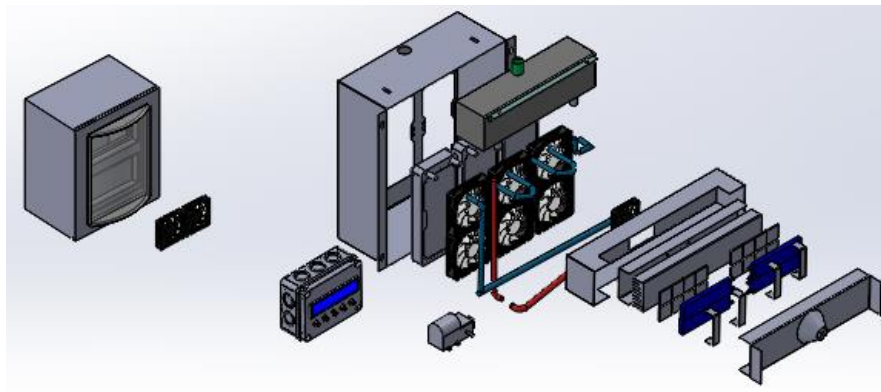
.Şekil 3.13. İkinci prototip için yapılan analiz çalışması ısıtma(dikdörtgen)

Dikdörtgen profil analiz çalışmasında termoelektrik modüllerin ısıttığı alüminyum fan yardımı ile içeriye ısıttığı gözlemlenmektedir. Kare prototipte olduğu gibi dikdörtgen prototipte de ısıtma başarı kriterleri olan 4 derece dış ortam sıcaklığından 22 derece ısı konfor şartlarına uygun bir ısıtma yapabildiği gözlemlenmektedir.

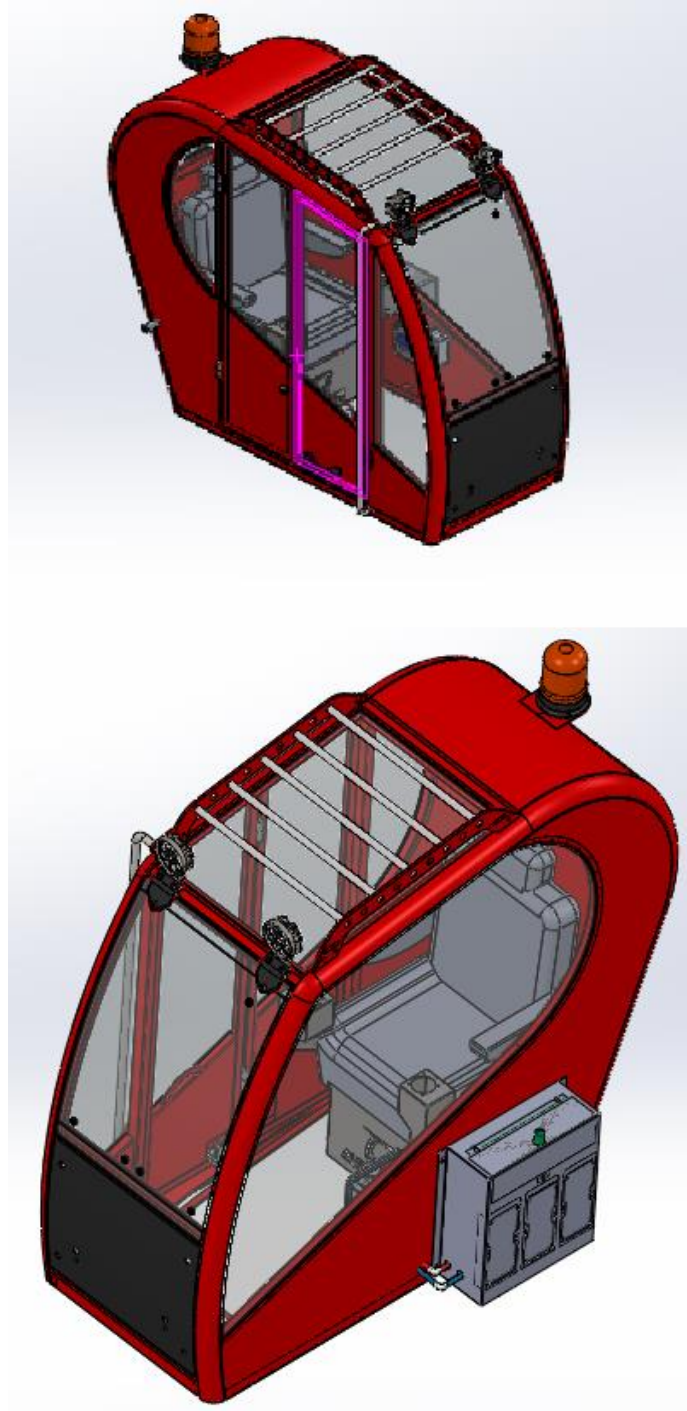
Çizelge 3.4. Dikdörtgen prototip için ısıtma grafiği (°C, dk)



Bu çizelgeden de görüldüğü üzere dikdörtgen prototipin yüzey alanı fazla olduğundan eş sayıda olan modüller alüminyum bloğu daha geç ısıtmaktadır. Ama istenilen sıcaklık bu tezdeki başarı kriteri 22 derece olduğundan 15 ila 20 dakika arasında kabin hacmindeki havayı istenilen sıcaklığa çıkarabildiği görülmektedir.



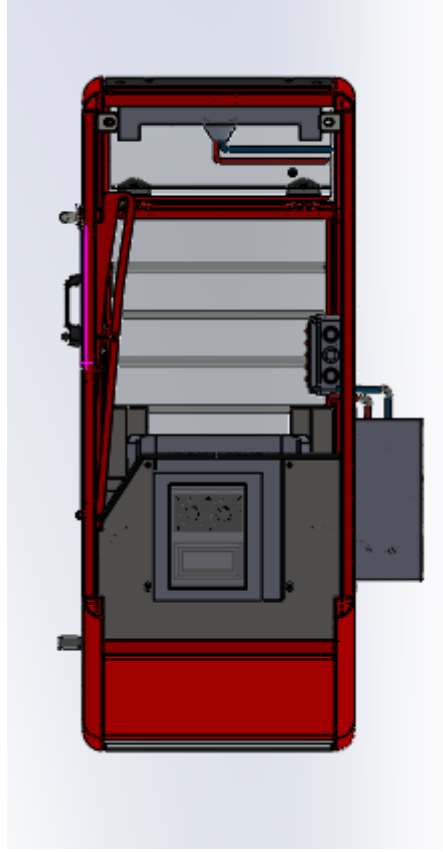
Şekil 3.14. Klima prototip patlatma görüntüsü



Şekil 3.15. Platform üstü vinç kabinine klimanın parçalarının montaj görünümü

Vinç kabin çiziminde görüldüğü gibi prototipimiz 4 ana parçadan oluşmaktadır. İç ünite, dış ünite, elektrik panosu ve kontrol kutusu olarak dört ana parçadan oluşmaktadır. Üst tarafta kontrol panosunun ve dış ünitenin, alt tarafta ise iç ünitenin ve elektrik panosunun montajı görülmektedir.





Şekil 3.16. Platform üstü vinç kabinine klimanın parçalarının montaj görünümü

## BÖLÜM 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tezime başlarken ilk olarak literatür taraması, araştırması ve ön fizibilite çalışmalarıyla termoelektrik soğutma yöntemi uygulanması ve kontrolü seçilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında ilgili tez konusu ile bağlantılı akademik makaleler araştırılmıştır. Buradan elde edilen bilgilerle termoelektrik seçimi ve 2 farklı ısıtma soğutma sistemi tasarımı yapılmıştır. Termoelektrik modüller üzerinde oluşacak ısı farkının en hızlı ve en yüksek performanslı olabilmesi için Solidworks 2018 programın akış analiz kısmında termal analizler yapıldı. Bu analizler sonucunda yeterli modül 1,5 m<sup>3</sup> bir hacme sahip iş makinası kabinini, ısıtma modun da 4 derece dış ortam hava sıcaklığında 22 derecede, soğutma modun da ise dış ortam sıcaklığı 35 derece iken 23 derecede ısı konforu sağlayabilecek şekilde modül adeti ve yerleşme planı bulunmuş oldu.

Yerleşke planları belirlenen modüller yurt dışından sipariş ile geldiğinden ve çalışma performansları termoelektrik modülü gönderen şirketlerle uyumlu olup olmadığı anlaşılabilmesi için alüminyum blok, radyatör, fan, pompa ekipmanları ile bir test düzeneği kurulup en iyi performansta çalışan 16 modül termoelektrik modül kullanılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda prototiplerde (dikdörtgen ve kare) soğutma ve ısıtma performansı gerçek koşullar altında testlere maruz bırakıldı. Bu testlerde ve analizlerde görüldüğü gibi istenilen sıcaklık iki prototipte yeterli olduğu anlaşılmıştır. Soğurma performansı dikdörtgen prototipteki soğuyan alüminyum da daha fazla vakit geçirmesinden dolayı ortamdaki gelen hava daha hızlı soğuyarak platform üstü kabine yayıldığı anlaşılmıştır.

Bu prototip ve çalışmalardan anlaşılacağı bu uygulamaların klima ihtiyaı olan ama 360 derece dönebilme yeteneğinden dolayı klima borularının yerleştirilemediği platformlarda kullanılabilereği gözlemlenmiştir. Klimanın yan unsurlarından olan su deposu, radyatör fan uygulamaları hali hazırda mevcut olan binek araçlarda ortadan kalkabileereği üfleme ünitesinin de hali hazırda mevcut olan ızgaralardan fletilebileereği ve klima konseptine uygun olmayan araçlarında klimalarının olabileereği gözlemlenmektedir.

## KAYNAKÇA

- [1] Ültanır M. Ö., (1998) Türkiye Açısından Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yeri 21. Yüzyıla girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi, Tüsiad Raporu Yayın No:T/98-12/239, 1998, İstanbul, s. 15
- [2] Ahıska, R., Ciylan, B., Savaş, Y., Güler, İ. (2004) Standart termoelektrik modülün Z parametlerinin ölçülmesi için yeni yöntem ve yeni sistem, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 19, No: 4, Ankara, s. 467-473
- [3] Goldsmid, H.J., and R.W. Douglas. 1954. The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration. *British Journal of Applied Physics* 5(11):386.
- [4] Rowe, D.M. 2005. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [5] Metzger, T. and Huebener, R.P. 1999. Modelling and cooling behavior of Peltier cascades. *Cryogenics*, 39, 235-239
- [6] Usta, H. ve Kırmacı, V., "Termoelektrik etkiler ve soğutma etkinliğinin uygulanması", *Teknoloji*, 3 (4): 65-71 (2002).
- [7] Dişlitaş, S. ve Ahıska, R., "Jeotermal termoelektrik jeneratör", *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri*, 305-312 (2003).
- [8] İmadoğlu A.C (2003) Portatif buzdolabı projesi raporu Ankara 1-3s
- [9] Astrain, D., Vian, J.G. and Dominguez, M., "Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation", *Applied Thermal Engineering*, 23 (17): 2183-2200 (2003).
- [10] Chung, M., Miskovsky, N.M., Cutler, P.H., Kumar, N. and Patel, V., "Theoretical analysis of a field emission enhanced semiconductor thermoelectric cooler", *Solid-State Electronics*, 47 (10): 1745-1751 (2003).

- [11] Riffat, S.B. and Ma, Xiaoli., “Thermoelectrics: a review of present and potential applications”, *Applied Thermal Engineering*, 23 (8): 913-935 (2003).
- [12] Maneewan S, Khedari J, Zeghamati B and Hirunlabh J (2003) Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector, *Renewable Energy*, 29: 743-752
- [13] İnan, S., Kara, İ. ve Koyun, A., “Peltier termo elektrik soğutucu kullanılarak katı cisimlerin ısı iletim katsayısının ölçülmesine yönelik cihaz tasarımı, yapılması ve endüstriyel uygulaması”, 23. Fizik Kongresi, Muğla, 1276-1280 (2005).
- [14] Bulut, H., “Termoelektrik sistemleri”, *Soğutma Dünyası*, 31: 9-16 (2005). Yalçınkaya, G., “Termoelektrik modül ile soğutma ve deneysel elektrik üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 1-28 (1).
- [15] Atik, K. ve Çakır, H., “Doğrudan bağlantılı fotovoltaik soğutma sistemi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3 (3): 33-37 (2006).
- [16] Ceylan B and Yılmaz S (2006) Design of a thermoelectric module test system using a novel test method, *International Journal of Thermal Sciences*.
- [17] Min, G. and Rowe, D.M., “Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators”, *Applied Energy*, 83 (2): 133-152 (2006).
- [18] Ravich, Yu., Gordienko, A. 2007. A method for calculating the transient time of a multi-stage thermoelectric cooler, *Semiconductors*, Vol. 41, No. 1, pp. 110–114. MAIK Nauka/Interperiodica distributed exclusively by Springer Science+Business Media LLC
- [19] Yılmaz, S., “Termoelektrik modüllü soğutucuda farklı soğutma uygulamalarının sistem performansına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi”, *Teknoloji*, 11 (1): 39-44 (2008).
- [20] Yavuz, C. ve Yılmaz, S., “Kondenzasyonlu kurutma fırınında termoelektrik modüllü nem alma ünitesi uygulamasının deneysel olarak incelenmesi”, 10th International Combustion Symposium, Sakarya, 191-197 (2008).
- [21] Aruğaslan, E., “Termal elektrik kaynaklı kablosuz yüksek sıcaklık duyum devresi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 8-19 (2008).
- [22] Ahıska, R., Fidan, U. ve Dişlitaş, S., “Farklı sıcaklık kontrol sistemlerinin termoelektrik tıp kitinin performansına etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara, 23 (2): 441-447 (2008).

- [23] Aruğaslan, E., “Termal elektrik kaynaklı kablosuz yüksek sıcaklık duyum devresi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 8-19 (2008).
- [24] Atik, K., “Termoelektrik soğutucu tasarımında termoekonomik optimizasyon”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), Karabük, 1-3 (2009).
- [25] Cıylan, B. ve Yılmaz, S. “Design of a thermoelectric module test system using a novel test method”, *International Journal of Thermal Sciences*, 46 (7): 717-725 (2009).
- [26] Gür, S. ve Atik, K., “Yoğunlaştırıcı güneş kolektörleri ve termoelektrik jeneratörler kullanılarak elektrik üretimi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), Karabük, 2-4 (2009).
- [27] Yavuz, C., Özkaymak, M. ve Kaya, M., “Termoelektrik modüllü su soğutucusunda farklı hava debilerinin sistem performansına etkileri”, *New World Sciences Academy*, 5 (2): 131-143 (2010).
- [28] SHAN J., WU G., TIAN X. (2010). Study on large time-delay constant temperature control system based on TEC, *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*
- [29] Benjamin, D., Julien, R., Lingai, L. (2012). Optimization of thermoelectric heat pumps by operating condition management and heat exchanger design, *Energy Conversion and Management*, 60,125-133.
- [30] Gouws R., and Eilers, H., “A review on thermoelectric cooling modules:Installation design, performance and efficiency”, *Academicjournals, Scientific Research and Essays*, 8(12): 485-492 (2013).
- [31] 9S. . Riffat and X. Ma, “Thermoelectrics: a review of present and potential applications,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 913–935, Jun. 2003.
- [32] 12 B. I. Ismail and W. H. Ahmed, “Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology,” *Recent Patents on Electrical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 27–39, Nov. 2008.
- [33] 8C. Gould and N. Shamma, “A Review of Thermoelectric MEMS Devices for Micro-power Generation, Heating and Cooling Applications,” in *Micro Electronic and Mechanical Systems*, K. Takahata, Ed. InTech, 2009.
- [34] Albayrak, N., & Keçeciler, A. Termoelektrik malzeme ile su soğutma uygulaması. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (2015 Özel Sayısı), 165-172.

- [35] Vian, J.G., Astrain, D., Dominguez, M. (2001) Numerical Modelling and a Desing of a Thermoelectric Dehumidifier, Applied Thermal Engineering, 22 (2002) Madrid, pp. 407-422
- [36] Minnich, A. J., Dresselhaus, M. S., Ren, Z. F., and Chen, G., "Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects", Energy & Environmental Science, 2 (5): 466 (2009).
- [37] Borup, K. A., de Boor, J., Wang, H., Drymiotis, F., Gascoin, F., Shi, X., Chen, L., Fedorov, M. I., Müller, E., Iversen, B. B., and Snyder, G. J., "Measuring thermoelectric transport properties of materials", Energy Environ. Sci., 8 (2): 423–435 (2015).
- [38] "Thermoelectrics", TheColumbiaEncyclopedia, <http://www.bartleby.com/65/th/thermoel.html>, Erişim Tarihi: 07.08.2019
- [39] H. Goldsmid, Introduction to Thermoelectricity, Springer, 2010.
- [40] Hamid Elsheikh, M., Shnawah, D. A., Sabri, M. F. M., Said, S. B. M., Haji Hassan, M., Ali Bashir, M. B., and Mohamad, M., "A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 30: 337–355 (2014).77
- [41] Lee, G. W., Kim, J. Y., Athar, T., Kim, S. J., Seo, W. S., and Park, K., "Electrical conductivity and thermoelectric power studies of solution-combustion-processed  $\text{Ca}_{2.76}\text{Cu}_{0.24}\text{Co}_{409}$ ", Ceramics International, 39 (2): 1397–1402 (2013).
- [42] Goldsmid, H. J., "Introduction to Thermoelectricity", Springer, Berlin, 7, 14 (2010)
- [43] "Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano", CRC Press, Boca Raton, 1-3, 1-5, 2-5, 20-4 (2006).
- [44] Callister, W. and Rethwisch, D., "Materials Science and Engineering: An Introduction", 7th ed. Ed., John Wiley & Sons, Inc., United States Of America, 673, 728-730 (2007).
- [45] Snyder, G. J. and Toberer, E. S., "Complex thermoelectric materials", Nature Materials, 7 (2): 105–114 (2008).
- [46] May, A. F., Toberer, E. S., Saramat, A., and Snyder, G. J., "Characterization and analysis of thermoelectric transport in n-type  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16-x}\text{Ge}_{30+x}$ ", Physical Review B, 80 (12): 125205 (2009).

- [47] Fergus, J. W., "Oxide materials for high temperature thermoelectric energy conversion", *Journal Of The European Ceramic Society*, 32 (3): 525–540 (2012).
- [48] Dresselhaus, M. S., Chen, G., Ren, Z. F., Dresselhaus, G., Henry, a, and Fleurial, J.-P., "New composite thermoelectric materials for energy harvesting applications", *Journal Of The Minerals, Metals And Materials Society*, 61 (4): 86–90 (2009).
- [49] Sootsman, J. R., Chung, D. Y., and Kanatzidis, M. G., "New and old concepts in thermoelectric materials", *Angewandte Chemie - International Edition*, 48 (46): 8616–8639 (2009).
- [50] Josh Kimmel, "Thermoelectric Materials", *Physics 152, Special Topics Paper*, 1999.
- [51] Onaran, K. 1993. *Malzeme Bilimi*. Istanbul: Bilim Teknik Yayın Evi.
- [52] Hájovský R, Pieš M, Richtár L. Analysis of the appropriateness of the use of Peltier cells as energy sources. *Sensors*. 2016;16(6):760-772.
- [53] Adhikari K. Thermocouple: facts and theories. *Himalayan Physics*. 2017;6:10-14.
- [54] Riffat S, Ma X. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review. *International Journal of Energy Research*. 2004;28(9):753-768.
- [55] Yarıiletken alaşımlarının elektrik, termoelektrik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi. Doctoral Thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [56] Rowe, D.M. (1995) *Handbook of Thermoelectric*, CRC pres, (1995) London, pp. 595-687



## **ÖZGEÇMİŞ**

Burak PALA 28.07.1994'te Gölcük doğumludur. İlk, orta ve lise eğitimini Antalya'da tamamladı. 2013 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2017 yılında bitirdi. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Enerji Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı.

## EKLER

### EK 1: Termoelektrik modül 1 test sonucu

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	34,5	3,1
2	30,2	2,9
3	27,7	3
4	25	3
5	20,9	2,95
6	18	2,9
7	16,2	2,85
8	15,2	2,8
9	14	2,85
10	12,8	2,8
11	11	2,75
12	8	2,75
13	5,9	2,8
14	4,7	2,8
15	3,1	2,8
16	2	2,75
17	0	2,75
18	-1	2,7
19	-2,1	2,75
20	-3	2,7

**EK 2: Termoelektrik modül 2 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	32	2,7
3	29,9	3
4	26,1	2,9
5	20,1	2,95
6	17,5	2,75
7	15	2,7
8	13,7	2,8
9	12	2,85
10	11,5	2,75
11	10,1	2,75
12	7,9	2,8
13	5	2,7
14	4	2,7
15	3,5	2,85
16	1,5	2,8
17	0	2,8
18	-1	2,75
19	-2,4	2,7
20	-2,9	2,7

**EK 3: Termoelektrik modül 3 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35	3
2	30	2,9
3	27	3
4	24	2,95
5	20,9	2,9
6	18	2,95
7	16,2	2,85
8	15	2,85
9	14	2,85
10	12	2,8
11	10,1	2,75
12	7,9	2,75
13	6	2,8
14	4,8	2,8
15	3	2,8
16	1,8	2,75
17	-0,1	2,75
18	-1	2,7
19	-1,8	2,75
20	-2,8	2,7

**EK 4: Termoelektrik modül 4 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	31	2,9
3	28,1	3
4	25,5	2,95
5	20,5	2,95
6	17,9	2,9
7	16	2,85
8	14,9	2,8
9	13,8	2,85
10	11,8	2,8
11	10,8	2,75
12	8	2,75
13	5,9	2,8
14	4,5	2,85
15	3	2,8
16	1,7	2,85
17	0	2,75
18	-1,1	2,7
19	-2,1	2,75
20	-2,7	2,75

**EK 5: Termoelektrik modül 5 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35	3
2	30,5	3
3	26,5	3
4	22,8	2,9
5	19,4	2,9
6	17,4	2,9
7	15,6	2,85
8	14,2	2,85
9	12,9	2,85
10	11,7	2,85
11	10,3	2,8
12	8,9	2,8
13	7,2	2,8
14	6,1	2,8
15	5,6	2,78
16	3,9	2,75
17	2,7	2,75
18	0,5	2,7
19	-1,1	2,7
20	-2,7	2,7

**EK 6: Termoelektrik modül 6 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,3	3
2	30,9	2,95
3	28	3
4	27,9	2,7
5	25,5	2,85
6	20,5	2,8
7	17,9	2,75
8	15,5	2,7
9	13	2,8
10	10,9	2,8
11	8	2,75
12	5,5	2,85
13	3,9	2,85
14	2,5	2,7
15	1,7	2,8
16	1	2,7
17	0	2,75
18	-1	2,8
19	-2	2,7
20	-2,5	2,7

**EK 7: Termoelektrik modül 7 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	34	3
2	30,8	3
3	27,2	2,9
4	24,8	2,9
5	21	2,9
6	18,1	2,85
7	17	2,85
8	14,6	2,85
9	12,1	2,85
10	10,5	2,8
11	9,1	2,8
12	7,9	2,8
13	6,1	2,8
14	5	2,75
15	3,8	2,75
16	3	2,75
17	2,1	2,75
18	1,2	2,75
19	0,2	2,75
20	-1,9	2,75

**EK 8: Termoelektrik modül 8 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	31,9	2,9
3	28	3
4	26,5	2,95
5	21	2,7
6	17,9	2,75
7	15,5	2,8
8	14,5	2,85
9	10	2,85
10	8,9	2,7
11	7,6	2,9
12	5	2,9
13	4,5	2,75
14	4	2,8
15	2	2,85
16	1,4	2,7
17	0	2,7
18	-1	2,9
19	-1,5	2,8
20	-1,7	2,8

**EK 9: Termoelektrik modül 9 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	34,5	2,95
2	31,4	2,9
3	27,9	2,85
4	23,8	2,9
5	21	2,85
6	17,7	2,8
7	15,8	2,8
8	14	2,8
9	13,1	2,85
10	11,8	2,8
11	10,8	2,8
12	8,2	2,8
13	6,1	2,75
14	5,5	2,75
15	4,9	2,75
16	4,1	2,75
17	2,9	2,7
18	1,8	2,7
19	-0,5	2,7
20	-1,2	2,7

**EK 10: Termoelektrik modül 10 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	34,9	2,8
3	31	2,9
4	28,7	3
5	26	2,95
6	24,3	2,75
7	20	2,7
8	18,9	2,8
9	16,8	2,85
10	14	2,9
11	11,5	2,9
12	9,5	2,7
13	6,7	2,75
14	4	2,85
15	2,6	2,75
16	1,5	2,75
17	1	2,8
18	0	2,85
19	-0,5	2,75
20	-1	2,75

**EK 11: Termoelektrik modül 11 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	33	2,9
3	30,9	2,85
4	28	2,7
5	26,5	2,85
6	23,5	2,9
7	20,7	2,7
8	17	2,8
9	14,8	2,75
10	12,8	2,75
11	10	2,8
12	8,5	2,85
13	7,5	2,85
14	5	2,7
15	3,8	2,8
16	2,7	2,75
17	1	2,85
18	0,5	2,8
19	0	2,7
20	-1	2,7

**EK 12: Termoelektrik modül 12 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	30	2,95
3	28,9	2,9
4	27	2,75
5	24	2,75
6	20,6	2,8
7	18,5	2,95
8	17,5	2,7
9	14	2,85
10	12,8	2,85
11	10	2,7
12	8	2,95
13	6,5	2,85
14	5,5	2,7
15	3,9	2,7
16	2	2,85
17	1,7	2,8
18	1	2,7
19	-0,5	2,75
20	-1	2,7

**EK 13: Termoelektrik modül 13 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3,1
2	32	3
3	30,1	2,95
4	27,5	2,8
5	26	2,9
6	24,5	2,75
7	20,3	2,75
8	18	2,9
9	16,9	2,95
10	14,7	2,6
11	12	2,7
12	10,3	2,75
13	8	2,8
14	5,5	2,9
15	3,3	2,75
16	2	2,75
17	1	2,9
18	0,5	2,6
19	-1	2,75
20	-0,5	2,7



**EK 14: Termoelektrik modül 14 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,2	2,95
2	31	2,95
3	28,2	2,9
4	25	2,9
5	22,1	2,9
6	18,7	2,85
7	16	2,85
8	15	2,85
9	13,5	2,85
10	12,5	2,8
11	10	2,8
12	8,8	2,8
13	7,1	2,8
14	5	2,8
15	4,1	2,75
16	3,8	2,75
17	3	2,75
18	1,5	2,75
19	0,7	2,75
20	-0,5	2,75

**EK 15: Termoelektrik modül 15 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	30	2,7
3	28,9	3
4	25	2,9
5	23,5	2,95
6	22,5	2,95
7	20	2,8
8	17,9	2,75
9	16,5	2,75
10	13,7	2,8
11	10,9	2,95
12	7	2,85
13	5	2,75
14	4,5	2,7
15	3,5	2,7
16	2,7	2,8
17	2	2,85
18	1	2,7
19	0	2,7
20	-0,5	2,75

**EK 16: Termoelektrik modül 16 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	30	2,95
3	28,9	2,95
4	25	3
5	20	2,7
6	19,5	2,85
7	18	2,75
8	15,3	2,7
9	14	2,85
10	13,5	2,85
11	12,6	2,9
12	10	2,7
13	8,6	2,95
14	7	2,85
15	4,5	2,8
16	3,5	2,75
17	2,1	2,75
18	1	2,85
19	0,5	2,7
20	0	2,7

**EK 17: Termoelektrik modül 17 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35	3
2	32	2,95
3	28,4	2,9
4	23,9	2,9
5	20	2,85
6	18,2	2,8
7	16	2,8
8	14,7	2,8
9	13,4	2,85
10	12	2,8
11	11,1	2,8
12	8,2	2,8
13	6,6	2,8
14	5,5	2,8
15	4,9	2,8
16	4,1	2,75
17	3,4	2,75
18	2,9	2,75
19	1,5	2,7
20	0	2,7

**EK 18: Termoelektrik modül 18 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	34,5	2,95
2	31,4	2,9
3	27,9	2,85
4	24,1	2,9
5	22	2,9
6	19,1	2,8
7	17,5	2,8
8	15,9	2,8
9	14,1	2,85
10	11,9	2,85
11	10,7	2,8
12	8	2,8
13	6,7	2,75
14	5,9	2,75
15	5,1	2,75
16	4,5	2,75
17	3	2,75
18	2,3	2,75
19	1,7	2,75
20	0,5	2,75

**EK 19: Termoelektrik modül 19 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	34	2,9
3	32,5	2,7
4	30,5	2,85
5	28,9	2,8
6	26	2,9
7	24,5	2,85
8	23,5	2,75
9	20	2,7
10	19,7	2,7
11	16,8	2,85
12	14	2,8
13	12,5	2,75
14	11,5	2,7
15	9,7	2,8
16	7,9	2,8
17	6,5	2,75
18	3,9	2,75
19	2,5	2,7
20	1	2,7

**EK 20: Termoelektrik modül 20 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	34,8	3
2	30,2	2,9
3	28,1	3
4	24,2	2,95
5	21	2,9
6	18,6	2,95
7	16,2	2,85
8	15,9	2,85
9	13,8	2,85
10	12,9	2,8
11	10,8	2,75
12	9	2,75
13	7,9	2,8
14	7	2,8
15	6,4	2,8
16	5,2	2,75
17	4,1	2,75
18	2,9	2,7
19	1,9	2,75
20	1	2,7

**EK 21: Termoelektrik modül 21 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35,5	3
2	33,1	3
3	29,3	2,95
4	26,3	2,95
5	23	2,95
6	19,9	2,9
7	18,3	2,9
8	15,9	2,9
9	14,7	2,85
10	13,4	2,85
11	11,6	2,85
12	9,9	2,8
13	8	2,8
14	6,2	2,8
15	5,1	2,8
16	4,3	2,8
17	5,1	2,75
18	3,9	2,75
19	2,8	2,75
20	1	2,75

**EK 22: Termoelektrik modül 22 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	35	3
2	30,5	3
3	27,9	2,9
4	24	2,9
5	21,2	2,85
6	18,6	2,85
7	16	2,85
8	14,9	2,85
9	13,7	2,8
10	12,9	2,8
11	10,8	2,8
12	9	2,8
13	7,9	2,8
14	6,9	2,8
15	6,2	2,75
16	5,2	2,75
17	4,1	2,75
18	2,9	2,75
19	2	2,7
20	1	2,7

**EK 23: Termoelektrik modül 23 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	34	2,9
2	31	2,9
3	27,5	2,85
4	24	2,9
5	20	2,85
6	18	2,8
7	16	2,8
8	14,5	2,8
9	13,4	2,85
10	12	2,8
11	10,8	2,75
12	8,2	2,75
13	6,1	2,8
14	5,5	2,8
15	4,8	2,8
16	4	2,7
17	3,1	2,65
18	2,5	2,7
19	1,8	2,65
20	1,1	2,65

**EK 24: Termoelektrik modül 24 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	34,7	2,95
2	30,8	2,95
3	28,2	2,9
4	25,5	2,9
5	22,7	2,9
6	18,7	2,85
7	17	2,85
8	15,1	2,85
9	13	2,85
10	12,5	2,8
11	10,3	2,8
12	9	2,8
13	7,2	2,8
14	5,9	2,8
15	4,9	2,75
16	4,3	2,75
17	3,7	2,75
18	3	2,75
19	2,2	2,75
20	1,5	2,75

**EK 25: Termoelektrik modül 25 test sonucu**

Zaman (dk)	Sıcaklık (K)	Elektrik Akımı (A)
1	34,7	2,95
2	30,8	2,95
3	28,2	2,9
4	25,5	2,9
5	22,7	2,9
6	18,7	2,85
7	17	2,85
8	15,1	2,85
9	13	2,85
10	12,5	2,8
11	10,3	2,8
12	9	2,8
13	7,2	2,8
14	5,9	2,8
15	4,9	2,75
16	4,3	2,75
17	3,7	2,75
18	3	2,75
19	2,2	2,75
20	1,5	2,75