

**T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TERMOELEKTRİK MODÜL İÇİ İLERİ MÜHENDİSLİK  
MALZEMELERİNİN TERMOELEKTRİK MODÜLÜN TERMAL  
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bahadır BOZKURT**

**Makine Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2020**

**T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TERMOELEKTRİK MODÜL İÇİ İLERİ MÜHENDİSLİK  
MALZEMELERİNİN TERMOELEKTRİK MODÜLÜN TERMAL  
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bahadır BOZKURT  
(181222002)**

**Makine Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL**

**HAZİRAN 2020**



T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi**

Enstitümüz Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı 181222002 numaralı öğrencisi **Bahadır BOZKURT**'un "Termoelektrik Modül İçi İleri Mühendislik Malzemelerinin Termoelektrik Modülün Termal Davranışa Etkisinin Deneysel ve Sayısal Analizi" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 03/06/2020 tarih ve 2020/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından *sybilif.s* ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak *kabul* edilmiştir.

**Öğretim Üyesi Adı Soyadı**

**İmzası**

Tez Savunma Tarihi : .../.../.....

- 1) Tez Danışmanı: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL .....
- 2) Jüri Üyesi : Prof. Dr. İsmail Cem PARMAKSIZOĞLU .....
- 3) Jüri Üyesi : Doç. Dr. Cem Bülent ÜSTÜNDAĞ .....

**Not:** Öğrencinin Tez savunmasında **Başarılı** olması halinde bu form **imzalanacaktır**. Aksi halde geçersizdir.

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Termoelektrik Modül İçi İleri Mühendislik Malzemelerinin Termoelektrik Modülün Termal Davranışına Etkisinin Deneysel ve Sayısal Analizi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (01/06/2020)

Bahadır BOZKURT

## **ÖNSÖZ**

Tezimi hazırlarken yol gösteren, ilgilenen ve tez danışmanlığımı yapan İstanbul Gedik Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Savaş DİLİBAL hocama, İstanbul Arel Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Yeşim Müge ŞAHİN hocama, bana bütün ömrüm boyunca destek veren, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili Annem ve Babama, her zaman yanımda olan eşim başta olmak üzere tüm aileme ve benim günlere gelmeme katkısı olan tüm dostlarıma teşekkürü borç bilirim.

**Haziran 2020**

**Bahadır BOZKURT**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
KISALTMALAR .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>17</b>
1.1 Çalışma Konusu .....	17
1.2 Tezin Amacı .....	18
1.3 Literatür Araştırması .....	18
<b>2. KURAMSAL ÇERÇEVE.....</b>	<b>24</b>
2.1 TE Çalışma Prensipleri.....	24
2.2 TE Malzemelerin Sınıflandırılması .....	26
2.2.1 Yarı iletkenler .....	26
2.2.2 Seramikler.....	27
2.2.3 Polimerler .....	28
2.3 TEM'lerin Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırılması .....	29
2.3.1 Uzak endüstrisinde kullanımı .....	29
2.3.2 Endüstriyel kullanımı.....	29
2.3.3 Biyomedikal ve tıp alanlarında .....	30
2.3.4 Genel kullanım.....	30
2.4 TEM'lerin Avantajları ve Dezavantajları .....	30
2.5 TEM'lerde Yalıtım Amaçlı Kullanılan İleri Mühendislik Malzemeleri .....	31
2.5.1 Epoksi reçine .....	32
2.5.2 Hidroksiapatit (HAp).....	34
2.5.3 Nano biyosilika aerojel (NBA).....	35
2.6 TEM'lerin Üretim Süreçleri .....	37
<b>3. MATERYAL METOD .....</b>	<b>39</b>
3.1 Soğutucu Taşıma Kutusunun Tasarlanması ve Optimize Edilmesi .....	40
3.1.1 Fiziksel parametrelerin belirlenmesi.....	40
3.1.2 Bilgisayar ortamında 3 boyutlu model oluşturulması.....	46
3.1.3 Oluşturulan 3 boyutlu modelin termal analizlerinin gerçekleştirilmesi ....	47
3.2 TEC'lerin Farklı İleri Mühendislik Malzemeleriyle Yalıtım İşlemlerinin Gerçekleştirilmesi.....	48
3.2.1 Standart hava boşluklu TEC .....	50
3.2.2 Vakum ortamı sağlanan TEC.....	50
3.2.3 Epoksi reçine ile doldurulan TEC.....	50
3.2.4 HAp ile doldurulan TEC.....	52
3.2.5 Nano HAp ile doldurulan TEC .....	52
3.2.6 NBA ile doldurulan TEC .....	53
3.3 Deney Düzenineğinin Oluşturulması .....	54

3.3.1 TEC ve soğutucu grubu .....	55
3.3.2 Dijital termometre ve higrometre .....	56
3.3.3 Kapalı çevrim sıcaklık kontrolörü .....	58
3.3.4 Enerjimetre .....	58
3.3.5 Güç kaynağı .....	59
3.3.6 NTC termistör grubu.....	60
3.3.7 Arduino Uno ve MegunoLink programı .....	63
3.4 TEC'in Morfolojik ve Elemental Analizlerinin Gerçekleştirilmesi .....	64
<b>4. ANALİZ VE DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>65</b>
4.1 Termal Analiz Sonuçları.....	65
4.2 Elemental ve Morfolojik Analiz Sonuçları.....	72
4.2.1 p-tipi yarı iletken morfolojik görüntüler ve EDS sonuçları.....	73
4.2.2 n-tipi yarı iletken morfolojik görüntüler ve EDS sonuçları.....	74
4.3 Farklı Deney Düzenekleri İçin Sıcaklık Ölçüm Sonuçları .....	77
4.4 Farklı Deney Düzeneklerinde ZT ve COP Değerlerinin Hesaplanması.....	85
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>87</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>92</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>98</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>117</b>

## KISALTMALAR

<b>A</b>	: Malzemenin Toplam Yüzey Alanı
<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>AC</b>	: Alternatif Akım
<b><math>\alpha</math></b>	: Seebeck Katsayısı
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alümina
<b><math>\alpha_{dış}</math></b>	: İç Ortam Hava Isı Taşınım Katsayısı
<b><math>\alpha_{iç}</math></b>	: Dış Ortam Hava Isı Taşınım Katsayısı
<b>Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub></b>	: Bizmut Tellürid
<b>Ca</b>	: Kalsiyum
<b>CCF</b>	: Sürekli Karbon Fiber
<b>CNT</b>	: Karbon Nano Tüp
<b>COP</b>	: Carnot Verimi
<b>COP<sub>max</sub></b>	: TEC'in Maksimum Performans Katsayısı
<b>DC</b>	: Doğru Akım
<b><math>\Delta T</math></b>	: Sıcaklık Farkı
<b><math>\Delta V</math></b>	: Gerilim Farkı
<b>EDS</b>	: Enerji Saçınım Spektrometresi
<b><math>\eta_{max}</math></b>	: TEG'in Maksimum Verimi
<b>FEG-SEM</b>	: Alan Emisyon Tabancalı Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>H</b>	: Duvar Durum Katsayısı
<b>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></b>	: Ortofosforik Asit
<b>HAp</b>	: Hidroksiapatit
<b>I</b>	: Akım
<b>I<sub>max</sub></b>	: Maksimum Çekilen Akım Miktarı
<b>k<sub>ort</sub></b>	: Malzemeler Arası Isı İletim Katsayısı
<b><math>\kappa</math></b>	: Isı İletkenliği
<b><i>l</i></b>	: Malzeme Kalınlığı
<b><i>l<sub>ç</sub></i></b>	: Soğutucu Taşıma Kutusunun Açılan Kısımlarının Çevre Uzunluğu
<b><math>\lambda</math></b>	: Malzemenin İletkenlik Katsayısı



$l_{\zeta}$	: Soğutucu Taşıma Kutusunun Açılan Kısımlarının Çevre Uzunluğu
<b>NBA</b>	: Nano Biyosilika Aerojel
<b>NTC</b>	: Direncin Negatif Sıcaklık Katsayısı
$Q_A$	: Fandan Gelen Isı
$Q_F$	: Yüksek Sıcaklıktaki Bölgeden Düşük Sıcaklıktaki Bölgeye Geçen Isı miktarı
$Q_{FT}$	: Soğutucu Taşıma Kutusunun Yüzeylerinden Yaşanan Isı Kaybı
$Q_{F_y}$	: Yan Yüzeyler Isı Kaybı
$Q_{Fs}$	: Fandan Gelen Isı Miktarı
$Q_s$	: Hava sızıntısı ısı kaybı
$Q_T$	: Soğutucu Taşıma Kutusunun Toplam Isı Kaybı
$Q_c$	: Isıl Yük
$Q_{max}$	: Maksimum Çekilen Isı Miktarı
<b>R</b>	: Soğutucu Taşıma Kutusunun Durum Katsayısı
$\sigma$	: Elektrik İletkenliği
<b><math>\Sigma a</math></b>	: Hava Sızıntısı Katsayısı
<b>T</b>	: Sıcaklık
$T_C$	: Soğuk Yüzey Sıcaklığı
$T_H$	: Sıcak Yüzey Sıcaklığı
<b><math>T_R</math></b>	: Rejim Sıcaklığı
$t_R$	: Rejim Sıcaklığına Ulaşma Süresi
<b>TE</b>	: Termoelektrik
<b>TEC</b>	: Termoelektrik Soğutucu
<b>TEG</b>	: Termoelektrik Jeneratör
<b>TEM</b>	: Termoelektrik Modül
<b>XPS</b>	: Stryofoam
$V_{max}$	: Maksimum Gerilim
<b>YÖK</b>	: Yüksek Öğretim Kurumu
$Z_f$	: Hata payı katsayısı
<b>ZT</b>	: Enerji Dönüşüm Verimliliği

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1 : TEC-12706 Teknik Özellikleri.....	43
Çizelge 3.2 : Termal Analiz Sınır Değerleri.....	47
Çizelge 3.3 : Düzeneklerde kullanılan ileri mühendislik malzemelerinin.....	49
Çizelge 3.4 : Çift Bileşenli İnce Döküm Epoksi Reçinesi Teknik Özellikleri .....	51
Çizelge 3.5 : HAp Teknik Özellikleri.....	52
Çizelge 3.6 : Nano HAp Teknik Özellikleri .....	53
Çizelge 3.7 : NBA Teknik Özellikleri .....	53
Çizelge 3.8 : Termometre ve Higrometre Ölçüm Cihazı Teknik Özellikleri .....	57
Çizelge 3.9 : Kapalı Çevrim Sıcaklık Kontrolörü Teknik Özellikleri.....	58
Çizelge 3.10 : Enerjimetre Teknik Özellikleri.....	59
Çizelge 3.11 : Güç Kaynağı Teknik Özellikleri .....	60
Çizelge 3.12 : NTC Termistör Teknik Özellikleri.....	61
Çizelge 3.13 : Arduino Uno Teknik Özellikleri .....	64
Çizelge 4.1 : Deney Düzeneklerinin Sıcak ve Soğuk Yüzey Rejim Sıcaklıkları ( $T_{R1}$ - $T_{R3}$ ) rejim sıcaklığına ulaşma süreleri ( $t_R$ ) toplam sıcaklık değişimi ( $\Delta T$ ) çizelgesi .....	83
Çizelge 4.2 : Tüm Deney Düzenekleri İçin $T_H$ - $T_C$ , Elektriksel Güç, COP.....	86

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 : TEG ve TEC Gösterimi.....	25
Şekil 2.2 : Epoksi Reçine Fonksiyonel Grup Gösterimi.....	32
Şekil 2.3 : Digliserid eter bisfenol-A'nın kimyasal yapısı .....	34
Şekil 2.4 : HAp sentez aşamaları .....	35
Şekil 2.5 : Biosilika Aerojel Üretim Basamakları .....	37
Şekil 2.6 : TEM üretimi süreç şeması.....	38
Şekil 3.1 : TEC'in $Q_c$ - $\Delta T$ Performans Eğrileri Grafiği .....	44
Şekil 3.2 : TEC'in $V$ - $\Delta T$ Performans Eğrileri Grafiği.....	45
Şekil 3.3 : TEC'in $Q_c$ - $V$ Performans Eğrileri Grafiği .....	45
Şekil 3.4 : TEC'in 3 Boyutlu Model ve Boyutları.....	46
Şekil 3.5 : TEM p-n Çiftinin 3 Boyutlu ve Termal 3 Boyutlu Görünümü .....	47
Şekil 3.6 : TEM p-n Çifti 3 Boyutlu Çizimi ve p-n Çifti 3 Boyutlu Termal Analizi	48
Şekil 3.7 : TEC'in İçerisindeki Isı Transferleri .....	49
Şekil 3.8 : Havanın Termal İletkenlik Grafiği .....	50
Şekil 3.9 : Standart TEC ile Epoksi Enjekte Edilen TEC'in 3 Boyutlu Gösterimi ...	51
Şekil 3.10 : Deney Düzenegi Bileşenleri.....	54
Şekil 3.11 : Soğutucu Ünite Grubu 3 Boyutlu Model Tasarımı .....	56
Şekil 3.12 : Termometre ve Higrometreye Sahip Ölçüm Cihazı.....	57
Şekil 3.13 : Kapalı Çevrim Sıcaklık Kontrolörü .....	58
Şekil 3.14 : Enerjimetre .....	59
Şekil 3.15 : Güç Kaynağı.....	60
Şekil 3.16 : NTC Termistör .....	61
Şekil 3.17 : 3 Boyutlu Kesit Model Üzerinde.....	62
Şekil 3.18 : 3 Boyutlu Kesit Model Üzerinde.....	63
Şekil 3.19 : Arduino Uno.....	63
Şekil 4.1 : D1 TEC'in Termal Analizi.....	65
Şekil 4.2 : D2 TEC'in Termal Analizi.....	65
Şekil 4.3 : D3 TEC'in Termal Analizi.....	66
Şekil 4.4 : D4 TEC'in Termal Analizi.....	66
Şekil 4.5 : D5 TEC'in Termal Analizi.....	67
Şekil 4.6 : D6 TEC'in Termal Analizi.....	67
Şekil 4.7 : Alüminyum Blok Eklenmiş D1 TEC'in Termal Analizi .....	68
Şekil 4.8 : Alüminyum Blok Eklenmiş D2 TEC'in Termal Analizi .....	68
Şekil 4.9 : Alüminyum Blok Eklenmiş D3 TEC'in Termal Analizi .....	69
Şekil 4.10 : Alüminyum Blok Eklenmiş D4 TEC'in Termal Analizi.....	69
Şekil 4.11 : Alüminyum Blok Eklenmiş D5 TEC'in Termal Analizi.....	70
Şekil 4.12 : Alüminyum Blok Eklenmiş D6 TEC'in Termal Analizi.....	71
Şekil 4.13 : Soğutucu Grubu ve TEC'in Termal Analiz Görüntüsü.....	72
Şekil 4.14 : p-n Çifti SEM Görüntüsü .....	73
Şekil 4.15 : p-tipi Yarı İletken FEG-SEM Görüntüsü .....	73
Şekil 4.16 : p-tipi Yarı İletken FEG-SEM EDS Ölçüm Noktası Görüntüsü .....	74
Şekil 4.17 : p-tipi Yarı İletkende Seçili Noktasal Bölgenin EDS Analiz Tablosu ....	74

Şekil 4.18 : n-tipi Yarı İletken SEM Görüntüsü .....	75
Şekil 4.19 : n-tipi Yarı İletken FEG-SEM EDS Görüntüsü .....	75
Şekil 4.20 : n-tipi Yarı İletkende Seçili Noktasal Bölgenin EDS Analiz Tablosu ....	76
Şekil 4.21 : TEC İçerisinde Bulunan p-tipi ve n-tipi Yarı İletkenlerin x1000 Büyütmeli Mikroskop Görüntüsü.....	76
Şekil 4.22 : D3 TEC'in Morfolojik İncelemesi .....	77
Şekil 4.23 : D1 0-500 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	77
Şekil 4.24 : D1 0-60 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	78
Şekil 4.25 : D3 0-60 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	79
Şekil 4.26 : D1 60-180 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	80
Şekil 4.27 : D2 60-180 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	81
Şekil 4.28 : D1 180-540 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği .....	82
Şekil 4.29 : Tüm Deneyle İçin T1 Sıcaklık-Zaman Grafiği .....	83
Şekil 4.30 : 60-180 s Aralığında D4T1 ve D5T1 Sıcaklık Zaman Grafiği.....	85
Şekil 4.31 : ZT Değeri- Zaman (s) Grafiği .....	87
Şekil 4.32 : Deney Düzeneklerinin ZT Değerleri.....	87
Şekil A.1 : p-tipi Yarı İletken EDS Sonuç Grafiği .....	98
Şekil A.2 : n-tipi Yarı İletken EDS Sonuç Grafiği .....	99
Şekil B.1 : D1 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	100
Şekil B.2 : D1 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	100
Şekil B.3 : D1 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	101
Şekil B.4 : D1 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	101
Şekil B.5 : D2 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	102
Şekil B.6 : D2 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	102
Şekil B.7 : D2 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	103
Şekil B.8 : D2 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	103
Şekil B.9 : D3 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	104
Şekil B.10 : D3 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	104
Şekil B.11 : D3 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	105
Şekil B.12 : D3 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	105
Şekil B.13 : D4 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	106
Şekil B.14 : D4 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	106
Şekil B.15 : D4 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	107
Şekil B.16 : D4 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	107
Şekil B.17 : D5 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	108
Şekil B.18 : D5 0-60 s aralığı sıcaklık zaman grafiği.....	108
Şekil B.19 : D5 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	109
Şekil B.20 : D5 180-500s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	109
Şekil B.21 : D6 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	110
Şekil B.22 : D6 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	110
Şekil B.23 : D6 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	111
Şekil B.24 : D6 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	111
Şekil B.25 : Tüm Deney Düzenekleri ve Tüm Termistörler 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	112
Şekil B.26 : Tüm Deney Düzenekleri T1-T3 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	112
Şekil B.27 : Tüm Deney Düzenekleri T1 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği	113
Şekil B.28 : Tüm Deney Düzenekleri T1 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği ..	113
Şekil B.29 : Tüm Deney Düzenekleri T1 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği .....	114

<b>Şekil B.30</b> : Tüm Deney Düzenekleri T1 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği	114
<b>Şekil B.31</b> : Tüm Deney Düzenekleri T3 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği	115
<b>Şekil B.32</b> : Tüm Deney Düzenekleri T3 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği ..	115
<b>Şekil B.33</b> : Tüm Deney Düzenekleri T3 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği	116

# TERMOELEKTRİK MODÜL İÇİ İLERİ MÜHENDİSLİK MALZEMELERİNİN TERMOELEKTRİK MODÜLÜN TERMAL DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ

## ÖZET

Mobil soğutma teknolojisinin önemli bir parçası haline gelen; aynı zamanda artık ısıdan elektrik enerjisi elde edilmesine imkan sağlayan termoelektrik modüllerin (TEM) kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Yeni ve daha verimli termoelektrik (TE) malzemelerin keşfiyle birlikte TEM'lerin performansında büyük artış yaşanmıştır. Ancak; sağlanan verimlilik artışı halen konvansiyonel sistemlerin verimliliğine ulaşamadığından, TEM'lerin kullanımı sınırlı düzeyde kalmaktadır.

TEM'ler konvansiyonel sistemlerden farklı olarak *Seebeck* ve *Peltier* prensiplerine göre çalışmaktadır. Tersinir olan bu sistem ile yüzeyler arası sıcaklık farkının elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve elektrik enerjisiyle yüzeyler arasında sıcaklık farkı yaratılması mümkün olmaktadır. TEM'lerin *Seebeck efekti* ile elektrik akımı oluşturmasında kullanılan modüllere termoelektrik jeneratör (TEG) ve *Peltier efekti* ile soğutma yapan modüllere ise termoelektrik soğutucu (TEC) adı verilmektedir.

TEC'lerin konvansiyonel sistemlerden birçok üstün özelliği mevcuttur. Bu özellikler; hareketli parça olmaması nedeniyle bakım gerektirmemesi ve uzun yıllar çalışabilmesi, çalışma sırasında doğaya zararlı soğutucu gazı ihtiyaç duymaması, yer çekimsiz ortamda çalışabilmesi olarak sıralanabilir. Ancak bu özelliklerine rağmen, düşük enerji dönüşüm verimlilikleri sebebiyle, TEC'lerin ticari kullanımı halen istenilen düzeye ulaşamamıştır.

Ticari kullanımlarda soğutma verimliliğinin artırılması amacıyla TEC'ler üzerine alüminyum bloklar yerleştirilmekte ve ısı transferi sağlayan yüzey alanları artırılmaktadır.

Şimdiye kadar gerçekleştirilen çalışmalarda, TEC'lerin yarı iletkenlerinin geliştirilmesi ve farklı tasarımlarla verimlilik artışı sağlanması konularına odaklanılmıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak; TEC'in yarı iletkenleri arasında farklı yalıtım ortamları oluşturularak, TEC'in çalışma mantığının tersi yönündeki ısı transferinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda TEC'in yarı iletkenlerinin bulunduğu hava boşluğunun yerini alabilecek farklı yalıtkan ileri mühendislik malzemeleri araştırılmıştır. Isı transferinin azaltılmasıyla TEC'in soğutma performansının artırılması ve mobil soğutma sistemlerinde TEC'lerin daha yaygın kullanılması beklenmektedir.

Deney düzeneği olarak seçilen bir soğutucu taşıma kutusuna, yalıtkanlık özelliğine sahip farklı ileri mühendislik malzemeleri içeren TEC'ler yerleştirilmiş ve her bir TEC için soğutma performansları incelenmiştir. Bu ileri mühendislik malzemelerinin seçiminde; termal yalıtkanlık, biyoyumluuluk, biyobozunurluk, mukavemet, hafiflik, düşük toksisite gibi unsurlar belirleyici olmuştur. Bu bağlamda; biri kontrol grubu olmak üzere 6 farklı deney düzeneği oluşturulmuştur. Kontrol grubu olarak piyasada bulunan bir TEM temin edilmiş ve termal, morfolojik ve elemental analizleri

gerçekleştirilmiştir. İkinci deney düzeneğinde ise TEM'in seramik yüzeyleri arasındaki hava boşaltılarak vakum ortamı oluşturulmuştur. Diğer 4 deney düzeneğinde ise; yüksek yalıtkanlık özellikleriyle bilinen epoksi reçine, mikron ve nano tanecik boyutlu hidroksiapatit ve nano biyosilika aerojel kullanılmıştır.

İleri mühendislik malzemelerle farklı yalıtım ortamları sağlanan TEC'lerin sıcaklık değişimleri anlık olarak takip edilmiş ve soğutma performansları hesaplanmıştır. Yapılan deneylerden yalnızca vakum ortamı sağlanan deneyin standart TEC'e göre daha yüksek performans sergilediği tespit edilmiştir. Epoksi reçinenin ise ısı köprüsü olarak davrandığı ve TEC için uygun bir yalıtım malzemesi olmadığı sonucuna varılmıştır. Soğutma performansının standart bir TEC'e göre daha düşük olduğu tespit edilen HAp ve NBA'nın kontrol grubu olan hava boşluklu TEM'den daha yüksek mukavemet ve biyouyumluluk gerektiren biyomekatronik uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** *Termoelektrik, İleri Mühendislik Malzemeleri, Termoelektrik Soğutucu, Seebeck, Peltier, Epoksi Reçine, Hidroksiapatit, Aerojel*

# EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS FOR THE EFFECT OF EMBEDDED ADVANCED ENGINEERING MATERIALS ON THERMAL BEHAVIOR OF THERMOELECTRIC MODULE

## ABSTRACT

Thermoelectric modules (TEM) are becoming more common day by day. They transform; temperature difference to electricity or electricity to temperature difference. This feature allows them to be used as a generator or cooler. With the discovery of new and more efficient thermoelectric (TE) materials, there has been a great increase in the performance of TEMs. Despite of the efficiency increase in TEMs, their usage remain limited, because they still can not reach the efficiency of conventional systems.

Unlike conventional systems, TEMs operate according to *Seebeck* and *Peltier* principles. With these reversible principles; it is possible to convert the temperature difference between the surfaces into electrical energy and also to create a temperature difference between the surfaces with electrical energy. If the modules are used for generating electrical current with the *Seebeck effect*, TEMs are called thermoelectric generators (TEG) and if the modules are used for cooling with the *Peltier effect*, TEMs are called thermoelectric coolers (TEC).

TECs have many superior features than conventional systems. These features can be summarized as; no moving parts, no requirement for maintenance, long lifetime, no need nature-harmful coolant gases, able to work without gravity. Despite these features; commercial use of TECs has not reached the desired level yet, due to their low energy conversion efficiency.

To increase cooling efficiency in commercial uses, aluminum blocks are placed on TECs to enlarge surface areas of the TEC to improve heat transfer.

Studies carried out so far, have focused on the development of semiconductors in TECs and increasing the cooling efficiency through different designs. Unlike other studies, this study aims to reduce the heat transfer in the opposite direction of TEC's working principles, by creating different insulation environments between the semiconductors of TEC. Different advanced engineering materials were investigated to replace the air gap where the semiconductors of TEC are located.

TECs with different advanced engineering materials were placed to a cooler transport box which is selected as the experimental setup. The cooling performances were examined for each insulated TEC. In the selection of these advanced engineering materials; factors such as high thermal insulation, biocompatibility, biodegradability, strength, lightness, low toxicity were determinative. In this context; 6 different experimental setups were created, including the control group. A commercially available TEC was provided as a control group and thermal, morphological and elemental analyzes were performed. In the second experiment setup, a vacuum environment was created by evacuating the air between the ceramic surfaces of TEC. In the other 4 experimental setups; Epoxy resin, micron and nanoparticle sized



hydroxyapatite and nano biosilica aerogel, known for their high insulating properties, are used.

Temperature changes of TECs with different advanced engineering materials, were monitored instantaneously and cooling performances were calculated. It was determined that only the vacuumed TEC provided higher cooling performance than the standard TEC. The epoxy resin acts as a thermal bridge and is not a suitable insulation material for TECs. Test results show that, HAp and NBA, which indicate lower cooling performance than a standard TEC, can be used in biomechanical applications that require higher strength and biocompatibility than the control group air-gap TEC.

**Keywords:** *Thermoelectric, Advanced Engineering Materials, Thermoelectric Cooler, Seebeck, Peltier, Epoxy Resin, Hydroxyapatite, Aerogel*

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Çalışma Konusu

Enerji krizi ve çevresel bozulma, 21. yüzyıl için iki temel büyük sorundur. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan yoğun fosil yakıt tüketimi ciddi atmosferik ve çevresel sorunlara neden olmuştur. Sonuç olarak, küresel ısınma, sera gazı emisyonu, iklim değişikliği, ozon tabakasının incilmesi ve asit yağmuru gibi terminolojiler ortaya çıkmaya başlamıştır. Yukarıdaki felaketlerin etkisinin azaltılması için termoelektrik (TE) enerji dönüştürücüler geleceğin teknolojilerinden biri olarak önerilmektedir (Jaziri ve ark, 2019). Günümüzde arabalardan ve elektrikli cihazlardan sağlanan artık ısıyı elektriğe dönüştürme kabiliyetinden dolayı, TE'lerin popülerliği günden güne artmaktadır (Matsumoto ve ark, 2015).

TE'lerin kullanımının artmasına imkan sağlayan birçok olumlu özelliği bulunmaktadır. Bu özellikler; enerji dönüşüm esasının sadece yüzeyler arası sıcaklık farkına bağlı olarak gerçekleşmesi, gaz emisyonu oluşturmaması, esnek ölçeklenebilirliğe sahip olması, hareketli parça içermediğinden bakım gerektirmemesi, çevreye zarar vermemesi, uzun ömürlü kullanılması ve güvenilir çalışma sağlaması olarak sıralanabilmektedir. Bu özelliklere ek olarak; elektrik enerjisini soğutma veya ısıtma amacıyla termal enerjiye dönüştürmek için malzeme üzerinden elektrik akımının geçmesi yeterlidir. Elektrik üretimi amaçlı kullanılan TE modüllere (TEM) termoelektrik jeneratör (TEG) adı verilmektedir. Soğutma amaçlı kullanılan TEM'lere ise termoelektrik soğutucu (TEC) adı verilmektedir. TE'lerin tersinir olması da kullanım alanını genişletmektedir (akım yönünün tersine çevrilmesi ile sıcak ve soğuk yüzeyler yer değiştirebilmektedir). Bu olumlu özelliklerine karşın; TE cihazların düşük enerji dönüşüm verimliliği ve yüksek malzeme maliyeti nedeniyle hala sınırlı kullanım alanı bulunmaktadır (Kim ve ark, 2013).

Enerji dönüşüm verimliliği, TE'ler için en önemli parametrelerden biridir. Bu alan üzerine çalışan araştırmacılar özellikle son 60 yılda çalışmalarını enerji dönüşüm

verimliliğini arttıracak metotlar geliştirmeye yoğunlaştırmıştır (Kenfaui ve ark, 2012). TE'lerin enerji dönüşüm verimliliğini arttırabilmek için yapılan çalışmalar; elektronik, malzeme ve tasarım eksenlerinde odaklanmaktadır.

Bu çalışmada; yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağlayan ve insan vücudunda kullanıma uygun TEC'lerin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

## 1.2 Tezin Amacı

TE malzemeler, üzerinden akım geçirildiğinde sahip olduğu yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturan ya da sıcaklık farkının bulunduğu yerde elektrik enerjisi üreten malzemelerdir. TEM ise TE'lerin seri olarak bağlanması ve iki seramik yüzey arasında yerleştirilmesiyle oluşan enerji dönüşüm sisteminin bütünüdür. TEM'lerin soğutma amaçlı kullanımı sırasında, yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı arttıkça ısı transferi de artmaktadır. Bu ısı transferi, ısı pompası olarak çalışan TEC'in amacının tam tersi yönünde gerçekleşmekte ve bu nedenle soğutma kapasitesini ve verimliliğini düşürmektedir. Soğutma verimliliğinin artırılması için, termal yalıtıklık sağlayan ileri mühendislik malzemeler kullanılarak ısı transferinin azaltılması amaçlanmıştır.

Bu amaçla; ileri mühendislik malzemelerin termal iletkenlik özellikleri esas alınarak 6 deney grubu oluşturulmuştur. Bu gruplar aşağıdaki gibidir;

- D1 Standart hava boşluklu TEC,
- D2 Vakum ortamı sağlanan TEC,
- D3 Epoksi reçine ile doldurulan TEC,
- D4 Hidroksiapatit (HAp) ile doldurulan TEC,
- D5 Nano HAp ile doldurulan TEC,
- D6 Nano biyosilika aerojel (NBA) ile doldurulan TEC.

Bu çalışmada; deney düzeneği olarak bir soğutucu taşıma kutusu tasarlanmış ve seramikleri arasındaki hava boşluğu farklı termal iletkenlik özellikleri taşıyan ileri mühendislik malzemeleriyle doldurulan TEC'lerin davranışları incelenmiştir.

## 1.3 Literatür Araştırması

Yapılan literatür araştırmasında TEM ile ilgili birçok çalışmanın olduğu ve özellikle küçük ebatlı, taşınabilir soğutma sistemleri oluşturulmasında TEC'lerden sıklıkla

yararlanıldığı görülmüştür. TEM'ler hakkında dünya çapında web üzerinden bulunan akademik araştırmaların sayısı 104.000'i bulmaktadır. Yalnızca 2020 yılında bu konu üzerine 7170 akademik makale yayınlanmıştır (URL-1, 2020).

YÖK tarafından sağlanan verilere göre Türkiye'de doktora ve yüksek lisans bazında TE'ler ile ilgili toplamda 120 adet çalışma gerçekleştirilmiş, bunlardan 2 tanesi 2020 yılında yayınlanmıştır. Birçok dergi ve konferansta bu konuyla ilgili çalışmaların yer aldığı ve ülkemizde özellikle 2012 yılındaki akademik çalışmaların konu üzerinde daha fazla yoğunlaştığı görülmüştür (URL-2, 2020).

Web üzerinden yapılan araştırma sonucunda ulaşılan verilere göre, TE sistemler üzerine alınan uluslararası patent sayısı 53.380 civarındadır. 2019 yılında alınan patent sayısı 6.349, 2020 yılında ise 41 adet olarak gerçekleşmiştir (URL-3, 2020).

Ülkemizde TE alanında 68 adet patent ve faydalı model başvurusu yapılmıştır. Bu başvurulardan 1 tanesi patent ve 2 tanesi faydalı model olmak üzere 3 adet başvuru 2019 yılında gerçekleşmiş olup, 2020 yılında konu hakkında herhangi bir patent başvurusunda bulunulmamıştır (URL-4, 2020).

Yapılan araştırmaların ve alınan patentlerin özellikle TEM'lerin enerji dönüşüm verimliliğinin artırılması ve performans ölçüm metotlarının geliştirilmesi üzerine odaklandığı görülmüştür. Bu çalışmada enerji dönüşüm verimliliği artışına ek olarak ihtiyaç duyulan alanlarda mukavemet artışı sağlanması da amaçlanmıştır. Bu artış hedeflenirken özellikle insan vücudundaki kullanım alanlarının (giyilebilir teknolojiler gibi) artırılması için biyoyumluluk unsuru da gözetilmiştir. Literatürde TEM'de bulunan yarı iletken malzemelerin üzerindeki ve arasındaki hava boşaltılarak vakum ortamı oluşturulan sistemler mevcuttur (Matsumoto ve ark, 2015) (URL-5, 2020). Bu çalışmada; standart ve vakum ortamındaki TEC'lerle ilgili ölçümler yapılmıştır. Ek olarak, TEC'in yarı iletkenlerinin bulunduğu boşluklara yerleştirilen düşük termal iletim katsayısına sahip ve biyoyumlu ileri mühendislik malzemeleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda enerji dönüşüm verimliliği ve mukavemet konularındaki gelişmeler de araştırılmış olup, bu özelliği ile literatürde yapılan çalışmaların ilki niteliğindedir.

1950'lerin sonlarından bu yana, TE'ler küçük ölçekli elektrik jeneratörlerine göre rekabetçi enerji dönüşümleri nedeniyle enerji üretimi ve karasal soğutma için kullanılmıştır. Daha sonra uzayda enerji üretimi için de TE malzemelerden ve

TEM'lerden faydalanılmıştır (Chen ve ark, 1996). Isı ile elektronların hareketine (*Seebeck etkisi*) dayanan TE'lerin enerji üretimi, diğer konvansiyonel enerji üretim sistemlere göre üstün özelliklere sahiptir (Bubnova ve ark, 2011).

1990'lı yıllarda; elektronik, haberleşme ve bilgi işleme teknolojilerinde yaşanan gelişmelerden dolayı soğutma ve enerji ihtiyacı artmıştır. Bu nedenle, daha verimli malzemelere odaklanılmış ve TE araştırmalarına büyük ilgi gösterilmiştir (Tritt, 2000). TEM'lerin ticari kullanımlarını arttırmak amacıyla performans katsayılarının (ZT) 3'ten daha büyük hale getirilmesi hedeflenmiştir (Zeng ve ark, 2020).

Rull-Bravo ve arkadaşları, endüstride sıklıkla kullanılan TEM'leri incelemiş ve sıcaklık aralıklarına göre kullanılan malzemelerin performans değerlerini p-tipi ve n-tipi olarak ayrı ayrı gösteren bir grafik yayınlamışlardır (Rull-Bravo ve ark, 2015).

Gao ve Rowe, TEC'lerin soğutma performans katsayısını, modülün sıcak ve soğuk yüzeylerindeki sıcaklık değişimlerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada; TEC'lerin sıcak yüzey sıcaklığı 25°C, soğuk yüzey sıcaklığı 5°C olduğu koşullarda, ZT değerinin 0,3-0,5 arasında olduğu saptanmıştır. Elde edilen deney sonuçları, enerji dönüşüm verimliliğini ve performans katsayısını artırmanın mümkün olabileceğini göstermiştir. (Gao ve ark, 2006)

Matsumoto ve arkadaşları, içten yanmalı bir motordan çıkan sıcak egzoz gazından elektrik enerjisi elde etmek için TEG kullanmışlardır. Ancak, bu karmaşık, ağır ve pahalı yapı ile ilgili sorunlar (vibrasyon, kontak temasının kaybolması vb.) ortaya çıkmıştır. TEG'i egzozun içinde bulunan bir vakum odasına yerleştiren ve modülü atmosferik basınç kullanarak ısı emiciye doğru bastıran yeni bir sistem tasarlamışlardır. Elektrik üretimi konusunda, yeni vakum alanı yapısının geleneksel yapıninkine eşdeğer elektrik üretimi performansı sağlayabildiğini ve ayrıca TEG boyutunun önemli ölçüde azaltılmasını sağlayarak TE eleman hasarını etkili bir şekilde önlediğini tespit etmişlerdir (Matsumoto ve ark, 2015).

Huang ve arkadaşları, TE uygulamada karbon nanotüpleri, TiO<sub>2</sub>'yi ve epoksi reçineyi bir araya getirerek oluşturdukları kompozitlerin termal iletkenliğini, elektriksel iletkenliğini ve ZT'sini araştırmışlardır. Kompoziti bir çözelti karıştırma yöntemi ile hazırlamışlar, daha sonra yapıyı, termal ve elektrik iletkenliklerini deneysel yöntemlerle karakterize etmişlerdir. Deney sonuçlarından alınan veriler ışığında, artan karbon nanotüp dolgu içeriğiyle, kompozitteki termal ve elektrik temas

dirençleri arasında büyük bir fark oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Oluşan fark nedeniyle termal ve elektriksel iletkenliklerin farklı değişen eğilimleri olduğunu saptamışlardır. Dolgu içeriğinin artması ile elektriksel iletkenlik katlanarak artarken, ısı iletkenlik değeri sabit kalmıştır. Elektrik/termal iletkenlik oranının yüksek olması nedeniyle, ağırlıkça %8 oranında dolgu içeren numunenin performans değerinin, düşük dolgu oranlı olanlardan 50 kat daha fazla olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Ulaştıkları sonuçlar ışığında Shi ve arkadaşları tarafından önerilen "elektron-perkülasyon termal-izolatör" kavramının (Shi ve ark, 2018), bir polimer kompozitin performans değerini artırmak için uygun bir yol olduğunu kabul etmişlerdir (Huang ve ark, 2017).

Coelho ve arkadaşları, biyolojik artıklardan elde ettikleri HAp malzemesini 32 saat boyunca yüksek enerjili bir öğütme cihazında öğütürerek 24-80 nm arası boyutlarda toz elde etmişlerdir. Elde edilen tozlar 350 MPa'da disk şeklinde preslemiş ve 4 saat boyunca 1000°C'de sinterlenmiştir. Bu sayede 0,050 W/m.K termal iletkenliğe sahip HAp tozları elde etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda parametrelerin öğütme süresi ile arttığını, ancak 8 ila 16 saat arasında plato evresine ulaşıldığını tespit etmişlerdir (Coelho ve ark, 2007).

Buluş, doğal kaynakları (*Lettered olive*, *Pinna nobilis* ve yumurta kabukları) kullanarak, kimyasal çöktürme yöntemi ile nano seviyede biyoseramik sentezi yapmış ve sentezlenen biyoseramiklerin karakterizasyon çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Elde edilen ürünlerin biyomedikal ve doku mühendisliği başta olmak üzere çeşitli alanlarda biyomalzeme olarak kullanılabilceğini belirtmiştir (Buluş, 2017).

Zhu ve arkadaşları, inorganik malzemelerin kırılabilirliği ve polimerlerin yüksek yanıcılığını aşmaya çalışmışlardır. Bu amaçla HAp, silisyum (Si), kitosan (CS) ve jelatin (G) kombinasyonları ile farklı organik/inorganik kompozit aerogeller (HAp-Si/CSG) elde etmişlerdir. Kimyasal çapraz bağlama ve tek yönlü dondurarak kurutma yöntemlerinin kullanarak, oluşturulan kompozit aerogellerin mekanik özellikleri ve termal kararlılığını önemli ölçüde geliştirebilmiş ve elde edilen anizotropik mikroyapılar sayesinde ısı iletkenliği üzerinde önemli bir gelişme sağlamışlardır. Çapraz bağlı HAp-Si/CS ve çapraz bağlı HAp-Si/CSG kompozit aerogelleri karşılaştırıldığında, jelatin içeren HAp-Si/CSG kompozit aerogelin daha yüksek dayanım (0,82–2,37 MPa) ve daha yüksek mukavemete (41,22-129,20

kN.m/kg) sahip olduğunu tespit edilmiştir. Ayrıca, hazırlanan HAp-Si/CSG kompozit aerogelin, aksel yönden daha düşük bir radyal yönlü termal iletkenlik (28,16-37,43 mW/m.K) sergilediği belirlenmiştir. CS tabakalarına gömülü nano yapılı HAp kompozit aerogelin, ısı transferini daha iyi sınırladığı ve organik bileşiklerin yanmaya karşı direnç gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sayede; biyokütle bazlı kompozit aerogel ve biyopolimerlerin yüksek mekanik özelliklere sahip, ısı yalıtımı sağlayan, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir fonksiyonel malzeme olduğunu vurgulamışlardır (Zhu ve ark, 2019).

Jelle ve Baetens, binalarda kullanılan gaz sıkıştırılmalı yalıtım panellerini ve vakum yalıtım panellerini incelemiş ve *Nanoconis* adı verilen nano katkı yalıtım panelleri ile karşılaştırmışlardır. Yapılan nano katkılamamanın yalıtım panelinde düşük boyutlu ve kapalı por yapısı oluşturduğu ve dolayısıyla *knudsen efekti* yarattığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak; nano yalıtım malzemelerinin bina yalıtım uygulamalarında sağlayacağı esneklik dolayısıyla gelecekte sıkça kullanılacağını söylemişlerdir (Jelle ve ark, 2010).

Denteng ve arkadaşları, hidrofobik aerogeller ve epoksi tozlarını kuru olarak karıştırmış ve sıcak presleme yöntemiyle silika aerogel/epoksi kompozit elde etmişlerdir. Elde edilen kompozit malzemenin; düşük ısı iletkenliği (0,11-0,044 W/m.K) ve hidrofobik özellikler (117°-140° su temas açısı) gösterdiğini ve 250°C'ye kadar çalışma sıcaklığı sağladığını tespit etmişlerdir. Transmisyon elektron mikroskobu görüntüleri, silika aerogellerin nanoporlarının bir kısmının epoksi ile kaplandığını göstermiştir. Bu fenomene dayanarak, kaplama işleminin ısı yalıtımı ve hidrofobik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için bir kaplama modeli oluşturmuşlardır. Ek olarak, aerogel/epoksi sisteminin bir termal iletkenlik tahmin denklemi elde edilmiş ve deneysel veriler karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Dengteng ve ark, 2009).

Leblance, TEM'in üretimi ve geliştirilmesindeki zorlukları tartışmakta ve sistem düzeyinde performansın yalnızca geleneksel TE malzeme performans metriklerinden daha fazla faktöre dayandığını ifade etmektedir. Bu nedenle termomekanik ve kimyasal malzeme özellikleri, termal ara yüz malzemeleri ve ısı eşanjörleri gibi sistem bileşenlerini ve sistem form faktörlerini beraberce incelemiştir. Üretim süreçleri ve toplam sistem maliyeti bileşenleri, ürün geliştirme ve ticarileştirme aşamaları için değerlendirmiştir (LeBlanc ve ark, 2014a).

Günümüzde; iklim değişikliği nedeni ile oluşan biyolojik bozulma, enerji üretimi için fosil yakıtların kullanımının azaltılması gerektiğini göstermektedir. Herhangi bir yakıt kullanmadan, yalnızca yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkından faydalanarak enerji üretebilen TE teknolojisi; fosil yakıt kullanımını azaltabileceği gibi, olası bir enerji krizinde çözüm olabilir. Ayrıca, gündelik hayatın hızlanması; esnek ve dinamik çözümlerin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle kompakt, hafif ve düşük hacimli TEM'ler taşınabilir ısıtma, soğutma ve enerji üretimi çözümleri için umut verici bir yöntem olabilir.



## 2. KURAMSAL ÇERÇEVE

### 2.1 TE Çalışma Prensipleri

TE malzemeler, sıcaklık farkının *Seebeck etkisi* ile elektrik enerjisine ve tersinir olarak elektrik enerjisinin *Peltier etkisi* ile termal enerjiye dönüştürülmesi prensipleri çalışmaktadır.

*Seebeck etkisi*, 1821 yılında Baltık Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedilmiştir. Bu etkiye göre, iki farklı metal çiftin uçları arasında sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) olması durumunda oluşacak gerilim farkından dolayı elektrik akımı oluşmakta ve dolayısıyla elektrik enerjisi açığa çıkmaktadır. p-n tipi yarı iletkenlerin iki ucu arasındaki sıcaklık farkının artması, gerilim farkını ( $\Delta V$ ) arttırmaktadır. Her malzemenin kendine özgü sabit bir *Seebeck katsayısı* ( $\alpha$ ) vardır ve gerilim farkının sıcaklık farkına oranıyla bulunmaktadır (denklem 2.1) (Rowe, 1995).

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

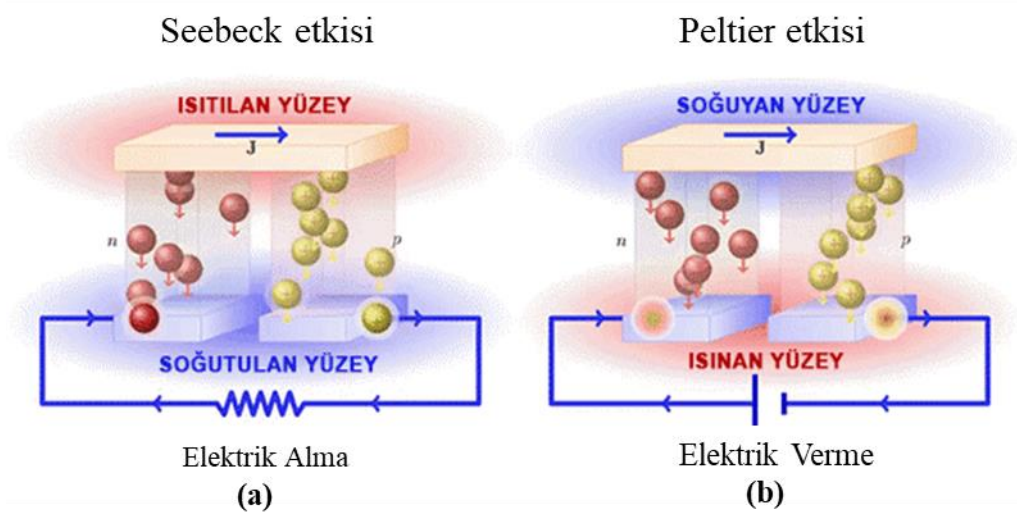
1834 yılında Fransız Bilim adamı Charles Athanase Peltier tarafından keşfedilen *Peltier etkisi* ise *Seebeck etkisinin* tam tersidir. Bu etkiye göre; devreye akım verildiğinde farklı iletkenlerin uçları, akımın yönüne bağlı olarak ısıyı emmekte veya reddetmekte, bu sayede ısınmakta veya soğumaktadır. Bu fenomen, iki malzeme arasındaki *Fermi enerjilerinin* farkından kaynaklanmaktadır. TE malzemeler üzerine düşük voltajlı, yüksek akımlı bir güç kaynağından doğru akım (DC) uygulandığında ısı, akım yönünde hareket eder. Bir TEC'in soğutma performansını belirlemek için *ZT* parametresi (denklem 2.2) kullanılır (Adhikari, 2017).

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\kappa} T \sigma \quad (2.2)$$

Denklemden; " $\alpha$ " Seebeck katsayısı, " $\sigma$ " elektrik iletkenliği, " $\kappa$ " ısı iletkenliğidir ve " $T$ " sıcak yüzeyin sıcaklığıdır.

Özetle, TE malzemeler *Seebeck* ve *Peltier etkileri* ile tersinir bir sistem olarak iki farklı amaca hizmet edebilir. TE malzemenin farklı yüzeylerine farklı sıcaklıklar

uygulandığında Şekil 2.1(a)'da görüleceği üzere elektrik üretimi için TEG olarak kullanılabilceği gibi; TE malzemeye akım verildiğinde Şekil 2.1(b)'de görüleceği üzere yüzeyler arasında sıcaklık farkı oluşturmak suretiyle TEC olarak da kullanılabilir.



**Şekil 2.1** : a) TEG ve b) TEC Gösterimi  
Kaynak: (URL-6, 2019)

TEG'in maksimum veriminin ( $\eta_{max}$ ) hesaplanması için denklem 2.3'ten yararlanılabilir:

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (2.3)$$

Bu denklemde;  $T_C$  soğuk yüzeydeki sıcaklığı ve  $T_H$  sıcak yüzeyin sıcaklığı ifade etmektedir.

TEC'in maksimum performans katsayısı ( $COP_{max}$ ) ise denklem 2.4'ten faydalanarak hesaplanmaktadır.

$$COP_{max} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT} - \frac{T_H}{T_C}}{\sqrt{1+ZT} + 1} \quad (2.4)$$

Yukarıda verilen denklem 2.3 ve 2.4'teki eşitliklere göre;  $ZT$  sonsuza yaklaştığında verim veya COP, Carnot'tır. Bu teori; TEG'lerin, elektronların çalışma ortamı olarak performans gösterdiği Carnot sıcak motorları olduğunu iddia etmektedir (Rowe, 1995).

TE sistemin performansını; iki ana faktör olan, TE'nin malzeme özellikleri ve

sistemin tasarım özellikleri belirlemektedir.

TE'lerde enerji dönüşüm verimliliği, birimsiz bir parametre olarak kullanılan ZT değeri ile tanımlanmaktadır (denklem 2.2). Bu formül, elektriksel direnç " $\sigma$ ", Seebeck katsayısı " $\alpha$ ", ısı iletkenliği " $\kappa$ " olmak üzere malzemeye özgü üç fiziksel özellik ile ilişkilidir. Denklemde yer alan değerlerin tamamı, mutlak T sıcaklıktaki özelliklerdir. TE malzemelerde enerji dönüşüm verimliliğinin yani ZT değerinin yükseltilmesi için termal iletkenliğin azaltılması gerekmektedir. Bu kapsamda geleneksel olarak TE malzemesinin kristal yapısına elektrik iletkenlikleri iyi olan yabancı türlerin alaşımlanması ve/veya kaplanması yöntemleri uygulanmıştır (Wang ve ark, 2013). Bu çalışmada; geleneksel yaklaşıma alternatif olarak, düşük termal iletkenlik değerlerine sahip ileri mühendislik malzemeler, TEM'in yarı iletkenlerinin bulunduğu bölgenin arasına yerleştirilecek ve yüzeyler arası termal iletkenliğe ve enerji dönüşüm verimliliğine olan etkisi irdelenecektir.

## 2.2 TE Malzemelerin Sınıflandırılması

Geleneksel TE malzemeleri 3 kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; yarı iletkenler, seramikler ve polimerlerdir. Son zamanlarda *etilendioksitiofen* gibi bazı polimerlerin ve karbon fiber polimer-matriks yapısal kompozitlerin de yüksek termoelektrik malzeme özellikleri gösterdiği keşfedilmiştir (Elsheik ve ark, 2014).

### 2.2.1 Yarı iletkenler

Maddeler elektriği iletmelerine göre iletken, yarı iletken ve yalıtkan olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Elektrik iletimi maddenin elektrik yükü ile ilişkilidir. İletken maddeler, serbest elektron sayısı ile orantılı olarak elektriği iyi ileten maddelerdir. Yalıtkan ya da diğer bir adıyla dielektrik maddeler ise serbest elektrik yükü bulunmayan ve bu nedenle elektriği iletmeyen maddelerdir. Yarı iletkenler ise; elektrik iletkenliği bakımından hem iletken hem de yalıtkan özellik gösteren maddelerdir.

Elektrik akımını oluşturan yük taşıyıcıları; elektrolitlerde iyonlar, metallerde elektronlar, yarı iletkenlerde ise elektron ve deliklerdir. n-tipi yarı iletkenlerde negatif yük taşıyıcıları (elektronlar), p-tipi yarı iletkenlerde ise pozitif yük taşıyıcıları (delikler) çoğunluktadır (Mamur, 2013).

Termoçiftler (Termokupllar) p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin oluşturduğu ikili

yapılardır.  $100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde büyük Seebeck katsayılarına sahip oldukları ve dökme malzemelerde  $\alpha$  ve  $\sigma$ 'yi etkilemeden  $\kappa$ 'yi azaltabildiklerinden dolayı yarı iletken malzemeler, termokupulların oluşturulması için önemlidir. ZT değerini artırmak amacıyla, atom ağırlığı yüksek olan  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ve Sb, Sn ve Pb ile alaşımları, yarı iletken olarak kullanılmaktadır. Yüksek atom ağırlığı, malzemedeki ses hızını azaltmanın yanı sıra termal iletkenliği de azaltmaktadır. En yüksek ZT değerine ulaşmayı sağlayan malzemelerin  $\text{Mg}_2\text{X}$  ( $\text{X} = \text{Si}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ) intermetalik bileşikler gibi ( $\text{Mg}_2\text{Si}$  için değer, ZT değeri, 862 K'de 0,86'dır); ağır katkılı (doplanmış) ve küçük bant aralığına sahip yarı iletkenler olduğu tespit edilmiştir. İntermetalik bileşiklerin katı çözeltileri, *antiflorit* yapısına sahip yarı iletkenlerdir. Sahip oldukları yüksek Seebeck katsayısı, düşük elektriksel direnci ve düşük ısı iletkenliği gibi üstün özellikleri nedeniyle, yüksek performanslı TE malzemelerin üretimi için uygun oldukları öne sürülmektedir (Tani ve Kido, 2005).

### 2.2.2 Seramikler

TEM'lerin üretiminde, seramikler; yarı iletkenleri dış etmenlerden korumak, elektriksel yalıtım ve termal iletkenlik sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Seramikler içinde ise metal oksitlerin daha yüksek kimyasal kararlılık ve oksidasyon direnci sağladıkları, daha az toksik ve düşük maliyetli olmaları sebebi ile kullanım avantajları bulunmaktadır. Bu nedenle üretimde metal oksitlerin kullanılması, daha dayanıklı TEM'lerin üretilmesini sağlamaktadır (Zhu ve ark, 2014).

Seramikler; yüksek sıcaklıkta atık ısı üreten yakma fırınlarından veya içten yanmalı motorlardan atık ısıyı alarak, termoelektrik enerji dönüşümü sağlamak için önemli TE malzemelerdir (Yasukawa ve Ark, 2010). Geçmişte;  $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ 'ün yüksek TE performanslı oksidi ortaya çıkana kadar, oksitlerin düşük taşıyıcı hareket kabiliyetleri nedeniyle TE malzemesi olarak kullanımı öngörülmemiştir. Günümüzde ise;  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ ,  $\text{NaCo}_2\text{O}_4$  gibi kobalt bazlı oksitler, TE modülünde p-tipi yarı iletken olarak üretilmektedir. Ayrıca; n-tipi yarı iletken için ise,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{ZnO}$  ve  $\text{CaMnO}_3$  gibi seramikler de incelenmiştir. Bu seramikler arasında  $\text{CaMnO}_3$ , n-tipi oksit TE materyali olarak kullanılabilmesine imkan sağlayan yüksek TE özellikleri göstermekte ve üretim için özel bir atmosferik koşul gerektirmemektedir (Wang ve Wang, 2013). p-tipi muadilleri ile karşılaştırıldığında; yüksek termal iletkenlikleri nedeniyle n-tipi oksit TE malzemelerinin kullanımına daha seyrek rastlanmaktadır (Wang ve ark, 2013). Şimdiye kadar, yüksek TE özelliklere sahip olan  $\text{SrTiO}_3$ ,

CaMnO<sub>3</sub> ve ZnO gibi birkaç n-tipi oksit malzemenin rapor edildiği bildirilmiştir (Wang ve Wang, 2013).

### 2.2.3 Polimerler

Yaygın olarak araştırılan, geliştirilen ve kullanılan inorganik TE malzemeler; toksisite (zehirleyicilik), doğal kaynakların yetersizliği, yüksek maliyet ve karmaşık üretim süreçleri gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle, TE malzemelerin özelliklerini geliştirmek ve kullanımını yaygınlaştırmak için yeni malzeme türleri geliştirmek veya bulmak büyük önem taşımaktadır (Wang ve ark, 2011). Mekanik esneklik sağlaması, sentezlemenin düşük maliyetli olması, çözelti ile işlenebilirliği, hafifliği, çevre dostu ve biyouyumlu olması nedeniyle TEM'lerde izoleli polimer matrisleri ve iletken dolgu maddeleri içeren iletken polimer kompozitleri ailesinin kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Pang ve ark, 2013). Wang ve arkadaşları, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen bazlı ayrıştırılmış iletken polimer kompozitlerden bir yapı oluşturmuş ve bu yapıda karbon nanotüp (CNT) ve bizmut tellür (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) hibrit dolgu maddelerinin farklı oranlarda kullanımının TE davranışlarını araştırmışlardır. Sonuç olarak; dizayn edilen iletken polimer kompozitleri ailesinin TE sistemindeki  $\alpha$  ve ZT'yi önemli biçimde yükselttiği gözlemlenmiştir (Pang ve ark, 2013).

Han ve arkadaşları, CNT polimer-matris yapısal kompozit malzemelerini araştırmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda; tellür partikülleri (hacimce %13), bizmut tellürid partikülleri (hacimce %2) ve karbon siyahı (hacimce %2) ekleyerek sürekli karbon fiber (CCF) epoksi-matris kompozitlerinin TE davranışının büyük ölçüde iyileştirildiğini göstermişlerdir. Yapılan müdahale ile, 343 K sıcaklıkta ZT değerinin 10 bin kat artarak,  $9 \times 10^{-6}$ 'dan  $9 \times 10^{-2}$ 'ye çıktığı görülmüştür (Han ve Chung, 2013).

Wang ve arkadaşları, *politiofen*/çok duvarlı CNT kompozitlerinin TE özelliklerini araştırmışlardır. Sonuçlar; 393 K sıcaklıkta en yüksek ZT değerinin  $8,71 \times 10^{-4}$  olarak, ağırlıkça %80 çok duvarlı karbon nano tüpten oluşan kompozitte bulunduğunu göstermiştir (Wang ve ark, 2013).

Son zamanlarda polimerlerin ZT değerleri büyük oranda yükseltilmiştir. Kim ve arkadaşları, iki farklı polimerden (*3,4-etilendioksitiofen* ve *stirensülfonat*) oluşturdukları TEM'in ZT değerinin oda sıcaklığında 0,42 değerine ulaştığını belirtmektedir (Kim ve ark, 2013).

Piyasada bulunan ve ticari olarak kullanılan en başarılı TE materyali  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  bazlı TEM'lerdir.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  bazlı TEM'lerin oda sıcaklığındaki ZT değerinin 1'e kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Bu değer, konvansiyonel sistemlere göre daha küçüktür ve düşük enerji dönüşüm verimliliği sağlamaktadır. Ticari olarak kullanılan buzdolapları ve soğutma sistemleri ile rekabet edebilmek için TEC'lerin ZT değerinin 3'ten büyük olması gerekmektedir. TE'lerde  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ 'nın bağımsız olmaması, ZT değerinin yükseltilmesinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Teorik olarak, TEC'ler için ZT değerinin 3'ten büyük olmasının önünde herhangi bir engel bulunmamaktadır. Ancak, literatürde yer alan çalışmaların ışığında ZT değerinin 3'ten yüksek olmasına imkan sağlayacak bir materyal bulunamamıştır (Majumdar, 2004).

## **2.3 TEM'lerin Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırılması**

### **2.3.1 Uzay endüstrisinde kullanımı**

1950 yılı sonrası, yarı iletkenlerin de gelişmesiyle birlikte, uzay endüstrisinde özellikle gezegenlerin keşifleri sırasında TEM'ler etkin rol oynamışlardır (URL-5, 2020). Uzun kullanım süresi, bakım gerektirmemesi, güneş ışığı veya rüzgar gibi değişkenlere bağlı olmadan çalışabilmesi TEM'lerin gezegen keşifleri sırasında kullanılmasını sağlamıştır. Özellikle; uzay araçlarının gezegenlerin karanlık bölgesine geçtiği ya da kum fırtınalarından dolayı fotovoltaik panellerin kumla kaplandığı ve güneş ışığı alınamadığı durumlarda şekil hafızalı alaşımların sağladığı fonksiyonlara alternatif enerji kaynağı olarak TEM'lerden yararlanılmıştır (Dilibal, 2005).

### **2.3.2 Endüstriyel kullanımı**

TEM'ler, endüstride soğutma amaçlı olarak; hassas sıcaklık kontrolü ve küçük boyutları sayesinde ölçüm cihazlarının soğutma gerektiren sensörlerinde; kimya sektöründe ise, kimyasal sirkülasyon sistemlerinde kullanılmaktadır (Jaziri ve ark, 2019).

Enerji santrallerinde; soğutma sirkülasyon suyu çıkışlarındaki ve sıcak su deşarj çıkışlarındaki boruların etrafına TEM'ler yerleştirilerek atık ısıdan enerji üretilerek, enerjinin geri kazanımı sağlanmaktadır.

### 2.3.3 Biyomedikal ve tıp alanlarında

TEM'ler; belirli sıcaklık aralıklarında bulunması gereken tıbbi ilaç ve sıvıların taşınmasında, mikroskop ile canlı materyallerin dondurularak görüntülenmesinde (Rodríguez-Barreiro ve ark, 2013), fotosentez analizinde, biyoreaktörlerde sıcaklık dengelemede, travmatik olayların soğuk-sıcak uygulamalarında (Yavuz, 2009), ozmometrelerde (Goyan ve ark, 1971) ve biyoaktif analizlerde kullanılmaktadır.

### 2.3.4 Genel kullanım

Günlük kullanımı giderek yaygınlaşan TEM'ler; arabalarda koltuk ısıtma-soğutma ve egzoz gazındaki atık ısıdan enerji geri kazanımı uygulamalarında kullanılmaktadır (Matsumoto ve ark, 2015). Yüksek soğutma beklenmeyen mobil buzdolabı uygulamalarında da TEC'lerin kullanımı giderek artmaktadır (Bozkurt ve ark, 2019). Su sebillerinde de kullanılan TEC'ler, havalandırma sistemlerinde nem alıcı olarak kullanılmaktadır. Gelecekte, enerji dönüşüm verimliliklerinin artmasıyla; TEC'lerin günlük kullanımda soğutmanın gerekli olduğu yerlerde ya da mobil, giyilebilir, biyomekatronik cihazlarda enerji kaynağı olarak kullanılacağı düşünülmektedir (Jaziri ve ark, 2019).

## 2.4 TEM'lerin Avantajları ve Dezavantajları

TEG'ler düşük enerji dönüşüm verimlilikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadırlar. Bu jeneratörlerin yüksek verimlilikte çalışabilmeleri için yüzeyleri arasındaki ısı farkının çok yüksek olması gerekmektedir. Örneğin; soğuk bölgelerdeki gayzer çıkışları, enerji santrallerindeki sıcak su çıkışları gibi atık ısıdan enerji elde etme amacıyla kullanılabilirler.

Bu çalışmada; özellikle TEC'lere odaklanılacak olup, soğutma ünitelerinde TE'lerin kullanımlarını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılacaktır.

TEC'ler konvansiyonel soğutma sistemlerine göre aşağıdaki avantajlara sahiptir;

- Hareketli parça içermediğinden bakım ihtiyacı düşüktür.
- Sessiz ve rijit ürünlerdir.
- İstenilen form ve esneklikte üretilebilmektedirler (Jeong ve ark, 2019).
- Diğer sıkıştırma tipi soğutma sistemleri gibi herhangi bir soğutucu akışkan içermediğinden, doğaya zarar vermeyen ürünlerdir.

- Tamamen tersinir ısı pompalarıdır. Soğuk ve sıcak yüzeyler ve ısı akışı; yalnızca mevcut akım yönü değiştirilerek, kolayca tersine çevrilebilir.
- Soğutucu akışkan içermediğinden yerçekimi olmayan ortamlarda bile performans kaybı yaşamadan çalışabilirler.
- Çok hassas sıcaklık kontrolüne imkan sağlarlar.

TEC'ler konvansiyonel sistemlere göre aşağıdaki dezavantajlara sahiptir;

- COP'leri (soğutma kapasiteleri) düşüktür.
- Elektrik kaynağı olarak doğru akım gerektirmektedir. Alternatif akım (AC) kaynaklarına sahip sistemlerde dönüştürücü kullanımı gerektirmektedir.
- Aynı kapasitedeki konvansiyonel sistemlere göre daha yüksek maliyetlidirler.

TEC'ler yukarıdaki avantaj ve dezavantajları nedeniyle; tıp, medikal ve elektronik sektörlerinde, bilişim ve askeri uygulamalarda, uzay endüstrisinde, giyilebilir ve mobil soğutma çözümlerinde ve bilimsel araştırmalarda yer almışlardır (Bahk ve Ark, 2015).

## **2.5 TEM'lerde Yalıtım Amaçlı Kullanılan İleri Mühendislik Malzemeleri**

Günümüzde yalıtım amacıyla kullanılacak birçok malzeme bulunmaktadır. Ancak; TEM'lerin yalıtımı için kullanılacak malzemelerin hem elektriksel hem de termal yalıtım sağlaması gerektiğinden, bu alanda kullanılacak malzemeler sınırlıdır. Ayrıca; deney düzeneği olarak tasarlanan soğutucu taşıma kutusunda toksisite ve biyouyumluluk gibi etmenlerde göz önünde bulundurulmak zorunda olduğundan, kullanılacak malzeme çeşitliliği daha da azalmaktadır. Bu çalışmada farklı ileri mühendislik malzemeleri kullanılarak TEM'lerin yüzeyleri arasında bulunan termal ve elektriksel bariyerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla kullanılacak malzemelerin aşağıdaki özellikleri taşıması gerekmektedir:

- Düşük ısı ve elektrik iletim katsayısına sahip olması,
- Küçük boyutlardaki boşlukları doldurabilmesi,
- Termal şoklara karşı dayanımının yüksek olması,
- Düşük genleşme katsayısına sahip olması,
- Kimyasal tepkimeye girmemesi,
- Kolay bulunabilmesi,
- Düşük maliyetli olması,

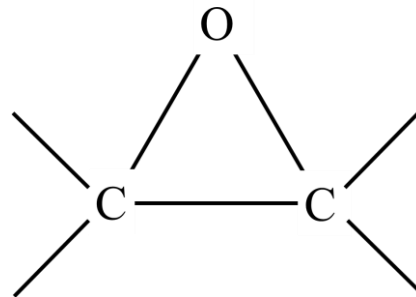


- Yüksek mukavemet sağlaması,
- Mümkünse geri dönüştürülmüş ve/veya geri dönüştürülebilir (biyobozunur) olması,
- Biyouyumlu olması,
- Toksik etki yaratmaması,

Literatürde yapılan araştırmalarda standart hava boşluklu TEM'ler sıklıkla kullanılmış ve ayrıca çok sık olmamakla birlikte vakum işlemi uygulanmış TEM'lerle ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Kompozit uygulamalarda yaygın olarak yer verilen epoksi reçinesi, bazı TE malzemelerin matris yapısını oluşturmakla birlikte bir yalıtım malzemesi olarak ilk defa bu çalışmada TEC'lere uygulanacaktır. Ayrıca termal bariyer oluşturma ve mukavemet sağlamak amacıyla yalıtım malzemesi olarak mikron ve nano boyutlu HAp ve NBA malzemeler de ilk kez bu çalışma kapsamında araştırılmaktadır. Dolayısıyla standart bir TEC'e farklı ileri mühendislik materyallerinin uygulanması ile 6 farklı deney düzeneği oluşturulmuş ve termal davranışları incelenmiştir. TEC'lere uygulanan ileri mühendislik malzemeleri olan epoksi reçine, mikron ve nano HAp ve NBA ilişkin üretim yöntemleri ve malzeme özellikler aşağıda başlıklar halinde sunulmaktadır.

### 2.5.1 Epoksi reçine

Epoksi fonksiyonel grupları, yapısını oluşturduğu epoksi reçinelere ismini vermektedir. Bir ya da birden çok epoksi grubu epoksi reçinesinin molekülünü oluşturmaktadır (Şekil 2.2). Epoksi reçinelerinin yapısında, oksijen bağlarına sahip eter bulunmaktadır. Piyasada bulunan ticari epoksi reçineleri; *alifatik* ve *sikloalifatik* bağların yanı sıra *aromatik* arka bağları da içermektedir (Durmuş, 2006).



**Şekil 2.2 :** Epoksi Reçine Fonksiyonel Grup Gösterimi

**Kaynak:** (Durmuş, 2006)

Epoksi reçinenin keşfi 1930 yılına dayanmaktadır ve o günden bu yana endüstride

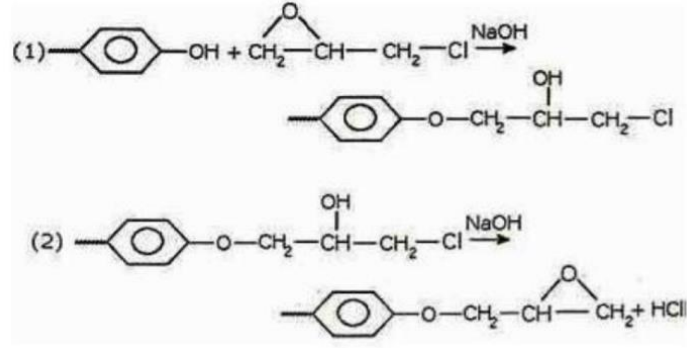
birçok uygulama alanı bulmuştur. Bu uygulama alanlarında; hafiflik ve mukavemetin önem taşıdığı havacılık sektörü, laminant ve mobilya gibi yapı malzemeleri, yalıtım amaçlı kaplamalar, yapıştırıcılar ve ana matris olarak kompozit malzeme uygulamaları gibi örnekler yer almaktadır (Richard ve ark, 1995).

Epoksi reçineler, kompozitler içerisinde en çok tercih edilen polimer matrisidir. Ancak, diğer polimer matrislere göre daha pahalıdır. Epoksi reçinelerin polimer matrisinde öncelikli olarak tercih edilmesinin başlıca sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çekme ve darbe dayanımları diğer kompozitlere nazaran yüksektir.
- Aşınma dayanımı yüksektir.
- Mekanik ve fiziksel özelliklerini yüksek sıcaklıkta muhafaza edebilir.
- Islatma açısı geniş olduğundan yüzeyleri yapıştırma kabiliyeti yüksektir.
- Kürlenerek katı hale geçmesi için oda sıcaklığı yeterlidir.
- Kürleme süresince uçuculuğu ve dolayısıyla kütle kaybı düşük seviyededir.
- Kürleme öncesi düşük akış hızına ve düşük viskoziteye sahiptir.
- Elektriksel ve termal yalıtkanlığı yüksektir.
- Kimyasallara karşı pasiftir (Kaw, 1997).

Çapraz bağlanma sırasında epoksi reçineler uçucu madde oluşturmazlar. Büzülme oranları çapraz bağlanma sonrasında diğer kompozitlere göre düşüktür (%1-5). Kürleme için yapılan pişirme süreleri uzundur. Pişirme zamanı, çapraz bağlanma tepkimeleri ile doğrudan ilişkilidir. Bağlanma tepkimelerini hızlandırmak amacıyla hızlandırıcılar (katalizörler) kullanılmaktadır. Kullanım sıcaklıkları, günümüzde yapılan katkılar ve polimer özelliklerine bağlı olarak 220°C'ye kadar çıkabilmektedir (Liu, 2005).

Epoksi reçinelerin elde edilmesi için; epoksi gruplarının kendi aralarında *anhidrid* veya *homopolimerizasyonu* ve *novalak*, *amin* gibi maddelerle reaksiyona girmesi gerekmektedir. Ticari olarak en yaygın kullanılan epoksi reçineleri, *bisfenol-A* ile *epiklorhidrin*'in reaksiyonuna alkali katalizör katılarak üretilmektedir (Şekil 2.3).



**Şekil 2.3 :** Digliserid eter bisfenol-A'nın kimyasal yapısı  
**Kaynak:** (Lee ve Neville, 1982)

Reçineler; dayanıklılık, sertlik ve yükseltilmiş ısı performansı gibi özelliklerini *bisfenol* kısmından almaktadır. Kimyasal dayanımını eter bağlarından, yapışkanlık özellikleri ve serbestlik değerleri ise epoksi ve hidroksil gruplarından kaynaklanmaktadır. Epoksi ve hidroksil grupları ile oluşturdukları bağlar sayesinde kimyasal sertleştirici ile tepkimeye girebilmektedirler (Lee ve Neville, 1982).

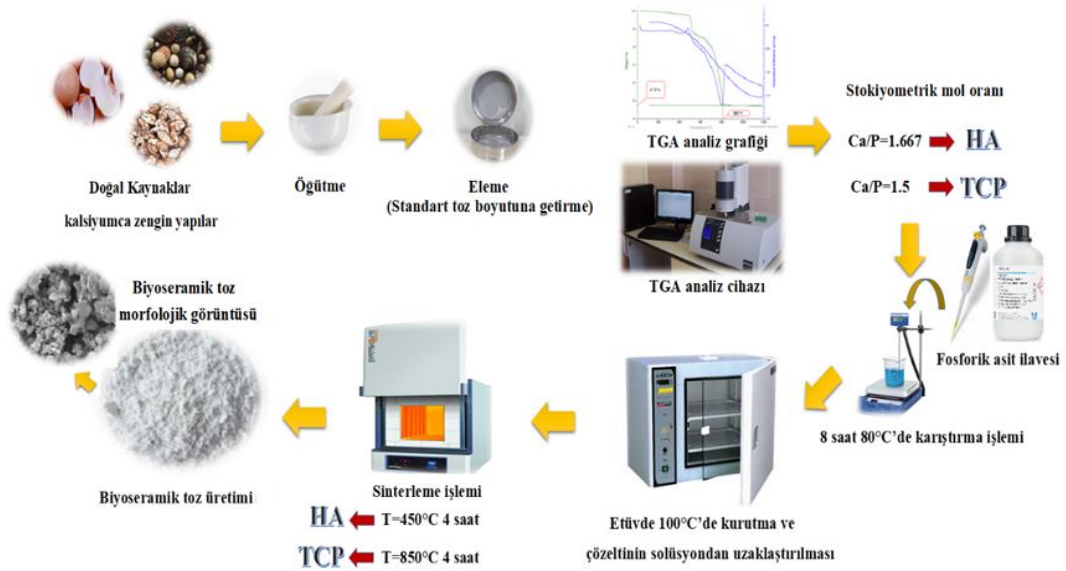
### 2.5.2 Hidroksiapatit (HAp)

Seramik malzemeler; kimyasal kararlılık, korozyona karşı direnç, düşük elektriksel ve termal iletkenlik gibi birçok önemli özelliğe sahiptir (Barsoum, 2003). Düşük termal iletkenlik ve yüksek mukavemete sahip gelişmiş termal yönetim (Jiang ve ark, 2012), enerji tasarrufu ve sürdürülebilir kalkınma için bir araştırma noktası olmuştur. Bir biyoseramik olan HAp; seramiklerin sergiledikleri düşük termal iletkenliğin yanı sıra, biyoyumluluk özelliği de taşımaktadır. HAp'ların termal iletkenliği bilinen geleneksel yalıtım malzemelerinden (Ahşap, yün, poliüretan vb.) daha düşüktür (Zhu ve ark, 2019). HAp, biyoyumlu bir seramik olduğundan, günümüzde mikrodalga fırınların içinde yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. HAp, yiyecek ambalajlarının içine katkılanırlan metaller ile mikrodalga fırında yiyeceklerin daha hızlı ve homojen şekilde ısınmasını ve yalıtkan özelliği sayesinde de daha uzun süre sıcak kalmasını sağlar (Harabi ve ark, 2010).

HAp'ı sentezleyebilmek için; kimyasal çöktürme, hidrotermal, katı hal reaksiyonları, spreylendirme, ıslak kimyasal ve sol-gel gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir. Sol-gel yöntemi; nano yapı, yüksek saflıkta ve kristallikte HAp hazırlayabilmek için daha uygundur. Kimyasal çöktürme yöntemi ise, karmaşık ve yüksek maliyetli cihazlara ihtiyaç duymaksızın kolayca HAp sentezlemeye imkan sağlamaktadır. Seramikler için dezavantaj yaratan kırılabilirlik özelliğini kimyasal çöktürme yöntemi ile

sentezlenen biyoseramik malzemelerde azaltmak mümkündür. Çünkü kimyasal çöktürme yöntemi ile sentezlenen biyoseramikler; HAp, trikalsiyum fosfat (TCP), monotit, portlantit vb. gibi fazları aynı anda içeren yapılar barındırmaktadır. Bu durum esnekliğin yanı sıra, üretilen biyoseramiklerin daha biyoemilebilir özellikte olmasını sağlamaktadır. Seramiklerde uyumluluk, mekanik ve mikroyapı gibi özellikleri geliştirmek için literatürde birçok araştırma mevcuttur. Kaygılı ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, biyoseramiklerin mikroyapısını ve dielektrik özelliklerini kontrol etmek için çeşitli katyonlar HAp yapısına katkılanmıştır (Kaygılı ve ark, 2013).

Bir biyoseramik olan HAp'ın sentez aşamaları şekil 2.4'te sunulmaktadır.



**Şekil 2.4 : HAp sentez aşamaları**

**Kaynak:** (Buluş, 2017)

### 2.5.3 Nano biyosilika aerojel (NBA)

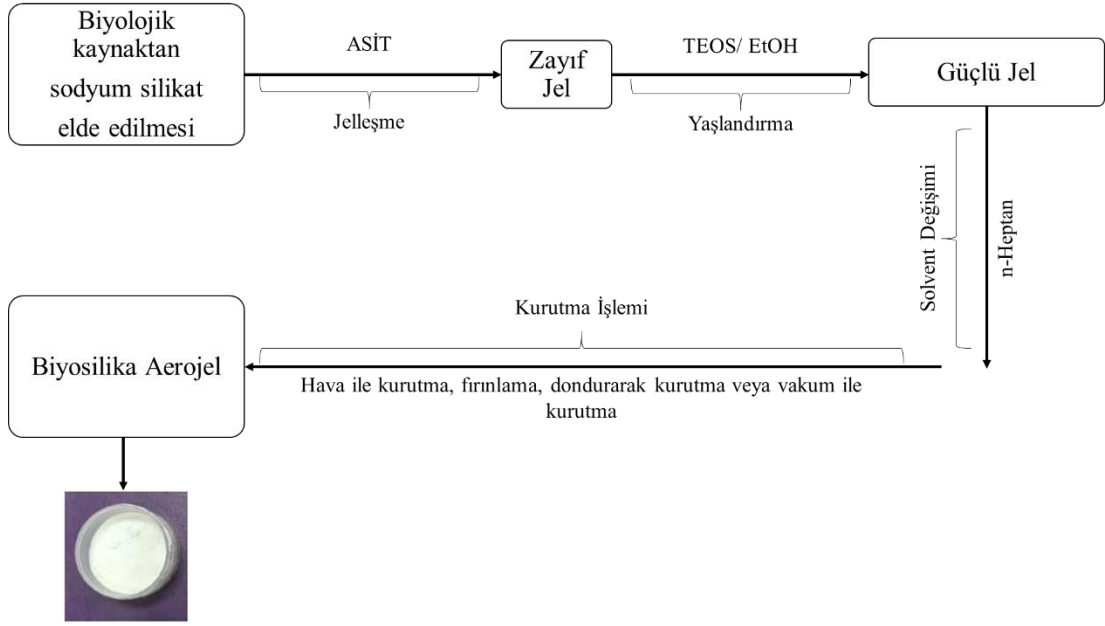
Aerojeller ve kompozitleri, ultra hafif ( $0,003-0,15 \text{ g/cm}^3$ ) katı malzemeler olarak bilinmektedir. Yüksek yüzey alanına ( $500-1200 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ve gözenekliliğe (%80-99,8) sahip olmasından dolayı, akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Genel olarak Sol-jel metodu ile üretilen aerojeller, ihtiyaca göre değişiklik gösteren hammaddeler kullanılarak elde edilmektedir. Aerojellerin yapısal özelliklerinden olan yüzey alanı ve gözenek büyüklüğü gibi özellikler, kullanılan hammaddeye ve üretim parametrelerine bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca; farklı fonksiyonel grupların (amin, karboksil grupları vb.)

eklenmesiyle, istenen mekanik ve fizikokimyasal (hidrofob, yoğunluk vb.) özellikleri sağlamak da mümkündür (Wang ve ark, 2016). Aerojeller; yüksek yüzey alanı ve gözenekliliği sayesinde absorban olarak, düşük termal iletkenliği sayesinde yalıtım malzemesi olarak, yüksek yüzey aktif bölge ve gözenek boyutu sayesinde ise katalizörlerde ve sensör teknolojilerinde kullanılmaktadır (Gurav ve ark, 2010).

Silika aerojeller, günümüzde üzerinde en çok çalışılan aerojel çeşididir. Sıkça kullanılmasının başlıca sebepleri ise; katı halde düşük oranda silika (%1-10) içermeleri ve diğer aerojellerle karşılaştırıldığında ısı iletimi katsayısının (0,02 W/m.K) daha düşük olmasıdır (Gurav ve ark, 2010) Silika aerojellerde por çapı ne kadar küçükse, taşınım ile ısı transferi o kadar azalmaktadır. Gözeneklerin nanometrik boyutunun, hava moleküllerinden ufak olması sayesinde (*Knudsen Efektii*); havadan daha düşük bir termal iletkenlik katsayısına ulaşabilmektedirler (Jelle ve ark, 2010).

Silika aerojeller bilinen katı malzemeler içinde ısı iletkenliği en düşük olan malzemedir. Düşük ısı iletkenliğin yanında; üretiminin tek parça (*monolit*) olarak gerçekleşmesi ve sahip olduğu optik özellikler sayesinde binaların iç ve dış cephelerinde ve pencerelerinde kullanılabilen eşsiz bir yalıtım malzemesidir (Jelle ve ark, 2010). Ayrıca, termal ve akustik yalıtıma ihtiyaç duyulan buzdolaplarında da yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Biyolojik kaynaklardan elde edilen silika aerojeller; seramik yapı içeriğinden dolayı çok yüksek sıcaklıklara dayanabilir ve doğaya zarar vermez. Bu özellikleri; biyosilika aerojelin yanmazlık gerektiren tüm alanlarda kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır (Yuan ve ark, 2016).

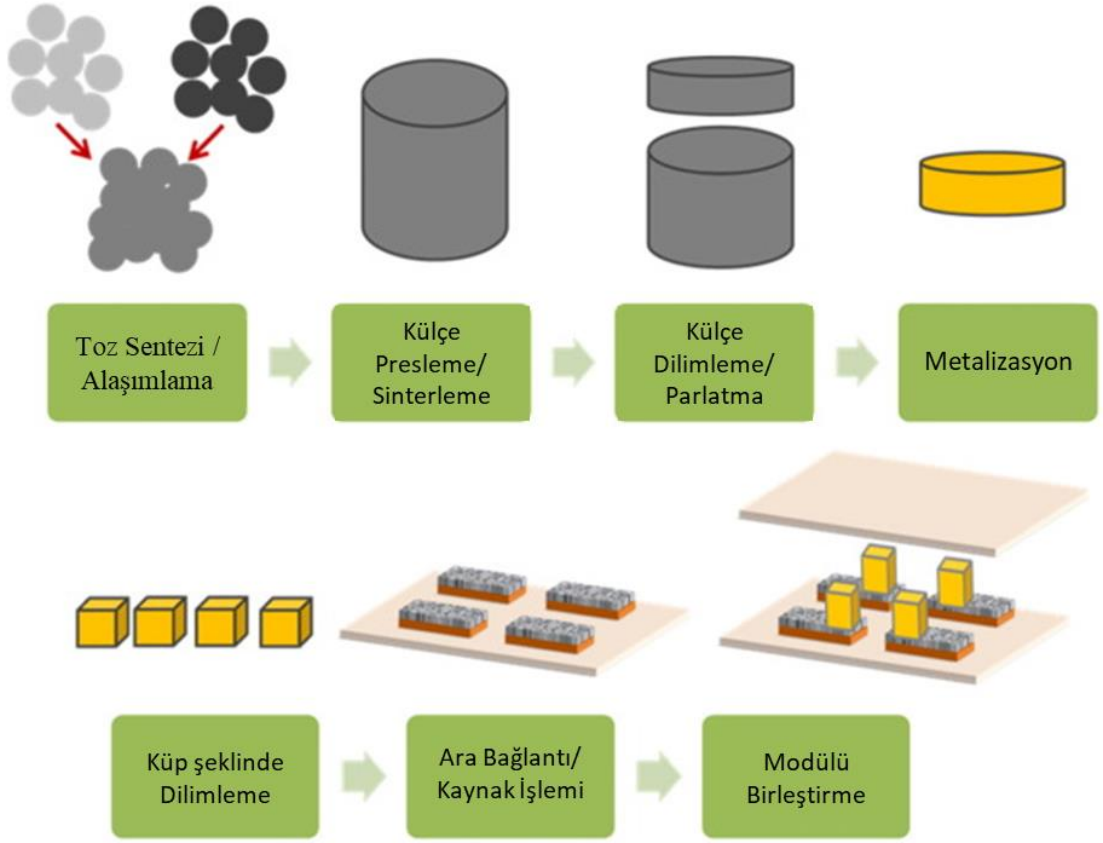
Bilinen yalıtım malzemelerine oranla çok hafif bir malzeme olan silika aerojeller; termal-akustik yalıtım ve büyük oranda enerji tasarrufu sağlamanın yanında, mobil cihazlarda da yalıtım için en ideal ileri mühendislik malzemesidir. Biyosilika aerojelin üretim basamakları şekil 2.5'te verilmektedir (Temel ve ark, 2017).



**Şekil 2.5 : Biosilika Aerojel Üretim Basamakları**  
**Kaynak:** (Temel ve ark, 2017)

## 2.6 TEM'lerin Üretim Süreçleri

TEM'lerin üretim süreci, kullanılan termoelektrik malzemenin türüne göre değişiklik göstermektedir. Bu bölümde standart bir TEM'in üretim süreci açıklanmaktadır. Sunulan üretim süreci farklı TE malzemeleri ve modülleri için değişiklik gösterebilmektedir. Ancak yaygın kullanılan TE üretim malzemeleri ve yöntemlerinde mühendislik açısından karşılaşılan zorlukların açıklanabilmesi için bir referans olarak sunulmaktadır. Bahse konu TEM üretim sürecinin şeması Şekil 2.6'da gösterilmektedir (LeBlanc, 2014b).



**Şekil 2.6 :** TEM üretimi süreç şeması  
**Kaynak:** (LeBlanc, 2014b)

### 3. MATERYAL METOD

Soğuk taşımada; verimlilik, sıcaklık hassasiyeti, hafiflik, mukavemet ve biyoyumluluk gibi unsurlar öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sağlayabilmek için; ısı kaybının en fazla olduğu ve ısının transferinin en fazla gerçekleştiği bölgelerin yalıtımının maksimum derecede gerçekleştirilmesi önem taşımaktadır. TEC'in dış yüzeylerine yapılacak herhangi bir müdahalenin TEC'in sağladığı ısı transferini olumsuz yönde etkileyeceği varsayımıyla; bu çalışmada TEC'lerin yarı iletkenlerinin bulunduğu bölge içerisine farklı ileri mühendislik malzemeleri doldurularak termal davranışları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan ileri mühendislik malzemeleri; yüksek termal ve elektriksel yalıtkanlık, kolay uygulanabilirlik, yüksek mukavemet, yanmazlık ve biyoyumluluk gibi unsurlar gözetilerek belirlenmiştir. Deneilerin gerçekleştirilebilmesi için bir soğutucu taşıma kabı oluşturulmuş ve deney düzeneğinde farklı yalıtkanlıklarda ileri mühendislik malzemeleri içeren TEC'ler bu düzeneğe yerleştirilmiştir.

Kontrol grubu olarak, hiçbir müdahalede bulunulmayan yani yalıtım malzemesi olarak hava kullanılan TEC ile D1 deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası, kontrol grubunda kullanılan TEC; Alan Emisyon Tabanlı-Taramalı Elektron Mikroskopu (FEG-SEM) cihazı ile görüntülenmiş ve Enerji Saçınım Spektrometresi (EDS) ile elemental analizi yapılmıştır. Bu analiz ile modül içerisinde TE özellik sağlayan elementler araştırılmıştır.

TEC'in yarı iletkenleri arasında kalan bölgede farklı ısı iletkenlik özellikleri sağlayan ortamlar yaratılarak 5 deney grubu oluşturulmuştur. Yarı iletken arasındaki hava boşaltılarak vakum ortamı oluşturulmuş ve D2 deneyi gerçekleştirilmiştir. Yarı iletkenler arasında kalan bölgeye; epoksi reçine enjekte edilerek D3 deneyi, toz halinde HAp doldurularak D4 deneyi, nano HAp doldurularak D5 deneyi ve son olarak NBA doldurularak D6 deneyi gerçekleştirilmiştir.

Deney süreci dört temel aşamaya ayrılmıştır:

- Soğutucu taşıma kutusunun tasarlanması ve optimize edilmesi: Fiziksel



parametrelerin belirlenmesi, bilgisayar ortamında 3 boyutlu model oluşturulması ve bu model üzerinde termal analizlerin gerçekleştirilmesi faaliyetlerinden oluşmaktadır.

- TEC'lerin farklı ileri mühendislik malzemeleriyle yalıtım işlemlerinin gerçekleştirilmesi: İleri mühendislik malzemelerinin teminini ya da sentezlenmesini ve TEC'in farklı iletkenlik katsayılarına sahip ileri mühendislik malzemeleri ile yalıtılması faaliyetlerinden oluşmaktadır.
- Deneysel düzeneğinin oluşturulması: Farklı yalıtım ortamı oluşturulmuş TEC'ler ile deneysel düzeneklerinin hazırlanması ve deneylerin gerçekleştirilmesi faaliyetlerinden oluşmaktadır.
- TEC'in morfolojik ve elemental analizlerinin gerçekleştirilmesi: D1 deneyinde kullanılan standart TEC'in, ışık mikroskobu ve FEG-SEM ile morfolojik analizinin ve FEG-SEM cihazında bulunan EDS ile elemental analizinin gerçekleştirilmesi faaliyetlerinden oluşmaktadır.

Deneysel Sonuçları "4. Analiz ve Deneysel Sonuçları" bölümünde detaylı olarak ele alınmaktadır.

### **3.1 Soğutucu Taşıma Kutusunun Tasarlanması ve Optimize Edilmesi**

#### **3.1.1 Fiziksel parametrelerin belirlenmesi**

Soğuk zincirde taşınması gereken malzemelerin taşıma koşullarını belirleyen AB 17.12.2013 tarihli ve 1308/2013 sayılı "Tarım ürünlerinde piyasaların ortak bir organizasyonunu oluşturmak ve Konsey Tüzüklerini yürürlükten kaldırmak" regülasyonu incelenmiş ve bu regülasyonda yer alan kriterler (Kabin sıcaklıkları, bağıl nem değerleri, taşıma süreleri vb.) baz alınarak fiziksel parametreler belirlenmiştir (URL-7, 2019). Regülasyon kapsamında belirlenen fiziksel parametreler ve ortam koşulları göz önünde bulundurularak; ortam sıcaklığının 20°C, ortamın bağıl nem oranının %60-70, taşıma kutusunun iç kabin sıcaklığının 0-8°C aralığında ve iç kabin bağıl neminin %50 oranında olması gerektiği kabul edilmektedir.

Sıcaklık ve nem parametrelerine ek olarak; oluşturulan soğutucu taşıma kutusunun boyutları, endüstride sıklıkla kullanılan kutu boyutlarında (220x160x110 mm) seçilmiştir. Soğutucu kutu malzemesi olarak Stryfoam (XPS) malzemesi seçilmiş ve

üretici firmanın teknik data sayfasından alınan verilere göre, XPS malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı 0,033 W/m.K olarak alınmıştır (URL-8, 2019) ve kutudaki ideal ısı gereksinimleri ve ısı kayıpları teorik olarak *Fourier etkisi* formülüyle (3.1) hesaplanmıştır (Fourier, 1955).

$$Q_F = k_{ort}A\Delta T \quad (3.1)$$

$Q_F$  : Yüksek sıcaklıktaki bölgeden düşük sıcaklıktaki bölgeye geçen ısı miktarı (W)

$A$  : Malzemenin toplam yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  : Dış yüzey ile iç yüzey arasındaki sıcaklık farkı (K)

$k_{ort}$  : Malzemeler arası ısı iletim katsayısı (W/m<sup>2</sup>.K)

$$k_{ort} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{dış}}} \quad (3.2)$$

$\alpha_{iç}$  : İç ortam hava ısı taşınım katsayısı (W/m<sup>2</sup>.K)

$\alpha_{dış}$  : Dış ortam hava ısı taşınım katsayısı (W/m<sup>2</sup>.K)

$\lambda$  : Malzemenin iletkenlik katsayısı (W/m.K)

$l$  : Malzemenin kalınlığı (m)

Soğutucu taşıma kutusunun ebatları 220x160x110 mm, kutu üzerine yerleştirilen TEC'in ebatları ise 40x40 mm'dir. Kutu 40 mm XPS yalıtım malzemesi ile yalıtılmıştır. Bu malzemenin ısı iletkenlik katsayısı 0,033W/m.K ( $\lambda$ ) olarak belirtilmiştir. Kutunun içindeki havanın ısı taşınım katsayısı ( $\alpha_{iç}$ ) ise; fanın oluşturduğu düşük güçte zorlayıcı akım nedeniyle oluşan ortalama akış hızından dolayı 100 W/m<sup>2</sup>.K olarak alınmıştır. Kutunun dışındaki havanın ısı taşınım katsayısı ( $\alpha_{dış}$ ) ise; kutunun dışındaki havanın durağan olması nedeniyle 10 W/m<sup>2</sup>.K olarak alınmıştır (URL-9, 2019).

Soğutucu Taşıma Kutusu Yüzeyleri Isı Kaybı ( $Q_F$ ) (denklem 3.1) (denklem 3.2);

$$\Delta T = 20^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = 20 \text{ K}$$

$A$  = Kutu toplam yüzey alanı- Kutu üzerine yerleştirilen TEC yüzey alanı

$$A = [2x[(0,22x0,16) + (0,22x0,11) + (0,16x0,11)]] - (0,04x0,04)$$

$$A = 0,1524 \text{ m}^2$$

$k_{ort}$  değerinin hesaplanması için denklem 3.2'deki değerler aşağıdaki gibi belirlenmiş ve eşitlikte yerine konulmuştur.

$$\alpha_{iç} = 100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$l = 0,040 \text{ m}$$

$$\lambda = 0,033 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\alpha_{dış} = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$k_{ort} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{0,04}{0,033} + \frac{1}{10}}$$

$$k_{ort} = 0,75636$$

$$Q_F = 0,75636 \times 0,1524 \times 20$$

$$Q_F = 2,3054 \text{ W}$$

Soğutucu taşıma kutusunun kapağındaki sızdırmalardan kaynaklı ısı kayıpları ( $Q_s$ ) (denklem 3.3);

$$Q_s = \Sigma a l_c R \Delta T Z_f \quad (3.3)$$

$Q_s$  : Hava sızıntısı ısı kaybı (W),

$\Sigma a$  : Hava sızıntısı katsayısı,

$l_c$  : Soğutucu taşıma kutusunun açılan kısımlarının çevre uzunluğu (m),

$R$  : Soğutucu taşıma kutusunun durum katsayısı,

$\Delta T$  : İç ve dış ortam sıcaklık farkı (K),

$Z_f$  : Hata payı katsayısı,

Benzer bir çalışmadan faydalanılarak; hava sızıntısı katsayısı (a) değeri 2, hava sızıntısı yaşanan kapak ve TEC bağlantı bölümlerinin toplam uzunluğu ( $l_c$ ) 0,92 m, sıcaklık değişimi  $\Delta T$  20 K, soğutucu taşıma kutusunun durum katsayısı (R) 0,7 ve hata payı katsayısı  $Z_f$  1,1 değeri alınmıştır (Yıldız, 2010).

$$Q_s = 2 \times 0,92 \times 0,7 \times 20 \times 1,1$$

$$Q_s = 28,336 \text{ W}$$

Soğutucu taşıma kutusunun içinde bulunan fanın üzerinde bulunan gerilim 12V, üzerinden geçen akım ise 0,10A'dır. Fandan gelen ısı " $Q_A$ " ise (denklem3.4),

$$Q_A = I \times V \quad (3.4)$$

$$Q_A = 12 \times 0,10$$

$$Q_A = 1,2 \text{ W}$$

Soğutucu taşıma kutusunun toplam ısı kaybı ( $Q_T$ ) (denklem 3.5);

$$Q_T = Q_F + Q_S + Q_A \quad (3.5)$$

$$Q_T = 2,3054 + 28,336 + 1,2$$

$$Q_T = 31,8414 \text{ W} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Soğutucu taşıma kutusu, içine konulan ürünleri sıcaktan korumak ve 0-8°C aralığında tutmak için XPS malzemesinden standart bir kutu şeklinde tasarlanmış ve bu tasarımdan kaynaklı ısı kayıpları ve bu kayıplara bağlı enerji ihtiyacı yaklaşık olarak 32W olarak hesaplanmıştır. Ortaya çıkan ısıl yüklerden dolayı ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanması amacıyla, ticari olarak kullanılan TEC'ler araştırılmış ve piyasada sıklıkla kullanılan TEC-12706 modelinin yeterli olacağı tespit edilmiştir. TEC modelinin kodundaki "127" p-n çifti sayısını, "06" ise saatte çekilen maksimum akım miktarını belirtmektedir.

Belirlenen TEC'in teknik özellikleri (Çizelge 3.1) sunulmaktadır.

**Çizelge 3.1 : TEC-12706 Teknik Özellikleri**

Özellikler	Minimum Değer	Maksimum Değer
Sıcak Yüzey Sıcaklığı (°C)	25	50
Soğuk Yüzey Sıcaklığı (°C)	-50	25
$Q_{\max}$ (Watt)	0	49
$I_{\max}$ (Amper)	0	6,1
$V_{\max}$ (Volt)	14,2	16,2
Modül İç Direnci (Ohm)	2,40	2,75
Termoelektrik Malzemesi	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	
Seramik Malzemesi	$\text{Al}_2\text{O}_3$	

**Kaynak:** (URL-10,2019)

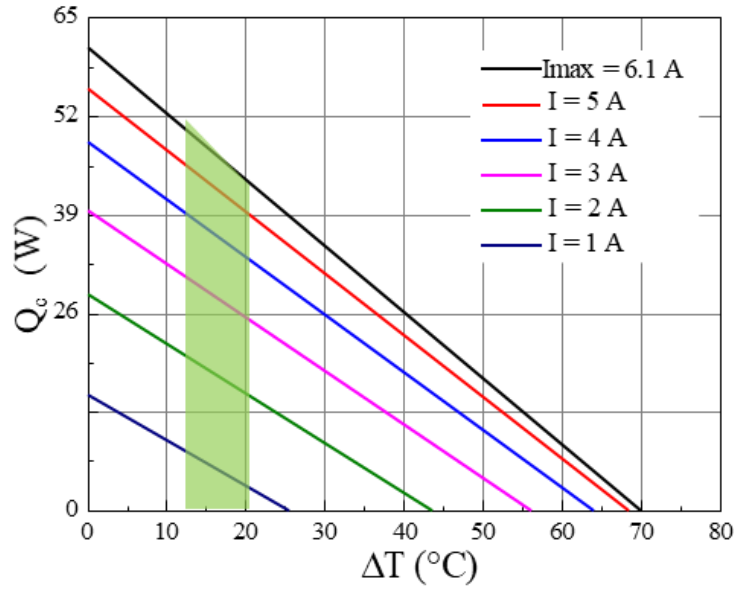
Ticari olarak üretilen TEC'lerin büyük çoğunluğu gibi bu TEM'de de TE malzemesi olarak  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ve seramik malzemesi olarak Alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kullanılmaktadır.

Verilen teknik özelliklere göre TEC'in sıcak yüzey sıcaklığı 25-50°C aralığında ve soğuk yüzey sıcaklığı -50°C ila +25°C aralığında değişebilmektedir. Çekilen ısı

miktarı ( $Q_{max}$ ) 49 Watt değerine ve çekilen akım miktarı ( $I_{max}$ ) 6,1 Amper değerine kadar yükselebilmektedir.

TEC-12706'nın; üretici firma tarafından, modülün sıcak yüzeyinin 27°C 'de olduğu anda ölçülen verilerle oluşturulmuş performans eğrileri; Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te sunulmaktadır.

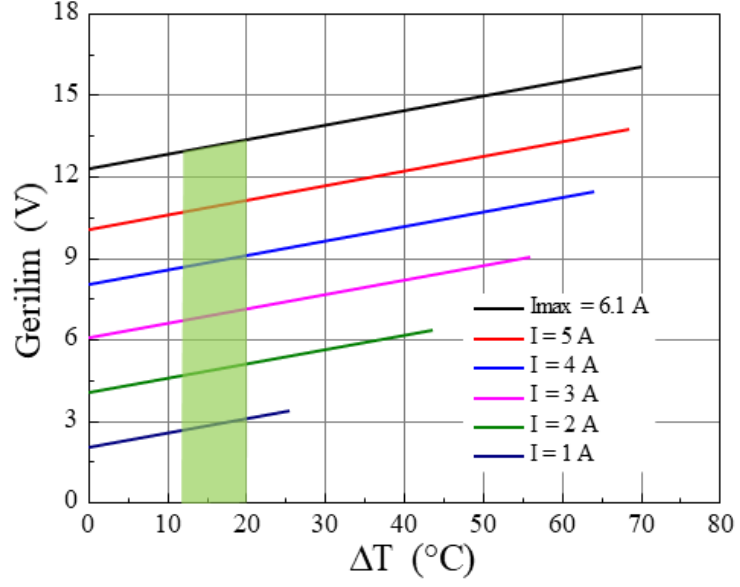
Şekil 3.1'de gösterilen grafikte; farklı akımlarda ( $I$ ) sıcaklık farkının ( $\Delta T$ ) ısı yükü ( $Q_c$ ) bağlı olarak değişimi incelenmektedir.



**Şekil 3.1 :** TEC'in  $Q_c$ - $\Delta T$  Performans Eğrileri Grafiği

**Kaynak:** (URL-10, 2019)

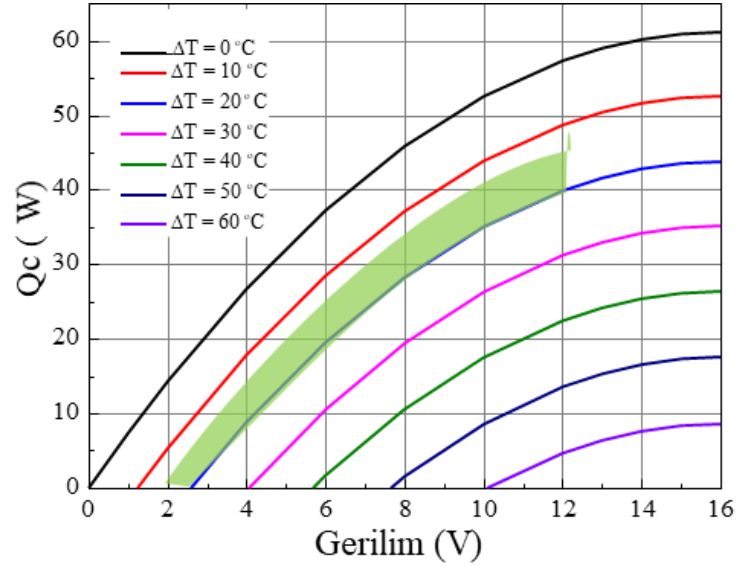
Oluşturulan soğutucu taşıma kutusunun iç kabin sıcaklığının 0-8°C aralığında olması gerektiğinden ve dış ortam sıcaklığının 20°C olmasından dolayı  $\Delta T$  12-20°C arasında olmalıdır. Bu çalışma kapsamında istenilen sıcaklık aralığı, grafikte yeşil renk ile taranmıştır.



**Şekil 3.2** : TEC'in V- $\Delta T$  Performans Eğrileri Grafiği  
**Kaynak:** (URL-10, 2019)

Şekil 3.2'de gösterilen grafikte; farklı akımlarda (I) sıcaklık farkının ( $\Delta T$ ) gerilime (V) bağlı olarak değişimi incelenmektedir.

Oluşturulan soğutucu taşıma kutusunun iç kabin sıcaklığının 0-8°C aralığında olması gerektiğinden,  $\Delta T$  12-20°C aralığındaki sıcaklık farkı sağlayan alan bu grafikte de yeşil renk ile taranmıştır.



**Şekil 3.3** : TEC'in  $Q_c$ -V Performans Eğrileri Grafiği  
**Kaynak:** (URL-10, 2019)

Şekil 3.3'te gösterilen grafikte; farklı sıcaklık değişimlerinde ( $\Delta T$ ) gerilimin (V) ısıtma

güce ( $Q_c$ ) bağlı olarak değişimi incelenmektedir.

Oluşturulan soğutucu taşıma kutusunun iç kabin sıcaklığının 0-8°C aralığında olması gerektiğinden,  $\Delta T$  12-20°C aralığındaki sıcaklık farkı sağlayan alan bu grafikte de yeşil renk ile taranmıştır.

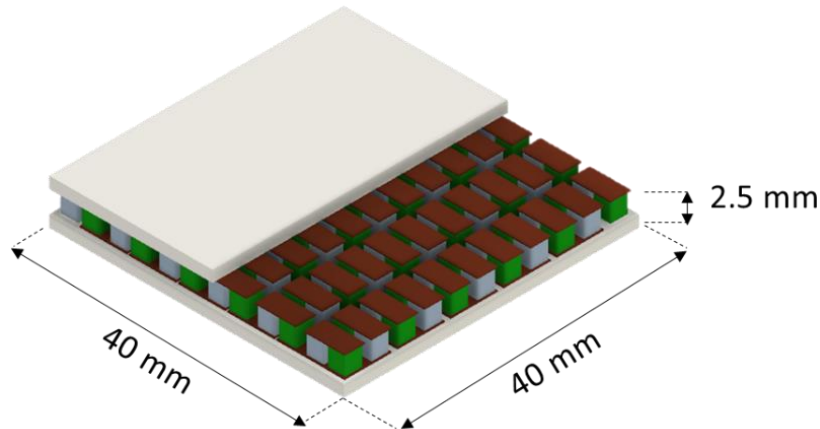
Performans eğrilerinden faydalanarak; istenilen çalışma sıcaklığı aralığına erişmek için, TEM'in tüketeceği elektrik enerjisinin yaklaşık 50W değerinde olması gerektiği tespit edilmiştir.

ZT değerinin hesaplanmasında denklem 2.2'de yer alan eşitlik kullanılmıştır. Bu denklemde, üretici tarafından sağlanan veriler olan;  $\alpha$  değeri  $190 \times 10^{-6}$ ,  $\sigma$  değeri  $850 \times 10^2$ ,  $\kappa$  değeri 1,2 olarak seçilmiştir (URL-10, 2019). Dış ortam sıcaklığını ifade eden T değeri ise 20°C-293,15 K olarak kabul edilmiştir. Bu veriler ışığında; standart hava boşluklu TEC için ZT değeri 0,749225417 olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın “4.4 Farklı Deneysel Düzeneklerinde ZT ve COP Değerlerinin Hesaplanması” bölümünde; gerçekleştirilecek deneylerden elde edilen veriler ışığında tüm deney düzenekleri için ZT ve COP değerleri hesaplanmaktadır.

### 3.1.2 Bilgisayar ortamında 3 boyutlu model oluşturulması

TEC'in 3 boyutlu modeli Autodesk Fusion360 programında 1:1 oranında çizilmiştir (Şekil 3.4). Oluşturulan 3 Boyutlu modelde p-n çiftleri, seramik malzemesi ve bakır bağlantı noktaları gerçek boyutlarıyla görülebilmektedir. Bu sayede, standart olarak kullanılan ticari bir TEC'in iç kesitinin görünümüne ve boyutlarına ilişkin genel bir bilgi verilmektedir.

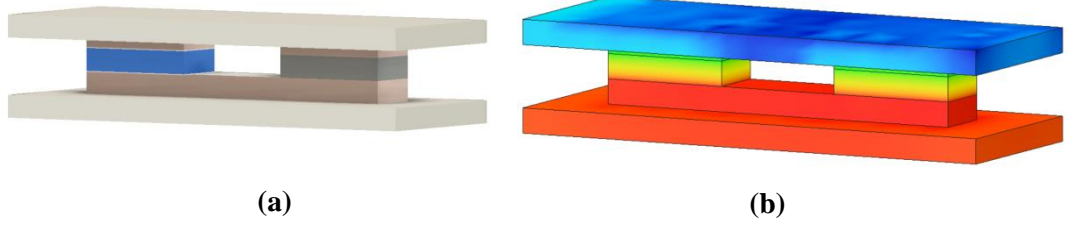


Şekil 3.4 : TEC'in 3 Boyutlu Model ve Boyutları

Kaynak: (Bozkurt, 2020)

### 3.1.3 Oluşturulan 3 boyutlu modelin termal analizlerinin gerçekleştirilmesi

Termal analiz sonuçlarının, gerçeğe yakın ve hızlı olması amacıyla; modül içerisinde tek bir p-n çifti ele alınarak termal analizler bu tek p-n çifti üzerinden, Autodesk Fusion360 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5 :** TEM p-n Çiftinin a) 3 Boyutlu ve b) Termal 3 Boyutlu Görünümü

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Yapılan termal analiz ile ısıl yüklerin modül üzerinde nasıl davranış göstereceği incelenmiş ve soğutucu kapasitesinin yeterliliği araştırılmıştır. Analiz için sağlanan sınır koşulları tabloda verilmiştir (Çizelge 3.2).

**Çizelge 3.2 :** Termal Analiz Sınır Değerleri

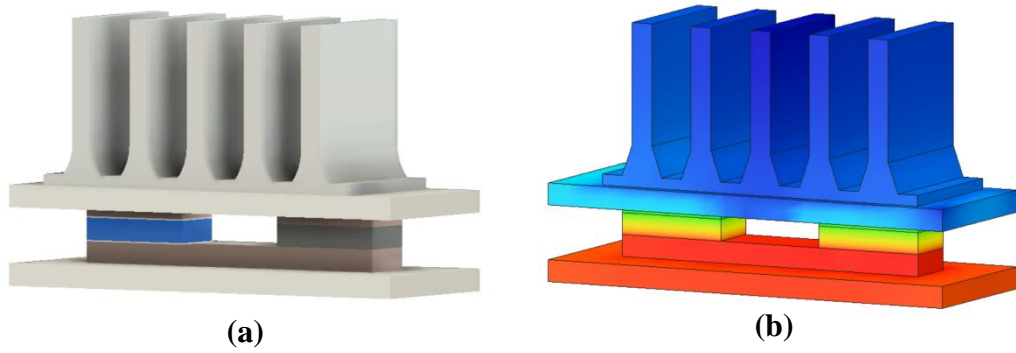
Sınır Koşullar	Değer
1.Genel	
Kontakt Toleransı	0,1 mm
Global İlk Sıcaklık	20°C
2.Mesh (Ağ)	
Kati maddeler için Ortalama Eleman Boyutu (model boyutunun% 'si)	
Öge Dizinimi	10
Yaratılan Eğri Mesh Elemanları	Parabolik
Kenarlardaki Döndürülen Maksimum Eğim (Açı.)	Evet
Maks. Bitişik Mesh boyutu oranı	60°
Maks. En Boy Oranı	1.5
Minimum Element Boyutu (ort. büyüklüğün % 'si)	10
3.Adaptif Mesh Geliştirme	
Aritma Adım Sayısı	0
Sonuçlar Yakınsaklık Toleransı (%)	20
Rafine Edilecek Elementlerin Kısmı (%)	20
Temel Doğruluk Sonuçları	Isı akısı

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Yapılan termal analiz sonucunda; TEC'in soğuk yüzey alanının istenen soğutma aralığını (0-8°C) sağlaması için, sıcak yüzey alanı sıcaklığının 50°C'yi geçmesi



gerektiği sonucuna varılmıştır. Sıcak yüzey alanı sıcaklığının 50°C'yi geçmesi, yarı iletkenlerle bakır bağlantı noktaları arasındaki kaynak malzemesini eritmektedir. Bu nedenle, 50°C sıcaklıkta TEC'in sağlıklı bir biçimde çalışması mümkün değildir. Bu sorunu, yüzey alanını genişletmek suretiyle sıcak yüzey alanı sıcaklığını düşürerek aşmak mümkündür. Bu bağlamda; yüzey alanını genişleterek ısı transfer hızını arttırmak amacıyla, TEC'in sıcak ve soğuk yüzeylerine yerleştirilmesi gereken alüminyum blok kütlesi ve yüzey alanı hesaplanmış ve sonuçlar "4.1 Termal Analiz Sonuçları" bölümünde verilmektedir (Şekil 3.6).



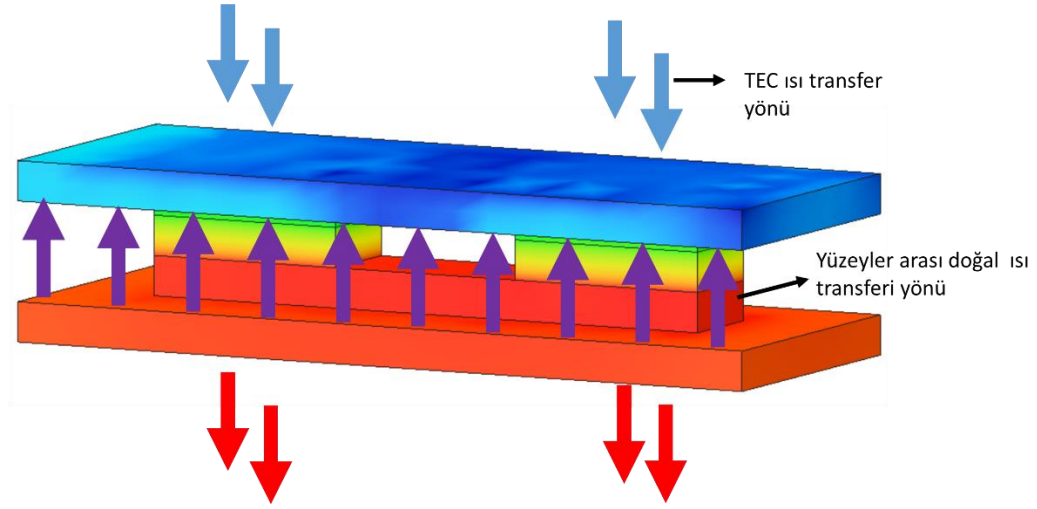
**Şekil 3.6 :** a) TEM p-n Çifti 3 Boyutlu Çizimi b) p-n Çifti 3 Boyutlu Termal Analizi  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)

Hesaplanan kütle ve alandaki alüminyum blokların TEC'in yüzeylerine yerleştirildiği model üzerinde, Autodesk Fusion360 programı ile termal analizler tekrardan gerçekleştirilmiştir. Termal analiz sonuçları "4.1 Termal Analiz Sonuçları" bölümünde verilmektedir.

Yapılan termal analizler göz önünde bulundurularak, yüzey alanını genişletmek amacıyla; ticari olarak bulunan ve toplamda 125 Watt güç aktarımı için tasarlanan soğutucu gruplar kullanılmıştır.

### 3.2 TEC'lerin Farklı İleri Mühendislik Malzemeleriyle Yalıtım İşlemlerinin Gerçekleştirilmesi

TEC'ler TE malzeme özelliklerinden dolayı soğuk yüzeydeki ısıyı çekerek sıcak yüzeye transfer etmektedir. Ancak *Fourier ısı transfer yasası* gereği sıcaklık farkı olan ortamlarda ısı geçişi olur ve ısı geçişinin yönü her zaman yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğrudur (Fourier, 1955). Bu durumda TEC'in çalışma prensibinin tersi yönünde doğal bir ısı akışı gerçekleşmekte ve TEC'in çalışma performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Şekil 3.7).



**Şekil 3.7 : TEC'in İçerisindeki Isı Transferleri**  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Bu çalışma kapsamında; *Fourier ısı transfer yasası* gereği doğal olarak oluşan ısı transferinin azaltılması hedeflenmiş ve bu amaçla ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyler arası bölgenin yalıtılması planlanmıştır.

Yalıtım amacıyla farklı ileri mühendislik malzemeleri kullanılmış ve bu malzemelerin sistem performansına etkisi araştırılmıştır. Düzenekte kullanılan ileri mühendislik malzemelerinin termal iletkenlik katsayıları özet olarak çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3 : Düzeneklerde kullanılan ileri mühendislik malzemelerinin**

Termal İletkenlik Katsayısı	Değer
Hava Ortamı Termal İletkenlik Katsayısı	0,025 W/m.K
Vakum Ortamı Termal İletkenlik Katsayısı	0,01 W/m.K
Epoksi Katkı Termal iletkenlik Katsayısı	1,15 W/m.K
HAp Katkı Termal iletkenlik Katsayısı	0,6 W /m.K
Nano HAp Katkı Termal iletkenlik Katsayısı	0,069 W/m.K
NBA Katkı Termal iletkenlik Katsayısı	0,05 W/m.K

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

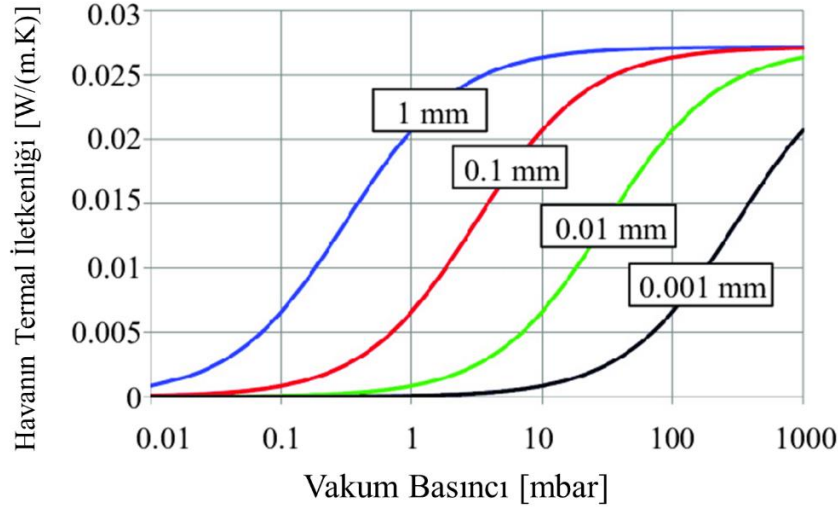
Sonuçlar “4. Analiz ve Deney Sonuçları” bölümünde sunulmakla birlikte; bu bölümde ileri mühendislik malzemelerinin temin edilmesi veya sentezlenmesi aşamaları, malzemelerin TEC içine uygulanma süreçleri ve teknik özellikleri açıklanmaktadır.

### 3.2.1 Standart hava boşluklu TEC

Kontrol grubu olarak oluşturulan D1 deneyinde, doğrudan ticari olarak kullanılan standart bir TEC ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bu standart TEC'in seramikleri arasında kalan yani modülün içerisindeki tüm boşluklar hava ile doludur ve TEC'in içerisine herhangi bir yabancı cisim girmemesi için çevresi beyaz bir silikon ile kaplanmıştır. Özetle, standart TEC'de kullanılan yalıtım malzemesi havadır ve havanın ısı iletim katsayısı ( $\lambda$ ) 0,025 W/m.K'dir (Lang ve ark., 2016).

### 3.2.2 Vakum ortamı sağlanan TEC

D2 deneyinde; standart bir TEC'in boşlukları arasındaki hava boşaltılarak, basınç 0.38 atm'e kadar düşürülmüş ve vakum ortamı elde edilmiştir. Yapılan işlem sonrası modül içinde oluşturulan vakum ortamı sayesinde, termal iletim katsayısı ( $\lambda$ ) 0,025 W/m.K'den 0,01 W/m.K'e düşürülmüştür. Farklı vakum basınçları altında havanın termal iletkenlik davranışları Şekil 3.8'de verilmektedir (Lang ve ark., 2016).



Şekil 3.8 : Havanın Termal İletkenlik Grafiği

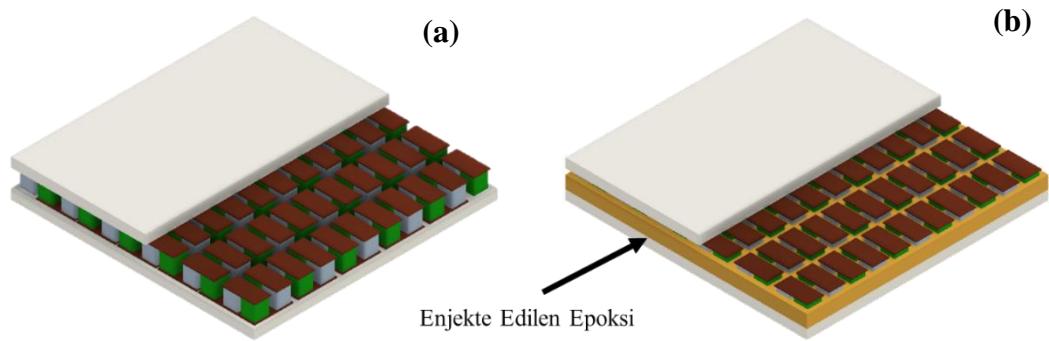
Kaynak: (Lang ve ark., 2016)

### 3.2.3 Epoksi reçine ile doldurulan TEC

D3 deneyinde; standart bir TEC'in boşlukları arasındaki bölgeye epoksi reçine enjekte edilmiş ve bölgeden havanın boşaltılması sağlanmıştır. Deney düzeneğinde epoksi reçine kullanılmasının temel nedeni; 1982 yılında Lee ve Neville tarafından gerçekleştirilen çalışmada; tek bileşenli epoksi reçinenin termal iletim katsayısının, normal şartlar altında bulunan havanın termal iletim katsayısından düşük olduğunun belirtilmesidir (Lee ve Neville, 1982). D3 deney düzeneği ile; D1 deneyindeki

standart TEC'in yalıtımında kullanılan havadan daha yalıtkan bir ortam yaratılması ve D2 düzeneğindeki vakum ortamının oluşturulmasında karşılaşılan zorlukların önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Uygulama aşamasında, sıvı halde bulunan epoksi reçine TEC içerisine enjekte edilmiştir. Epoksinin katılaşma sürecinde TEC'in iç yüzeyindeki boşluğu tamamıyla doldurması ve modül dışına taşmaması önem taşımaktadır. Bu amaçla; TEC'in standart olarak yan yüzeylerinde bulunan silikon, bariyer olarak kullanılmış ve epoksi reçine enjektör vasıtasıyla modülün içerisine enjekte edilmiştir (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9 :** a) Standart TEC ile b) Epoksi Enjekte Edilen TEC'in 3 Boyutlu Gösterimi  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

TEC'in yalıtımında kullanılacak epoksi reçine; ticari olarak rahatlıkla temin edilebilen, düşük termal ve elektriksel iletkenliğe sahip, çift bileşenli ince döküm epoksi reçinesi olarak tercih edilmiştir. Modülün içindeki boşluğun hacmi 3 boyutlu modelden hesaplanarak 3 gram epoksi reçine karışımının gerektiği tespit edilmiştir. Epoksi ve katalizörünün karışım oranı üretici firma tarafından 4/1 olarak belirlenmiş ve karışım bu orana göre hazırlanmıştır. Çift bileşenli ince döküm epoksi reçinesi, diğer epoksi reçinelerden farklı olarak katılaşma sırasında dışarıya ısı vermemektedir.

Üretici firma tarafından sağlanan çift bileşenli ince döküm epoksi reçinesinin özellikleri Çizelge 3.4'te verilmektedir (URL-11, 2019).

**Çizelge 3.4 : Çift Bileşenli İnce Döküm Epoksi Reçinesi Teknik Özellikleri**  
**TEKNİK ÖZELLİKLER**

Özgül Ağırlık	1.15 g/cm <sup>3</sup>
Termal İletkenlik Katsayısı	1.30-1.44 W/m.K
Hacimsel Direnç	>10 <sup>15</sup> ohm.cm
Çalışma Sıcaklığı	-55°C-+155°C

---

Renk	Şeffaf
Katılma Süresi	24 Saat

---

**Kaynak:** (URL-11, 2019)

#### **Çizelge 3.4 : Çift Bileşenli İnce Döküm Epoksi Reçinesi Teknik Özellikleri (Devamı)**

TEC içerisine enjekte edilen epoksi reçinenin katılmasını hızlandırmak için, modül etüv içerisinde 45°C’de 6 saat tutulmuştur. Katılmanın durumunu kontrol etmek için, oluşturulan referans parça modül ile aynı koşullarda muhafaza edilmiştir. Epoksi reçinenin tam olarak katılması için; etüvden çıkarılan modül 24 saat oda koşullarında bekletilmiştir.

#### **3.2.4 HAp ile doldurulan TEC**

D4 deneyinde; standart bir TEC’in boşlukları arasındaki bölgeye, 200 mikron tane boyutunda ticari olarak kullanılan HAp tozları etanol ile karıştırılarak enjekte edilmiş ve bölgeden havanın boşaltılması sağlanmıştır. Karışımın içindeki etanolün uçması için; modül, 24 saat etüvde 45°C’de bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda, deneyin yapılması için soğutucu taşıma kutusuna yerleştirilen TEC; akım verilmesiyle birlikte içeriğindeki alkolün TEC’in yarı iletkenlerine zarar vermesinden dolayı kısa devre yapmıştır. Bu nedenle deney düzeneği tekrar oluşturulmuş ve yeni düzenekte etanol kullanılmamış, 200 mikron tane boyutundaki HAp tozları TEC içerisindeki boşluklara sıkıştırılarak doldurulmuştur.

İleri mühendislik seramiklerinden olan HAp’ın, elektriksel olarak yalıtkan olduğu literatür araştırmasından bilinmektedir (Horiuchi ve ark, 2012).

Sigma-Aldrich firmasından temin edilen ve TEC içerisine sıkıştırılarak doldurulan HAp’ın teknik özellikleri Çizelge 3.5’te verilmektedir.

#### **Çizelge 3.5 : HAp Teknik Özellikleri**

---

<b>TEKNİK ÖZELLİKLER</b>	
Özgül ağırlık	3,140 g/cm <sup>3</sup>
Termal İletkenlik Katsayısı	0,6 W/m.K

---

**Kaynak:** (URL-12, 2019)

#### **3.2.5 Nano HAp ile doldurulan TEC**

D2 deneyinde oluşturulan vakum ortamının, TEC içerisinde yaratılmasının karmaşık ve maliyetli olması ve teknolojik ilerlemeler ışığında geliştirilen ileri mühendislik

nano malzemelerin üstün özellikleri nedeniyle; TEC'in yalıtımında, nano HAp'ın kullanılması uygun görülmüştür (Zhu, ve ark, 2019). Bu amaçla nano HAp sentezi gerçekleştirilmiş ve TEC'in içerisine sıkıştırılarak doldurulmuştur.

Nano HAp'ın sentezlenmesi için kimyasal çöktürme yöntemi kullanılmış; doğal kaynaklardan elde edilen kalsiyum (Ca) içeriği, ortofosforik asit (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ile tepkimeye sokulmuş ve tepkime sonucunda bir çökelti elde edilmiştir. Elde edilen çökelti etüvde 100°C'de kurutularak, çökeltiden solüsyonun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Etüv işleminden çıkan malzeme 4 saat boyunca sinterlenerek nano HAp sentezleme işlemi tamamlanmıştır.

TEC içerisine yerleştirilen nano HAp'ın teknik özellikleri Çizelge 3.6'da verilmektedir.

**Çizelge 3.6 : Nano HAp Teknik Özellikleri**

<b>TEKNİK ÖZELLİKLER</b>	
Özgül Ağırlık	3,140 g/cm <sup>3</sup>
Termal İletkenlik Katsayısı	0,069 W/m.K
Gözeneklilik Oranı	%86-96

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

### **3.2.6 NBA ile doldurulan TEC**

D6 deneyinde; standart bir TEC'in boşlukları arasındaki bölgeye, ticari olarak kullanılan NBA tozları sıkıştırılarak doldurulmuş ve bölgeden havanın boşaltılması sağlanmıştır.

İleri mühendislik malzemelerinden olan NBA'ların TEC'lerin yalıtımı için uygun bir malzeme olarak değerlendirilmesinin birkaç farklı nedeni bulunmaktadır. Bilinen yalıtım malzemelerine oranla çok hafif bir malzeme olan NBA; yüksek termal, akustik ve elektriksel yalıtım sağlamaktadır (Temel ve ark, 2017).

Bu deney için, Yıldız Teknik Üniversitesi ve Ömer Lütfü Özgül Kimyevi Maddeler firması iş birliğiyle üretilen NBA tozu temin edilmiştir. NBA'nın teknik özellikleri Çizelge 3.7'de verilmektedir.

**Çizelge 3.7 : NBA Teknik Özellikleri**

<b>TEKNİK ÖZELLİKLER</b>	
Özgül Ağırlık	0,15-0,25 g/cm <sup>3</sup>
Termal İletkenlik Katsayısı	0,051 W/m.K

Gözenek Boyutu	3-5 nm
Spesifik Yüzey Alanı	700±30 m <sup>2</sup> /g

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

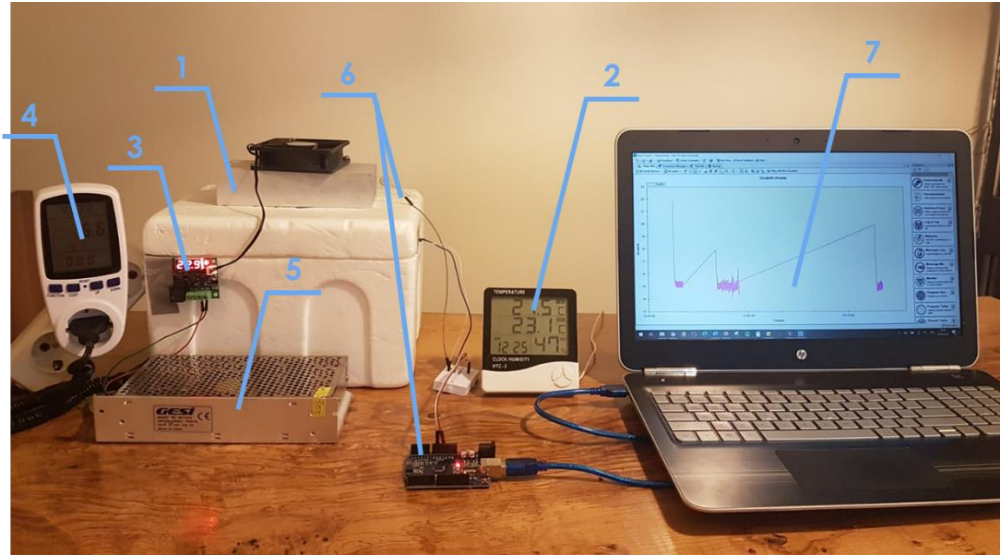
### Çizelge 3.7 : NBA Teknik Özellikleri (Devamı)

### 3.3 DeneY Düzeneyinin Oluşturulması

Bu çalışma boyunca farklı ileri mühendislik malzemeleri ile yatılım sağlanan TEC'lerin davranışlarının incelenmesi amacıyla oluşturulan deney düzeneği, literatürde yer alan benzer çalışmalardan esinlenerek tasarlanmıştır. Soğutucu taşıma kutusuna farklı yalıtkanlık özellikleri gösteren malzemeler içeren TEC'ler, alüminyum blok ve fandan oluşan soğutucu grup ve kutunun 4 farklı noktasına termistörler (NTC sıcaklık sensörleri) yerleştirilmiştir.

Literatürde yer alan benzer uygulamalarda; sıcaklık ölçümleri kapalı bir kutu yerine doğrudan alüminyum bloklar üzerinden 2 sıcaklık sensörü ile gerçekleştirilmiştir (Al Musleh, 2017). Bir başka çalışmada ise, TEC ve alüminyum bloklar su soğutmalı bir kabinin içine yerleştirilmiştir (Ciylan ve Yılmaz, 2007).

Bu çalışma boyunca kullanılan deney düzeneği Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.10 : DeneY Düzeneği Bileşenleri**

- 1) TEC ve Soğutucu Grubu 2) Dijital Termometre ve Higrometre 3) Kapalı Çevrim Sıcaklık Kontrolörü 4) Enerjimetre 5) Güç Kaynağı 6) NTC Termistör Grubu 7) Arduino Uno ve MegunoLink Programı

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

DeneY düzeneği bileşenlerinin teknik detayları aşağıda başlıklar halinde incelenmektedir.

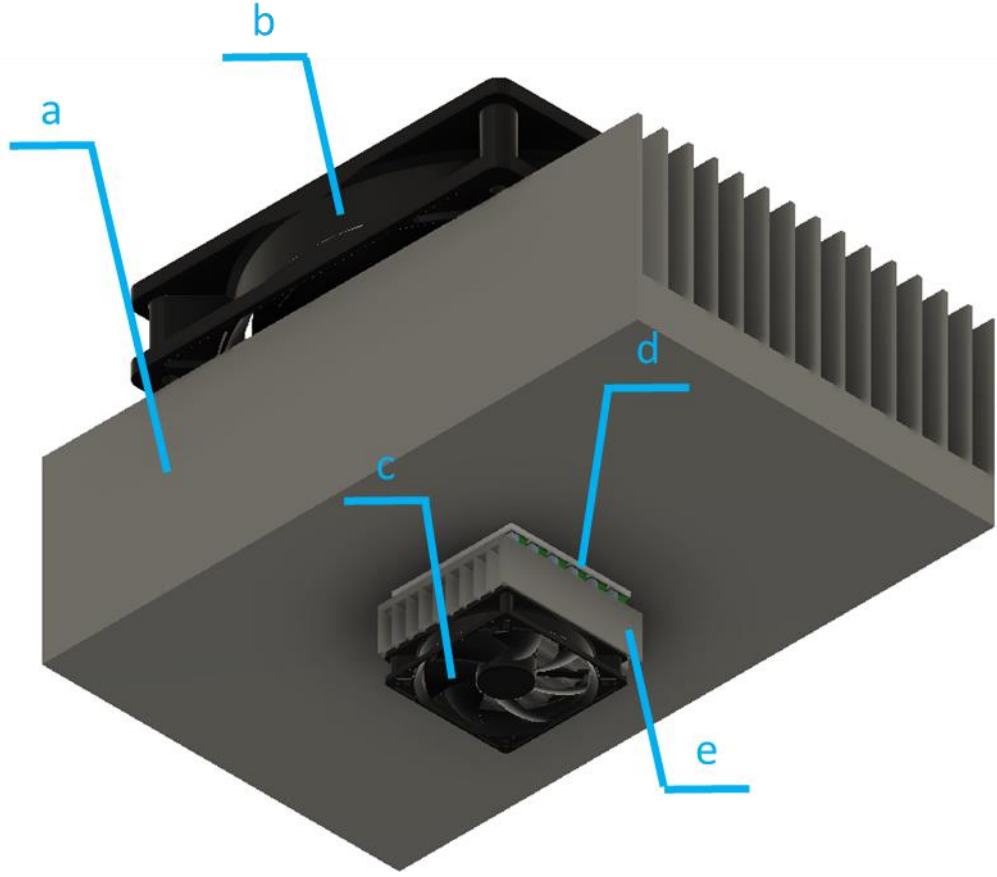
### 3.3.1 TEC ve soğutucu grubu

Bu çalışmada kullanılan TEC'in özellikleri "3.1.1 Fiziksel parametrelerin belirlenmesi" bölümünde detaylıca anlatılmaktadır. TEC yüzey alanının genişletilmesi amacıyla, modül üzerine monte edilen alüminyum blok ve fan gruplarından oluşan soğutucu grubuna ilişkin bilgiler aşağıda detaylıca açıklanmaktadır.

TEC'in sıcak yüzeyine 70x145x35 mm boyutlarında; TEC'in soğuk yüzeyine ise 40x40x10 mm boyutlarında alüminyum bloklar monte edilmiştir. Alüminyum bloklar ile modülün yüzeyleri arasına Cooler Master markalı Htk-002 (Alüminyum ve gümüş metal tozu içerikli) termal macun uygulanarak, alüminyum bloklar ve TEC'in yüzeyleri arasındaki temas alanı arttırılmıştır. Alüminyum blokların termal tasarım gücü 125 Watt'tır. Soğutucu grupta sıcak ve soğuk yüzeyde havanın ısı taşınım katsayısını arttırmak amacıyla iki adet fan bulunmaktadır. Sıcak yüzeydeki alüminyum blok üzerindeki fan, 80 mm çapında olup 12 V gerilim ve 0,20 A akım ile çalışmakta; soğuk yüzeydeki alüminyum blok üzerinde yer alan fan ise, 40 mm çapında olup 12V gerilim ve 0,10 A akım ile çalışmaktadır.

Soğutucu ünite grubuna ilişkin 3 boyutlu model tasarımı Autodesk Fusion360 programında oluşturulmuştur (Şekil 3.11).





**Şekil 3.11 : Soğutucu Ünite Grubu 3 Boyutlu Model Tasarımı**

- a) Sıcak Yüzey Alüminyum Blok b) Sıcak Yüzey Fan c) Soğuk Yüzey Fan d) TEM e) Sıcak Yüzey Alüminyum Blok

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

### 3.3.2 Dijital termometre ve higrometre

Soğutucu taşıma kutusu içine yerleştirilen termistörlerden aktarılan sıcaklık değerlerini teyit etmek ve dış ortamın sıcaklık ve nemini tespit etmek amacıyla; termometre ve higrometre özelliklerine sahip bir ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.12). Kullanılan ölçüm cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.7’de verilmektedir.



Şekil 3.12 : Termometre ve Higrometreye Sahip Ölçüm Cihazı  
Kaynak: (URL-13, 2019)

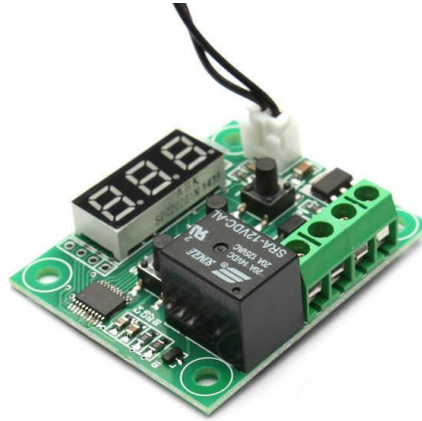
Çizelge 3.8 : Termometre ve Higrometre Ölçüm Cihazı Teknik Özellikleri

**TEKNİK ÖZELLİKLER**

Sıcaklık Ölçüm Aralığı	-10°C-+50°C
Sıcaklık Hassasiyeti	±1°C
Sıcaklık Çözünürlüğü	0,1°C
Nem Ölçüm Aralığı	% 10-99 rh
Nem Hassasiyeti	%±5 rh
Nem Çözünürlüğü	% 1 rh

Kaynak: (URL-13, 2019)

### 3.3.3 Kapalı çevrim sıcaklık kontrolörü



**Şekil 3.13 :** Kapalı Çevrim Sıcaklık Kontrolörü

**Kaynak:** (URL-14, 2019)

TEC'in sıcak yüzeyinin çalışma sıcaklığının 25-50°C aralığında tutulabilmesi için kapalı çevrim sıcaklık kontrolörü (Şekil 3.13) kullanılmıştır. Kapalı çevrim sıcaklık kontrolörüne ilişkin teknik özellikler Çizelge 3.9'da verilmektedir.

**Çizelge 3.9 :** Kapalı Çevrim Sıcaklık Kontrolörü Teknik Özellikleri

#### **TEKNİK ÖZELLİKLER**

Çalışma Sıcaklık Aralığı	-50-110°C
Ölçüler	48,5x40 mm
Sıcaklık Kontrol Modu	ON/OFF
Kontrol Hassasiyeti	0,1°C
Yenileme Süresi	500 ms
Çalışma Voltajı	DC 12V
Çıkış Gücü:	20A röle
Sıcaklık Ölçüm Aleti	NTC
Çevresel Gereksinim	Sıcaklık: -10-60°C , Nem: %20-85
Prob Uzunluğu	53 cm

**Kaynak:** (URL-14, 2019)

### 3.3.4 Enerjimetre

Yapılan deneylerde TEC'in toplamda ve anlık olarak tükettiği elektrik enerjisinin ölçülmesi ve takip edilmesi amacıyla enerjimetre (Şekil 3.14) kullanılmıştır. Kullanılan enerjimetrenin teknik özellikleri Çizelge 3.10'da verilmektedir.



**Şekil 3.14 : Enerjimetre**  
**Kaynak:** (URL-15, 2019)

**Çizelge 3.10 : Enerjimetre Teknik Özellikleri**

---

**TEKNİK ÖZELLİKLER**

---

Çalışma Gerilimi	200-250 AC
Frekans Gösterimi	50Hz
Maksimum Akım	16 A
Akım Çözünürlüğü	0,1 A
Güç Tüketim Gösterim Frekansı	1000 ms

---

**Kaynak:** (URL-15, 2019)

### 3.3.5 Güç kaynağı

Deney düzeneğindeki TEC, soğutucu grubunda yer alan fanlar ve kapalı çevrim sıcaklık kontrolör devresinin çalıştırılabilmesi için DC akıma ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin sağlanabilmesi için; şehir şebekesindeki AC akımı DC akıma dönüştüren bir güç kaynağı (Şekil 3.15) kullanılmıştır. Kullanılan güç kaynağının teknik özellikleri Çizelge 3.11’de verilmektedir.



**Şekil 3.15 : Güç Kaynağı**  
Kaynak: (URL-16, 2019)

**Çizelge 3.11 : Güç Kaynağı Teknik Özellikleri**

TEKNİK ÖZELLİKLER	
Çıkış Voltajı	12V (DC)
Çıkış Akımı	10 A
Güç	120 Watt
Voltaj Ayar Aralığı	11,5-13,5 V
Voltaj Toleransı	%2,0
Verim	%88
Voltaj Koruması	14 V
Gövde Malzemesi	Alüminyum
Özellikler	Kısa Devre ve Gerilim Korumalı

Kaynak: (URL-16, 2019)

### 3.3.6 NTC termistör grubu

NTC (negative temperature coefficient of resistance-dirençin negatif sıcaklık katsayısı) termistörü, sıcaklığın artmasıyla iletkenliği azalan bir tür sıcaklık sensörüdür (Fagan ve Amarakoon, 1993). Deney düzeneğinde yer alan soğutucu taşıma kutusunun 4 farklı noktasına NTC termistörler yerleştirilerek, bu bölgelerdeki sıcaklığın sürekli biçimde analog olarak ölçülmesi sağlanmıştır. Kullanılan NTC termistörlerin (Şekil 3.16) teknik özellikleri Çizelge 3.12’de verilmektedir.



**Şekil 3.16 : NTC Termistör**

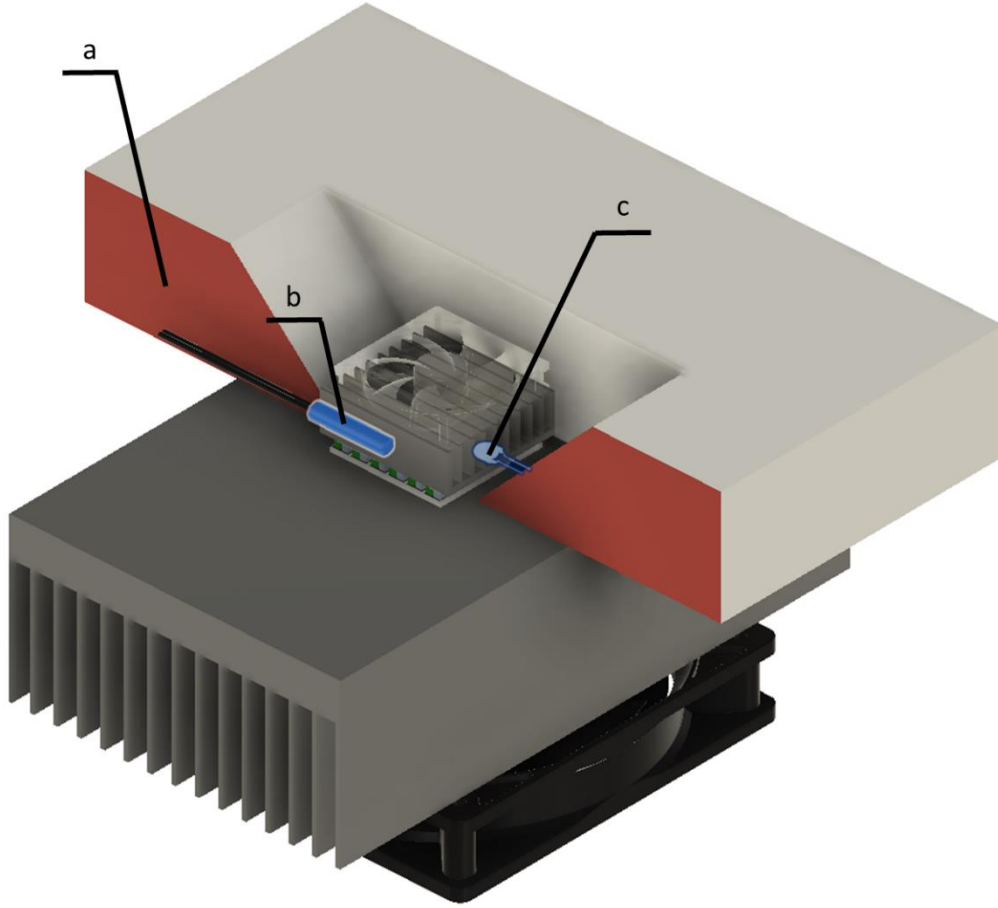
**Kaynak:** (URL-17, 2019)

**Çizelge 3.12 : NTC Termistör Teknik Özellikleri**

<b>TEKNİK ÖZELLİKLER</b>	
Empedans	100 K $\Omega$
Hassasiyet	%1
Sensör Boyutları	3x15 mm
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-50°C-300°C

**Kaynak:** (URL-17, 2019)

Soğutucu taşıma kutusunun iç kısmında kullanılan NTC termistörler, 3 boyutlu kesiti verilen model üzerinde T1 ve T2 olarak Şekil 3.17’de gösterilmektedir. T1 NTC termistörü, TEC’in soğuk yüzeyine yerleştirilmiştir; T2 NTC termistörü ise, soğuk yüzeydeki alüminyum bloğun uç noktasına yerleştirilmiştir.

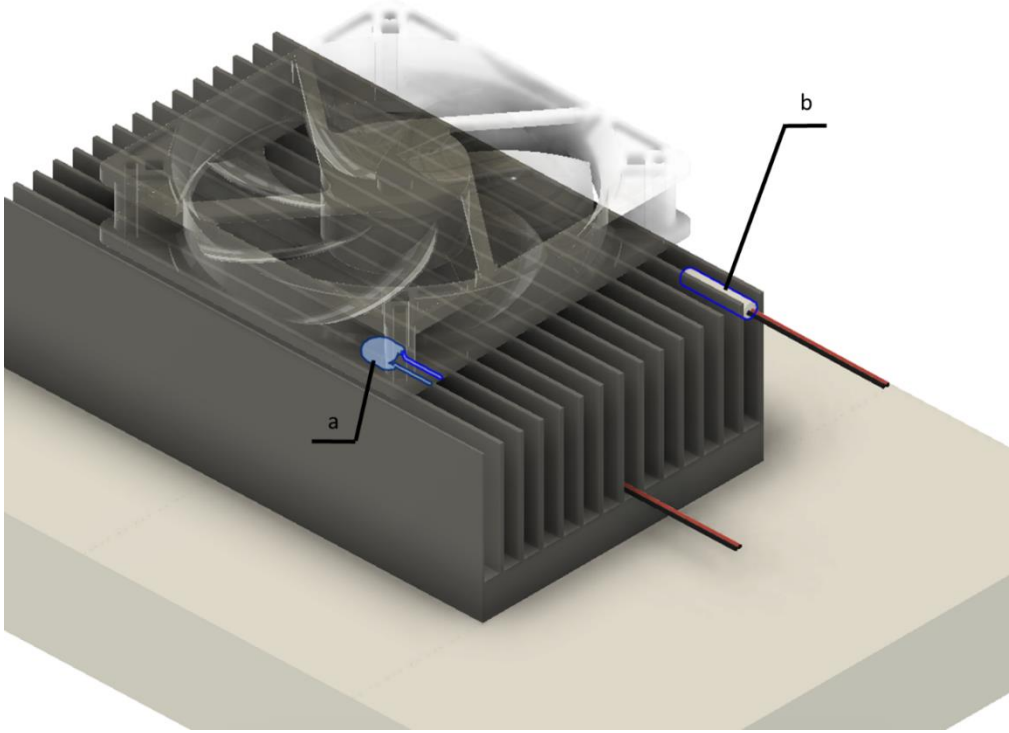


**Şekil 3.17 : 3 Boyutlu Kesit Model Üzerinde**

a) Soğutucu Taşıma Kutu Kesiti b) T2 NTC Termistör c) T1 NTC Termistör

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Soğutucu taşıma kutusunun dış kısmında kullanılan NTC termistörler, 3 boyutlu kesiti verilen model üzerinde T3 ve T4 olarak Şekil 3.18’de gösterilmektedir. T3 NTC termistörü, TEC’in sıcak yüzeyine yerleştirilmiş; T4 NTC termistörü ise, sıcak yüzeydeki alüminyum bloğun uç noktasına yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.18 : 3 Boyutlu Kesit Model Üzerinde**  
a) T3 NTC termistörü b) T4 NTC Termistörü  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

### 3.3.7 Arduino Uno ve MegunoLink programı

Elektronik donanım ve yazılım temelli bir geliştirme platformu olan Arduino Uno (Şekil 3.19); NTC termistörler tarafından ölçülen analog sıcaklık verilerinin, bilgisayara dijital olarak aktarılmasını sağlamaktadır.



**Şekil 3.19 : Arduino Uno**  
**Kaynak:** (URL-17, 2019)

Deney düzeneğinde kullanılan Arduino Uno teknik özellikleri Çizelge 3.13'te verilmektedir.



**Çizelge 3.13 : Arduino Uno Teknik Özellikleri**

<b>TEKNİK ÖZELLİKLER</b>	
Mikrodenetleyici	ATmega328
Çalışma Gerilimi	5V
Giriş Gerilimi (limit)	6-20V
Dijital Giriş / Çıkış Pinleri	14
Analog Giriş Pinleri	6
Her Giriş / Çıkış için Akım	40 mA
3.3V Çıkış için Akım	50 mA
EEPROM	1 KB (ATmega328)
İşlemci Frekansı	16 MHz

**Kaynak:** (URL-17, 2019)

MegunoLink programı, USB portu üzerinden bilgisayara bağlanan Arduino Uno tarafından dijitalleştirilen sıcaklık ölçüm verilerinin derlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu program vasıtasıyla dijital sıcaklık ölçüm verilerinin tablo ve grafik halinde düzenlenmesi mümkün olmaktadır.

### **3.4 TEC'in Morfolojik ve Elemental Analizlerinin Gerçekleştirilmesi**

Deney düzeneğinde kullanılan TEC'deki p-n çiftlerinin morfolojik analizleri FEI Quanta FEG 450 marka FEG-SEM ile yapılmıştır. Görüntüler; yüksek vakum ortamında, 10 KV ve 20 KV potansiyel gerilimlerde, x100, x200, x300 ve x4000 kat oranlarında büyütülerek alınmıştır. Aynı zamanda hem p-tipi ve hem n-tipi yarı iletkenlere elemental analiz yapılmıştır. Bunun için; EDS kullanılmıştır. Analiz sonuçları, "4.2 Elemental ve Morfolojik Analiz Sonuçları" bölümündeki Şekil 4.14-4.20 ve "EK A" da yer alan Şekil A.1-A.2'de detaylı olarak verilmiştir. Bu morfolojik çalışmaları desteklemek ve D3 deneyindeki epoksi katkının TEC boşluklarını nasıl doldurduğunun görülmesi amacıyla Isolab marka ışık mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 4.21- 4.22'de x1000 büyütmedeki görüntüler verilmiştir.

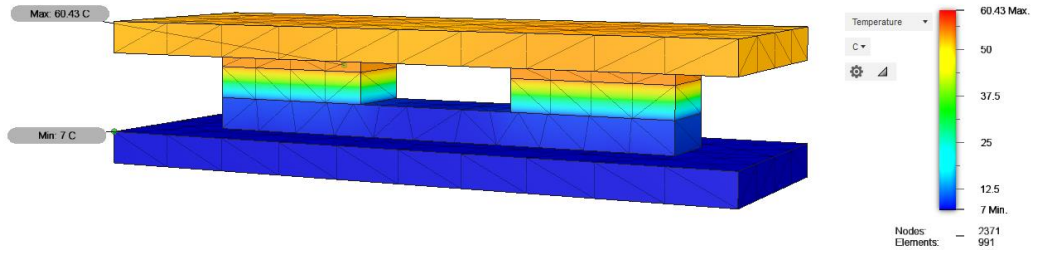
Rull-Bravo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma referans alınarak, TE etki gösteren element gruplarına ait elemental analiz sonuçları değerlendirilmiştir (Rull-Bravo ve ark, 2015).

Bu referansta bulunan elementler ile elemental analiz sonuçları eşleştirilerek; deney düzeneğinde kullanılan TEC'de p-tipi yarı iletkenin TE etki gösteren antimon (Sb), kalay (Sn), tellür (Te) ve sodyum (Na) elementlerini; n-tipi yarı iletkenin ise TE etki gösteren bizmut (Bi), tellür (Te), kurşun (Pb) elementlerini içerdiği tespit edilmiştir. TE etki gösteren elementlerin yarı iletkenler içindeki ağırlıkça oranları "4.2 Elemental ve Morfolojik Analiz Sonuçları" bölümünde detaylıca sunulmaktadır.

## 4. ANALİZ VE DENEY SONUÇLARI

### 4.1 Termal Analiz Sonuçları

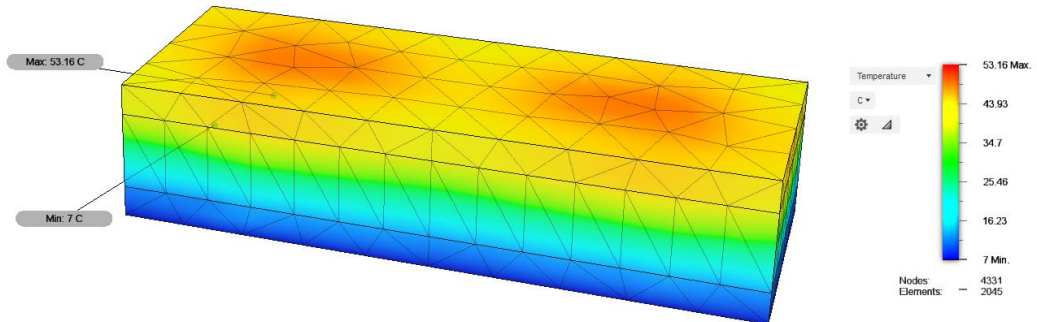
Gerçekleştirilen termal analizlerde; kontrol grubu olan D1 deneyindeki hava boşluklu standart TEC'in soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 60,43°C olması gerektiği Autodesk Fusion360 programı ile teorik olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.1). Hesaplanan bu değerin, TEC'in çalışma sıcaklığının (maksimum 50°C) üzerinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1 : D1 TEC'in Termal Analizi

Kaynak: (Bozkurt, 2020)

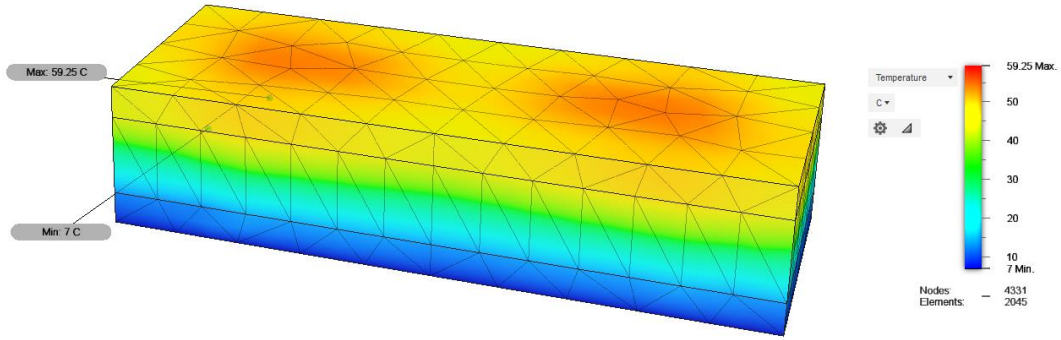
D2 deneyinde; TEC'in seramikleri arasındaki havanın vakumlandığı model üzerinden termal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen termal analiz ile; TEC'in soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 53,16°C'ye ulaşacağı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : D2 TEC'in Termal Analizi

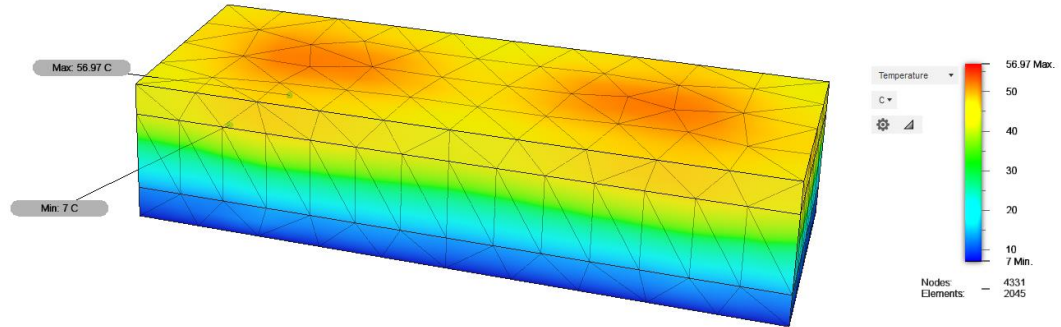
Kaynak: (Bozkurt, 2020)

D3 deneyinde; TEC'in seramikleri arasındaki boşluğun epoksi reçine ile doldurulduğu model üzerinden termal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen termal analiz ile; TEC'in soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 59,25°C'ye ulaşacağı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.3).



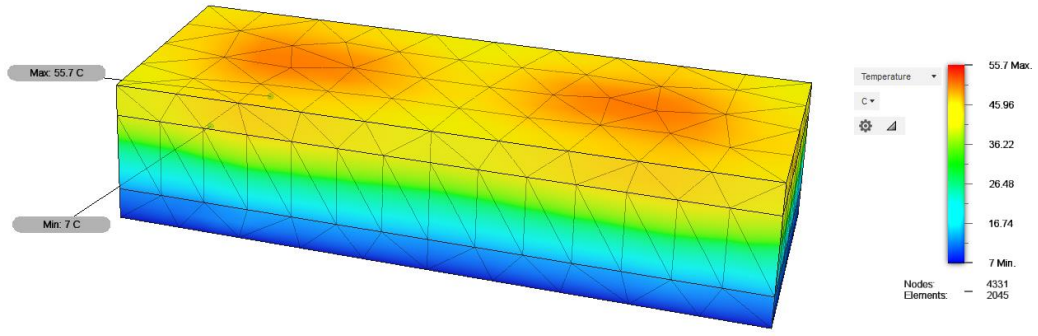
**Şekil 4.3 : D3 TEC'in Termal Analizi**  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)

D4 deneyinde; TEC'in seramikleri arasındaki boşluğun HAp ile doldurulduğu model üzerinden termal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen termal analiz ile; TEC'in soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 56,97°C'ye ulaşacağı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.4).



**Şekil 4.4 : D4 TEC'in Termal Analizi**  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)

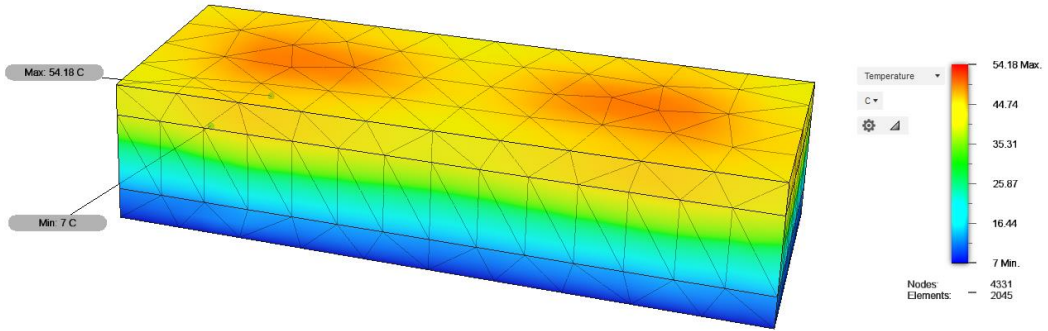
D5 deneyinde; TEC'in seramikleri arasındaki boşluğun nano HAp ile doldurulduğu model üzerinden termal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen termal analiz ile; TEC'in soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 55,7°C'ye ulaşacağı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.5).



**Şekil 4.5 : D5 TEC'in Termal Analizi**

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

D6 deneyinde; TEC'in seramikleri arasındaki boşluğun NBA ile doldurulduğu model üzerinden termal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen termal analiz ile; TEC'in soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 54,18°C'ye ulaşacağı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.6).



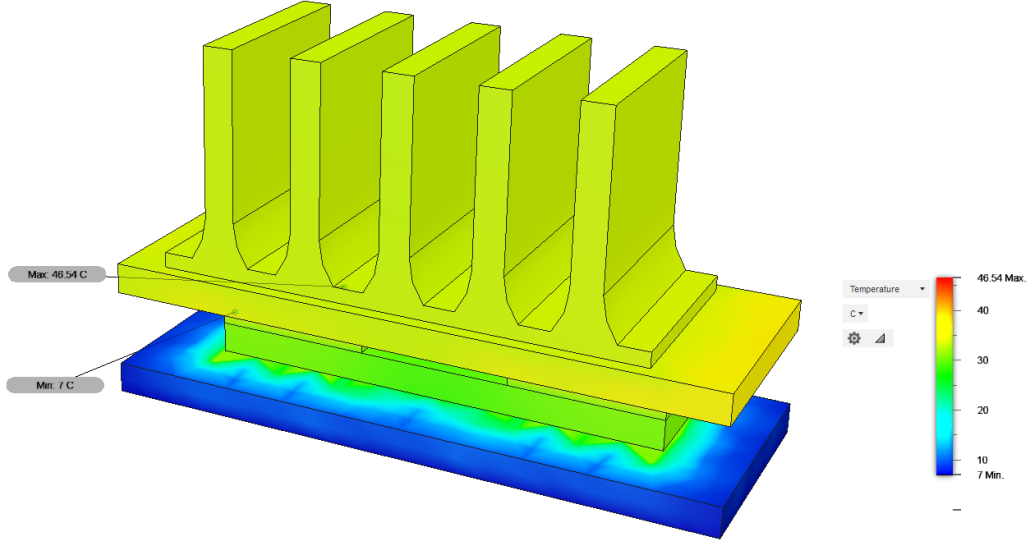
**Şekil 4.6 : D6 TEC'in Termal Analizi**

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Farklı ileri mühendislik malzemeleri ile yalıtım sağlanan tüm deney düzeneklerinde gerçekleştirilen termal analizler; TEC'in soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 50°C'yi geçeceğini göstermektedir. TEC 50°C'nin altındaki sıcaklıklarda çalışabildiği için, sıcak yüzeydeki ısı transfer hızının artırılması gerekmektedir.

Bu amaçla TEC'in sıcak yüzeyindeki ısıyı yayarak ısı transfer hızını artırması için alüminyum blok tasarlanmış ve termal analizler tekrarlanmıştır.

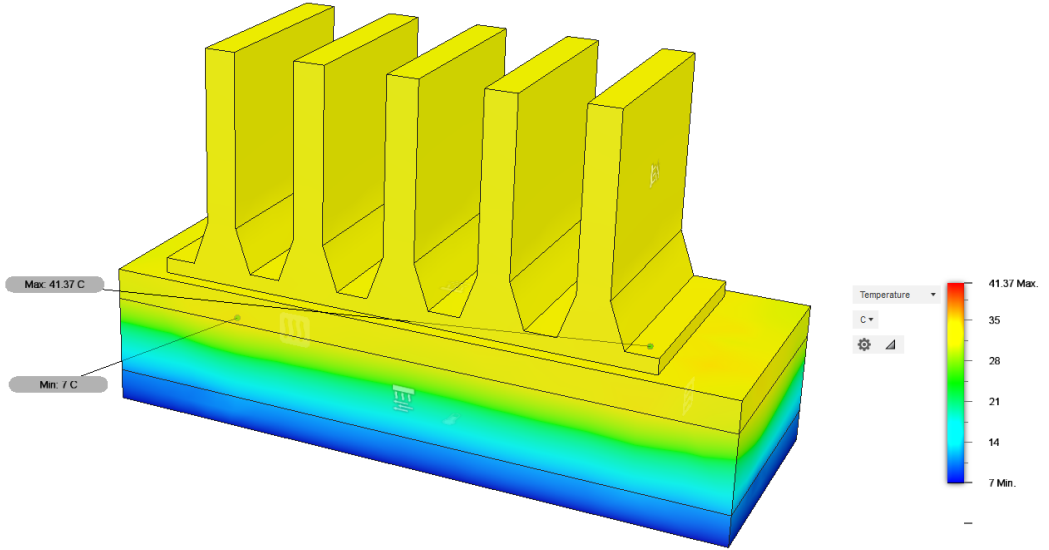
D1 deneyindeki standart hava boşluklu TEC'in sıcak yüzeyine alüminyum blok eklenmesi ile oluşturulan modelin termal analizi gerçekleştirildiğinde; soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 46,54°C olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.7).



**Şekil 4.7 :** Alüminyum Blok Eklenmiş D1 TEC'in Termal Analizi

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

D2 deneyinde seramikleri arasındaki hava vakumlanan TEC'in sıcak yüzeyine alüminyum blok eklenmesi ile oluşturulan modelin termal analizi gerçekleştirildiğinde; soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 41,37°C olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.8).

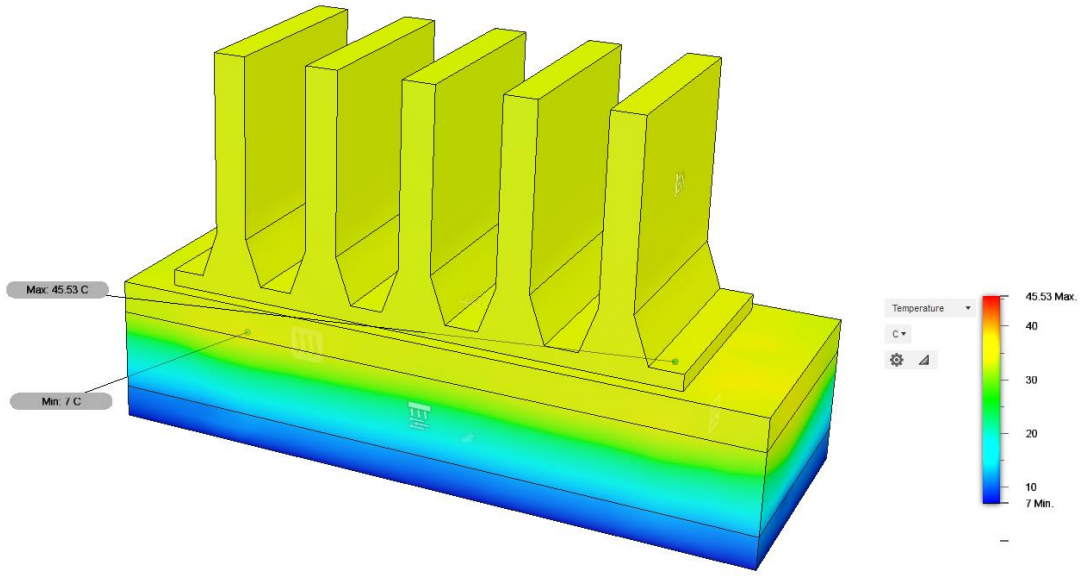


**Şekil 4.8 :** Alüminyum Blok Eklenmiş D2 TEC'in Termal Analizi

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

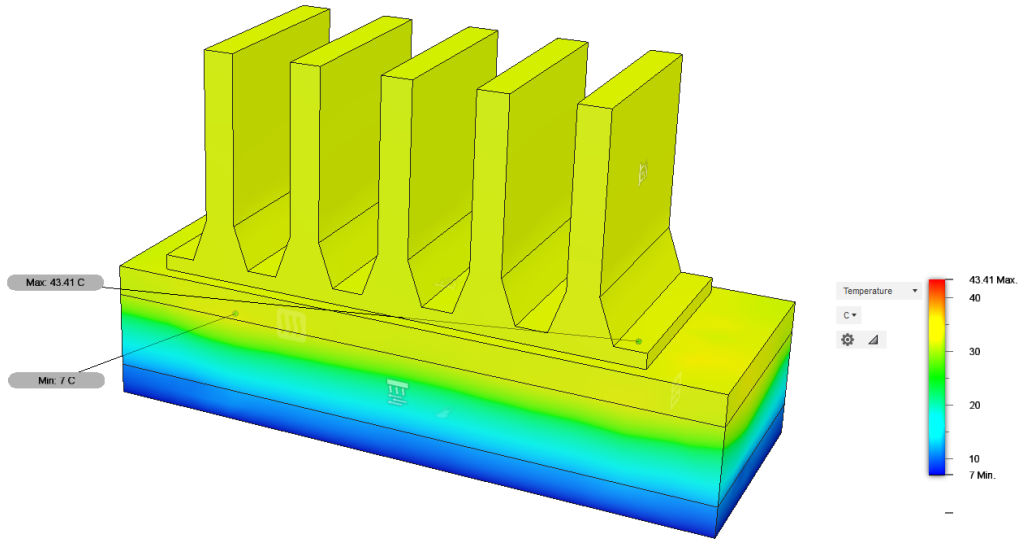
D3 deneyinde; seramikleri arasındaki boşluk epoksi reçine ile doldurulan TEC'in sıcak yüzeyine alüminyum blok eklenmesi ile oluşturulan modelin termal analizi gerçekleştirildiğinde; soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey

sıcaklığının 45,53°C olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.9).



**Şekil 4.9 :** Alüminyum Blok Eklenmiş D3 TEC'in Termal Analizi  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

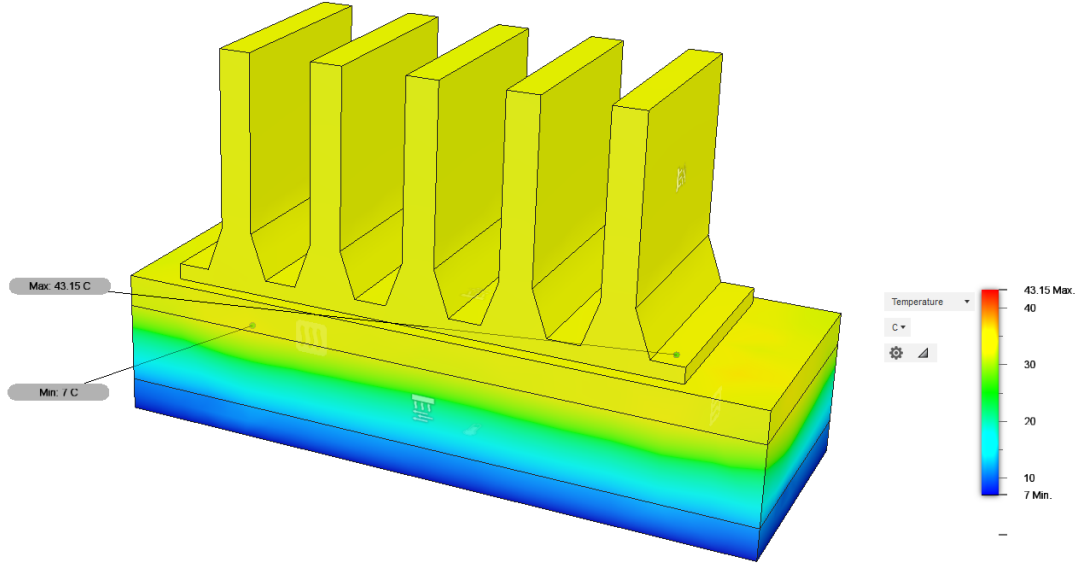
D4 deneyinde; seramikleri arasındaki boşluk HAp ile doldurulan TEC'in sıcak yüzeyine alüminyum blok eklenmesi ile oluşturulan modelin termal analizi gerçekleştirildiğinde; soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 43,41°C olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.10).



**Şekil 4.10 :** Alüminyum Blok Eklenmiş D4 TEC'in Termal Analizi  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)



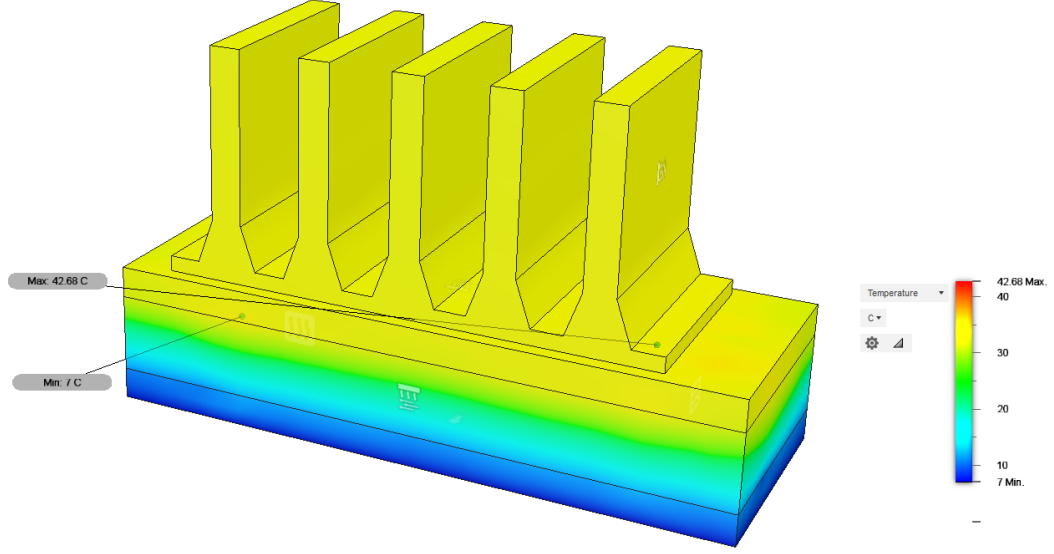
D5 deneyinde; seramikleri arasındaki boşluk nano HAp ile doldurulan TEC'in sıcak yüzeyine alüminyum blok eklenmesi ile oluşturulan modelin termal analizi gerçekleştirildiğinde; soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 43,15°C olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11** : Alüminyum Blok Eklenmiş D5 TEC'in Termal Analizi

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

D6 deneyinde; seramikleri arasındaki boşluk NBA ile doldurulan TEC'in sıcak yüzeyine alüminyum blok eklenmesi ile oluşturulan modelin termal analizi gerçekleştirildiğinde; soğuk yüzey sıcaklığının 7°C olabilmesi için, sıcak yüzey sıcaklığının 42,68°C olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.12).



**Şekil 4.12 :** Alüminyum Blok Eklenmiş D6 TEC'in Termal Analizi

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

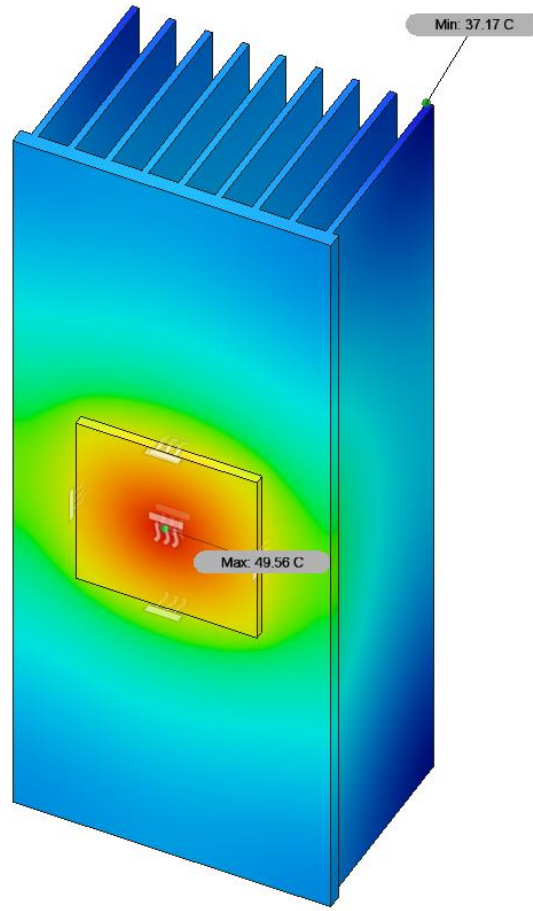
Termal analizler sonucunda ulaşılan veriler kullanılarak, bir p-n çiftinin maksimum kapasiteyle çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan alüminyum kütlesi ve hacmi Autodesk Fusion360 programı ile hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda; bir p-n çifti üzerindeki ısı transfer hızının artırılması ve ısıl yükün dağıtılması için, 1,18 gram kütleye ve 0,59 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip bir alüminyum bloğun kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan TEC'in üzerinde 127 adet p-n çifti bulunmasından dolayı, toplamda en az 150 gram kütleli ve 75 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip alüminyum blok kullanılmalıdır.

Teorik olarak hesaplanan veriler ışığında; TEC'in sıcak yüzeyindeki ısıl yükün dağıtılabilmesi için ihtiyaç duyulan alüminyum blok, bilgisayar bileşenlerinde sıklıkla kullanılan alüminyum soğutucu grubu temin edilerek sağlanmıştır. Söz konusu soğutucu grubun transfer edebileceği ısı kapasitesi 125 Watt olarak tercih edilmiştir.

TEC'in 125 Watt ısı gücü ürettiği durumda soğutucu grubunun soğutma performansının ölçülmesi amacıyla yeni bir termal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda maksimum kapasitede (125 Watt) TEC'in sıcak yüzey sıcaklığının 49,56°C'ye kadar yükselebileceği ve bu sayede 50°C'yi geçmeyeceği sonucuna varılmıştır (Şekil4.13).

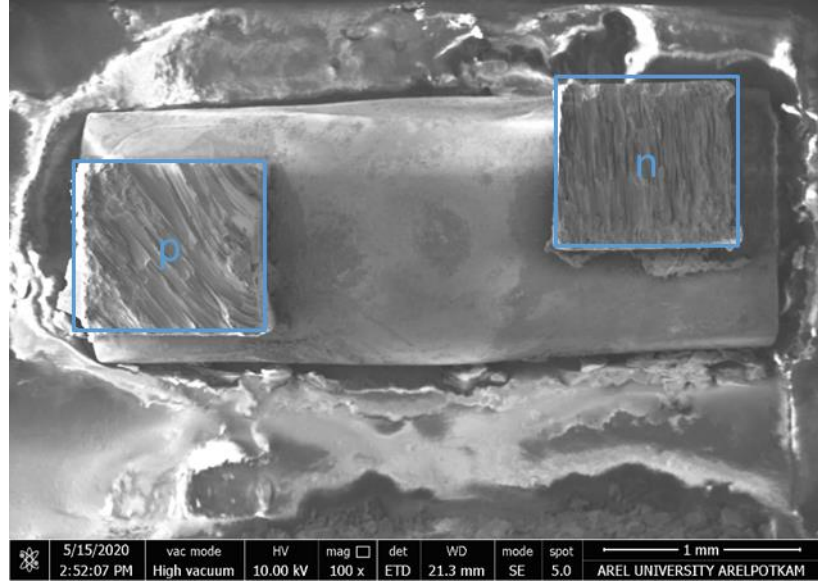




**Şekil 4.13 :** Soğutucu Grubu ve TEC'in Termal Analiz Görüntüsü  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

## 4.2 Elemental ve Morfolojik Analiz Sonuçları

Morfolojik ve EDS analiz sonuçları Şekil 4.14-4.20 ve "EK A"da yer alan Şekil A.1-A.2'de verilmektedir. Numunelerin x100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen p-n çifti FEG-SEM görüntüleri Şekil 4.14'te ve x300 ve x4000 kat büyütülmesi sonucu elde edilen FEG-SEM görüntüleri; p-tipi yarı iletken için Şekil 4.15'te, n-tipi yarı iletken içinse Şekil 4.18'de verilmektedir.

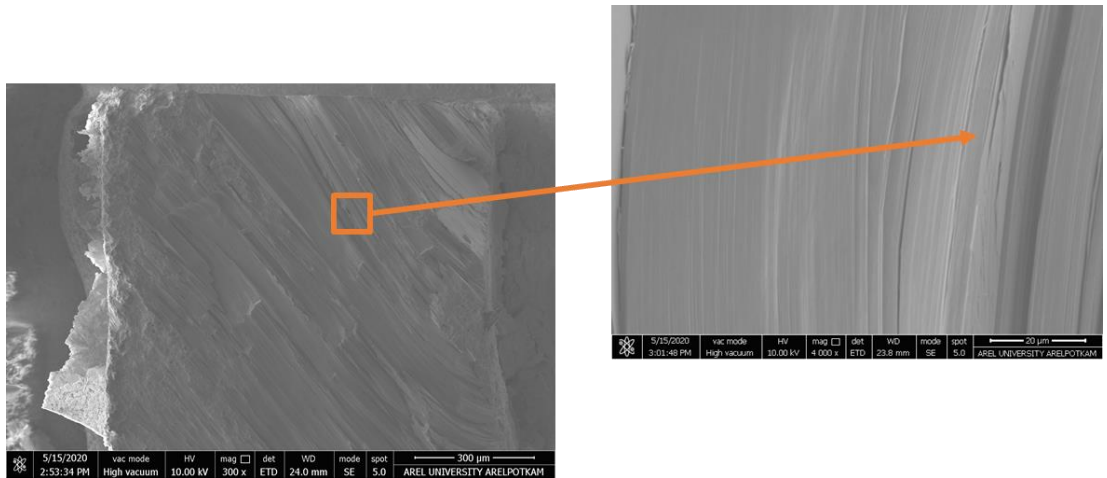


**Şekil 4.14 : p-n Çifti SEM Görüntüsü**  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)

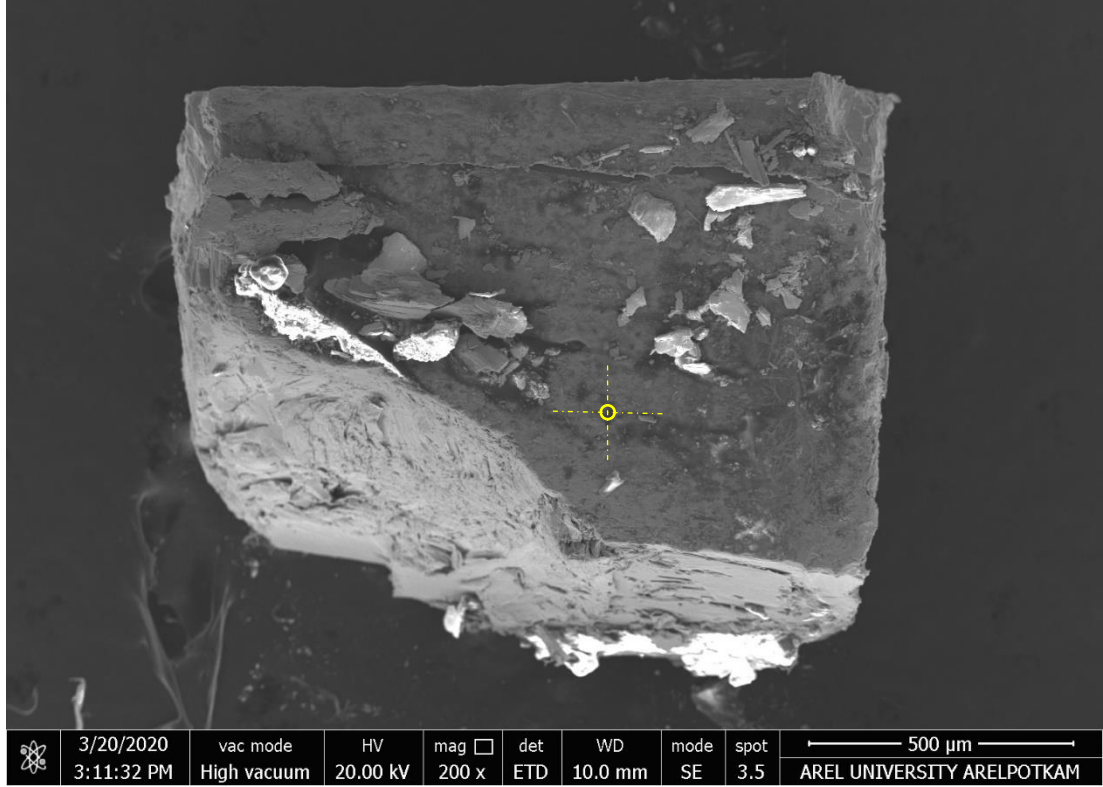
TEC’de bulunan p-n çiftlerini oluşturan elementlerin ağırlıkça yüzdeleri elemental analiz ile belirlenmiş olup; p-tipi yarı iletkene ilişkin elemental analiz sonuçları Şekil 4.17, elemental dağılım ise Şekil A.1’deki spektrumda sunulmaktadır. n-tipi yarı iletkene ilişkin elemental analiz sonuçları Şekil 4.20’de, elemental dağılım ise Şekil A.2’deki spektrumda sunulmaktadır. p-n çiftinde elemental analizin yapılacağı noktalar görüntülerin daha homojen dağıldığı bölgelerden seçilmiştir.

#### 4.2.1 p-tipi yarı iletken morfolojik görüntüler ve EDS sonuçları

Şekil 4.15’te verilen FEG-SEM görüntülerine göre; bazı bölgelerde devamlılık sağlamayan, ancak çok sayıda mikro çatlaklar görülmektedir.



**Şekil 4.15 : p-tipi Yarı İletken FEG-SEM Görüntüsü**  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)



**Şekil 4.16 :** p-tipi Yarı İletken FEG-SEM EDS Ölçüm Noktası Görüntüsü

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	K Ratio	Z	R	A	F
O K	8.25	31.34	9.38	398.43	0.0392	1.3872	0.7918	0.3423	1.0000
Na K	6.55	17.33	12.29	158.07	0.0148	1.2685	0.8220	0.1782	1.0024
Si K	3.58	7.76	9.76	268.40	0.0217	1.2781	0.8498	0.4687	1.0111
S K	1.64	3.11	12.61	142.83	0.0140	1.2570	0.8670	0.6630	1.0237
Tc L	12.03	7.46	4.66	569.02	0.1041	0.9833	1.0311	0.8505	1.0351
Sn L	6.21	3.18	10.08	207.21	0.0580	0.9292	1.0650	0.9532	1.0534
Sb L	17.58	8.78	5.19	540.01	0.1616	0.9219	1.0692	0.9631	1.0358
Te L	44.16	21.04	3.05	1205.12	0.3896	0.8948	1.0732	0.9669	1.0197

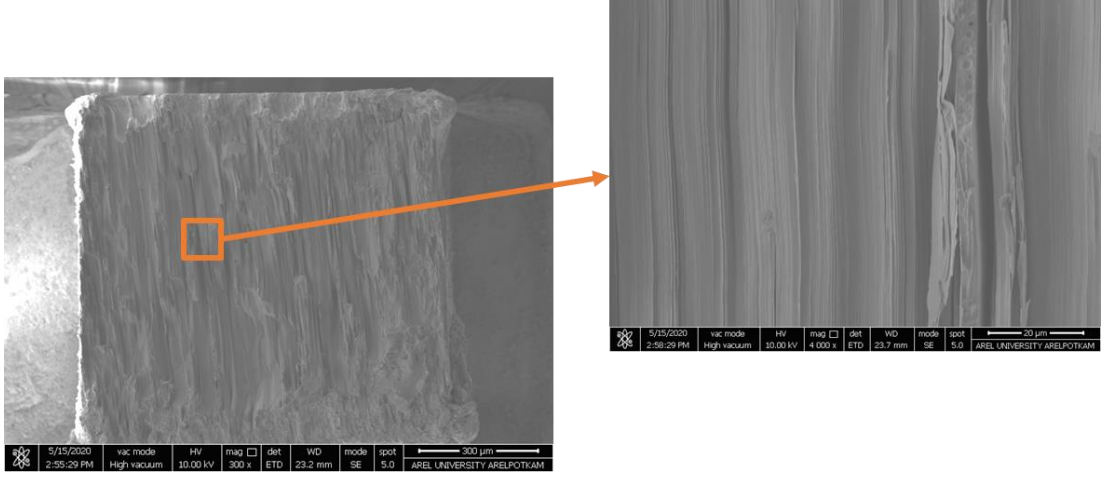
**Şekil 4.17 :** p-tipi Yarı İletkende Seçili Noktasal Bölgenin EDS Analiz Tablosu

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

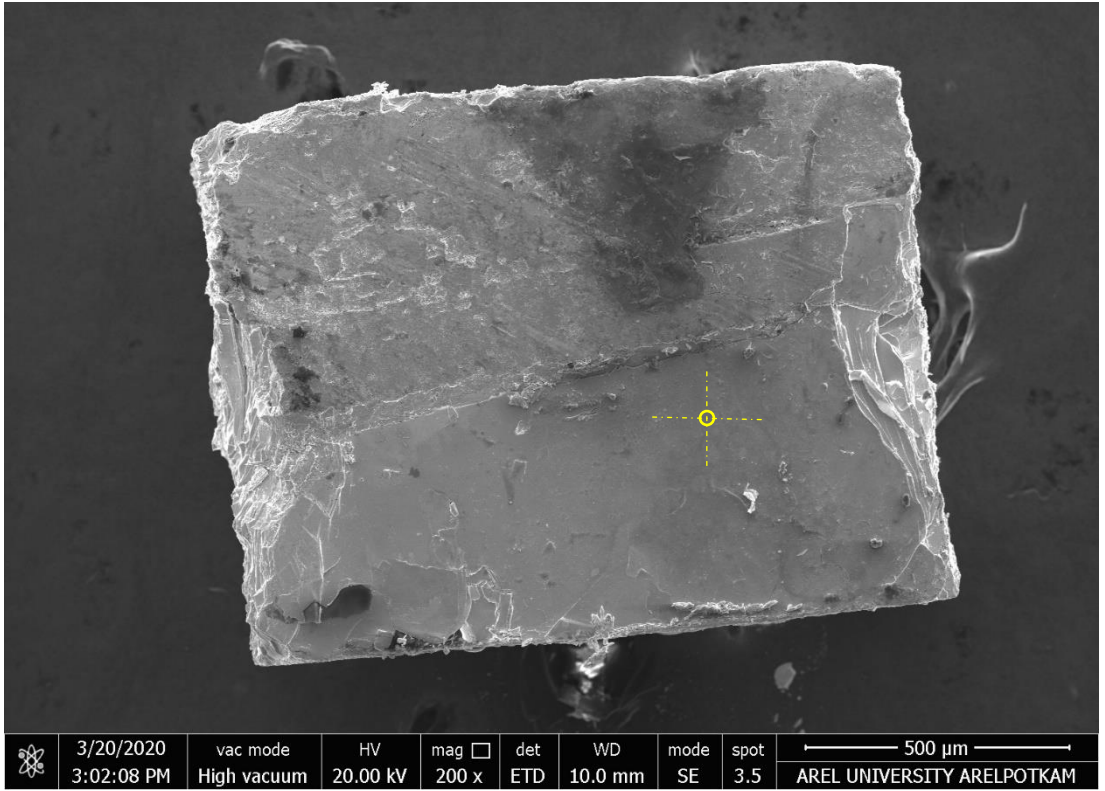
p-tipi yarı iletkende bulunan elementlerin; %17,58'i antimon (Sb), %6,21'i kalay (Sn), %44,16'sının tellür (Te), %6,55'inin sodyum (Na) olmak üzere %74,5'inin TE etkiye sahip elementlerden oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.17).

#### 4.2.2 n-tipi yarı iletken morfolojik görüntüler ve EDS sonuçları

Şekil 4.18'de verilen FEG-SEM görüntülerine göre; n-tipi yarı iletken, p-tipine benzer mikro çatlakların yanı sıra derin yarıkların da olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.18 :** n-tipi Yarı İletken SEM Görüntüsü  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)



**Şekil 4.19 :** n-tipi Yarı İletken FEG-SEM EDS Görüntüsü  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)

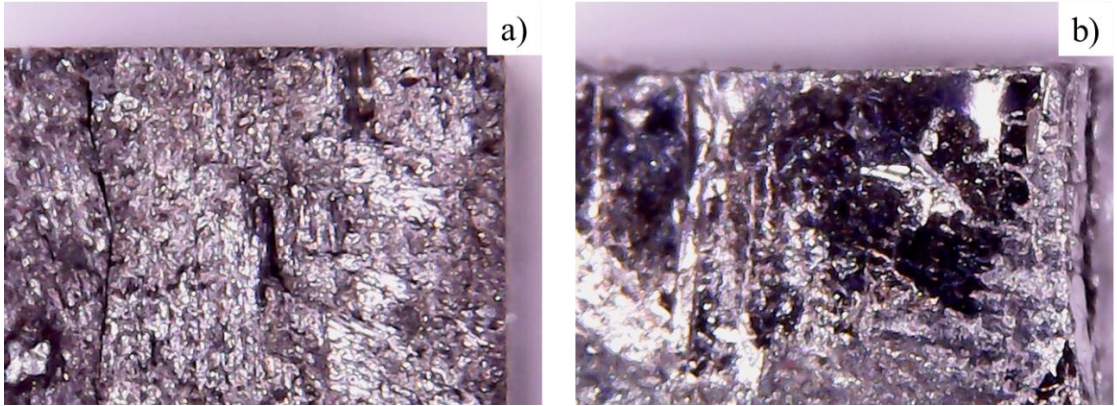


Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	K Ratio	Z	R	A	F
O K	14.45	51.83	9.26	748.34	0.0548	1.4008	0.7779	0.2710	1.0000
Si K	7.76	15.85	7.19	847.24	0.0511	1.2904	0.8352	0.5091	1.0029
Pb M	14.90	4.13	3.35	732.18	0.1353	0.8370	1.1822	1.0052	1.0794
Bi M	21.34	5.86	3.21	1050.43	0.1845	0.8392	1.1861	0.9866	1.0442
Sn L	10.48	5.07	7.84	397.38	0.0829	0.9388	1.0484	0.8403	1.0031
Te L	23.65	10.64	5.82	768.45	0.1852	0.9042	1.0567	0.8629	1.0039
Fe K	0.71	0.73	38.81	30.18	0.0072	1.1218	0.9309	0.8860	1.0190
Zn K	6.72	5.90	11.02	159.30	0.0729	1.0932	0.9596	0.9536	1.0412

**Şekil 4.20 :** n-tipi Yarı İletkende Seçili Noktasal Bölgenin EDS Analiz Tablosu  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

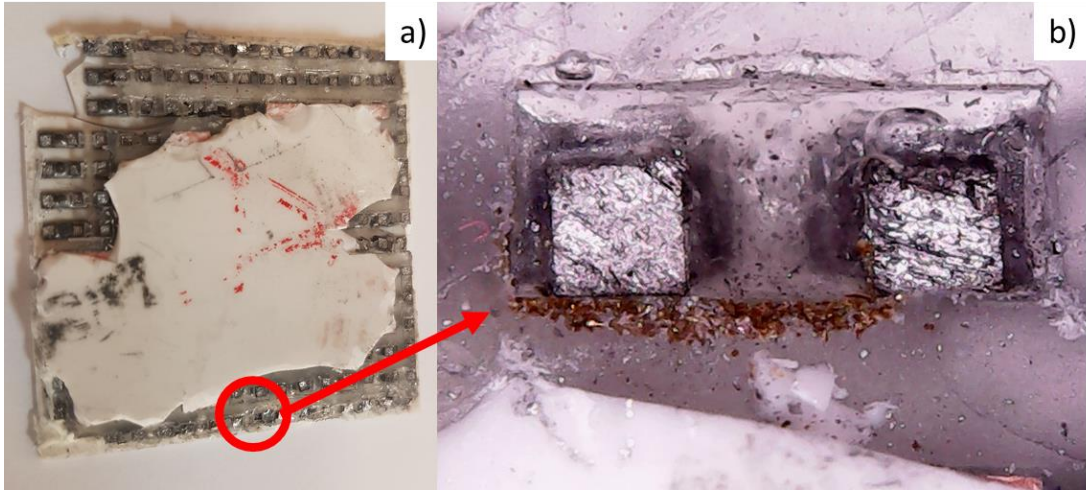
n-tipi yarı iletkenlerde bulunan elementlerin; %21,34'ü bizmut (Bi), %23,65'i tellür (Te), %14,90'u kurşun (Pb) olmak üzere %59,89'unun TE etkiye sahip elementlerden oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.20).

TEC içerisinde çıkarılan p-tipi ve n-tipi yarı iletkenler, 1000x büyütmede ışık mikroskobu ile incelenmiştir (Şekil 4.21). Morfolojik inceleme sonucunda, yarı iletkenlerin yapısında ve kaynak birleşme noktalarında birçok boşluk ve yüzeysel çatlakların bulunduğu tespit edilmiştir. Yapılan literatür araştırması; bu yüzeysel çatlak ve boşlukların, ısı transferini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir (Appel ve ark, 2015).



**Şekil 4.21 :** TEC İçerisinde Bulunan a) p-tipi ve b) n-tipi Yarı İletkenlerin x1000 Büyütmeli Mikroskop Görüntüsü  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

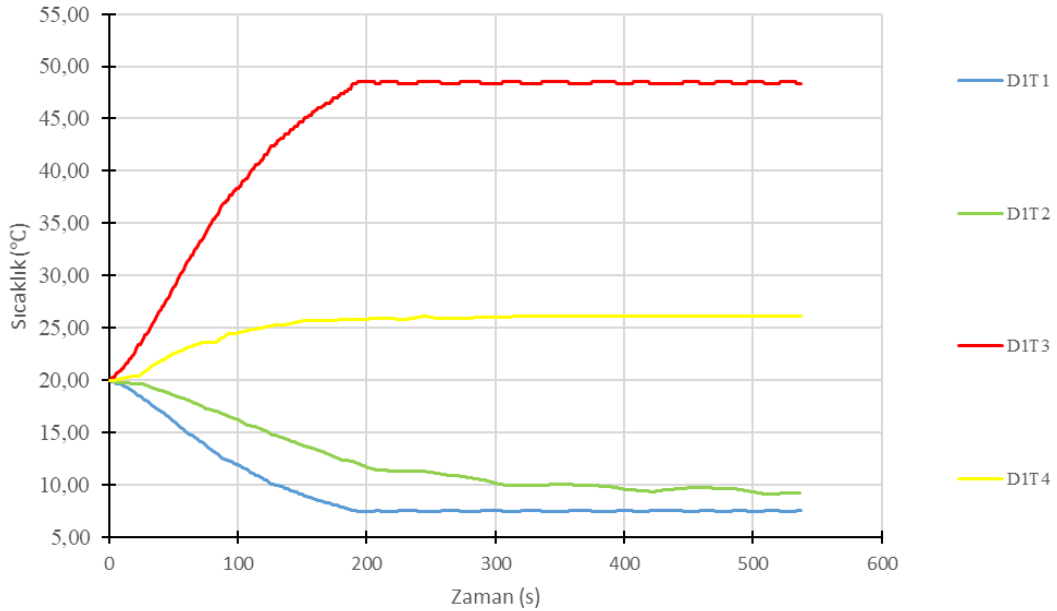
TEC'in seramik yüzeyleri arasına epoksi reçine enjekte edilmiş D3 deneyi sonrası, bu numuneye de x1000 büyütmeli ışık mikroskop ile morfolojik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, epoksi reçinenin TEC'in yarı iletkenlerinin bulunduğu boşluk bölgenin tamamını doldurduğu ve modül içinde hiç hava kalmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.22).



**Şekil 4.22** : D3 TEC'in Morfolojik İncelemesi a) Modülün Uzaktan Görünüşü b) p-n çiftinin x1000 Büyütmeli Işık Mikroskop Görüntüsü  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

### 4.3 Farklı Deney Düzenekleri İçin Sıcaklık Ölçüm Sonuçları

Kontrol grubu olarak belirlenen, standart hava boşluklu TEC ile gerçekleştirilen D1 deneyinde; soğutucu taşıma kutusu içinde yer alan 4 termistörden alınan sıcaklık verileri Şekil 4.23'te derlenmiştir. Bahse konu sıcaklık-zaman grafiği; sıcaklık değişimlerinin 200. saniyeye kadar daha yoğun olarak gerçekleştiğini göstermekte, sıcaklık değişim eğrileri bu zamandan sonra daha yatay bir seyir izlemektedir.



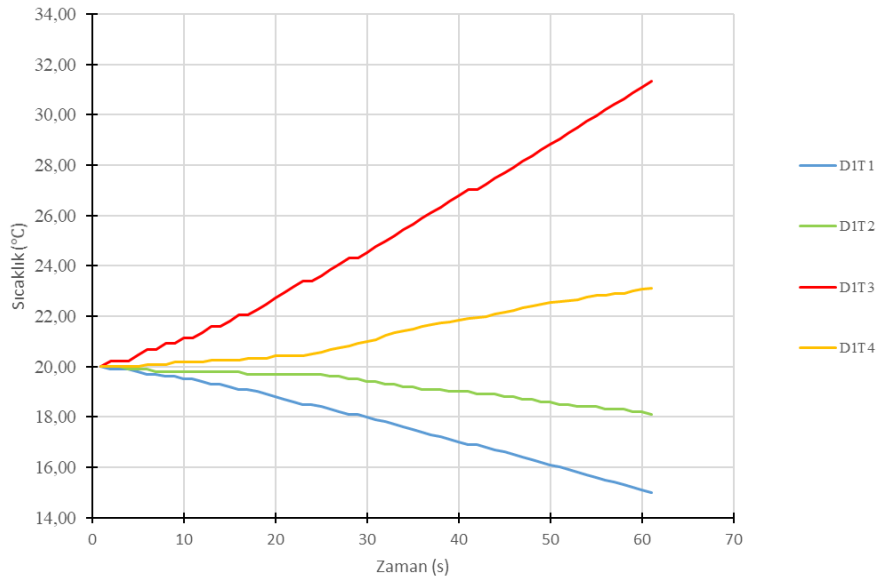
**Şekil 4.23** : D1 0-500 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağlı Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

D1T1, D1 deneyindeki TEC'in soğuk yüzey sıcaklığını; D1T2, D1 deneyindeki kabin içi soğuk uç yüzey sıcaklığını; D1T3, D1 deneyindeki TEC'in sıcak yüzey sıcaklığını; D1T4 ise D1 deneyindeki TEC'in sıcak yüzeyinde bulunan alüminyum bloğun uç yüzeyindeki sıcaklığı ifade etmektedir. Grafikte sıcak ve soğuk yüzeyler ve uç noktalar üzerinden alınan sıcaklık verilerinin, x eksenine göre simetriğe yakın eğriler oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuçlar TEC'in soğuk ve sıcak yüzeylerinin orantısal olarak benzer performanslar sergilediğini ortaya koymaktadır.

Uç nokta sıcaklıkları; sıcak ve soğuk yüzeylerde kullanılan alüminyum blokların farklı boyutlarda olmasından etkilenmektedir. Ayrıca TEC'in soğuk yüzeyinin yalnızca soğutucu taşıma kutusunun iç hacmi kadar bir havayı soğutması beklenirken; TEC'in sıcak yüzeyi doğrudan dış ortamla temas etmekte ve çok büyük bir hacmi ısıtmaya çalışmaktadır.

Bu çalışmada TEC'in soğutma özelliğine odaklanıldığından, T2 eğrisinin belirlenen kabin içi sıcaklığı olan 0-8°C aralığına ulaşması hedeflenmektedir. Yapılan ölçümler kabin içi sıcaklığı gösteren D1T2 eğrisinin, 500. saniye ve sonrasında rejim sıcaklığına ( $T_R$ ) ulaştığını göstermektedir.

Sıcaklık değişimlerinin daha detaylı incelenmesi amacıyla, grafik farklı zaman aralıklarını kapsayacak şekilde 3 faza ayrılmıştır (0-60s, 60-180s, 180-540s).

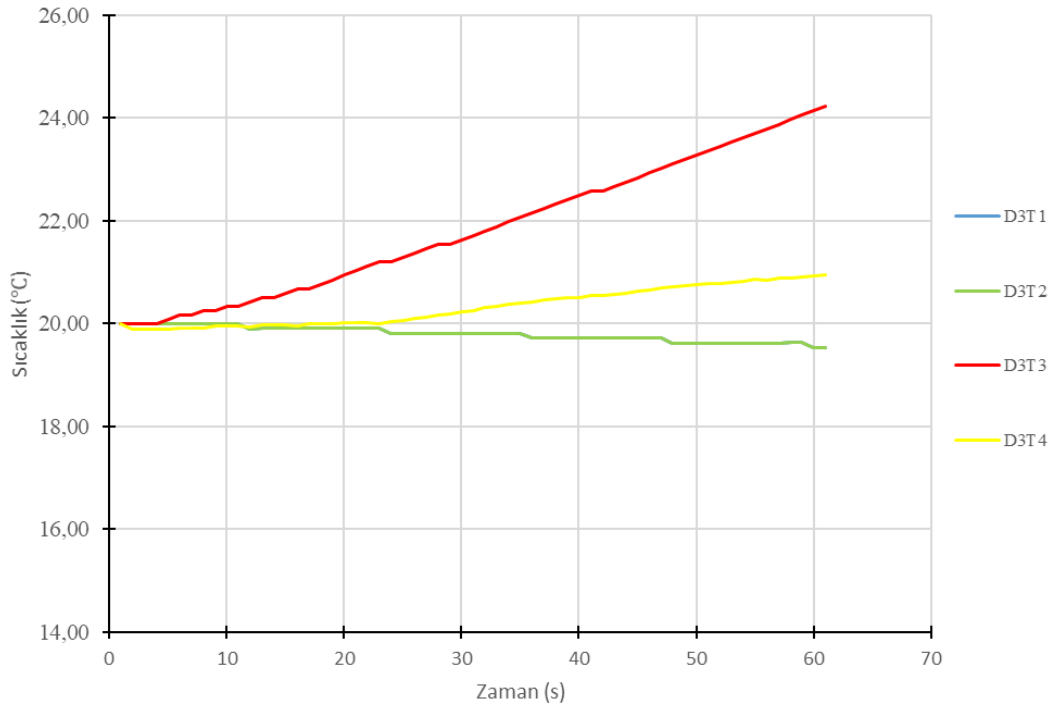


**Şekil 4.24** : D1 0-60 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağlı Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

TEC'e akım verildikten sonra sıcak ve soğuk yüzeylerin hızlı bir biçimde sıcaklık farkı oluşturmaya başladığı Şekil 4.24'te görülmektedir. İlk 60 saniye içinde; TEC'in sıcak yüzey sıcaklığı 20°C'den 31°C'ye yükselmiş ve yaklaşık %50 oranında bir sıcaklık artışı yaşanmıştır. Soğuk yüzey sıcaklığı ise; ilk 60 saniyede 20°C'den 15°C'ye düşmüş ve yaklaşık %25 oranında soğutma sağlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen diğer deneylerde; yalıtım malzemesi olarak epoksi reçine kullanılan D3 deneyi hariç, Şekil 4.21'deki grafiğe benzer sıcaklık değişim eğrileri elde edilmiştir.



**Şekil 4.25 :** D3 0-60 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Epoksi Termal İletkenlik Katsayısı 1,15 W/m.K)

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Epoksi reçine katkılı D3 deney düzeneğinde sıcak ve soğuk yüzeylere ilişkin sıcaklık eğrilerinin x eksenine göre simetri oluşturmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.25). İlk 60 saniyede soğuk yüzey (D3T1) ve kabin içi sıcaklığın (D3T2) benzer şekilde değiştiği görülmüş olup 60. saniyede bu sıcaklık 19,53°C olarak ölçülmüştür. Bu veriler ışığında yaşanan sıcaklık değişiminin %2,5 oranından daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

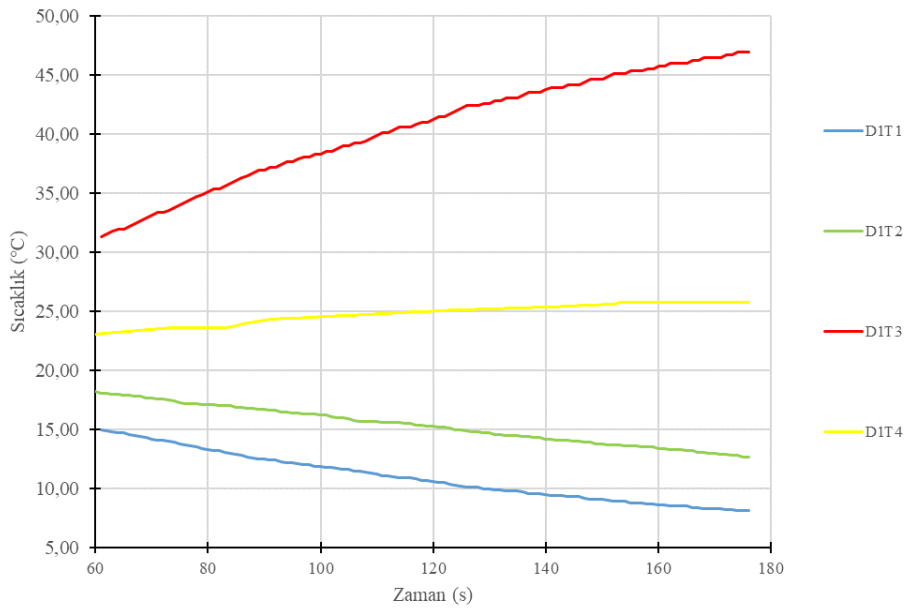
0-60 saniye aralığında D3 deneyinde soğuk ve sıcak yüzeylerde sıcaklık değişiminin düşük olması; epoksi reçinenin, TEC'in yarı iletkenleri üzerinden geçen ısıyı depoladığını göstermektedir. Epoksi reçine üzerinde depolanan ısının; TEC'in



içindeki yarı iletkenlerin de ısınarak iç dirençlerinin artmasına sebep olması, ısı kapasiteyi düşürmektedir.

Farklı ileri mühendislik malzemeleri içeren TEC'lerde ilk 60 saniyede Şekil 4.21'e benzer sıcaklık değişimleri yaşanmasının temel sebebi; yüzeyler arasındaki ısı transferinin nispeten düşük olmasından dolayı, oluşturulan yalıtkan bariyerin etkisinin düşük olmasıdır. Tüm deney düzeneklerine ilişkin sıcaklık-zaman grafikleri "EK-B"de sunulmaktadır.

D1 deneyi için 60-180 saniye aralığında sıcaklık artış ivmesinin düştüğü Şekil 4.26'te görülmektedir.

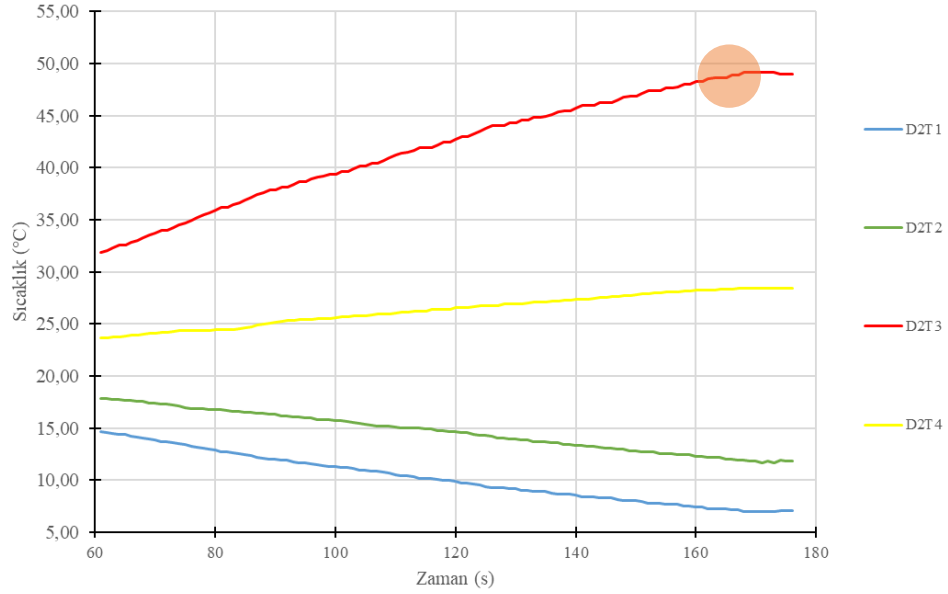


**Şekil 4.26 :** D1 60-180 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Bu aşamada vakum ortamı yaratılan D2 deneyi hariç tüm deney grupları için soğuma işleminin azalan bir ivmeyle birlikte devam ettiği görülmektedir. Standart hava boşluklu D1 deney düzeneğinin soğutma performansının; epoksi reçine katkılı D3, HAp katkılı D4, nano HAp katkılı D5 ve NBA katkılı D6 deney düzeneklerinden daha yüksek olduğu, 60-180 saniye aralığında görülmektedir.

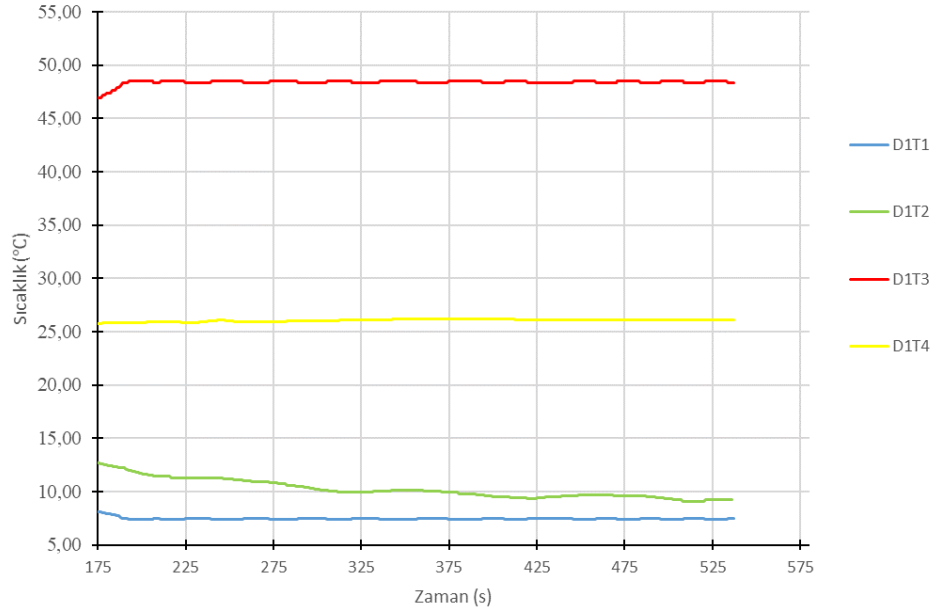
Diğer tüm deney düzeneklerinden daha yüksek bir soğutma performansı gösteren vakum ortamlı D2 deney düzeneğinde ise soğuk yüzey sıcaklığı 168. saniyede rejim sıcaklığı olan 7°C'ye ulaşmaktadır (Şekil 4.27). D2 deney düzeneğinin soğuk yüzey sıcaklığının teorik olarak 7°C'den daha düşük olması da mümkündür. Ancak;

yaratılan vakum ortamıyla ısı transferinin azaltılması, sıcak yüzey sıcaklığının TEC'in maksimum çalışma sıcaklığı olan 50°C'yi geçmesine sebep olmaktadır. Bu durumda deney düzeneğinde yer alan kapalı çevrim sıcaklık kontrolörü devreye girmekte ve çalışma sıcaklığının üst limitinin aşılması ve TEC'in korunması için, sisteme akım girişini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle D2 deney düzeneğindeki soğuk yüzey sıcaklığının, minimum 7°C olması ve bu değerin altına inmemesi gerekmektedir.



**Şekil 4.27 :** D2 60-180 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

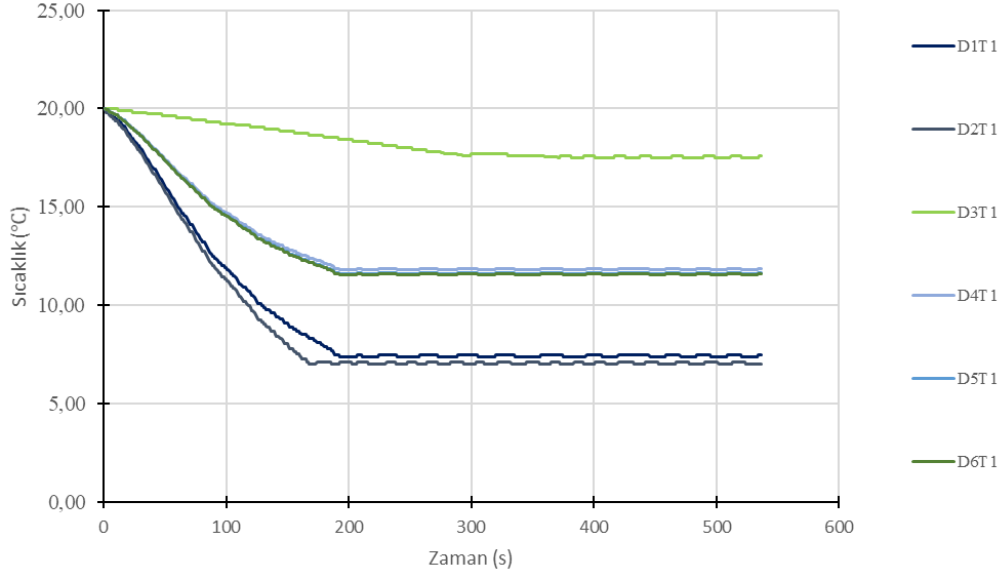
D1 deneyi için; 180-540 saniye aralığında sıcaklık artışının durarak, tüm sıcaklık ölçüm noktalarındaki sıcaklıkların rejim sıcaklığına yani plato evresine ulaştıkları Şekil 4.28'de görülmektedir.



**Şekil 4.28 :** D1 180-540 s Aralığı Sıcaklık-Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)  
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

D1 deneyinin soğuk yüzeyi 193. saniyede rejim sıcaklığına ulaşmakla birlikte; bu yüzey tarafından soğutulan kabin içindeki sıcaklığı ifade eden D1T2 eğrisi, *Fourier ısı transfer yasası* gereğince, farklı sıcaklıklar arasında ısı transferi devam ettiğinden, plato sıcaklığına (9,30°C) ancak 500. saniyede ulaşabilmektedir. D1 deneyinde, soğuk yüzey rejim sıcaklığı ( $T_{R1}$ ) olan 7,4°C'ye ve sıcak yüzey rejim sıcaklığı ( $T_{R3}$ ) olan 48,53°C'ye aynı anda (193. saniye) ulaşıldığı saptanmıştır. Yapılan tüm deneyler içinde sıcak ve soğuk yüzeylerin aynı anda rejim sıcaklığına ulaştığı tek düzenek D1 deney düzeneğidir.

Epoksi reçine enjekte edilen D3 deney düzeneği hariç; farklı ileri mühendislik materyalleri ile doldurularak yalıtım ortamı sağlanan D4, D5 ve D6 deney düzeneklerinin rejim sıcaklıklarında küçük farklılıklar olmakla birlikte, bu sıcaklıklara ulaşma zamanlarının aynı olduğu görülmektedir (Şekil 4.29). Epoksi reçine ile doldurulan D3 deneyinde ise; rejim sıcaklıkları ortam sıcaklığına çok yakın olmakla birlikte (soğuk yüzey için 17,52°C-sıcak yüzey için 30,72°C), plato evresine ulaşma zamanları da diğer deneylerden yaklaşık %75 daha geç gerçekleşmiştir.



**Şekil 4.29 :** Tüm Deneyler İçin T1 (Soğuk Yüzey Sıcaklığı) Sıcaklık-Zaman Grafiği  
(Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Tüm deney düzeneklerinde sıcaklık eğrilerinin plato evresine ulaştıktan sonra dalgalanmalar gösterdiği Şekil 4.29’da görülmektedir. Küçük sıcaklık farklılıklarını ifade eden bu dalgalanmaların; TEC’in ısı kapasitesinin maksimum düzeyde kullanılması durumunda, yarı iletkenlerin stabil bir ısı transferi sağlayamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.1’de; tüm TEC’lerin soğuk-sıcak yüzeylerinin ulaştıkları rejim sıcaklıkları ( $T_{R1}$ - $T_{R3}$ ) ve rejim sıcaklığına ulaşma süreleri ( $t_R$ ) verilmektedir. Aynı zamanda deney düzeneklerinin plato evresine ulaştıkları durumda oluşan toplam sıcaklık farkları da ( $\Delta T$ ) bu çizelgede yer almaktadır.

**Çizelge 4.1 :** Deney Düzeneklerinin Sıcak ve Soğuk Yüzey Rejim Sıcaklıkları ( $T_{R1}$ - $T_{R3}$ ) rejim sıcaklığına ulaşma süreleri ( $t_R$ ) toplam sıcaklık değişimi ( $\Delta T$ ) çizelgesi

	$T_{R1}$ (°C)	$t_R$ (s)	$T_{R3}$ (°C)	$t_R$ (s)	$\Delta T$ (°C)
D1	7,40	193	48,53	193	41,13
D2	7,00	168	49,21	170	42,21
D3	17,52	362	30,72	289	13,20
D4	11,81	194	46,07	167	34,26
D5	11,60	194	47,22	168	35,62
D6	11,56	193	47,25	167	35,69

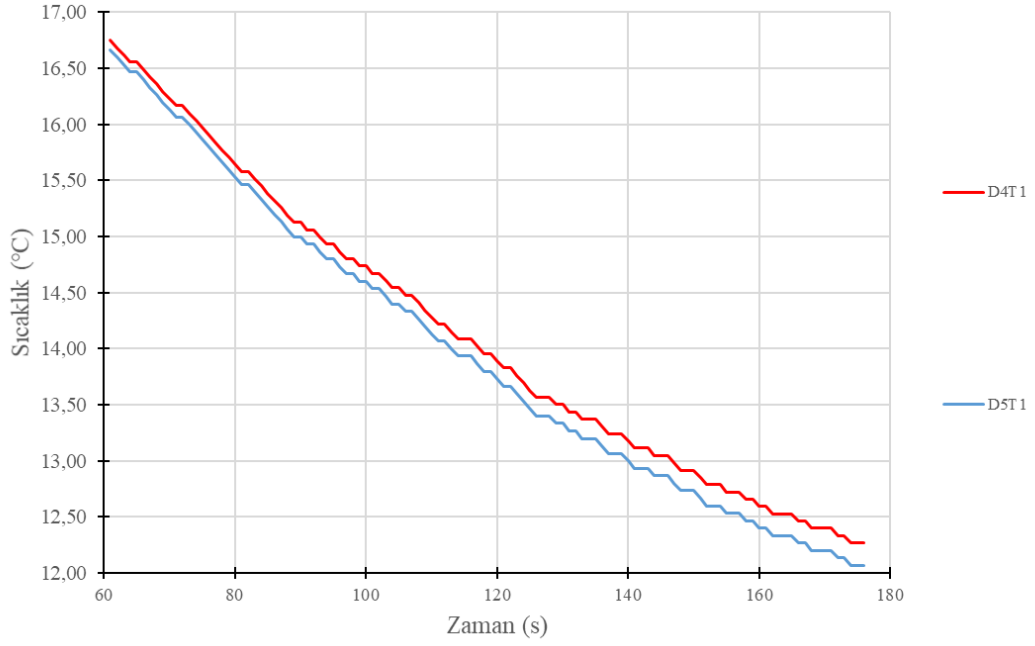
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Çizelge 4.1’de derlenen veriler ışığında; tüm deney düzenekleri içinde, en yüksek

soğutma performansına vakum ortamı sağlanan TEC (D2) ile ulaşıldığı görülmektedir. İleri mühendislik malzemeleri kullanılarak oluşturulan deney düzeneklerinin (D3, D4, D5, D6); vakum ortamı oluşturulan ve standart hava boşluklu TEC'lerden, daha düşük soğutma performansı sergilediği saptanmıştır. Kullanılan yalıtım malzemelerinden epoksi reçinenin; TEC'in yarı iletkenleri arasında gerçekleşen ısı transferi sırasında ısıyı depoladığı ve dolayısıyla soğutma kapasitesini olumsuz yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

D6 deney düzeneğinde yalıtım malzemesi olarak kullanılan NBA'nın diğer yalıtım malzemeleri içinde en yüksek performansı sergilediği ancak yine de standart hava boşluklu TEC'in (D1) ısı performansına erişemediği tespit edilmiştir.

Mikron boyutlu ve nano boyutlu HAp'larla gerçekleştirilen deneylerde de (D4-D5) standart hava boşluklu TEC (D1) soğutma performansına ulaşamamıştır. Aynı malzemenin, farklı tane boyutlarında elde edilmesiyle gerçekleştirilen bu deneylerde, sıcak-soğuk yüzey sıcaklıklarının ve dolayısıyla soğutma performanslarının farklılık gösterdiği sonucu ortaya çıkmıştır. Sonuçlar; nano HAp katkılı D5 deney düzeneğinin, HAp katkılı D4 deney düzeneğine göre üstünlük sağladığını göstermektedir. TEC içinde kullanılan ileri mühendislik malzemelerinin etkisinin en net gözlenebildiği, 60-180 saniye zaman aralığında; D4 ve D5 deney düzeneklerindeki soğuk yüzey sıcaklıkları Şekil 4.30'da detaylı olarak incelenmektedir.



**Şekil 4.30 :** 60-180 s Aralığında D4T1 ve D5T1 Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 HAp ve Nano HAp Termal İletkenlik Katsayısı 0,6 - 0,069 W/m.K)

**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Şekil 4.30'da HAp katkılı D4 deneyi ve nano HAp katkılı D5 deneyinin soğuk yüzey sıcaklıklarının farklılık gösterdiği ve nano boyutlu HAp'ın daha yüksek bir yalıtkanlık sağladığı görülmektedir. Aynı malzeme olmasına rağmen, nanometrik boyutlarda por çapının küçülmesiyle termal iletkenlik katsayısı küçülen nano HAp; daha yalıtkan davranış göstermektedir (Jelle ve ark, 2010). *Knudsen Efekt*i olarak adlandırılan bu olgu D4 ve D5 soğuma eğrilerinde net biçimde görülmektedir.

#### 4.4 Farklı Deney Düzeneklerinde ZT ve COP Değerlerinin Hesaplanması

Üretici firma tarafından sağlanan veriler kullanılarak ZT değeri hesaplanan D1 deney düzeneğinde; sıcak ve soğuk yüzey rejim sıcaklıklarının belirlenmesinin ardından TEC'in performans katsayısı olan COP, denklem 2.4'te yer alan eşitlikten faydalanılarak 0,51682 olarak hesaplanmıştır. TEC'in ortalama elektriksel gücü ise enerjimetre kullanılarak 63 Watt olarak tespit edilmiştir. Carnot Çevrimine göre; konveksiyonel sistemlerde COP, sistemden çekilen ısı miktarının, elektriksel güce oranlanması ile bulunmaktadır. Bu eşitlik sonucu; sistemden çekilen ısı miktarı yaklaşık 32,56 Watt olarak hesaplanmaktadır. Bu değer "3.1.1 Fiziksel parametrelerin belirlenmesi" bölümünde teorik olarak 31,84 W hesaplanan ısı kaybı ( $Q_T$ ) ile oldukça yakın bir değerdir. Bu değerlerin yakın olması; teorik

hesaplamaların, gerçek sonuçlara oldukça uyumlu olarak gerçekleştiğini göstermektedir.

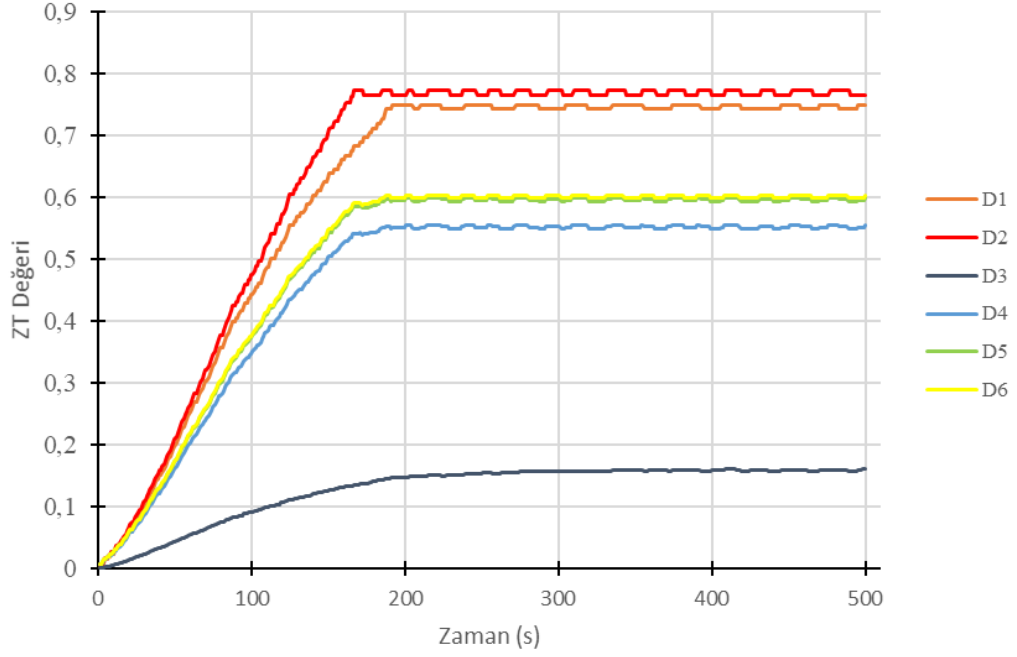
COP değeri; sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları farkı ( $T_H - T_C$ ) ve elektriksel güç ile doğru orantılıdır. Diğer deney düzeneklerinin COP değerleri; kontrol grubu olan D1 deneyindeki COP değeri, rejim sıcaklığında sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları farkı ve elektriksel güç oranlanarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.2).

**Çizelge 4.2 : Tüm Deney Düzenekleri İçin  $T_H - T_C$ , Elektriksel Güç, COP**

	$T_H - T_C$ (°C)	Elektriksel Güç (W)	COP
D1	41,13	63	0,51682
D2	42,21	65	0,51407
D3	13,2	32	0,32655
D4	34,26	58	0,46761
D5	35,62	57,5	0,49040
D6	35,69	57	0,49567

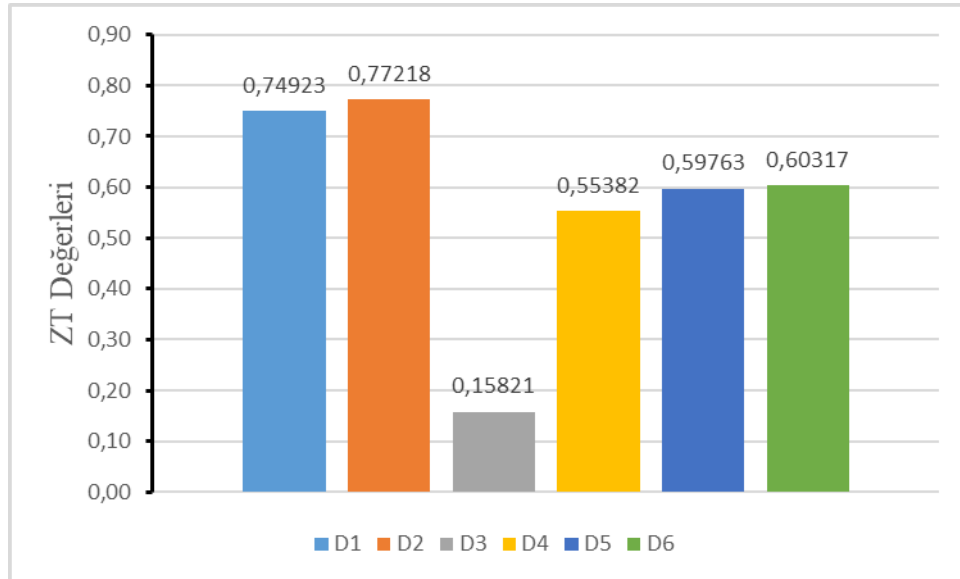
**Kaynak:** (Bozkurt, 2020)

Ulaşılan COP değerleri; farklı deney düzenekleri için ZT değerlerinin hesaplanabilmesine imkan sağlamaktadır. Tüm deney düzenekleri için, 0-500 saniye zaman aralığında; ölçülen sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarına göre hesaplanan ZT değerleri Şekil 4.31’de sunulmaktadır. Nano HAp katkılı D5 deney düzeneği ve NBA katkılı D6 düzeneği ZT değerleri birbirine çok yakın olması sebebiyle grafikte tek eğri gibi gözükmektedir.



**Şekil 4.31 : ZT Değeri- Zaman (s) Grafiği**  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)

Deneyley boyunca termistörlerden alınan sıcaklık verilerine göre hesaplanan ZT değeri; deney düzenekleri rejim sıcaklığına ulaşmaya kadar artış göstermekte, rejim sıcaklığına ulaşıldığında ise yatay bir seyir izlemektedir. Farklı yalıtım ortamları oluşturulmuş deney düzenekleri için; rejim sıcaklığına ulaşıldığında, ZT değeri maksimum olmakta ve düzenek ZT değeri olarak belirlenmektedir (Şekil 4.32).



**Şekil 4.32 : Deney Düzeneklerinin ZT Değeri**  
Kaynak: (Bozkurt, 2020)



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada TE malzemelerinin soğutma amaçlı kullanımına ve performanslarının artırılmasına ilişkin analizler ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler; termal analiz, morfolojik analiz ve elemental analiz olarak gruplanmaktadır.

Deney düzeneğinin oluşturulabilmesi ve çalışabilmesi için gerekli termal yüklerin belirlenmesi aşamalarını içeren termal analizler sonucunda; TEC’de ısı transferi gerçekleşen yüzey alanlarının genişletilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle; TEC’in sıcak yüzeyine alüminyum blok eklenerek termal analizler tekrardan gerçekleştirilmiş ve bu şekilde sistemin ideal sıcaklık aralığında (-50-+50°C) çalışabileceği tespit edilmiştir.

Morfolojik analizler; TEC’lerde bulunan p-n çiftleri üzerinde boşluk ve yüzeysel çatlaklar bulunduğunu göstermekte olup, bu durum TEC’in soğutma performansını düşürmektedir.

Gerçekleştirilen elemental analizler sonucunda ise; TEC’lerde TE özellik gösteren malzemelerin ağırlıkça p-tipinde %74,5; n-tipinde ise %59,89 oranında bulunduğu tespit edilmiştir.

TEC’in seramikleri arasında yer alan yarı iletkenlerin bulunduğu boşluklarda farklı yalıtım ortamları oluşturmak üzere, farklı ileri mühendislik malzemeleri ile TEC’e müdahale edilmiş ve bu müdahaleler sonucunda farklı sıcaklık davranışları gözlemlenmiştir. Farklı ileri mühendislik malzemeleri ile yalıtım sağlanan deney düzeneklerinden; standart hava boşluklu TEC (D1), vakum ortamı yaratılan TEC (D2), epoksi reçine enjekte edilen TEC (D3), HAp ile doldurulan TEC (D4), nano HAp ile doldurulan TEC (D5), NBA ile doldurulan TEC (D6) olarak adlandırılmıştır.

Kontrol grubu olarak kullanılan standart hava boşluklu TEC’den ve diğer deney düzeneklerinden daha yüksek bir performans gösteren D2 deneyinde yaratılan toplam sıcaklık farkı 31,9°C olarak gerçekleşmiştir. Bu deneyde elde edilen COP değeri (0,51407), D1 deneyinin COP değerinden (0,51682) daha küçük olmakla birlikte;

tüm deneyler içinde en yüksek ZT değerine (0,77218) bu deney düzeneğinde ulaşılmıştır. En yüksek ZT değerine yani enerji dönüşüm verimliliğe sahip olan D2 deneyinde COP değerinin D1 deneyinden düşük çıkması; tüketilen elektriksel gücün D1 deneyinden 2 Watt (%3,17) daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Seramik yüzeyleri arasına farklı ileri mühendislik malzemeleri uygulanan tüm deney düzeneklerinin; D1 deney düzeneğinden daha düşük soğutma performansı gösterdiği görülmüştür.

Epoksi reçine ile doldurulan D3 deneyi, en düşük ZT (0,15821) ve COP (0,32655) değerleriyle, soğutma performansı en düşük olan düzenek olmuştur.

Mikron boyutlu HAp ile doldurulan D4 deneyinin; ZT (0,55382) ve COP (0,46761) değerlerinin, aynı malzemenin nano boyutlu olarak kullanıldığı D5 deney düzeneğinin ZT (0,59763) ve COP (0,49040) değerlerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Nano boyutlu materyalin daha yüksek yalıtım sağlamasının nedeni; yüzey alanının genişletilerek daha sıkı istiflenmeye imkan sağlayacak şekilde, malzeme arasındaki boşlukların azaltılmasıdır (Zhang ve ark, 2017). Azalan boşluklar sayesinde TEC içerisinde mukavemet artışı sağlanmış, aynı zamanda aynı malzemenin nano boyutlarda kullanılması, *knudsen efektiyle* termal yalıtkanlığı artırmıştır.

NBA ile doldurulan D6 deney düzeneğinde ise; kullanılan tüm ileri mühendislik malzemeleri dahilinde, en yüksek soğutma performansına ulaşılmıştır. NBA kullanılan D6 deney düzeneğindeki sıcaklık değişimi (35,69°C), ZT (0,60317) ve COP (0,49567) değerleri; nano HAp katkılı D5 deneyinden elde edilen verilerle ZT değerinde %0,918 artış gösterirken, COP değerinde %1,063 artış göstermektedir.

Yapılan deneyler sonucunda; TEC'lerin seramik yüzeyleri arasında ısı bariyeri oluşturması planlanan ileri mühendislik malzemelerinin, ısı köprüsüne dönüştüğü ve sistem performansını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Tüm yalıtım malzemeleri, öncelikle sistemdeki ısıyı üzerine çekmiş ardından TEC içindeki yarı iletkenlerin iç dirençlerini arttırmak suretiyle ısı transferinde azalmaya neden olmuştur. Özellikle epoksi reçine kullanılan D3 deney sonuçlarında ulaşılan sıcaklık değişimi (13,2°C), ZT (0,15821) ve COP (0,32655) değerleri bu etkiyi net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Nano HAp ve NBA; biyobozunur malzemeler olduğundan, doğaya zarar vermeyen

ve geri dönüştürülebilir malzemelerdir. Bu çalışma kapsamında; kullanılan diğer ileri mühendislik malzemelerine göre, COP değeri daha yüksek olan bu malzemelerin farklı TEC uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Nano HAp, biyouyumlu bir malzeme olduğundan canlı organizmalarda kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde; insan vücuduna temas eden alanlarda, doğrudan vücut içinde ya da yiyecek ve içeceklerin temas ettiği ekipmanlarda kullanılabilir. Kimyasal/kristal yapısı, dolgu malzemesi olarak kullanıldığında TEC'e ekstra mukavemet sağlamaktadır. Biyo atıklardan elde edilen nano HAp, NBA'ya göre daha uygun maliyetli bir malzemedir. Ancak yapılan deneyler sonucunda; dolgu malzemesi olarak nano HAp kullanılan TEC'in soğutma performansında, hava boşluklu TEC'e göre %20,21 oranında performans kaybı yarattığı tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında, nano HAp ile doldurulmuş TEC'ler gelecekte aşağıdaki alanlarda kullanılabilir:

- Travmatik dokuların soğutulmasında kullanılan biyosensörlerde,
- Doku, organ veya ilaç nakil kutularında,
- Uygun maliyetli ve yüksek mukavemetli taşınabilir soğutucu kutularında,
- Biyomekatronik sistemlerin işlemcilerinin soğutulmasında.

Silika aerojeller, dünyada bilinen en düşük yoğunluklu katı malzemelerdir (Wang ve ark, 2016). Silika aerojellerden olan NBA da düşük özkütlesi ( $0,15-0,25 \text{ g/cm}^3$ ) sayesinde oldukça hafif bir malzemedir. Termal, elektriksel ve akustik yalıtkanlık özelliğinin yanında, NBA dolgu malzemesi olarak kullanıldığında TEC'e ekstra mukavemet sağlamaktadır. Biyolojik kaynaklardan elde edilen NBA, nano HAp'a göre, daha yüksek maliyetli ancak daha hafif bir malzemedir. İleri mühendislik malzemeleri ile doldurulan tüm deney düzenekleri içinde, en yüksek soğutma performansını sergileyen deney düzeneği NBA ile doldurulan TEC olmuştur. NBA kullanılan TEC'in soğutma performansında, hava boşluklu TEC'e göre %19,49 oranında performans kaybı yaşandığı tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında, NBA ile doldurulmuş TEC'ler gelecekte aşağıdaki alanlarda kullanılabilir:

- Akıllı saatler, soğutma fonksiyonu olan giysiler gibi giyilebilir teknolojilerde,
- Uzay endüstrisinde, uzay araçlarının soğutulmak istenen elektronik devrelerinde,
- Hafiflik gerektiren uçak endüstrisinde soğutma amaçlı,

Soğutma hayatımızın farklı alanlarında karşımıza çıkan temel ihtiyaçlardan biridir. Gelecekte TEC'lerin verimliliklerinin artmasının sağlanması, soğutma alanında daha yoğun kullanılmalarına imkan sağlayacaktır. Daha yüksek mukavemet, akustik yalıtım ve titreşim önleme gibi özelliklerin gerekli olduğu kullanım alanlarında; TEC'lerin iç bölgelerinin yalıtımının nano HAp ve NBA ile sağlanabileceği bu çalışma sonucunda ulaşılan en önemli sonuçtur. Deneyler sonucu elde edilen veriler, TEC'in içerisine yerleştirilen nano HAp ve NBA'ların; giyilebilir teknolojiler, taşınabilir soğutma sistemleri, biyosensör ve biyomekatronik gibi uygulamalarda kullanımına yönelik fırsatlar sunmaktadır.

## KAYNAKLAR

### Yayınlar

- Adhikari, K.** (2017). Thermocouple: Facts and Theories. *The Himalayan Physics*, 6(7), 10-14.
- Al Musleh, M. T.** (2017). Thermoelectric generator experimental performance testing for wireless sensor network application in smart buildings. *MATEC Web of Conferences*, 120, 08003.
- Appel, O., Zilber, T., Kalabukhov, S., Beeri, O., Gelbstein, Y.** (2015). Morphological effects on the thermoelectric properties of Ti<sub>0.3</sub>Zr<sub>0.35</sub>Hf<sub>0.35</sub>Ni<sub>1+δ</sub>Sn alloys following phase separation. *Journal of Materials Chemistry C*, 3(44), 11653–11659.
- Bahk, J. H., Fang, H., Yazawa, K., Shakouri, A.** (2015). Flexible thermoelectric materials and device optimization for wearable energy harvesting. *Journal of Materials Chemistry C*, 3(40).
- Barsoum, M.** (2003). *Fundamentals of Ceramics*. Bristol: IOP Publishing Ltd.
- Bozkurt, B.** (2020). *Termoelektrik Modül İçi İleri Mühendislik Malzemelerinin Termoelektrik Modülün Termal Davranışına Etkisinin Deneysel Ve Sayısal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Gedik Üniversitesi , Makine Mühendisliği, İstanbul.
- Bozkurt, B., Dilibal, S., & Şahin, Y. M.** (2019). Investigation of the Cooling Performance of the Thermoelectric Modules for Mobile Cooling System. İstanbul: ICESBE.
- Bubnova, O. K.** (2011). Optimization of the thermoelectric figure of merit in the conducting polymer poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Nature Materials*, 10(6), 429–433.
- Buluş, E.** (2017). *Doğal İzole Edilmiş Biyoseramiklerden Elektrospinning Yöntemi İle Polimerik Biyokompozit Malzeme Eldesi*. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Fırat Üniversitesi , Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri , Elazığ.
- Chen, J. Y.** (1996). The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator. *Journal of Applied Physics*, 79(11), 8823–8828.
- Ciylan, B., Yılmaz, S.** (2007). Design of a thermoelectric module test system using a novel test method. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(7), 717-725.
- Coelho, T. M., Nogueira, E. S., Weinand, W. R., Lima, W. M., Steimacher, A., Medina, A. N., Bento, A. C.** (2007). Thermal properties of natural

nanostructured hydroxyapatite extracted from fish bone waste. *Journal of Applied Physics*, 101(084701), 1-8.

- Dengteng, Ge, Yang, L., Li, Y., Zhao, J.** (2009). Hydrophobic and thermal insulation properties of silica aerogel/epoxy composite. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355(52-54), 2610-2615.
- Dilibal, S.** (2005). *Nikel-titanyum şekil bellekli alaşım üretimi ve şekil bellek eğitimi*, Doktora Tezi, İstanbul.
- Durmuş, A.** (2006). *Poliolefin Nanokompozitlerin Hazırlanması*, Doktora Tezi, İstanbul.
- Elsheikh, M. H., Shnawah, D. A., Sabri, M. F. M., Said, S. B. M., Hassan, M. H., Bashir, M. B. A., Mohamad, M.** (2014). A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(30), 337-355.
- Fagan, J. G., Amarakoon, V. R.** (1993). Reliability and reproducibility of ceramic sensors. I-NTC thermistors. *American Ceramic Society Bulletin*(72), 70-79.
- Fourier, J.,** (1955). *The Analytical Theory of Heat*. New York.: Dover Publications.
- Gao, M., Rowe, D.M.** (2006). Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators”, 83 (2): 1-20, (2005). *Applied Energy*, 83(2), 133-152.
- Goyan, F. M., Johnson, R. D., Borazan, H. N.** (1971). Improved Thermoelectric Osmometer. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 60(1), 117–120.
- Gurav, J. L., Jung, I. K., Park, H. H., Kang, E. S., Nadargi, D. Y.** (2010). Silica aerogel: synthesis and applications. *Journal of Nanomaterials*.
- Han, S., Chung, D. D. L.** (2013). Carbon fiber polymer–matrix structural composites exhibiting greatly enhanced through-thickness thermoelectric figure of merit. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 48, 162-170.
- Harabi, A., Belamri, D., Karboua, N., Mezahi, F.-Z.** (2010). Sintering of bioceramics using a modified domestic microwave oven. . *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 104(1), 383–388.
- Horiuchi, N., Nakamura, M., Nagai, A., Katayama, K., Yamashita, K.** (2012). Proton conduction related electrical dipole and space charge polarization in hydroxyapatite. *Journal of Applied Physics*, 112(074901), 1-6.
- Huang, C., Zhen, W., Huang, Z., Luo, D.** (2017). Thermal and electrical conductivities of epoxy resin-based composites incorporated with carbon nanotubes and TiO<sub>2</sub> for a thermoelectric application. *Applied Physics A*, 124(38), 1-7.
- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., Ismail, M.** (2019). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*.
- Jelle, B. P., Gustavsen, A., Baetens, R.** (2010). The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. *Journal of Building Physics*, 34(2), 99-123.

- Jeong, Y. J., Jung, J., Suh, E. H., Yun, D. J., Oh, J. G., Jang, J.** (2019). Self-Healable and Stretchable Organic Thermoelectric Materials: Electrically Percolated Polymer Nanowires Embedded in Thermoplastic Elastomer Matrix. *Advanced Functional Materials*(1905809), 1-12. doi:DOI: 10.1002/adfm.201905809
- Jiang, G., Diao, L., Kuang, K.** (2012). *Advanced Thermal Management Materials*. Springer Science & Business Media.
- Kaw, A.** (1997). *Mechanics of Composite Materials*. USA: CRC Pres Inc.
- Kaygili, O., Keser, S., Ates, T., Al-Ghamdi, A. A., Yakuphanoglu, F.** (2013). Controlling of dielectrical and optical properties of hydroxyapatite based bioceramics by Cd content. . *Powder technology*, 245, 1-6.
- Kenfaui, D., Lenoir, B., Chateigner, D., Ouladdiaf, B., Gomina, M., Noudem, J. G.** (2012). Development of multilayer textured Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> materials for thermoelectric generators: Influence of the anisotropy on the transport properties. . *Journal of the Europe*, 32(10), 2405-2414.
- Kim, G. H., Shao, L., Zhang, K., Pipe, K. P.** (2013). Engineered doping of organic semiconductors for enhanced thermoelectric efficiency. *Nat Mater. Nature Materials*, 12, 719-723.
- Lang, S., Gerschitzka, M., Bauer, D., Drück, H.** (2016). Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Materials for Thermal Energy Stores in Solar Thermal Systems. *Energy Procedia*, 91, 172-181.
- LeBlanc, S.** (2014). Thermoelectric generator Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications. *Sustainable Materials and Technologies*, 1(2), 26-35.
- LeBlanc, S., Yee, S. K., Scullin, M. L., Dames, C., Goodson, K. E.** (2014). Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(32), 313–327.
- Lee, H., Neville, K.** (1982). *Handbook of Epoxy Resin* (17 b.). USA: McGraw-Hill Inc.
- Liu, Y., Zhang, W., Zhou, H.** (2005). Mechanical properties of epoxy resin/hydroxyl-terminated polyester blends: effect of two-phase structure. *Polymer International*, 54(10), 1408–1415.
- Majumdar, A.** (2004). Thermoelectricity in Semiconductor Nanostructures. *Science*, 303(5659), 777-778.
- Mamur, H.** (2013). *Termoelektrik Jeneratörün Elektriksel, Termoelektriksel Ve Isıl Parametrelerinin İncelenmesi İçin Bilgisayarlı Bir Veri Edinim Ve Test Sisteminin Gerçekleştirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Ankara.
- Matsumoto, M., Mori, M., Haraguchi, T., Ohtani, M., Kubo, T., Matsumoto, K., Matsuda, H.** (2015). Development of state of the art compact and lightweight thermoelectric generator using vacuum space structure. *SAE International Journal of Engines*, 8(4), 1815-1825.
- Pang, H., Piao, Y. Y., Tan, Y. Q., Jiang, G. Y., Wang, J. H., Li, Z. M.** (2013). Thermoelectric behavior of segregated conductive polymer composites

with hybrid fillers of carbon nanotube and bismuth telluride. *Materials Letters*, 107, 150-153.

- Richard A. Vaia, Klaus D. Jandt, Edward J. Kramer, and Emmanuel P. Giannelis** (1995). Kinetics of Polymer Melt Intercalation. *Macromolecules*, 28, 8080-8085.
- Rodríguez-Barreiro, R., Abendroth, C., Vilanova, C., Moya, A., Porcar, M.** (2013). Towards a Microbial Thermoelectric Cell. *PLoS ONE*, 8(2).
- Rowe, D.** (1995). Handbook of thermoelectrics. Boca Raton, London: CRC Press.
- Rull-Bravo, M., Moure, A., Fernandez, J. F., Martín-González, M.** (2015). Skutterudites as thermoelectric materials. *Rsc Advances*, 5(52), 41653-41667.
- Shi, B., Dong, L., Li, M., Liu, B., Kim, K., Xu, X., Liu, J.** (2018). Thermal percolation in composite materials with electrically conductive fillers. *Applied Physics Letters*, 113(4).
- Tani, J.-i., Kido, H.** (2005). Thermoelectric properties of Bi-doped Mg<sub>2</sub>Si semiconductors. *Physica B: Condensed Matter*, 364(1-4), 218-224.
- Temel, T. M., İkizler, B. K., Terzioğlu, P. Y., Elalmış, Y. B.** (2017). The effect of process variables on the properties of nanoporous silica aerogels: an approach to prepare silica aerogels from biosilica. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 84(1), 51-59.
- Tritt, T.** (2000). *Advances in Thermoelectric Materials I*. Elsevier.
- Wang, H., & Wang, C.** (2013). Thermoelectric properties of Yb-doped La<sub>0.1</sub>Sr<sub>0.9</sub>TiO<sub>3</sub> ceramics at high temperature. *Ceramics International*, 39(2), 941-946.
- Wang, L., Jia, X., Wang, D., Zhu, G., & Li, J.** (2013). Preparation and thermoelectric properties of polythiophene/multiwalled carbon nanotube composites. *Synthetic Metals*, 181, 79-85.
- Wang, L., Wang, D., Zhu, G., Li, J., Pan, F.** (2011). Thermoelectric properties of conducting polyaniline/graphite composites. *Materials Letters*, 65(7), 1086-1088.
- Wang, Q., Feng, J., Ma, L., Wei, W., Xie, J., Xia, C., Jiang, D.** (2016). Synthesis, characterization, and adsorption properties of silica aerogels crosslinked with diisocyanate under ambient drying. *Journal of materials science*, 51(20), 9472-9483.
- Wang, S., Lü, Q., Li, L., Fu, G., Liu, F., Dai, S., Wang, J.** (2013). High-temperature thermoelectric properties of Cd<sub>1-x</sub>Pr<sub>x</sub>O ceramics. *Scripta Materialia*, 69(7), 533-536.
- Yasukawa, M., Kono, T., Ueda, K., Yanagi, H., Hosono, H.** (2010). High-temperature thermoelectric properties of La-doped BaSnO<sub>3</sub> ceramics. *Materials Science and Engineering: B*, 173(1-3), 29-32.
- Yavuz, A. H.** (2009). *Bulanık Mantıklı Termoelektrik Beyin Soğutucu*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Ankara.



- Yıldız, Y.** (2010). *Güneş Pili Termoelektrik Modüllü Ev Tipi Soğutucunun İmalatı Ve Performansının Ölçülmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Yuan, B., Zhang, J., Yu, J., Song, R., Mi, Q., He, J., & Zhang, J.** (2016). Transparent and flame retardant cellulose/aluminum hydroxide nanocomposite aerogels. *Sci. China Chem.*, 59, 1335–1341.
- Zeng, Y. J., Wu, D., Cao, X. H., Zhou, W. X., Tang, L. M., Chen, K. Q.** (2020). Nanoscale organic thermoelectric materials: measurement, theoretical models, and optimization strategies. *Advanced Functional Materials*, 30(8), 1-25.
- Zhang, Y.-G., Zhu, Y.-J., Chen, F., Sun, T.-W.** (2017). Biocompatible, Ultralight, Strong Hydroxyapatite Networks Based on Hydroxyapatite Microtubes with Excellent Permeability and Ultralow Thermal Conductivity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(9), 7918-7928.
- Zhu, J., Xiong, R., Zhao, F., Peng, T., Hu, J., Xie, L., Jiang, C.** (2019). Lightweight, high-strength, and anisotropic structure composite aerogel based on hydroxyapatite nanocrystal and chitosan with thermal insulation and flame retardant properties. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1-45.
- Zhu, Y., Wang, C., Wang, H., Su, W., Liu, J., Li, J.** (2014). Influence of Dy/Bi dual doping on thermoelectric performance of CaMnO<sub>3</sub> ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 144(3), 385-389.

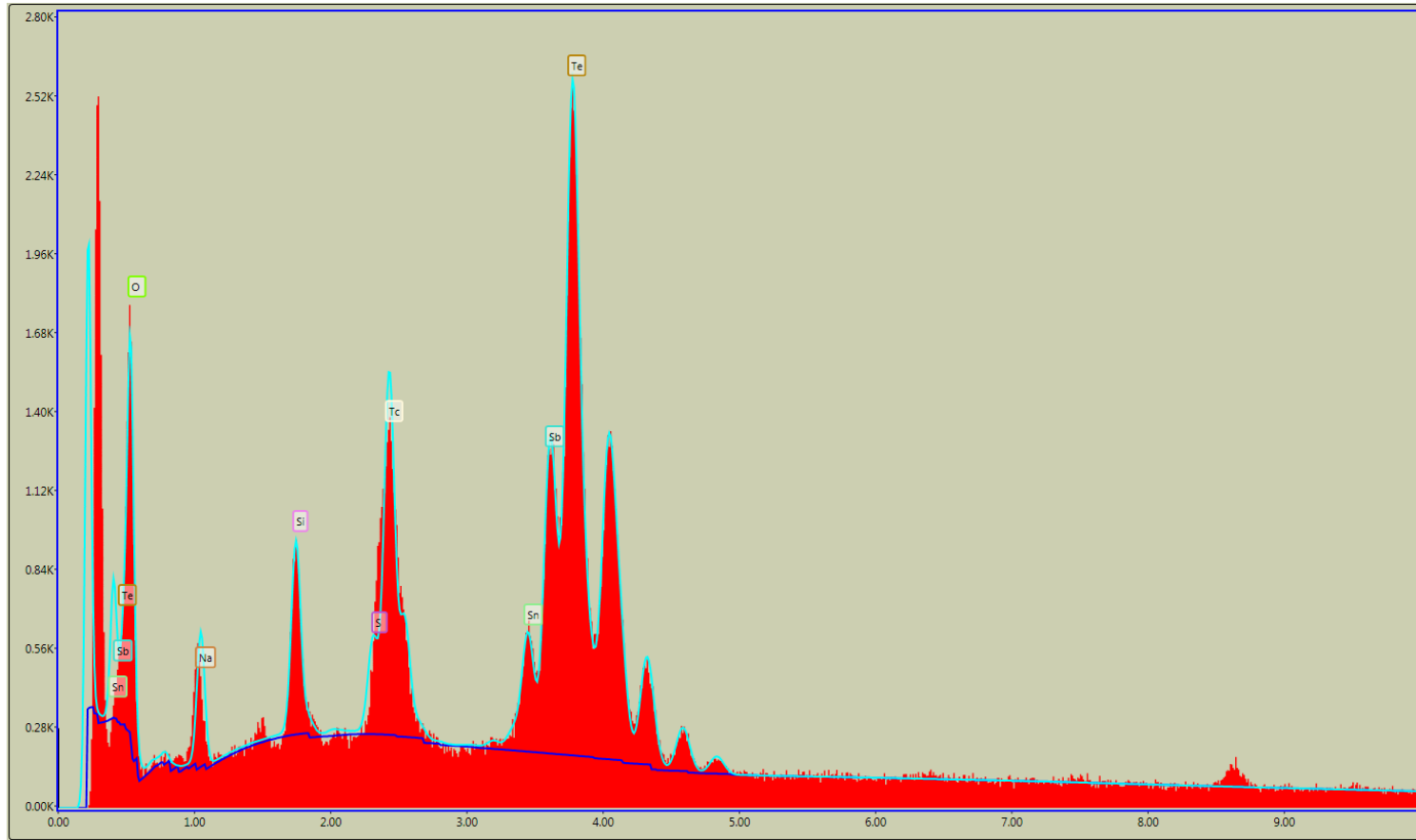
#### İnternet Kaynakları

- URL-1** < <https://scholar.google.com/> > , alındığı tarih: 07.05.2020
- URL-2** < <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp> > , alındığı tarih: 07.05.2020
- URL-3** < <https://patents.google.com/> > , alındığı tarih: 07.05.2020
- URL-4** < <https://portal.turkpatent.gov.tr/anonim/arastirma/patent/detayli> > , alındığı tarih: 07.05.2020
- URL-5** < <https://rps.nasa.gov/power-and-thermal-systems/power-systems/current/> > , alındığı tarih: 05.01.2019
- URL-6** < <https://muhendisgundemi.com/termoelektrik/> > , alındığı tarih: 05.01.2019
- URL-7** < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/> > , alındığı tarih: 04.01.2019
- URL-8** < <http://www.xpsturkiye.org/sayfa.asp?ID=136> > , alındığı tarih: 05.01.2019
- URL-9** < [https://www.engineersedge.com/heat\\_transfer/](https://www.engineersedge.com/heat_transfer/) > , alındığı tarih: 06.02.2019
- URL-10** < <https://grabcad.com/library/peltier-plate-module-1> > , alındığı tarih: 09.05.2019
- URL-11** < <https://www.epotek.com/site/component/products/products.html> > , alındığı tarih: 15.05.2019

- URL-12** < <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/289396> >, alındığı tarih: 15.05.2019
- URL-13** < <https://www.sanayimalzemeleri.com/htc-2-ic-ortam-sicaklik-ve-nem-dis-ortam-sicaklik-olcer3DsbDpAhWQxOAKHR85CMEQr4kDegQI> >, alındığı tarih: 20.06.2019
- URL-14** < [https://n11scdn.akamaized.net/a1/1024/elektronik/diger/ar-026-xh-w1209-yukse-kozunurlu-sicaklik-kontrol-karti-arduino\\_\\_1463836140007660.jpg](https://n11scdn.akamaized.net/a1/1024/elektronik/diger/ar-026-xh-w1209-yukse-kozunurlu-sicaklik-kontrol-karti-arduino__1463836140007660.jpg) >, alındığı tarih: 20.06.2019
- URL-15** < <https://urun.gittigidiyor.com/yapi-market-tamirat/watmetre-priz-tipi-enerji-tuketim-olcer-466395815> >, alındığı tarih: 21.06.2019
- URL-16** < <http://www.guvenlimekanlar.com/urun/12v-20-amper-kamera-guc-kaynagi-metal/> >, alındığı tarih: 22.06.2019
- URL-17** < <https://www.robishop.com/urun/arduino-uno-r3-orjinal> >, alındığı tarih: 22.06.2019

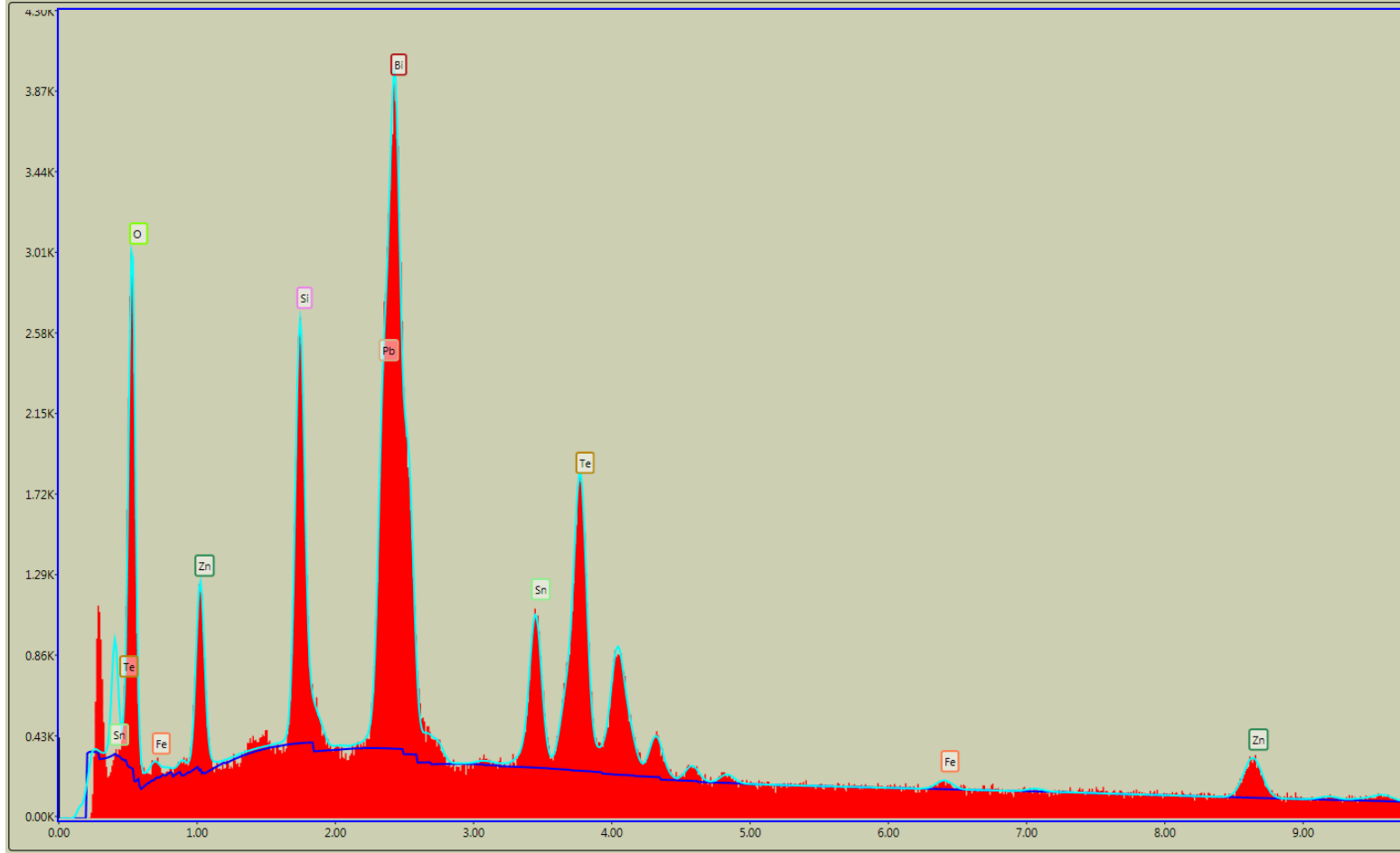
## EKLER

### EK A : EDS Sonuç Grafikleri



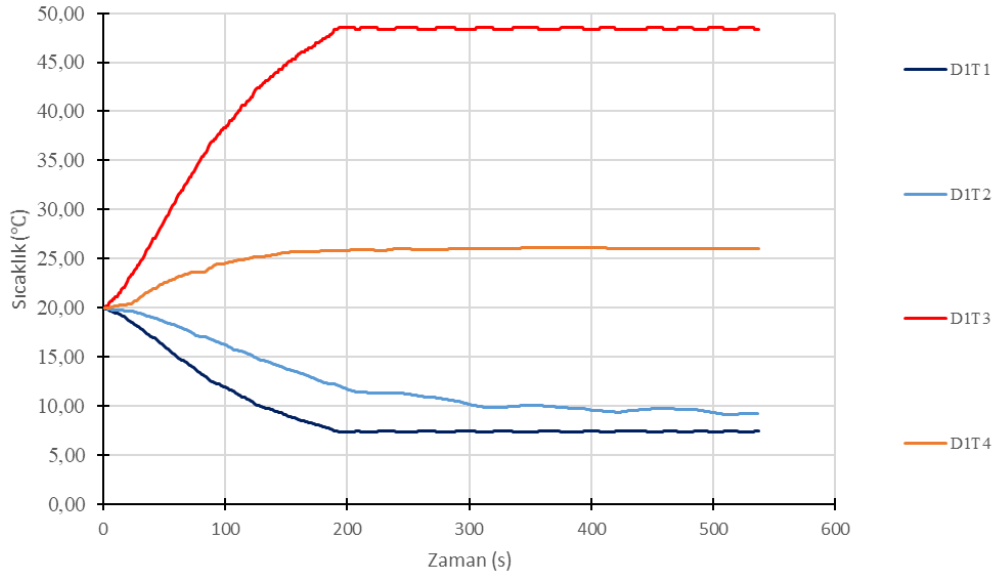
Şekil A.1 : p-tipi Yarı İletken EDS Sonuç Grafiği

EK A

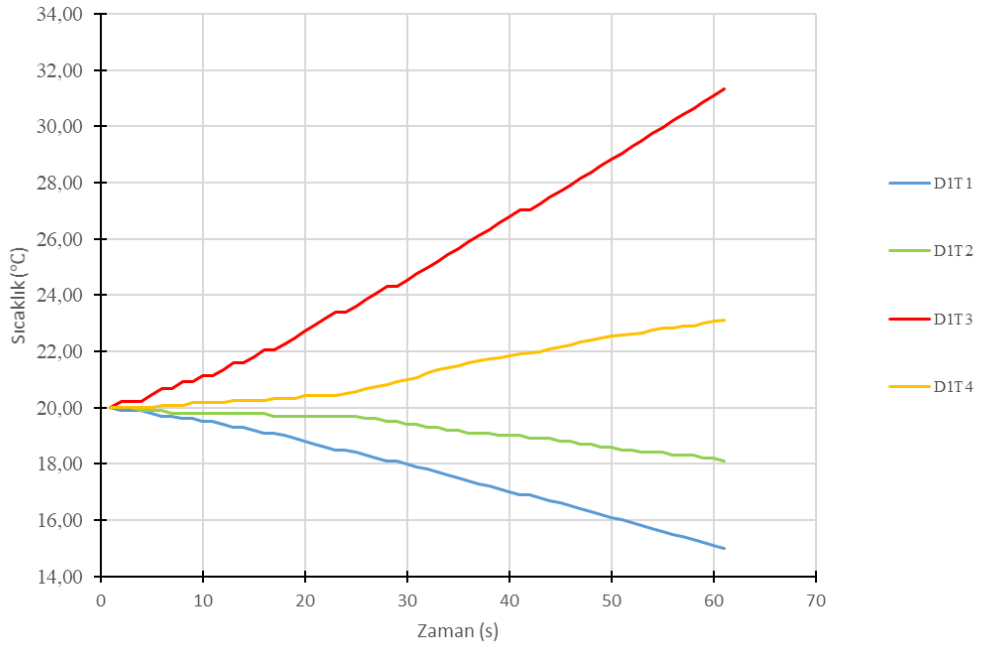


Şekil A.2 : n-tipi Yarı İletken EDS Sonuç Grafiği

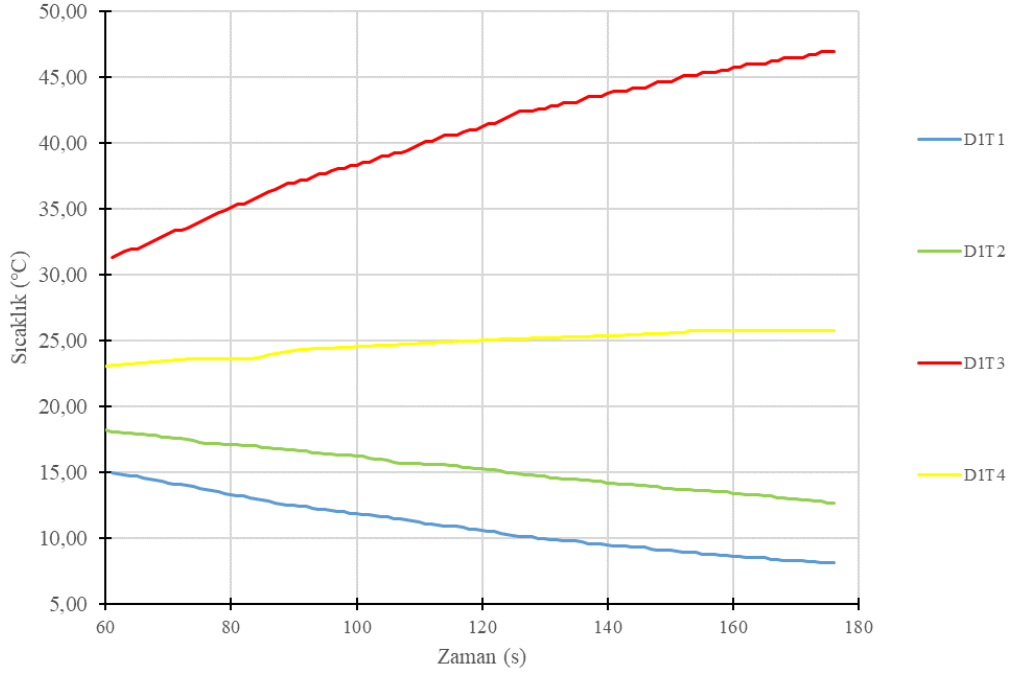
## EK B : Sıcaklık-Zaman Grafikleri



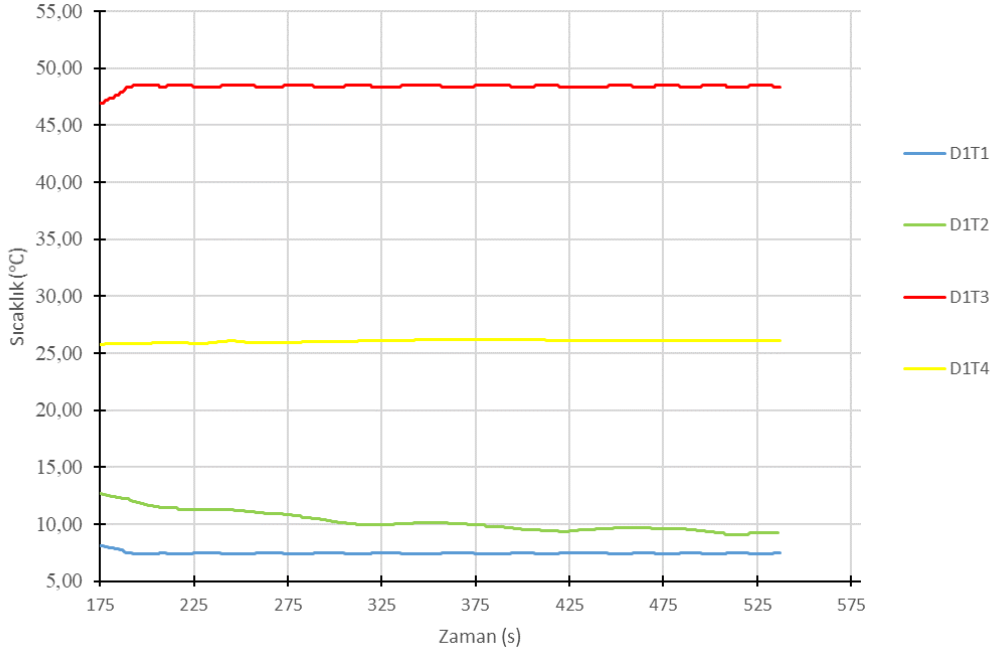
**Şekil B.1** : D1 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)



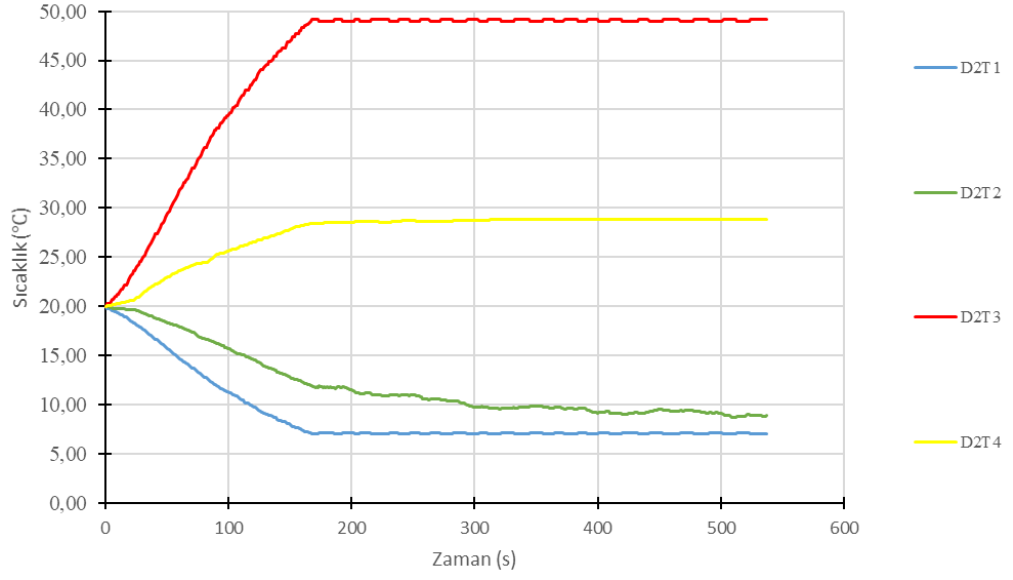
**Şekil B.2** : D1 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)



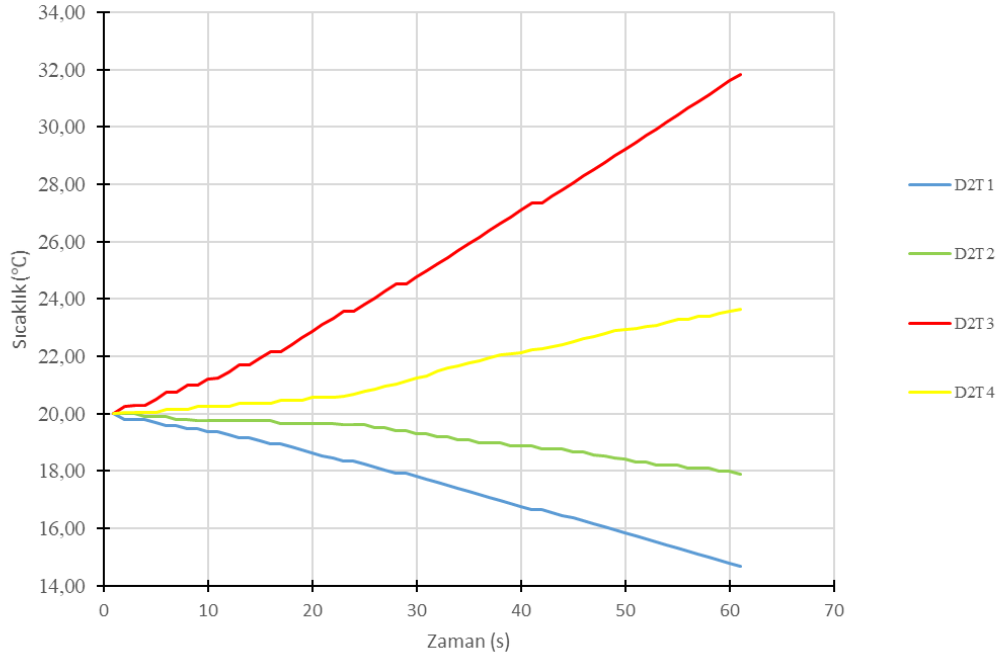
**Şekil B.3 :** D1 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)



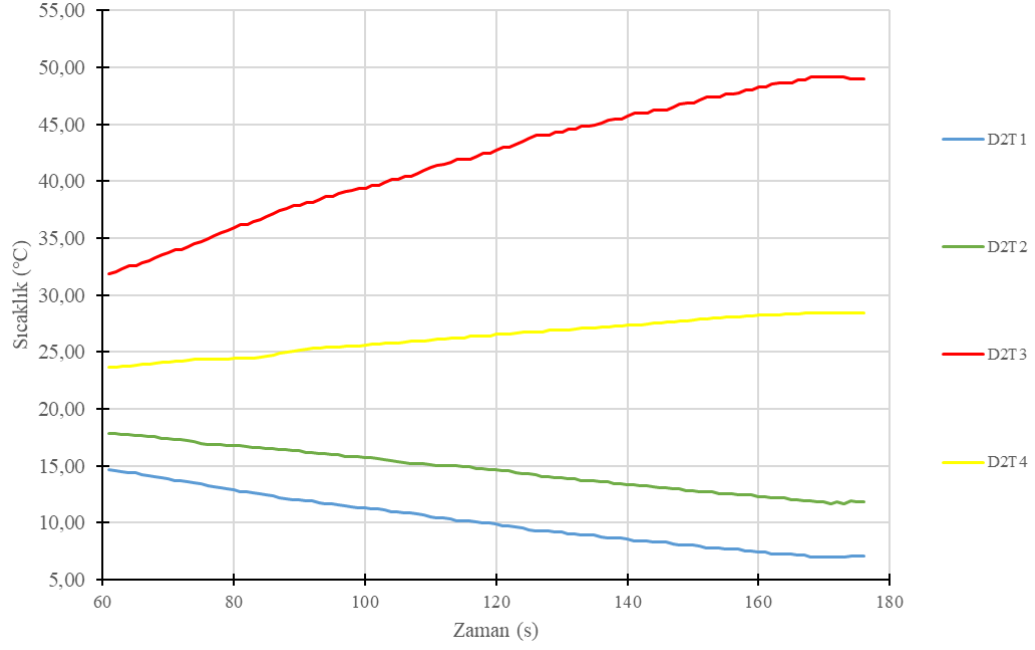
**Şekil B.4 :** D1 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,025W/m.K)



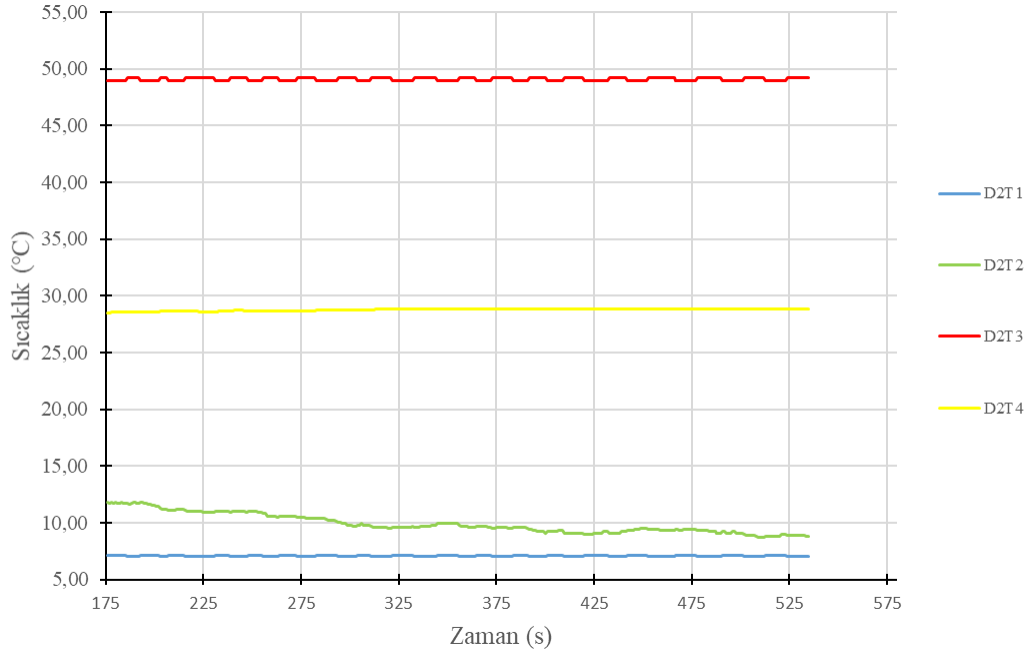
**Şekil B.5 :** D2 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,01W/m.K)



**Şekil B.6 :** D2 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,01 W/m.K)

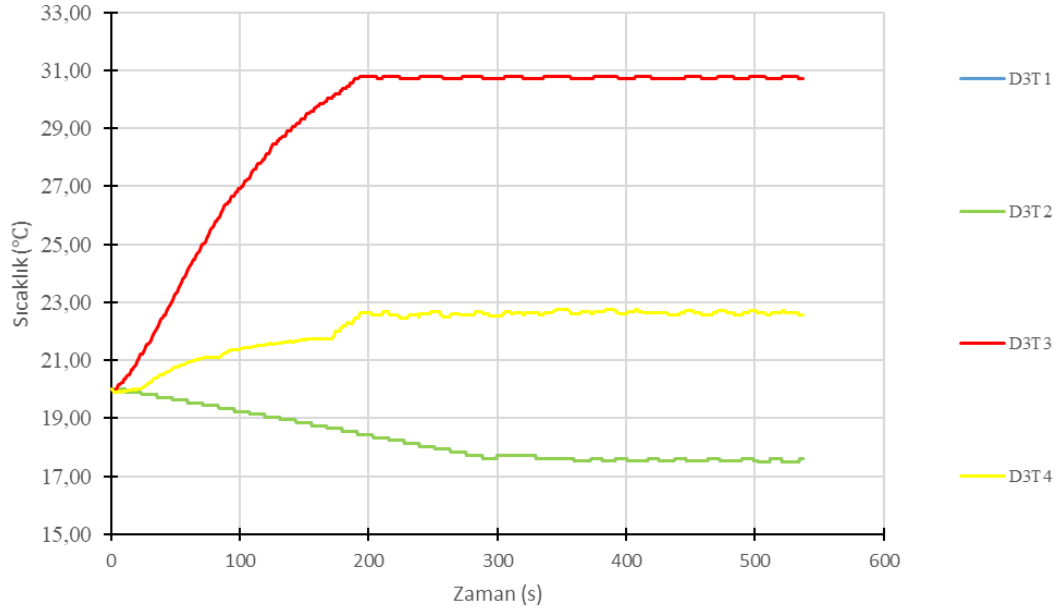


**Şekil B.7 :** D2 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,01 W/m.K)

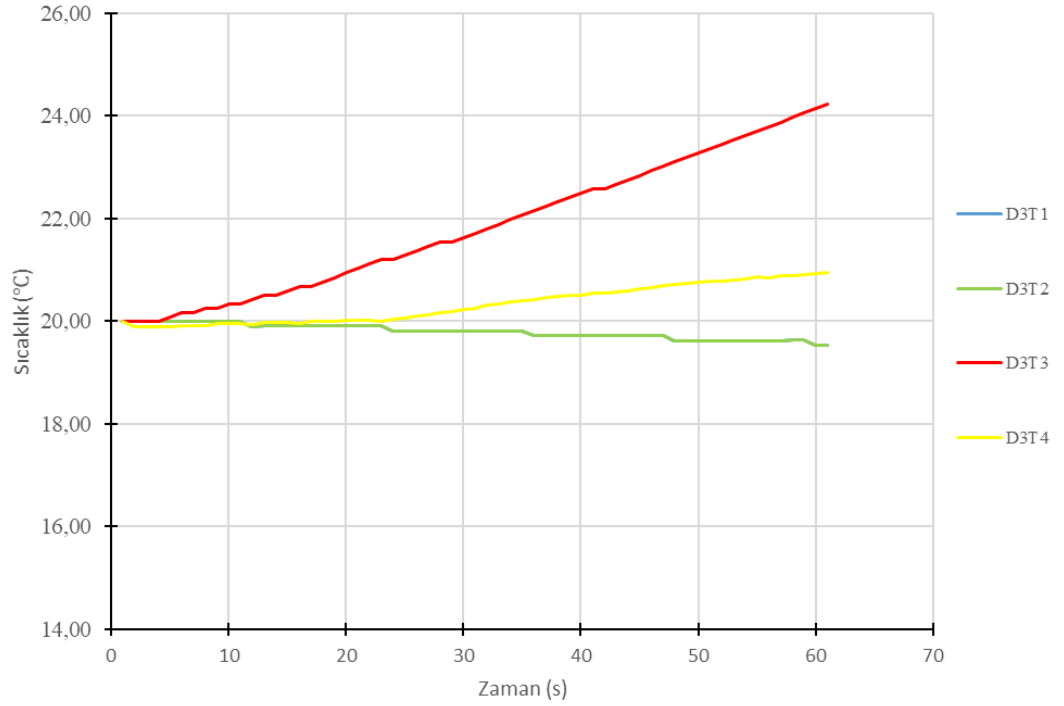


**Şekil B.8 :** D2 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,01 W/m.K)

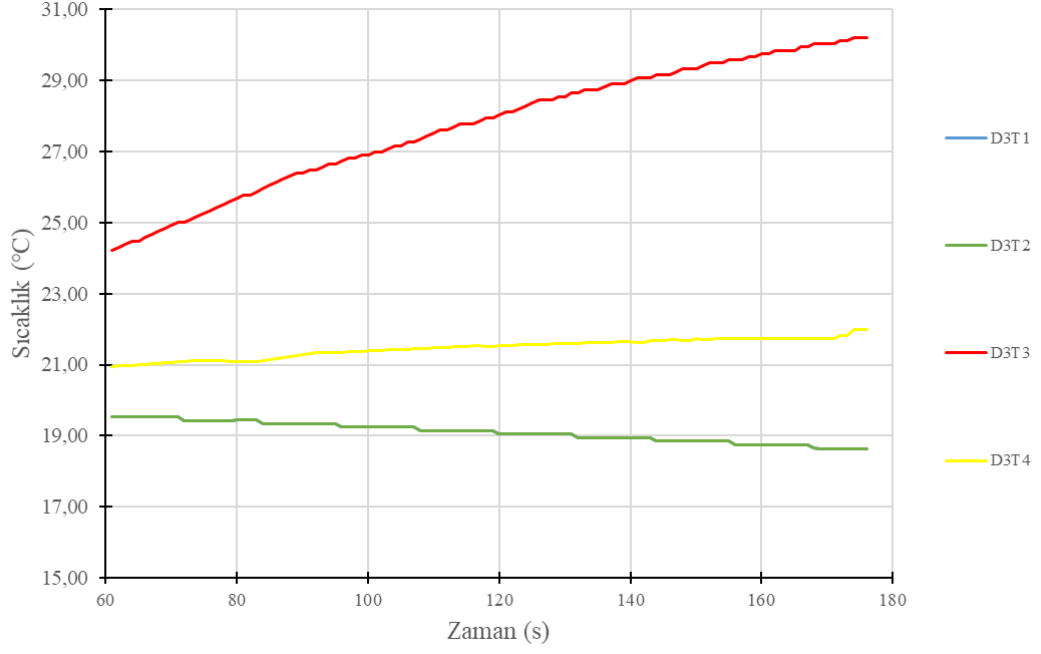




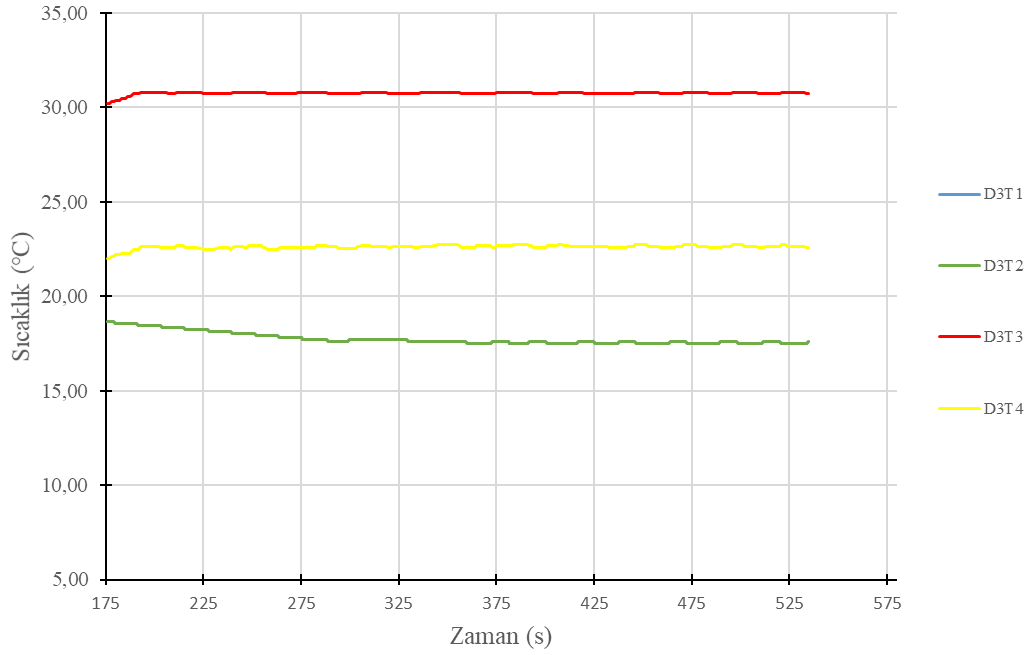
**Şekil B.9** : D3 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 1,15 W/m.K)



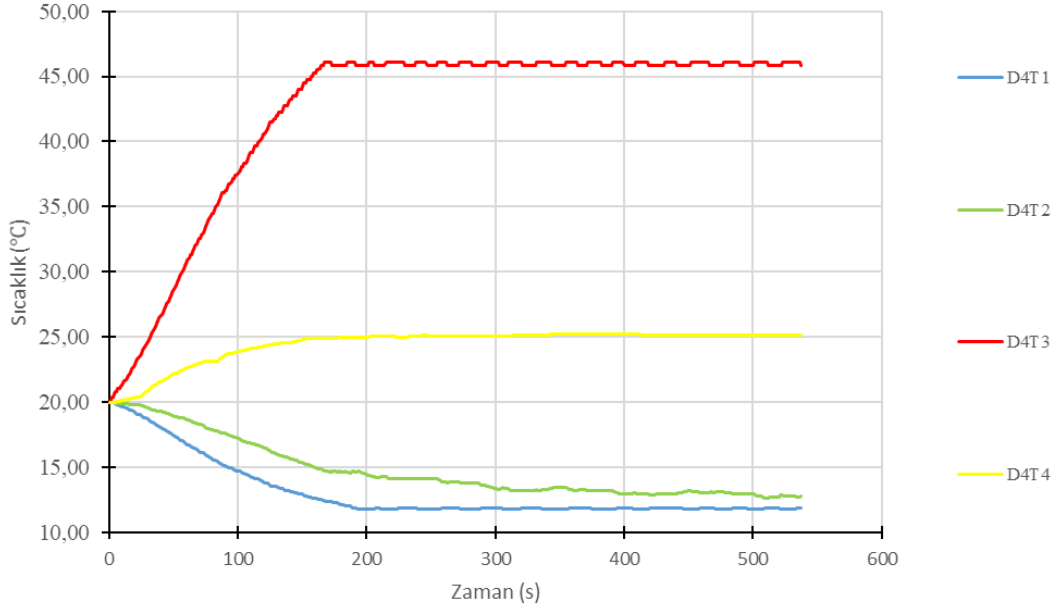
**Şekil B.10** : D3 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 1,15 W/m.K)



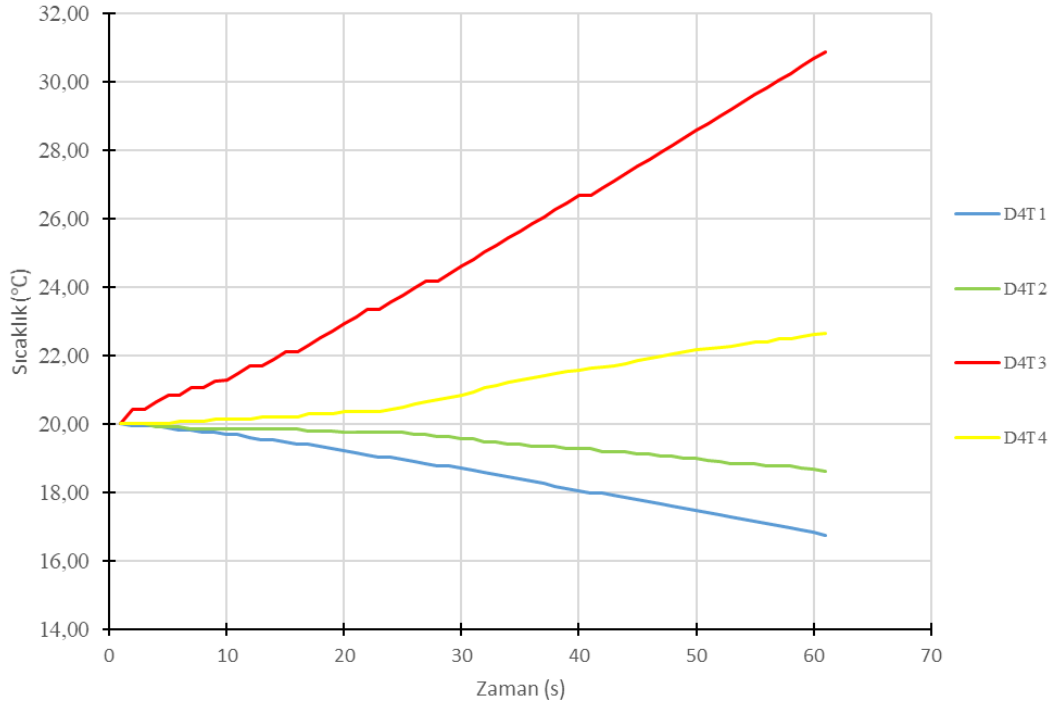
**Şekil B.11** : D3 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 1,15 W/m.K)



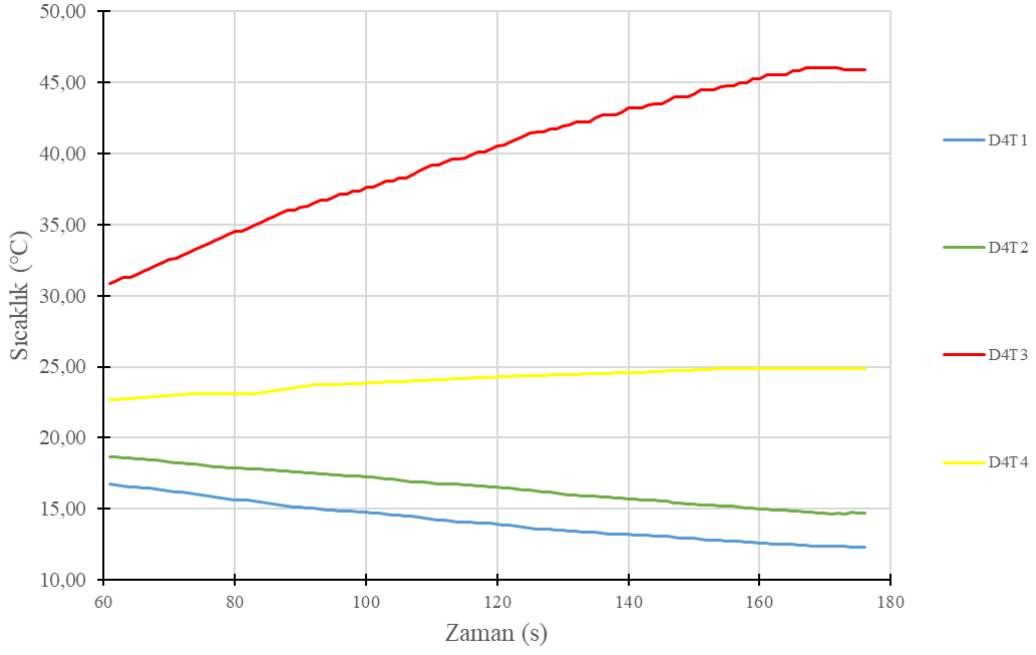
**Şekil B.12** : D3 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 1,15 W/m.K)



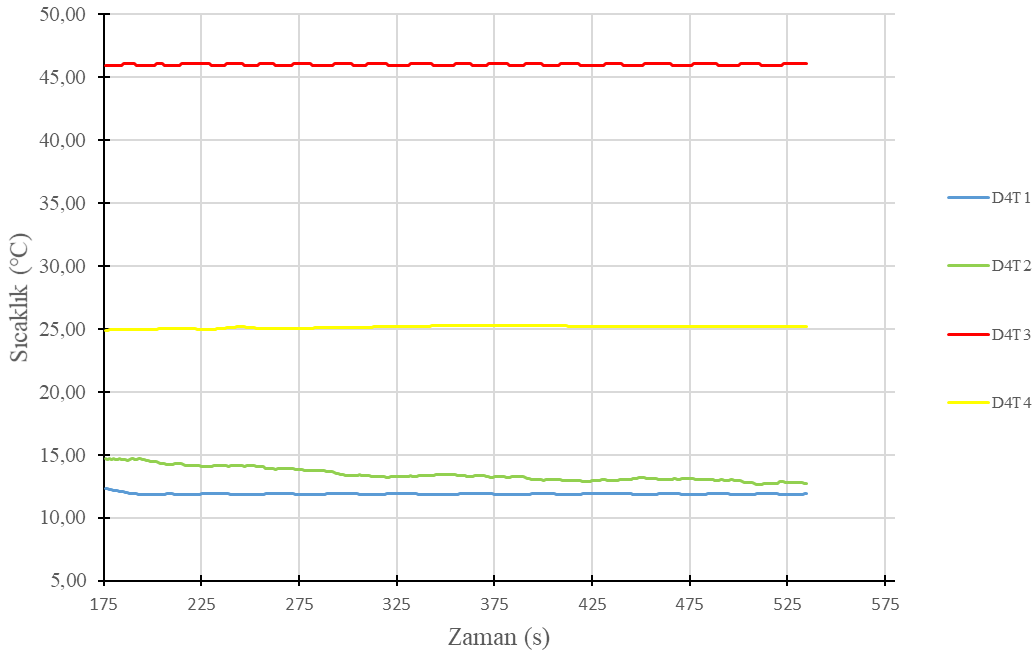
**Şekil B.13 :** D4 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,6 W/m.K)



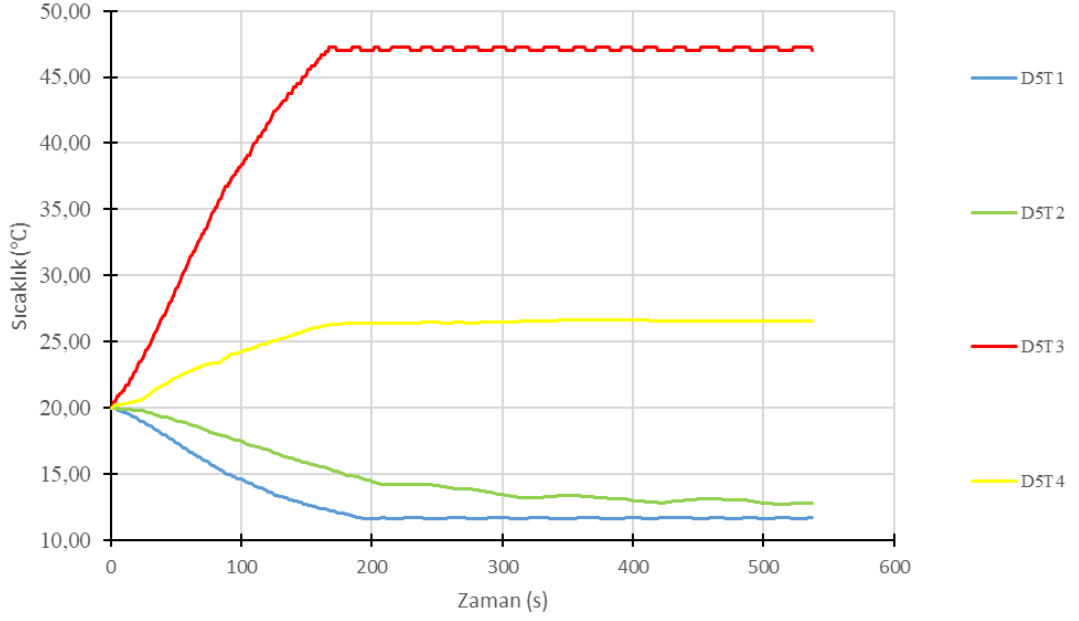
**Şekil B.14 :** D4 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,6 W/m.K)



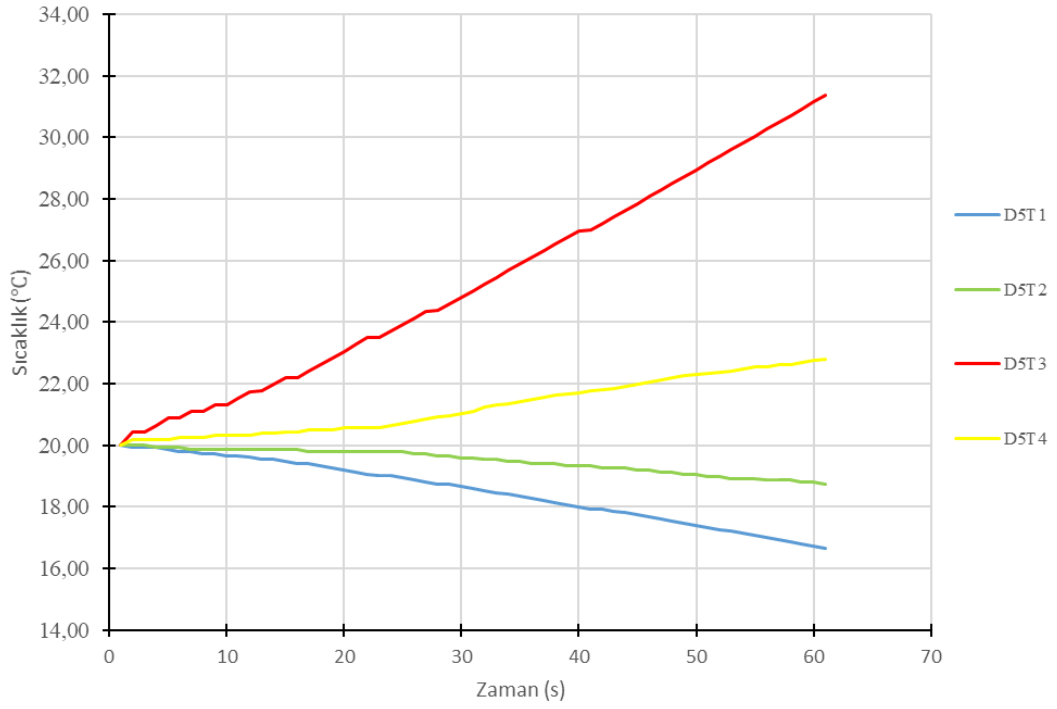
**Şekil B.15 :** D4 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,6 W/m.K)



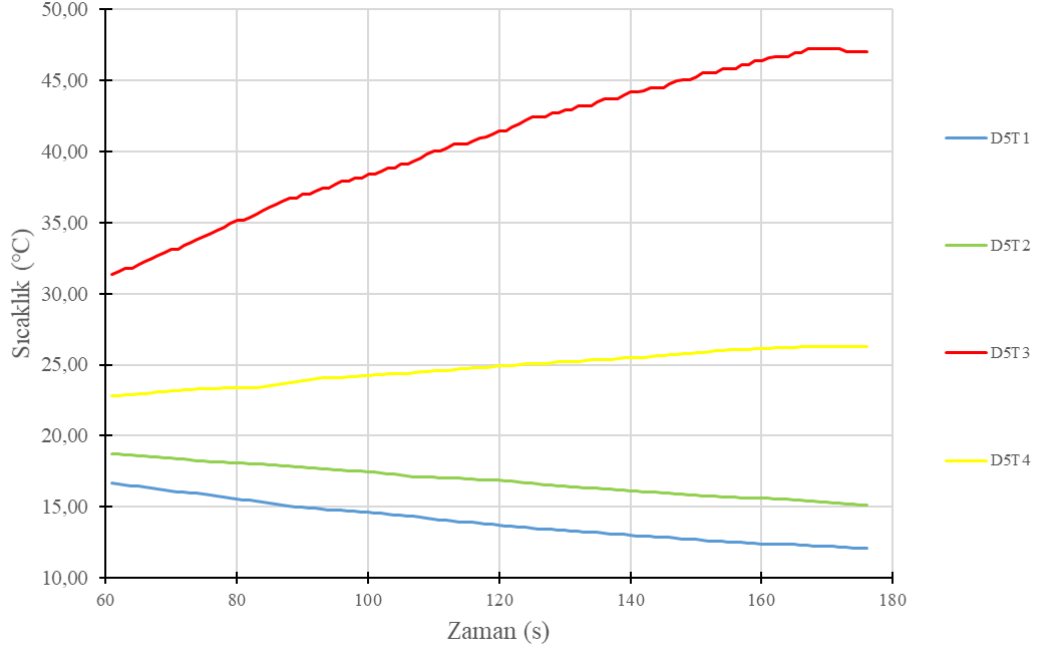
**Şekil B.16 :** D4 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,6 W/m.K)



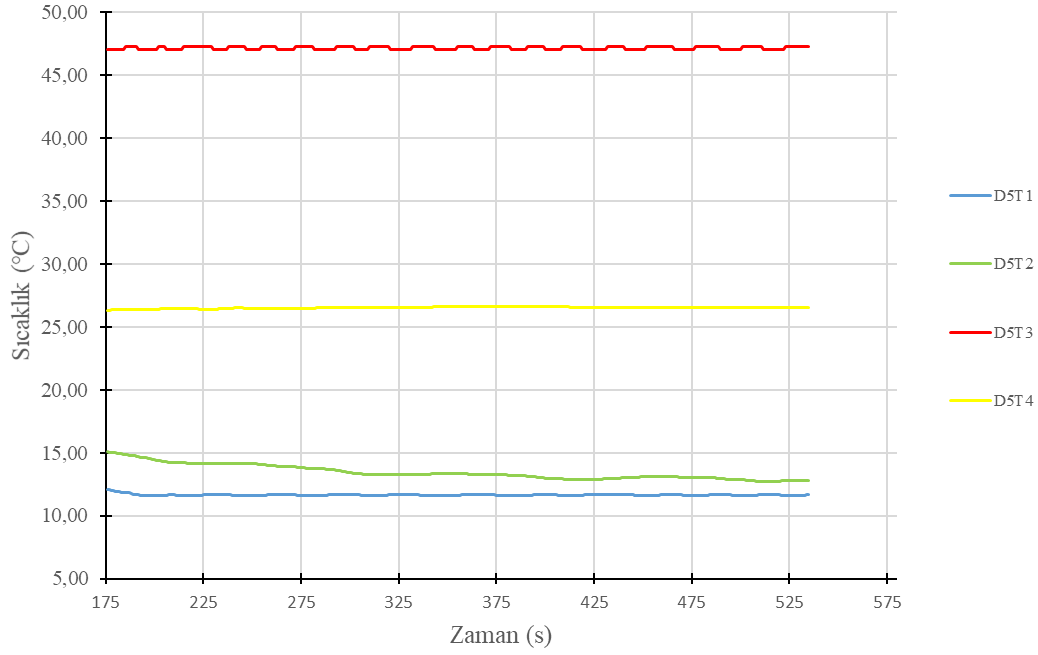
**Şekil B.17** : D5 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,069 W/m.K)



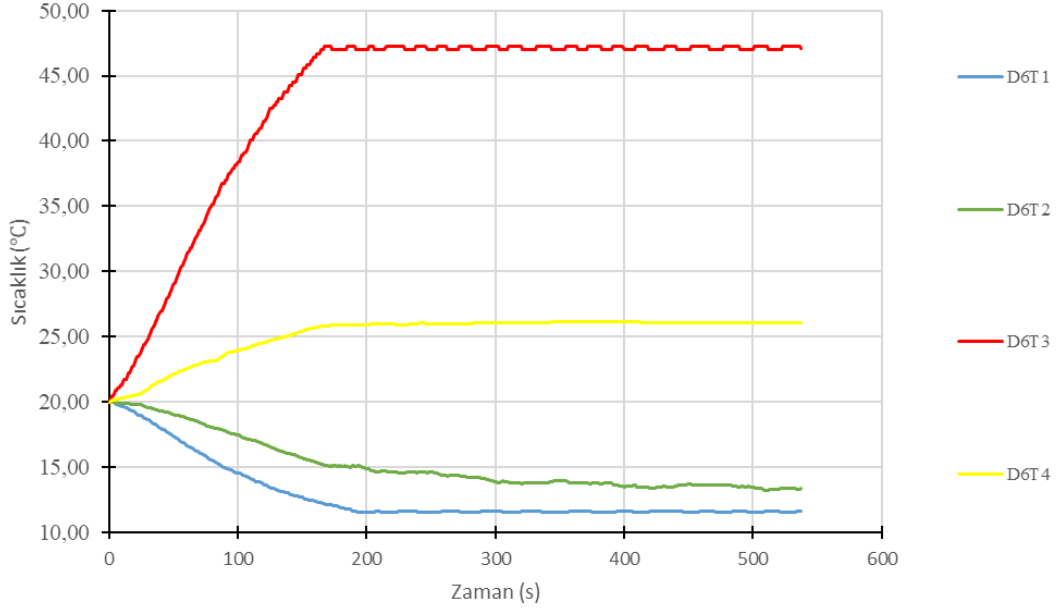
**Şekil B.18** : D5 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,069 W/m.K)



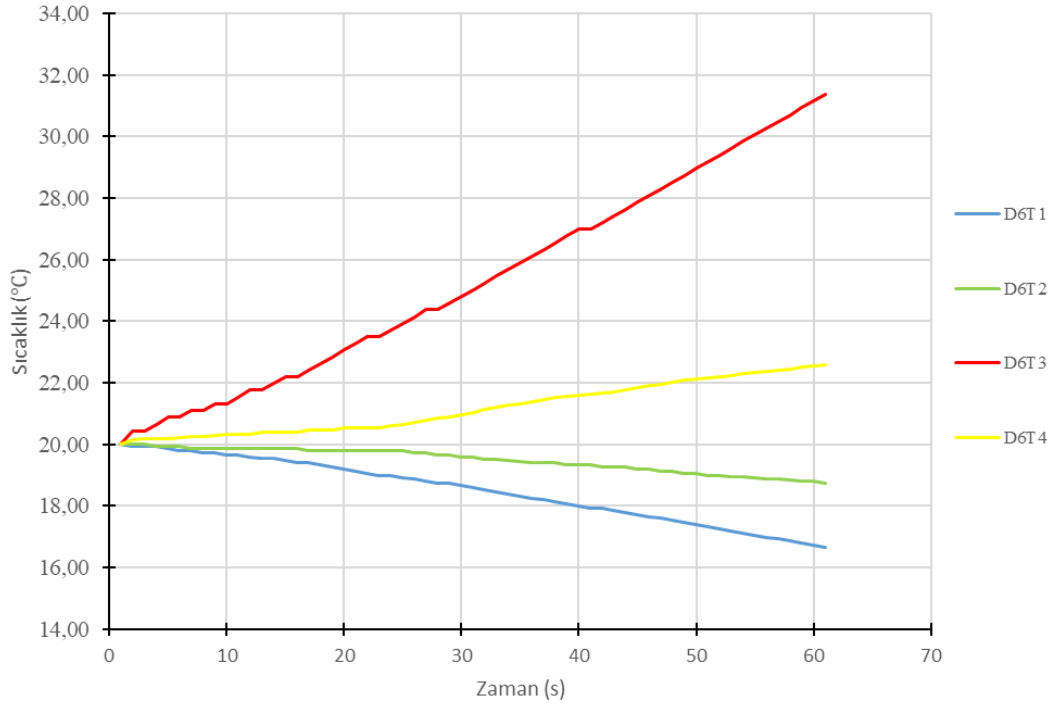
**Şekil B.19** : D5 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,069 W/m.K)



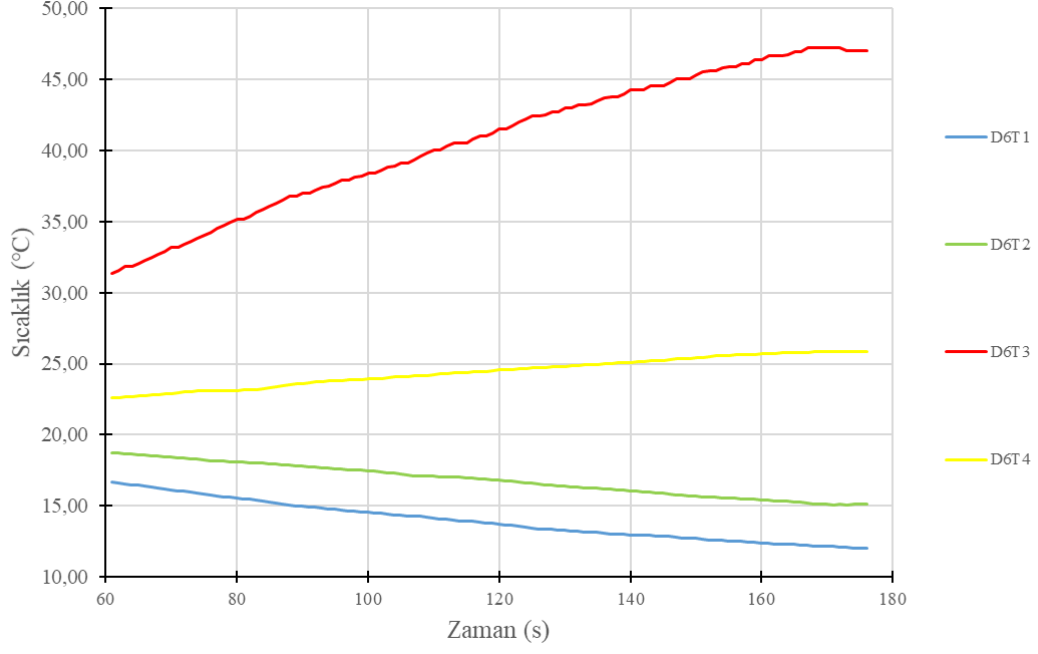
**Şekil B.20** : D5 180-500s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,069 W/m.K)



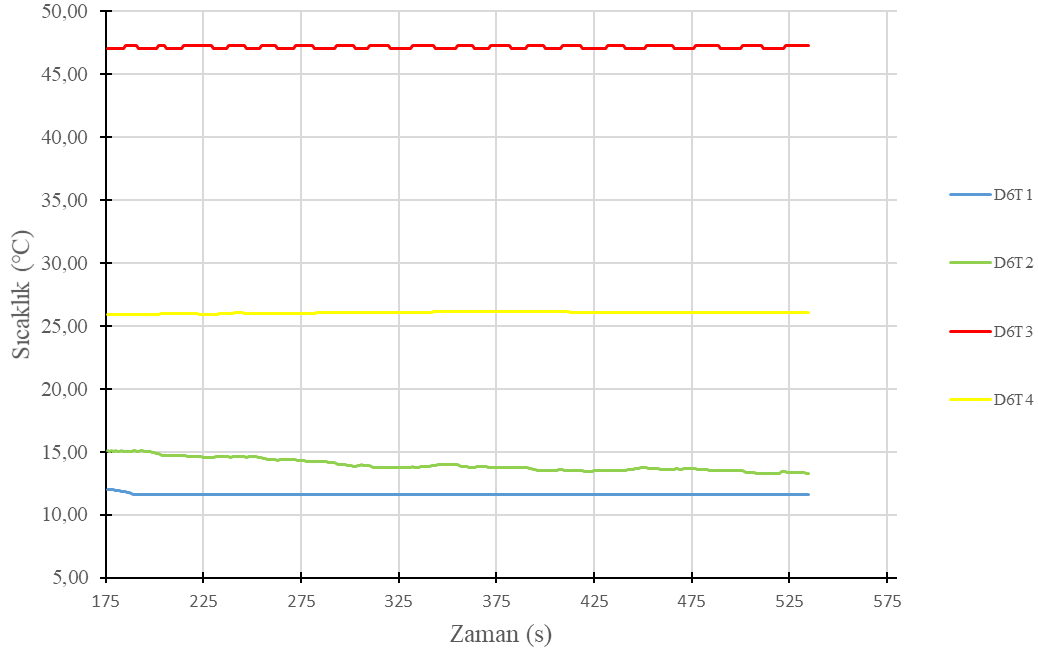
**Şekil B.21** : D6 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,05 W/m.K)



**Şekil B.22** : D6 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,05 W/m.K)

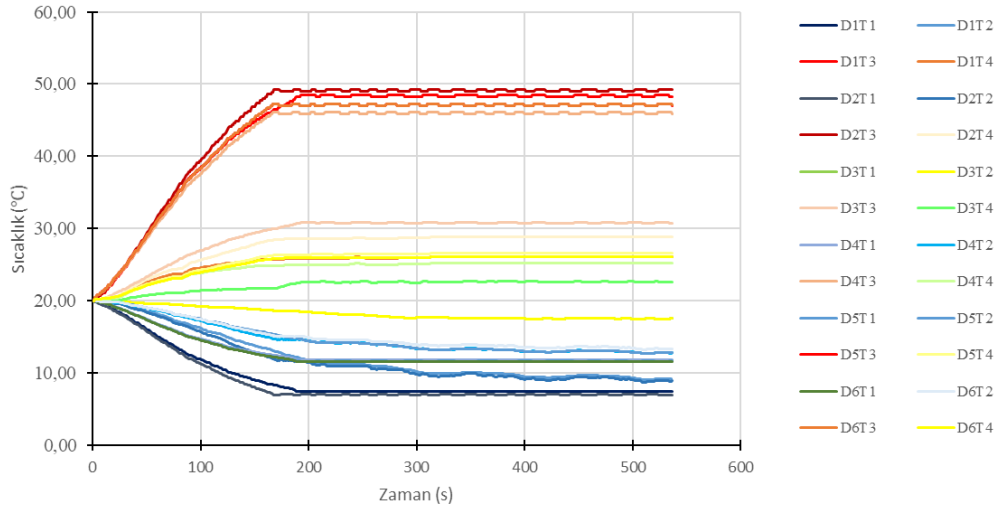


**Şekil B.23 : D6 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği**

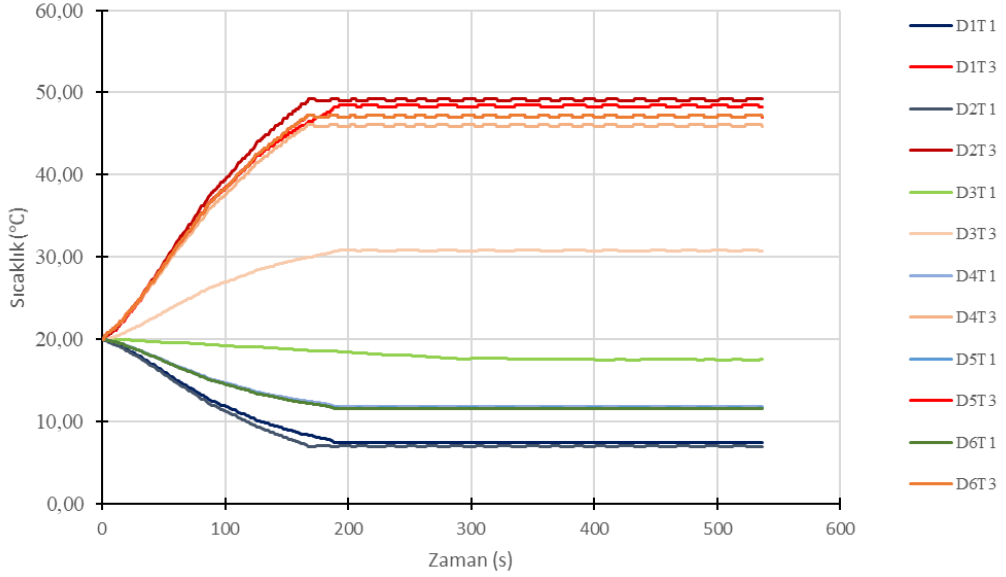


**Şekil B.24 : D6 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50 Havanın Termal İletkenlik Katsayısı 0,05 W/m.K)**

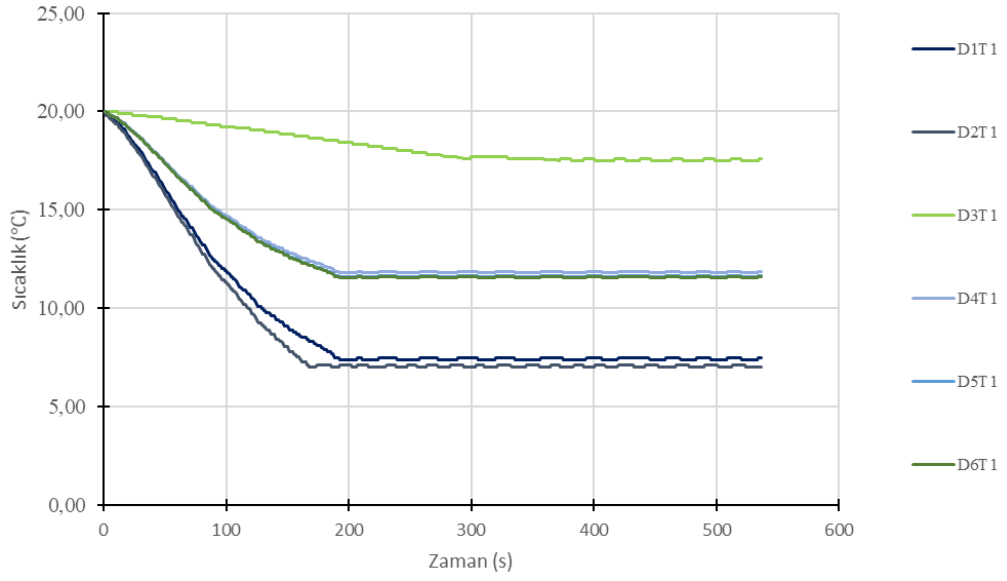




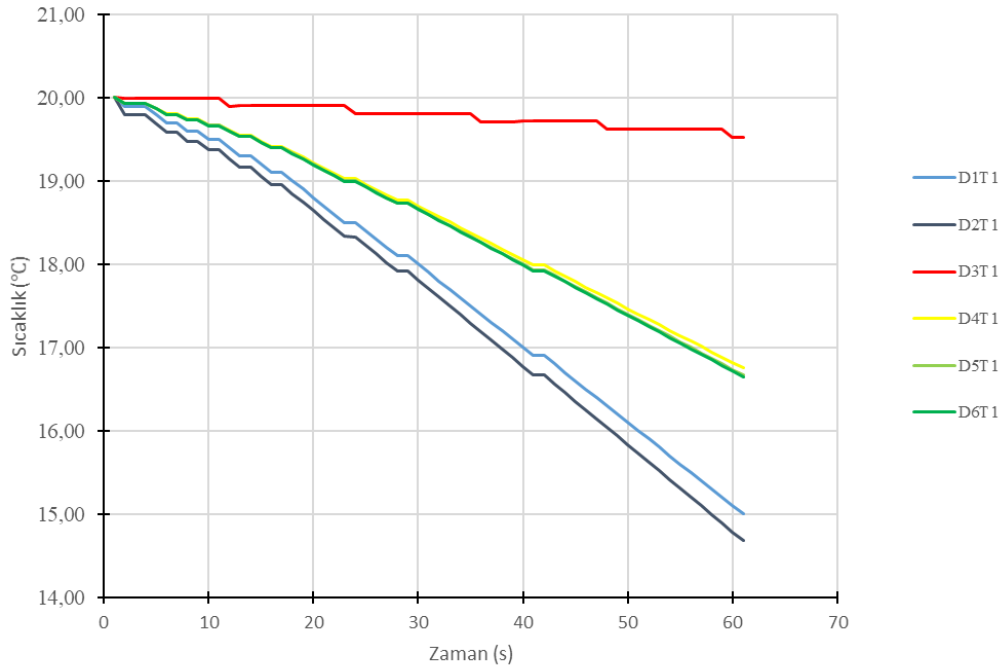
**Şekil B.25 :** Tüm Deney Düzenekleri ve Tüm Termistörler 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



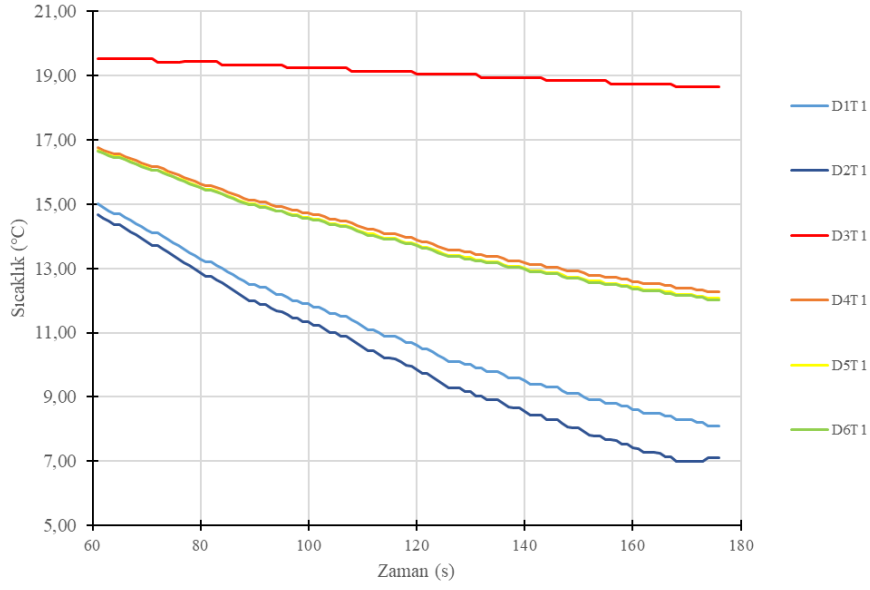
**Şekil B.26 :** Tüm Deney Düzenekleri T1-T3 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



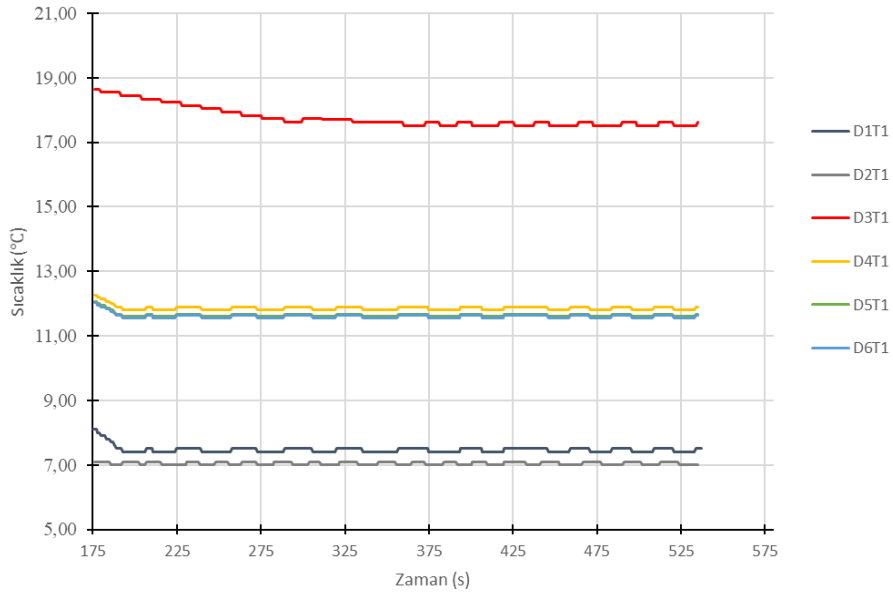
**Şekil B.27** : Tüm Deney Düzenekleri T1 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



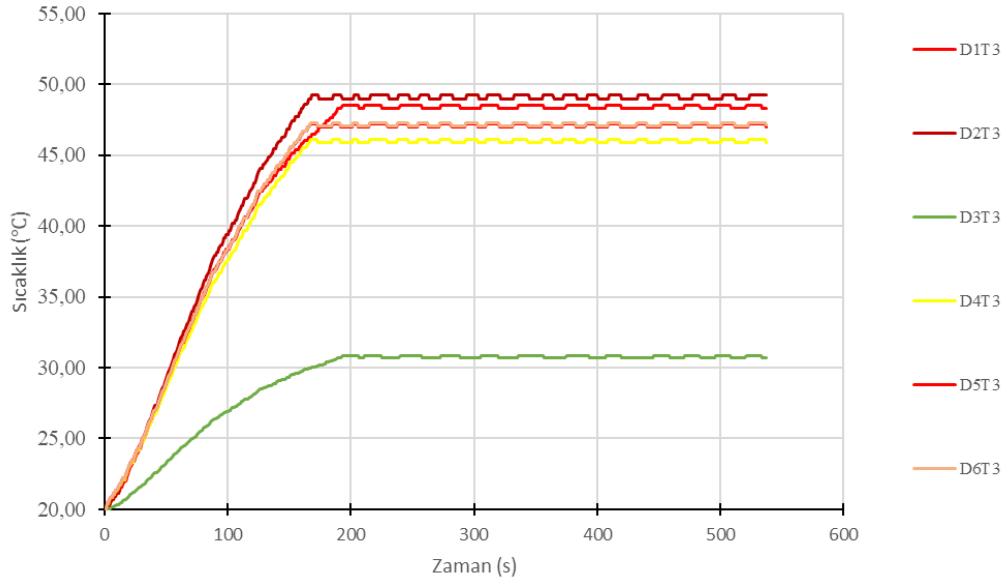
**Şekil B.28** : Tüm Deney Düzenekleri T1 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



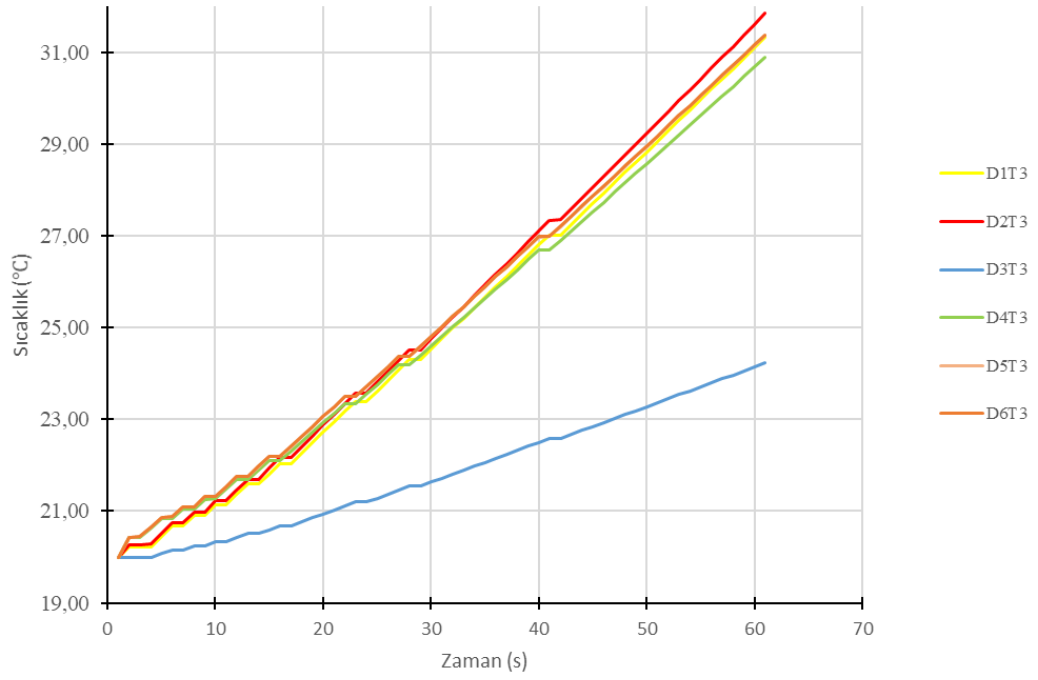
**Şekil B.29 :** Tüm Deney Düzenekleri T1 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



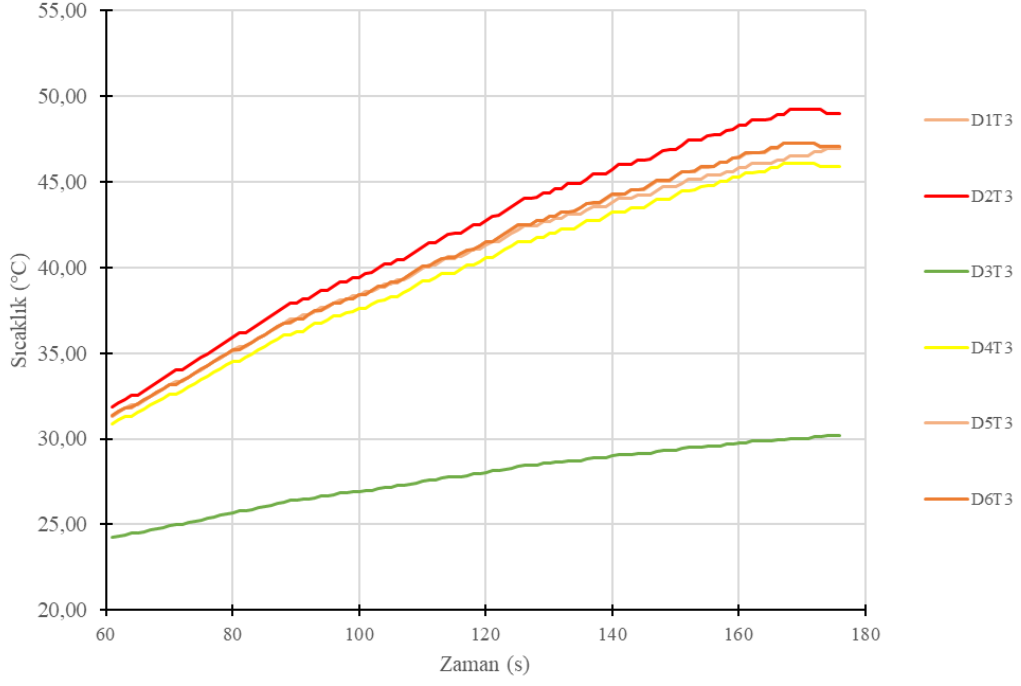
**Şekil B.30 :** Tüm Deney Düzenekleri T1 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



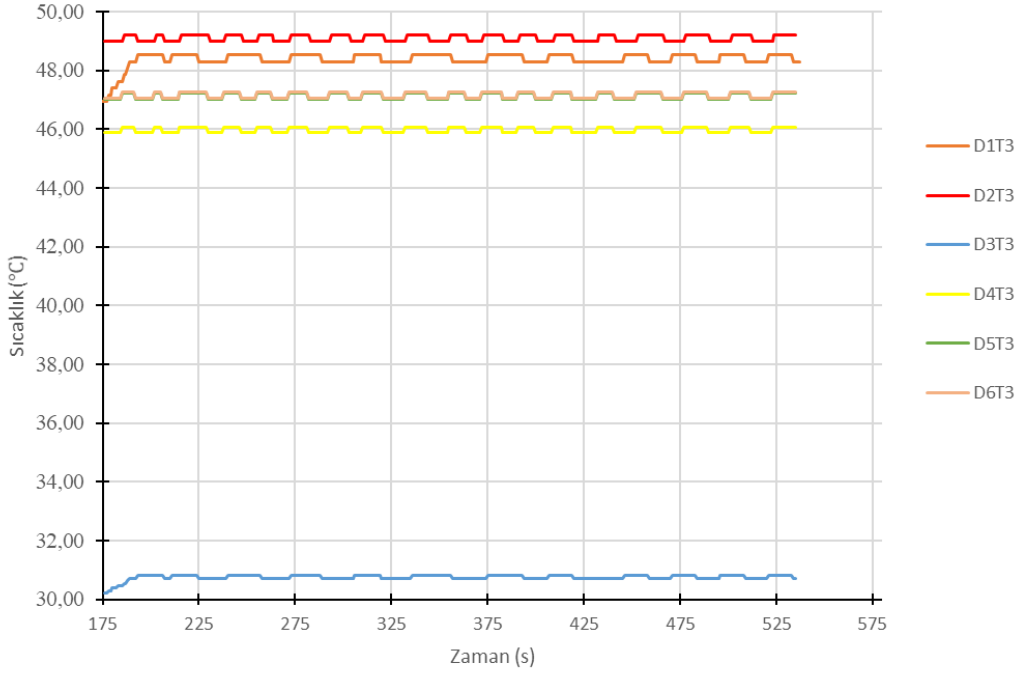
**Şekil B.31** : Tüm Deneş Düzenekleri T3 0-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



**Şekil B.32** : Tüm Deneş Düzenekleri T3 0-60 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



**Şekil B.33 :** Tüm Deney Düzenekleri T3 60-180 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)



**Şekil B.34 :** Tüm Deney Düzenekleri T3 180-500 s Aralığı Sıcaklık Zaman Grafiği (Ortam Sıcaklığı 20°C, Bağıl Nem %50)

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Bahadır BOZKURT  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 29.03.1988, BURSA  
**E-posta** : bozkurtbahadir@hotmail.com



### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2017, Işık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

#### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Bozkurt, B., Dilibal, S., & Şahin, Y. M. (2019). Investigation of the Cooling Performance of the Thermoelectric Modules for Mobile Cooling System. ICESBE, İstanbul, Türkiye

#### DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- T. Baykara, A. Demirural, B. Bozkurt, C. Yazacak, 2017 2017/20882 Numaralı "Yanma geciktirici solüsyon ve uygulama yöntemi" Patent Başvurusu
- T. Baykara, A. Demirural, B. Bozkurt, C. Yazacak, 2017 2017/18578 Numaralı "Balistik zırh korumalı mobil operasyon aracı" Patent Başvurusu
- B. Bozkurt, 2016 Yüksek Lisans Bitirme Projesi (Avrupa Birliği İlkokul ve Ortaokul düzeyinde İSG Uygulamaları)
- B. Bozkurt, 2012 Üniversite Bitirme Projesi (Şekil Hafızalı Alaşımlarda Yorulma Analizi)
- B. Bozkurt, 2006 Özel Namık Sözeri Okul Birincisi
- B. Bozkurt, 2004 Bursa Liseler Arası Proje Yarışması Üçüncüsü (Kap sıvı ile dolduğunda uyarı huni Projesi)
- B. Bozkurt, 2004 Tübitak Liseler Arası Buluş Yarışması Türkiye Birincisi (Konuşan Durak Projesi)