



**GAZ YAKICI CİHAZLARDAKİ ATIK ISI ENERJİSİNİN ELEKTRİK  
ENERJİSİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ**

**Koray GÖKTEKİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2018**

Koray GÖKTEKİN tarafından hazırlanan “GAZ YAKICI CİHAZLARDAKİ ATIK ISI ENERJİSİNİN ELEKTRİK ENERJİSİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr. Öğretim Üyesi Halil İbrahim VARIYENLİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Başkan:** Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Tayfun MENLİK

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

Tez Savunma Tarihi: 10/05/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirim, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Koray GÖKTEKİN

10/05/2018

# GAZ YAKICI CİHAZLARDAKİ ATIK ISI ENERJİSİNİN ELEKTRİK ENERJİSİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Koray GÖKTEKİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2018

## ÖZET

Bu çalışmada, hermetik kombilerin bacasından atmosfere atılan ısı enerjisinden faydalanarak termoelektrik jeneratörler ile elektrik enerjisi üreten ve ürettiği enerji ile kombilerin enerji ihtiyacını karşılamayı amaçlayan Termoelektrik Baca Sistemi (TBS) tasarlanarak imalatı yapılmıştır. TBS ile yazın kullanım sıcak suyu konumunda, kışın ise hem kalorifer hem de kullanım sıcak suyu konumunda deneyler yapılmıştır. Kalorifer konumunda deneyler, -20 °C ile +20 °C dış hava sıcaklıkları arasında kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C ile 85 °C arasında 5 °C aralıklarla değiştirilerek yapılmıştır. Kullanım suyu konumundaki deneyler, dış hava sıcaklığı -20 °C ile 35 °C ve kullanım suyu sıcaklığı ise 35 °C ile 65 °C arasında 5 °C aralıklarla değiştirilerek yapılmıştır. Kışın kalorifer konumunda yapılan deneylerde; minimum güç dış hava sıcaklığı 15 °C'de ve kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C'de 51,98 W, maksimum güç ise dış hava sıcaklığı -15 °C'de ve kalorifer suyu sıcaklığı 85 °C'de 181,1 W değerinde ölçülmüştür. Kışın kullanım suyu konumunda yapılan deneylerde; minimum güç dış hava sıcaklığı 15 °C ve kullanım suyu sıcaklığı 35 °C'de 73,28 W, maksimum güç ise dış hava sıcaklığı -15 °C ve kullanım suyu sıcaklığı 65 °C'de 184,63 W değerinde ölçülmüştür. Yazın kullanım suyu konumunda yapılan deneylerde; minimum güç dış hava sıcaklığı 30 °C ve kullanım suyu sıcaklığı 35 °C'de iken 42,77 W, maksimum güç dış hava sıcaklığı 15 °C ve kullanım suyu sıcaklığı 65 °C'de iken 154,44 W ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmada, TBS kullanılarak hermetik kombinin ömrü boyunca ortalama 3381,32 kW elektrik enerjisi üreteceğine ve 2769,3 kg CO<sub>2</sub> salınımı engelleyebileceği sonucuna varılmıştır. Dış hava sıcaklığının azalması, kalorifer ve kullanım suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak atık gaz sıcaklığının yükselmesi ile atık ısıdan elde edilen güç miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 92807  
Anahtar Kelimeler : Gaz yakıcı cihaz, alternatif enerji, atık ısı, termoelektrik jeneratör  
Sayfa Adedi : 75  
Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Halil İbrahim VARIYENLİ

# CONVERSION OF THE WASTE HEAT ENERGY IN HERMETIC GAS BURNER TO ELECTRICITY

(M. Sc. Thesis)

Koray GÖKTEKİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2018

## ABSTRACT

In this study, a Thermoelectric Chimney System (TCS) which aims to generate electricity with thermoelectric generators by utilizing heat energy drawn from the bottom of the hermetic combi boiler and to meet the energy requirement of the energy produced by the thermoelectric generators, was designed and manufactured. Experiments were carried out with TCS in the position of using hot water for summer and in the position of hot water for both heating and use in winter. Experiments in the heater position were carried out by changing the temperature of the heating water between 35 °C and 85 °C at 5 °C intervals between -20 °C and 20 °C outside temperatures. Experiments in the use water condition were carried out by changing the outside air temperature from -20°C to 35°C and the use water temperature from 35 °C to 65 °C at 5 °C intervals. In the experiments carried out in the winter heating condition; minimum power outside temperature of 15 °C and heating water temperature of 51 °C at 35 °C, maximum power at outside temperature of -15 °C and heating water temperature of 18 °C at 85 °C were measured. Experiments carried out in the use water condition in winter; minimum power outside temperature of 15 °C and operating water temperature of 35 °C at 73.28 W and maximum power of 184.63 W at -15 °C outside temperature and 65 °C use water temperature. Experiments carried out in summer position water use; the minimum power was measured as 42.77 W at outdoor temperature of 30 °C and the service water temperature of 35 °C, while the maximum power was measured as 154.44 W at outdoor temperature of 15 °C and the service water temperature of 65 °C. In the experimental work, using TCS, the hermetic combi boiler produced an average of 3381.32 kW of electricity over its lifetime and 2769.3 kg of CO<sub>2</sub> could be prevented from oscillating. The increase in the waste gas temperature and the increase in the amount of power obtained from the waste heat due to the decrease of the outside air temperature and the increase of the temperature of the heating and use water were obtained.

Science Code : 92807

Key Words : Gas burning device, alternative energy, waste heat, thermoelectric generator

Page Number : 75

Supervisor : Assist. Prof. Halil İbrahim VARİYENLİ

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince, bilgisini ve tecrübelerini her zaman benimle paylaşan ve yapmış olduğu katkılarıyla çalışmalarına yön veren tez danışman hocam Sayın Doktor Öğretim Üyesi Halil İbrahim VARİYENLİ'ye; bu tez çalışmasını, 07/2015-10 kodlu proje kapsamında destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi'ne; bilimsel araştırma projesinin kurulumu için gerekli olan makine ve el aletleri ile deney setinin kurulmasına ve deneysel çalışmaların yapılmasına imkân sağlayan Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ne; yaşamımın her aşamasında yanımda olup beni yalnız bırakmayan, her an aklımda olup tüm sevgi ve her türlü destekleri ile bana ilham kaynağı olan; sevgili annem Şengül GÖKTEKİN'e, hayattın her aşamasında örnek aldığım babam Mustafa GÖKTEKİN'e ve kardeşlerim Duygu GÖKTEKİN ve Dođa GÖKTEKİN'e en derinden teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	7
3. ATIK ISI ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ELDE ETME YÖNTEMLERİ.....	15
3.1. Stirling Motoru .....	15
3.1.1. Stirling çevrimi.....	16
3.1.2. Stirling motorundan elektrik enerjisi üretilmesi .....	17
3.2. Kojenerasyon ve Trijenerasyon .....	18
3.2.1. Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerin avantajları .....	19
3.3. Organik Rankine Çevrimi (ORC).....	20
3.3.1. Organik rankine çevriminin avantajları.....	20
3.4. Termofotovoltaik Teknolojisi .....	21
3.4.1. Termofotovoltaik (TPV) sistemler.....	21
3.4.2. Termofotovoltaik (TPV) sistemlerin avantajları .....	22
3.5. Termoelektrik Etkiler ve Termoelektrik Jeneratörler.....	22



	<b>Sayfa</b>
3.5.1. Seebeck etkisi.....	24
3.5.2. Peltier etkisi.....	26
3.5.3. Thomson etkisi.....	29
3.5.4. Termoelektrik jeneratör (TEJ).....	29
3.5.5. Termoelektrik modüllerin avantajları ve dezavantajları.....	34
<b>4. TEORİK ANALİZ.....</b>	<b>37</b>
4.1. Belirsizlik Analizi.....	40
<b>5. MATERYAL VE METOT.....</b>	<b>41</b>
5.1. Termoelektrik Baca Sistemi.....	43
5.1.1. Hermetik baca borusu.....	43
5.1.2. TEG2-07025HT-SS termoelektrik jeneratör özellikleri.....	45
5.1.3. Termoelektrik jeneratörlerin iç baca borusuna montajı.....	46
5.2. Güç Transferi ve Depolama Sistemi.....	48
5.3. Ölçüm Cihazları.....	48
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>51</b>
6.1. Teorik Çalışma.....	51
6.1.1. Kalorifer konumu.....	51
6.1.2. Kullanım sıcak suyu konumu.....	55
6.2. Deneysel Çalışma.....	58
6.2.1. Kalorifer konumu.....	58
6.2.2. Kullanım sıcak suyu konumu.....	61
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>65</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>69</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>75</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Ölçüm cihazlarının hassasiyeti ve belirsizliği.....	40
Çizelge 5.1. TEG2-07025HT-SS modülün çeşitli sıcaklık farklarında güç değerleri ....	45
Çizelge 5.2. PT 100 RTD özellikleri .....	49
Çizelge 5.3. Elimko E-680 sıcaklık ölçüm cihazının teknik özellikleri.....	50
Çizelge 7.1. Vergiler hariç mesken elektrik fiyatı zamları .....	67



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Dünya’da 2017 yılı birincil enerji kullanımı .....	3
Şekil 3.1. İdeal stirling P-V diyagramı .....	16
Şekil 3.2. Gama tipi serbest pistonlu stirling motoru mekanizması .....	17
Şekil 3.3. Kojenerasyon sisteminin şematik görünüşü .....	18
Şekil 3.4. Trijenerasyon sisteminin şematik görünüşü .....	18
Şekil 3.5. ORC sistem şeması.....	20
Şekil 3.6. TPV sistemin şeması.....	22
Şekil 3.7. Termoelektrik dönüştürücü.....	23
Şekil 3.8. Seebeck deneyi şeması .....	24
Şekil 3.9. Seebeck etkisi .....	25
Şekil 3.10. Basit bir termoelektrik pilin şekli .....	25
Şekil 3.11. Peltier deneyi şeması .....	27
Şekil 3.12. Termoelektrik soğutucu modülün yapısı .....	28
Şekil 3.13. İletken bir telde oluşan Thomson etkisi.....	29
Şekil 3.14. Termoelektrik modülün içyapısı.....	30
Şekil 3.15. N-tipi termoelektrik elemanın şematik görünümü.....	31
Şekil 3.16. P-tipi termoelektrik elemanın şematik görünümü .....	32
Şekil 3.17. Farklı yarı-iletken malzemelerin sıcaklığa bağlı verimleri.....	32
Şekil 3.18. Termoelektrik jeneratör ile elektrik enerjisi üretimi.....	33
Şekil 4.1. Basit bir termo çift katı modellemesi.....	38
Şekil 4.2. Basit bir termo çiftin seri ve/veya paralel bağlantı şekli .....	39
Şekil 5.1. Deney setinin şematik görünümü .....	41
Şekil 5.2. Beşgen TBS iç baca borusu imalat ölçüleri.....	44

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.3. İç baca borusunun tamamlanmış hali .....	44
Şekil 5.4. TBS iç baca borusuna termoelektrik jeneratörlerin montaj detayı .....	46
Şekil 5.5. TEJ'lerin TBS baca borusu içerisindeki görüntüsü .....	47
Şekil 5.6. Deney seti çalışma diyagramı .....	48
Şekil 6.1. Kalorifer suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ baca sisteminden elde edilebilecek güç değerleri .....	51
Şekil 6.2. Dış hava sıcaklığının TEJ baca sistemi elektriksel parametrelerine etkisi .....	52
Şekil 6.3. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri .....	53
Şekil 6.4. Akım – gerilim eğrisi .....	53
Şekil 6.5. TBS'den elde edilebilecek güce bağlı olarak azalacak CO <sub>2</sub> salınımı miktarı .....	54
Şekil 6.6. Kullanım suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ baca sisteminden elde edilebilecek güç değerleri .....	55
Şekil 6.7. Dış hava sıcaklığının TEJ baca sistemi elektriksel parametrelerine etkisi .....	56
Şekil 6.8. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri .....	56
Şekil 6.9. Akım – gerilim eğrisi .....	57
Şekil 6.10. TBS'den elde edilen güce bağlı olarak azalan CO <sub>2</sub> salınımı miktarı .....	67
Şekil 6.11. Kalorifer suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ baca sisteminden elde edilen güç değerleri .....	58
Şekil 6.12. Dış hava sıcaklığının TEJ baca sistemi elektriksel parametrelerine etkisi ...	59
Şekil 6.13. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri .....	60
Şekil 6.14. Akım – gerilim eğrisi .....	60
Şekil 6.15. TBS'den elde edilen güce bağlı olarak azalan CO <sub>2</sub> salınımı miktarı .....	61
Şekil 6.16. Kullanım suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ baca sisteminden elde edilen güç değerleri .....	62

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.17. Dış hava sıcaklığının elektriksel parametrelere etkisi .....	62
Şekil 6.18. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri .....	63
Şekil 6.19. Akım – gerilim eğrisi.....	63
Şekil 6.20. TBS'den elde edilen güce bağlı olarak azalan CO <sub>2</sub> salınımı miktarı .....	64
Şekil 7.1. Teorik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	65



**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.1. TBS deney düzeneği.....	42
Resim 5.2. Tasarımı ve imalatı yapılan iç baca borusu.....	43
Resim 5.3. TEG2-07025HT-SS modül .....	45
Resim 5.4. TEJ montajları tamamlanmış TBS iç baca borusu.....	47
Resim 5.5. Elimko E-680 serisi universal girişli-gelişmiş tarayıcı .....	49



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>Ah</b>	Amper saat
<b>B<sub>1</sub></b>	Yüksek birleşme noktası
<b>B<sub>2</sub></b>	Düşük birleşme noktası
<b>cm</b>	Santimetre
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbondioksit
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b>E<sub>g</sub></b>	Jeneratör verimi (%)
<b>I</b>	Jeneratör çıkış akımı (A)
<b>K</b>	Kelvin
<b>K<sub>c</sub></b>	Termo çiftin ısı iletkenliği (W/K)
<b>km/h</b>	Sürüş hızı
<b>lt/s</b>	Debi
<b>m</b>	Yük direncinin iç dirence oranı
<b>mm</b>	Milimetre
<b>NO<sub>x</sub></b>	Azot oksitler
<b>P<sub>max</sub></b>	Maksimum güç (W)
<b>Q<sub>1</sub></b>	Yayılan ısı
<b>Q<sub>2</sub></b>	Soğrulan ısı
<b>Q<sub>H</sub></b>	Termal güç girişi (W)
<b>R</b>	Elektriksel direnç (Ω)
<b>R<sub>C</sub></b>	Termoelektrik mikro modülün ortalama iç direnci (Ω)
<b>R<sub>L</sub></b>	Yük direnci (Ω)
<b>R<sub>M</sub></b>	Modülün ortalama direnci (Ω)
<b>rpm</b>	Dakikadaki devir sayısı
<b>SO<sub>2</sub></b>	Kükürt dioksit

**Simgeler****Açıklamalar**

<b>T</b>	Sıcaklık (°C)
<b>T<sub>avg</sub></b>	Modülün güç çıkışı (W)
<b>T<sub>c</sub></b>	Soğuk yüzey sıcaklığı (°C)
<b>T<sub>d</sub></b>	Düşük sıcaklık (°C)
<b>T<sub>h</sub></b>	Sıcak yüzey sıcaklığı (°C)
<b>T<sub>y</sub></b>	Yüksek sıcaklık (°C)
<b>V</b>	Voltaj (V)
<b>V<sub>max</sub></b>	Maksimum yük gerilimi (V)
<b>V<sub>o</sub></b>	Jeneratör çıkışı (V)
<b>W</b>	Üretilen güç
<b>W/m<sup>2</sup></b>	Işınım şiddeti
<b>Z</b>	Kalite faktörü
<b><math>\alpha</math></b>	Seebeck sabiti (V/°C)
<b><math>\alpha_M</math></b>	Modülün ortalama Seebeck Katsayısı (V/°C)
<b><math>\kappa_{th}</math></b>	Termal iletkenlik (W/mK)
<b><math>\eta_{max}</math></b>	Maksimum verimlilik (%)
<b><math>\Delta_T</math></b>	Sıcaklık farkı

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AA</b>	Alternatif akım
<b>AC</b>	Alternatif gerilim
<b>BM</b>	Birleşmiş milletler
<b>cc</b>	Silindir hacmi
<b>CFD</b>	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
<b>COP26</b>	BM İklim Değişikliği Taraflar Konferansı
<b>DA</b>	Doğru akım
<b>DC</b>	Doğru gerilim



**Kısaltmalar****Açıklamalar****DKP**

Demir profil modeli

**ENVER**

Enerji Verimliliği Kanunu

**G20**

20'ler Grubu

**LED**

Işık yayan diyot

**MTEP**

Milyon ton eşdeğer petrol

**OECD**

Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü

**ORC**

Organik Rankine Çevrimi

**PV**

Fotovoltaik

**TBS**

Termoelektrik baca sistemi

**TE**

Termoelektrik

**TEC**

Termoelektrik soğutucu

**TEJ**

Termoelektrik jeneratör

**TEM**

Termoelektrik modül

**TİG**

Tunsten inert gaz

**TPV**

Termofotovoltaik

## 1. GİRİŞ

Dünya enerji ihtiyacı; hızlı nüfus artışı, sanayideki gelişmeler, kaynakların plansız kullanılması ve benzeri sebeplerden dolayı hızla artmaktadır. Enerji tüketiminin artmasına paralel olarak insanların maden ve enerji kaynaklarına olan talebi de artmıştır [1, 2]. Kullanımı artarak devam eden kömür, petrol ve doğalgaz tüketimi CO<sub>2</sub> yayılımını arttırmakta, atmosferdeki CO<sub>2</sub> miktarının artması sera etkisine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır [3]. Küresel ısınma sonucunda oluşan iklim değişikliklerinin % 90 oranında insan faaliyetlerinden kaynaklandığı ifade edilmekte ve iklim değişiklikleri dünyadaki tüm canlıların yaşamını tehdit etmektedir [4]. Bu nedenle ülkemizde ve tüm dünyada bazı çalışmalar yapılmaktadır.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun; yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılmasını, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılmasını, kaynak çeşitliliğinin artırılmasını, sera gazı emisyonlarının azaltılmasını, atıkların değerlendirilmesini, çevrenin korunmasını ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan imalat sektörünün geliştirilmesini amaçlamaktadır [5].

2007 yılında kabul edilen Enerji Verimliliği Kanunu (ENVER); enerjinin etkin kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasını amaçlamaktadır. Enerji Verimliliği Kanunu; enerjinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim aşamalarında, endüstriyel işletmelerde, binalarda, elektrik enerjisi üretim tesislerinde, iletim ve dağıtım şebekeleri ile ulaşımda enerji verimliliğinin artırılmasına ve desteklenmesine, toplum genelinde enerji bilincinin geliştirilmesine, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmasına yönelik uygulanacak usûl ve esasları kapsamaktadır [6].

Türkiye 2020'de Paris Anlaşması'nın yürürlüğe gireceği COP26 zirvesi için adaylık süreci içine girmiştir. Bu süreçte, hem devletin hem de toplumun iklim değişikliğine cevap vermek için hazırlanması gerekmektedir [7]. Bu nedenle; teknolojinin araştırılması ve geliştirilmesi, teknolojik olarak ihtiyaç duyulan konularda finans ve maddi destek sağlanması, sosyo-ekonomik ve ekolojik sistemlerin esnekliğinin ekonomik çeşitlendirme

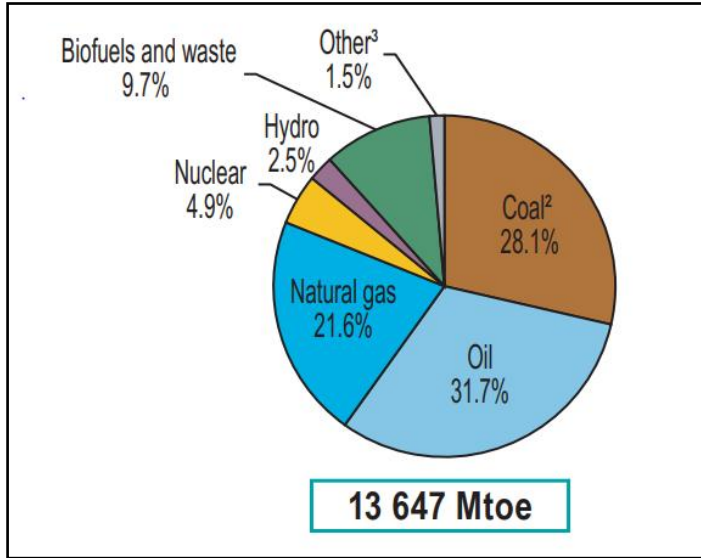
ve doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi gibi metotlarla inşa edilmesi gerekmektedir [7,8].

Türkiye OECD ve G20 üyesi bir ülkedir. Bu nedenle müzakerelerde Türkiye'nin izleyeceği politika ve yapacağı bildirimlere ilişkin olarak; ortak vizyon, azaltım, uyum, teknoloji transferi, kapasite geliştirme ve finans konularında sektörel olarak mevcut durumu, imkanları ve taleplerinin belirlenerek çok seçenekli stratejilerin oluşturulması gerektiği bilinmektedir [9].

İnsanların çeşitli faaliyetlerinin küresel ısınmaya katkısı; enerji kullanımında %49, endüstrileşmede %24, ormansızlaşmada %14 ve Tarımda %13'tür. Küresel ısınma, dünyadaki yaşamın sürdürüldüğü ekosistemlerin bütüncül yapısını tehdit eden, binlerce bitki ve hayvan türlerinin yok olmasına neden olan, insan yaşamını etkileyen, aşırı sıcaklık, yangın, susuzluk, kuraklaşma gibi diğer meteorolojik afetlerin artmasına sebep olan bir oluşumdur [10].

Kyoto protokolünde ulusal koşullara uygun olarak uygulanacak bazı politika ve önlemleri geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bunlardan bazıları; ulusal ekonominin ilgili sektörlerinde enerji verimliliğinin artırılması, sera gazlarının salınımlarını sınırlayan ya da azaltan politikaların ve önlemlerin teşvik edilmesi ve yenilenebilir enerji türleri, karbondioksiti gideren teknolojiler ile çevre dostu ileri ve yenilikçi teknolojilerin araştırılması ve teşvik edilmesidir [11].

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmını sağlayan birincil enerji kaynaklarının 2017 yılı verilerine göre kullanım miktarı 13647 MTEP (milyon ton eşdeğer petrol) olmuştur. Şekil 1.1'de dünya birincil enerji ihtiyacını karşılamada, petrol kullanımının % 31,7'lik pay ile birinci sırada yer aldığı görülmektedir. Petrolü % 28,1'lük pay ile kömür, % 21,6'lük pay ile doğal gaz takip etmektedir. Diğer enerji kaynakları ise jeotermal, güneş, rüzgâr ve ısı enerjisi kaynaklarıdır [12].



Şekil 1.1. Dünya’da 2017 yılı birincil enerji kullanımı [12]

Yeryüzündeki fosil yakıtların gün geçtikçe azaldığı ve yakın gelecekte tükeneceği bilinmekte, uluslararası çıkarımlara göre dünyadaki petrol ve doğalgaz rezervlerine 50 yıl, kömüre ise 100 yıl civarında ömür biçilmektedir [1]. Tüm enerji üretim tesislerinin çevreye olumsuz etkileri olmasına rağmen, insanların teknolojik gelişme ve refah düzeyleri için bu tesislere ihtiyaç duyduğundan, fosil yakıtlarla çalışan sistemlerin yerini alabilecek alternatif sistemlere ve enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayan ileri teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır [13].

Fosil yakıtların alternatifi olan yenilenebilir enerji kaynakları ise; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, biokütle enerjisi, dalga enerjisi, gel-git enerjisi ve hidrojen enerjisi olarak sıralanabilir [1]. Yenilenebilir enerji üretimi; yüksek maliyetli olması, bakım onarım gerektirmesi ve verimlerinin düşük olması nedeniyle çok fazla tercih edilmemektedir. Ayrıca tüm enerji üretim sistemlerinde olduğu gibi yenilenebilir enerji sistemleri de genellikle yerleşim yerlerinin dışında kurulmakta ve üretilen enerjinin bir kısmı son kullanıcılara ulaştırılırken iletim – dağıtım hatlarında kaybolmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansının 2013 yılı son raporunda enerji sektörüne 2013 – 2035 yılları arasında küresel ölçekte toplam 38,9 trilyon dolar yatırım yapılacağı belirtilmiştir. Yapılan bu yatırımın 17,4 trilyon dolarının elektrik sektörüne ayrılacağı, elektrik sektörü içerisindeki dağılımın ise %58’inin üretim, %11’inin iletim ve %31’inin dağıtım giderleri

için harcanacağı ön görülmektedir [2]. Sonuç olarak, elektriğin iletim dağıtım giderleri toplam yatırım içerisinde %42'lik paya sahip olacaktır.

Tüm bunlara alternatif bir enerji üretim yöntemi ise termoelektrik jeneratör (TEJ)'ler ile kurulan termoelektrik güç üretim sistemleridir. TEJ'ler termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılmaktadır [14]. İleri teknoloji ürünü olan termoelektrik güç üretim sistemleri; sıcaklık farkından elektrik enerjisi ürettiğinden alternatif bir enerji kaynağı olmakta, güç üretimi için gerekli sıcaklık farkını atık ısılar ile sağladığında enerji verimliliğini arttırmaktadır.

Yenilenebilir enerji sistemleri ile kıyaslandığında termoelektrik enerji üretiminin birçok avantajı bulunmaktadır. Rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerjisi ile biokütle enerjisinden belirli bölgelerde yararlanılmakta ve üretilen enerji iletim dağıtım hatları ile kilometrelerce uzağa taşınmaktadır. Güneş panelleri ile enerji üretiminde çok fazla yüzey alanına gereksinim duyulmakta ve güneşten günün belirli bölümlerinde yararlanıldığı için yüksek maliyetli depolama sistemlerine gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca bu sistemlerin periyodik bakım, onarım ve temizlik gerektirdiği bilinmektedir. Termoelektrik sistemler ise bakım onarım gerektirmezler ve termodinamik sistemlerin kullanımının mümkün olmadığı yerlerde kullanılabilirler.

Termoelektrik sistemlerin en büyük dezavantajları verimlerinin düşük olması ve maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Dünyadaki fosil enerji kaynakları tükendiğinde bunları yeniden üretmek insanlığın elinde olmayacak ve bu kaynakların yeniden oluşumunu beklemek uzun yıllar alacaktır. Evrenin var olduğundan günümüze kadar sürekliliğini devam ettiren sıcak kaynaklar doğada (güneş enerjisi [16], jeotermal [15, 16]) ve farklı sistemlerin atık ısıları [14, 15] biçiminde günlük yaşantımızın birçok alanında mevcuttur. Fosil yakıtların yakın gelecekte tükeneceği göz önüne alındığında diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla enerji üretilmesine olduğu gibi, termoelektrik jeneratörler ile elektrik üretilmesine de ihtiyaç duyulacaktır.

Fosil yakıtların yanması ile çalışan sistemlerde, sistemin tasarımına göre elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı sistem tarafından kullanılmakta, bir kısmı ise baca gazları ile kullanılmadan çevreye atılmaktadır [17]. Çevreye atılan ısı enerjisinin geri kazanımı sistemlerin verimini arttıracak; buna bağlı olarak enerji tasarrufu sağlanacak [18], yakıt

tüketimi azaltılacaktır [19]. Günümüzde enerjinin büyük çoğunluğu sınırlı rezervlere sahip fosil yakıtlardan sağlandığından, bu kaynakların verimli kullanılması bakımından atık ısıların geri kazanımı oldukça önemlidir [20]. Konvansiyonel ve yoğuşmalı olarak ikiye ayrılan kombilerin ısı verim değerleri; günümüz teknolojisinde konvansiyonel olanlarda %80'in, yoğuşmalı kombilerde %90'ın üzerindedir [21]. Enerji kaybının büyük kısmı ise kullanılmadan çevreye atılan sıcak baca gazlarından kaynaklanmakta, atık ısının farklı biçimlerde geri kazanımı sağlanmaktadır. Günümüz teknolojisinde atık ısının bir kısmı termoelektrik jeneratörler ile elektrik enerjisine dönüştürülerek, elektrik ihtiyacı şebekeden bağımsız olarak karşılanabilir.

Termoelektrik güç üretiminde sıcak ve soğuk enerji kaynaklarına gereksinim duyulmaktadır. Sıcak kaynak olarak jeotermal [15, 16], güneş enerjisi [16] ve atık ısı [14, 15] kullanılmaktadır. Soğuk kaynak için genellikle fan veya pompa ile soğutma yapılmakta, soğutma işlemi için fazla miktarda enerji harcanmaktadır [22]. Termoelektrik jeneratörün ürettiği elektrik enerjisinin, fan ve pompanın çalışması için harcanan miktarı sistem verimini büyük ölçüde düşürmektedir.

Günümüzde yüksek verimli termoelektrik dönüşüm yapan jeneratörler üretilmemiştir. Bunun başlıca sebeplerinden bir tanesi termoelektrik dönüştürücülerin diğer bir kullanım alanı olan soğutma alanına daha çok önem verilmiş olması ve bu alanda daha çok çalışma yapılmış olmasıdır. Son yıllarda alternatif enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaçtan dolayı bu alanda önemli ilerlemeler sağlanmış olsa dahi, TEJ'ler ile elektrik üretimi istenilen düzeylere ulaşamamıştır. Bazı ülkelerde TEJ'lerin kullanımı ile enerji üreten sistemler kurulmuştur ve kurulmaya devam edecektir. Her geçen gün verimleri giderek artan bu sistemler yakın gelecekte birçok alanda enerji üretimi için kullanılacaktır.

Bu çalışmada, hermetik tip kombilerin baca borusundan atmosfere atılan atık ısı enerjisi kullanılarak TEJ'ler vasıtasıyla elektrik enerjisi üretecek, atmosfere atılan ısı enerjisinin sıcaklığını düşürecek ve gaz yakıcı cihazın ihtiyacı olan elektrik enerjisini sağlayacak Termoelektrik Baca Sistemi tasarlanmıştır. Bu sayede; birim yakıt daha verimli kullanılacağı için gaz yakıcı cihazın enerji verimliliği artacak, elektrik enerjisine gereksinimi azalacağından CO<sub>2</sub> salınım miktarı düşecektir.



## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yapılan araştırmada, konvansiyonel gaz yakıcı cihazların atık ısısından TEJ'ler ile elektrik enerjisi üretimine yönelik çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu bölümde, yapılan araştırma sonucunda genel anlamda atık ısı enerjisinden elektrik enerjisi üretimine yönelik çalışmalara yer verilmiştir.

Özgün 2009 yılında, Isı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren termoelektrik jeneratörlerin yaygın çalışma koşullarının tersine çok düşük sıcaklıklarda (kriyojenik sıcaklıklar) çalışma performanslarının teorik ve deneysel olarak incelenmesini yapmıştır. Atmosferik basınçta sıvılaştırılmış  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığındaki azotun soğuk ısı kaynağı,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığındaki atmosferin sıcak ısı kaynağı olarak kullanılması halinde termoelektrik jeneratörler ve termoelektrik soğutucular hem teorik hem de deneysel olarak incelemiştir. Yarı iletken malzemenin oluşturabileceği elektron-boşluk çiftlerinin yoğunluğu ısıl uyarım ile yeterli düzeyde tutabilecek şekilde kontrol edildiğinde, soğuk yüzeyin sıcaklığını çok düşük seviyelere çekmenin modülün performansını arttırdığı deneysel ve teorik çalışmalarla tespit etmiştir. Burada kazanç hem iletkenliğin düşmesi hem de sıcaklık farkının artırılması ile üretilebilecek olan voltaj, akım ve güç değerlerinin artması olarak sıralanmıştır. Modüllerin malzemeleri göz önüne alınarak, sıcak çalışma bölgeleri  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tabanlı yarı iletkenler için üst limiti  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak belirlemiştir [23].

Ünsaç 2010 yılında, öncelikle bir termoelektrik jeneratör modülünün kriyojenik sıcaklıklardaki temel karakteristik özellikleri deneysel olarak belirlemiş ve kriyojenik şartlarda termoelektrik jeneratör üzerinden alınacak gerilim ve güç değerleri hesaplamış, sonrasında ise mevcut bir kriyojenik ısı değiştiricisi üzerinde termoelektrik jeneratör uygulaması gerçekleştirmiştir. Hi-Z Technology Firmasının HZ-20 kodlu termoelektrik jeneratör modülünün kriyojenik sıcaklıklarda deneysel karakterizasyonunu yapmış, düşük sıcaklıklarda iç direncin azalmasıyla birlikte Joule kayıpları azalırken, Seebeck katsayısının daha fazla azalmasından ötürü, Bismuth Telluride tabanlı termoelektrik modüller için düşük sıcaklıklarda üretilebilecek maksimum gücün, ortalama sıcaklık ile beraber düştüğünü gözlemlemiştir. Deney düzeneğine yerleştirilen sıkıştırma aparatı ile modül üzerine basıncın etkisini araştırmış, basınç arttıkça ısı transferinin iyileştiği gibi, modülün sıcaklık değişimlerine cevap verme süresinin kısalacağını gözlemlemiştir [24].



Gür 2009 yılında yapmış olduğu çalışmasında; yoğunlaştırıcı güneş kolektörü kaynaklı termoelektrik jeneratörlerden elde edilen elektrik enerjisi deneysel olarak incelemiştir. Güneş enerjisinden daha yüksek ışıma şiddetleri elde edebilmek için, aynaların üzerine düşen güneş enerjisini bir noktaya odaklayarak termoelektrik modüllerin bir yüzeyinde yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Termoelektrik modüllerin diğer yüzeyini ise doğal sirkülasyonla dolaşan su tarafından soğutmuştur. Dört adet TEC1-03150T125 model termoelektrik modülü seri olarak bağladığı sistemde ürettiği ışıma şiddeti  $557 \text{ W/m}^2$  ve ürettiği güç  $0,911 \text{ W}$  iken, sistem veriminin  $\%1,043$  olduğu ve termoelektrik modüllerin çalışma verimi güneş pilleri ile karşılaştırdığında, güneş pillerinden düşük olmasına rağmen üretim maliyetlerinin ucuz olması nedeniyle kullanılabilirliğinin yüksek olduğunu belirtmiştir [25].

Atik ve arkadaşı 2009 yılında yapmış oldukları bu çalışmada, jeotermal enerji ile çalışan termoelektrik jeneratör imalatı yapmıştır. 8 adet TEC1-12706T125 termoelektrik modül kullandıkları sistemde; termoelektrik modüllerin bir yüzeyini sıcak su ile ısıtıp, diğer yüzeyini şebeke suyu ile soğuttuklarında elde ettikleri sıcaklık farkı ile elektrik enerjisi üretmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonunda; sıcak su girişi  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  olduğunda gerilimin  $6 \text{ V}$ , üretilen elektriksel gücün  $2,5 \text{ W}$  olduğunu ve ayrıca üretilen güç ile LED’li aydınlatma sisteminin çalıştırılabildiğini ve su sıcaklığı ile üretilen gerilimin doğrusal, gücün ise parabolik olarak artmakta olduğunu belirtmişlerdir [26].

Kaya 2010 yılında, TEG1-12611-6.0, TMG-450-08-1.0 ve TEP1-164-1.5 termoelektrik modülleri laboratuvar ortamında ve motor egzoz çıkışına monte ederek, araç egzoz gazında oluşan ısı ile çalıştırılan termoelektrik sistemin deneysel incelemelerini yaparak araç üzerinde bu enerjinin tekrar kullanılabilirliği araştırmıştır. Egzozda oluşan gerçek ısı değerlerinin ölçümü için 1994 model 2000 CC 72hp Ford Taunus bir motor kullanmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan deneyler sonucunda bir TEP1-1264-1.5 modülünün  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkında en fazla  $3 \text{ V}$  gerilim,  $0,637 \text{ A}$  akım ve  $1,91 \text{ W}$  güç ürettiğini, bir TMG-450-0.8-1.0 modülünün  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkında en fazla  $8,97 \text{ V}$  gerilim,  $0,417 \text{ A}$  akım ve  $3,742 \text{ W}$  güç ürettiğini gözlemlemiştir. Motor egzoz çıkışına bağlanan DKP profil üzerinde yaptığı deneyler sonucunda bir TEG1-12611-6.0 modülünün  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkında en fazla  $1,7 \text{ V}$  gerilim,  $0,776 \text{ A}$  akım ve  $1,319 \text{ W}$  güç ürettiğini, 10 adet TEP1-1264-1.5 modülün seri bağlı beş modül grubun iki kol paralel bağlantısı ile ortalama  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkına ulaşmış ve en fazla  $5,6 \text{ V}$  gerilim,  $0,56 \text{ A}$  akım ve  $3,136 \text{ W}$  güç ürettiğini

gözlemlemiştir. Buna bağlı olarak yukarıda belirtilen modüllerin karakteristik değerleri ve ölçüm değerlerine bağlı olarak araç üzerindeki 12 V – 60 Ah'lik bir akümülatörü şarj edebilmesi için gereken modül sayıları ve maliyet bilgilerini vermiştir [27].

Döşkaya 2010 yılında yapmış olduğu çalışmasında, termoelektrik modülün yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturarak gerilim elde etmiş, elde ettiği gerilim ve sıcaklık farkı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. İncelemeler sonucunda; yüzeyler arası ısı geçişinin azaltılması, sıcak yüzeyin ısı kaybının düşürülmesi, güneş takip sistemi eklenmesi, soğuk yüzeyin daha iyi soğutulması gibi yapılacak bazı iyileştirmelerle verim değerlerinin arttırılabileceğini belirtmiştir. Termoelektrik modüllerin atık ısının bol bulunduğu jeotermal kaynaklarda ve fabrikalarda kullanımıyla, yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceğini ve termoelektrik enerji üretim sistemlerinin önümüzdeki yıllarda önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak karşımıza çıkacağını vurgulamıştır [28].

Kılıç 2010 yılında, enerji mimarlığı çerçevesinde yaptığı bir deney düzeneğiyle binlerce bacadan atık olarak çıkan baca gazının oluşturduğu hava kirliliğinin olumsuz etkisini, oluşan baca ısısından hibrit enerji elde ederek olumlu yöne çevirmeyi amaçlamıştır. Termoelektrik jeneratörün iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluşturmak için bir yüzeyinde bacadan gelen atık ısı, diğer yüzeyinde ise çevre havası ve soğutma suyu döngüsü kullanmıştır. Yapmış olduğu çalışma sonunda, Toplam faydanın rakamsal değerinin %12,2 olduğu sistemde, herhangi bir ısı kaybı olmaksızın yapının sıcak su ve elektrik enerjisi ihtiyacının verimli bir şekilde karşılanabileceğini belirtmiştir [29].

Çevik 2011 yılında yapmış olduğu çalışmasında; katı, sıvı ve gaz yakıtla çalışabilecek 12 adet termoelektrik modülü seri bağlayarak ve bütan gazıyla çalışan portatif özellikte termoelektrik bir jeneratör tasarlamıştır. Sistemde sıcaklık farkı 29 °C'de 1,15 V, 49 °C'de 1,62 V, 75 °C'de ise 4 V gerilim değeri ölçmüştür. Sıcak su deposundaki suyun kaynamasıyla birlikte sıcaklık farkı 84 °C'ye ulaşmış ve gerilimi 9,85 V olarak ölçmüştür. Çalışmasında termoelektrik jeneratör üzerinden sağladığı gerilimler ile hazırladığı LED lambalı sistemler vasıtasıyla aydınlatma sağlamıştır. Sistem 3 V ürettiğinde tek bir LED lamba, 6 V ürettiğinde 12 adet LED lamba, 9 V ürettiğinde ise 90 tane LED lambadan oluşan armatür ile aydınlatma sağladığını ve lüksmetreyle yaptığı ölçümlerde ise 85 lükslük bir aydınlatma şiddeti ölçtüğünü belirtmiştir [30].

Ahıska ve arkadaşları 2012 yılında yapmış oldukları çalışmalarında, termoelektrik jeneratörlerin ve fotovoltaik sistemlerin enerji üretimindeki karakteristiklerini incelemişlerdir. Fotovoltaik sistemlerin güneşe bağımlı olduğunu ve sadece güneşli günlerde verimli olabildiğini, termoelektrik jeneratörlerin ise jeotermal gibi bir kaynak olduğu sürece çalışabileceğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, kurmuş oldukları TEJ sisteminde birim alandan  $840 \text{ W/m}^2$ , PV sistemde ise  $93 \text{ W/m}^2$  elektrik enerjisi elde ettiklerini ve TEJ sistemin PV sisteme göre birim alandan 9,2 kat daha fazla elektrik enerjisi ürettiğini belirtmişlerdir [31].

Özkaymak ve arkadaşları 2014 yılında, termoelektrik jeneratörler kullanarak bir deney seti oluşturmuşlar ve jeneratörün sıcak tutulması gereken yüzeyini soba borusunda üretilen atık gaz yoluyla ısıtarak ve soğuk olan yüzeyi ise üzerinden su geçirip soğutarak sıcaklık farkı ile elektrik üretimi sağlamışlar. Yaptıkları ölçümlerde debinin sıfır olduğu düzeyde 5,11 Volt ve 0,92 Amper üretirken, termoelektrik jeneratörün performansının debinin artırılmasıyla arttığını ve debinin 0,083 lt/s olduğu anda 8,69 Volt ve 1,45 Amper'lik performans elde ettiklerini belirtmişlerdir [32].

Ahıska ve arkadaşları 2011 yılında, bir TEM'in TEJ olarak kullanılması için matematiksel modellini Matlab/Simulink'le benzetimini yapmışlar ve bu modelin doğruluğunu iki sıcaklık aralığında deneylerle ispatlamışlardır. Benzetim sonuçlarıyla deney sonuçlarını karşılaştırarak hata yüzdeleri akım %5,57, gerilim %5,12 ve güç değerleri için ortalama %3,72 olduğunu belirtmişlerdir. TEJ atık ısı giriş miktarı  $Q_H = 197 \text{ W}$  ve sıcaklık farkı  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  iken, çıkış gerilimi  $V_{\max} = 2,2\text{V}$ , çıkış gücü  $P_{\max} = 6,71\text{W}$  ve verimi ise %3,4 olarak tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları deney ve teorik analizin sonuçlarına göre özellikle endüstriyel ve jeotermal alanlarda, düşük sıcaklıklar için atık ısı geri kazanımında, TEJ'in umut verici potansiyele sahip olduğunu ifade etmişlerdir [33].

Ahıska ve arkadaşları 2016 yılında, termoelektrik ve fotovoltaik güneş panellerini karşılaştırmışlardır. Termoelektrik güneş panellerinin güneşin ısısını direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürürken, fotovoltaik güneş panellerinin güneşin foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştürdüğü ifade etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, termoelektrik jeneratörlerle birim yüzeyden elde edilen elektrik enerjisi, fotovoltaik panellerle elde edilen elektrik enerjisinden 30 kat daha fazla olduğunu,  $1 \text{ m}^2$  yüzeye sahip termoelektrik

panelle 4 kW elektrik gücü üretilirken, aynı yüzeye sahip fotovoltaik panellin sadece 132 Watt enerji ürettiğini gözlemlemiştirler [34].

Baatar ve Kim 2010 yılında, yolcu araçlarının motor soğutma suyunu kullanan düşük sıcaklıkta bir termoelektrik jeneratör geliştirmişler. Motor boyutunun 2 litre olduğu çalışmanın deney sonuçlarına göre, önerilen sistemin maksimum çıkış gücünün yaklaşık olarak 75 W ve hesaplanan verim değerinin ise %10 olduğunu, 80 km/h sürüş hızında atık ısıdan motor soğutma suyu ile elektrik enerjisi üretiminde toplam verimliliğin %0,4 olduğunu belirtmişlerdir. Önerilen termoelektrik jeneratör sisteminin, radyatörün eski su soğutma sisteminin temel bileşenleri hariç, ilave su pompaları veya mekanik cihazlar olmaksızın geleneksel radyatörlerin yerini alabileceği sonucuna varmışlardır [35].

Liu ve arkadaşları 2014 yılında, düşük entalpideki termal işi kullanmak için mekanik enerjiyle değişime gerek duymadan, termoelektrik etkiyi kullanarak direk elektrik enerjisine dönüştürebilecek bir ısı teknolojisi uygulamışlardır. Elektrik üretim sistemi olarak, yeni bir teknik ile üretilen termoelektrik jeneratör (TEJ) modülleri kullanarak iki farklı güç jeneratörü tasarlamış ve imal etmişlerdir. Yapılan çalışma sonuçlarına göre; birinci sistem ile sıcak ve soğuk yüzeyler arasında 200 °C sıcaklık farkında 500 W güce erişmişler, 80 °C sıcaklık farkında ise 160 W çıkış gücü gözlemlemiştirler. İkinci TEJ sisteminde ise 120 °C sıcaklık farkında 1 KW'ı aşabileceğini belirtmişlerdir. Sıcak taraf yaklaşık 95° C ve soğuk tarafta 30 °C sıcaklıkta iken TEJ sisteminin anlık verimliliği %4,5'e ulaştığını, verim değerinin giriş sıcaklığı ile katlanarak artmakta olduğunu gözlemlemiştirler. Bu çalışmada geliştirilen TEJ sisteminin maliyetinin, üretilen eşdeğer enerji açısından PV ve rüzgar enerjisi sistemlerine göre çok daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [36].

Baskar ve arkadaşları 2014 yılında, atık ısı geri kazanım sisteminin iki zamanlı bir benzinli motora uyarlanmasının fizibilitesini incelemeyi amaçlamışlardır. Birleştirilmiş ısı ve güç sisteminin güç ve ısı üretimi için karbondioksit (CO<sub>2</sub>), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) ve azot oksitler (NO<sub>x</sub>) emisyonunda azalma gibi yararlar sağladığını belirtmişlerdir. Deneysel performans testi, atık ısı geri kazanım sistemi ile birlikte ve atık ısı geri kazanım sistemi olmadan, iki kez çalıştırılan benzinli motorun genel verimliliğinin sırasıyla %29,67 ve %29,2 olduğunu, güç miktarının 90 W olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu deneysel çalışma ile yakıt tüketiminin % 4 oranında azaldığının gözlemlendiğini ve atık ısı geri kazanım sisteminin

çeşitli proses endüstrilerinde boşa harcanmış enerjiyi kullanmak için daha verimli olduğunu ortaya koymuşlardır [37].

Kumar ve arkadaşları, termoelektrik jeneratörlerin performansını incelemek için egzoz gazı ile motor soğutma sıvısı arasındaki sıcaklık farkına göre seçtikleri 18 adet termoelektrik jeneratör modülü bulunan bir ısı eşanjörü tasarlamışlar ve farklı motor çalışma koşullarında motor test cihazında test etmişlerdir. Isı eşanjörlerinin çeşitli tasarımları bilgisayar destekli tasarım programı (CFD) kullanarak modellemişler ve analiz, akış, ısı aktarım özelliklerini incelemişlerdir. TEJ'in güç üretim verimliliğini en üst düzeye çıkartmak için sıcak ve soğuk yüzey arasında büyük sıcaklık farklılığı sağlanması gerektiğini, çalışmanın aynı zamanda enjektör egzozunda verimli bir şekilde uygulanabileceğini ve yakın gelecekte termoelektrik jeneratörlerin alternatörün boyutunu azaltabileceğini veya otomobillerde alternatörü ortadan kaldırabileceğini ortaya koymuşlardır [38].

Aravind ve arkadaşları 2014 yılında, kullanılan malzeme ile TEJ'in tasarımını ve analizini yapmışlardır. TEJ'in etkinliğini etkileyen faktörleri, TEJ verimliliğini ve TEJ'deki ısı aktarımını ANSYS programı kullanarak incelemişlerdir. TEJ'in pili şarj etme sisteminin yakıt tüketimini azaltabileceği ve otomobillerde kullanılan pil ömrünün uzatılabileceği, atık egzoz ısısının iyileştirilmesi için en iyi yöntemin TEJ'ler olduğu, atmosfere bırakılan ısının azaltacağı, otomobillerin yakıt tüketiminin azaltacağı ve TEJ'lerin en büyük avantajının, atık ısı kaynağından enerji üretmesi olduğu sonucuna varmışlardır [39].

Adavbiele 2013 yılında, benzinli bir motorun atık ısı enerjisinin performans ve fizibilitesini değerlendirmek amacıyla, üç egzoz gazına dayalı TEJ ve bir su soğutucu temelli TEJ kullanmıştır. Geri dönüşümsüzlüklerin yüksek olması nedeniyle TEJ'lerin toplam verimliliğin düşük olmasına rağmen, TEJ'lerin çıkış gücünü motor atık ısısından elde edilebilen bir elektrik düzeyi oluşturmuştur. Genel verimlilik yalnızca %2,18 iken, kazanılan enerjinin kalitesini artırmak amacıyla motorun atık ısıdan elektrik enerjisi üretmek için hala çok fazla alana sahip olduğunu ve TEJ'lerin sera gazı azaltılmasındaki rolünün küresel iklim şemasında çok önemli olabileceğini belirtmiştir [40].

Jadhao ve Thombare 2013 yılındaki çalışmalarında, içten yanmalı motorun atık ısısının egzoz gazı enerjisi ile kaybı açıklamış, içten yanmalı motorlardan atık ısının geri

kazanılması için olası yöntemleri ve içten yanmalı motorun performansını ve emisyonlarını incelemiş, atık ısı geri kazanım sisteminin atık ısıyı geri kazanmanın ve yakıt tasarrufu yapmanın en iyi yolu olduğunu belirtilmişlerdir. Atık ısı geri kazanım teknolojilerinin kullanımı ile büyük enerji tasarrufu potansiyeli olduğunu ifade etmişlerdir. Egzoz gazı atık ısı geri kazanım ve mekanik güç dönüşümünün Rankine, Stirling ve Brayton gibi termodinamik döngüler ve buhar emme yardımı ile mümkün olduğunu, atık ısı geri kazanımı için termoelektrik jeneratörlerin düşük verimlilikle düşük ısı kullandığını, termal verimlilikte ve emisyonda azalmada aynı miktarda artış için faydalı olduğunu belirlemişlerdir [41].

Tzer-Ming ve Sheng-Chung 2012 yılında, Toyota model 2200 c.c. aracın motor devri ve harici soğutma havası akışının atık ısı geri kazanımını ve termoelektrik dönüşüm sisteminin enerji çıkışı üzerindeki etkisini tartışmak için gerçek araç testi için kullanılan dört silindri dört zamanlı motorlu bir araç kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda, motor devri arttıkça enerji çıktısının da arttığını bulmuş, eğer motor devrinin çok yükselirse (2500 rpm'i aşarsa), termoelektrik jeneratörün aşırı ısınabileceği ve hasar görebileceğini belirtilmişlerdir. Günümüzde, seri bağlantılı altı termoelektrik jeneratörün üfleme havası debisi  $0.04 \text{ m}^3/\text{sn}$  ve motor devri 2500 rpm olduğunda yaklaşık 16 W'lık maksimum elektrik gücü değerine sahip olacağını belirtilmişlerdir [42].

Jorge ve arkadaşları 2011 yılında, hibrid araçlarda termoelektrik jeneratör (TEJ) kullanılarak atık termik enerjinin geri kazanımını ve uzun menzilli elektrikli taşıtlar ile daha genel olarak alternatör çalışma süresini azaltacak az miktarda elektrik akımı üretmesinden fayda sağlayabilecek herhangi bir araçta kullanılabilirliğini incelemiştir. Sonuç olarak, HP ile iletilen ısı aktarım hızının bazen 1,4 kW'ı aşan bir düzeyde önemli derecede gelişirken, çalışmakta olan HP'nin basıncı ve sıcaklığı üzerinde kontrol elde etmenin mümkün olduğunu belirtilmişlerdir. Erken gelişme aşamasında olan son tasarım, HP üreten termoelektrik modüllerin ve elektrik üretiminin potansiyelinin ön değerlendirmesini içerdiği, HP ve su soğutma sistemi boyunca  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farklılıklarında (Isı Borusundan soğutma sisteminden çıkan ısı temel alınarak hesaplanan) % 3 verimlilik değerleri, sıcaklık ile doğrusal bir artış ve verimlilik değeri kaydetmişlerdir [43].



### 3. ATIK ISIDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ELDE ETME YÖNTEMLERİ

Atık ısıdan elektrik enerjisi elde etmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Hermetik kombilerin atık ısı enerjisinden termoelektrik jeneratörler vasıtasıyla elektrik enerjisi elde etme üzerine çalışılacağından, ilk olarak atık ısı enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yöntemlerine, daha sonra Termoelektrik Jeneratörlere ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

#### 3.1. Stirling Motoru

Sıcak hava motorları, farklı sıcaklıktaki iş akışkanının genişletilmesi ve sıkıştırılması işlemlerinin kapalı ve rejeneratif bir çevrim olan Stirling çevrimi boyunca tekrarlandığı termal sistemlerdir. Teorik olarak en yüksek verime sahip motorlardır. Ayrıca sessiz ve titreşimsiz çalışmaları, özel bir yakıtı veya enerji kaynağına bağlı kalmadan kullanılabilmesi, yeterli tork ve özgül güç değerleri ve basit tasarımları ile bu motorlar araştırma konusu olarak gündeme gelmektedir [44].

Sıcak hava motorlarının genel olarak üstünlükleri aşağıda sıralanmıştır [44].

- Stirling motorlarında her türlü ısı kaynağı kullanılabilir.
- Termik verimi Carnot çevriminin verimine denktir ve sıkıştırma oranına bağlı değildir.
- Hareketli parçaların az olması üretim maliyetinin düşük olmasına neden olmaktadır.
- Montajı ve bakımı diğer motorlara göre daha kolay ve ucuzdur.
- Çok küçük ebatlarda yapılabileceği gibi, çok büyük boyutlarda da yapılabilmektedir.
- İçten yanmalı motorlarda olduğu gibi gürültülü çalışmaz.
- Silindir içerisinde yanmanın gerçekleşmemesi ve hareketli parçaların az olması, sıcak hava motorunun ömrünün uzun olmasını sağlamaktadır.
- Yanma ürünü olan NO<sub>x</sub>, CO, yanmamış HC ve partikül emisyonları oluşmadığından, çevre kirliliğine neden olmamaktadır.

Sıcak hava motorlarının olumsuz yanları aşağıda sıralanmıştır [44].

- Piston malzemesinin ısı iletim katsayısı, silindirin et kalınlığı ve ısı transfer alanı gibi sistem özelliklerinin etkisi ile motorun çalışması için gerekli olan ısının silindir

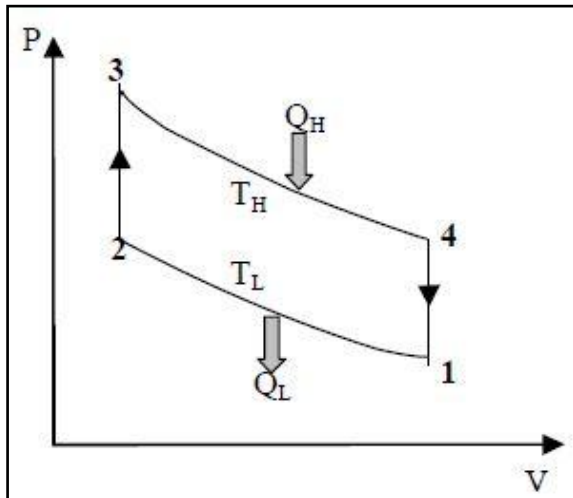


içerisindeki çalışma akışkanına transferi, zaman almaktadır. Bu nedenle motorun ilk hareketi, ani olarak gerçekleşmemektedir.

- Motor, kapalı sistemli olduğundan, çalışma akışkanı sürekli olarak silindir içerisinde yer almaktadır. Sızdırmazlık problemi çözülemez ise gaz kaçaqları oluşmakta ve motor verimi azalmaktadır.
- Ölü hacimlerin fazla olması, motor verimini düşürmektedir.
- Motorun yavaşlaması ve hızlanması zaman almaktadır. Piston hızı kontrolü yapılması zordur.
- Silindirin uç bölgesi kesintisiz olarak yüksek sıcaklığa maruz kaldığından, bu bölgede termal gerilmeleri önlemek için sıcaklığa dayanımı fazla, yüksek maliyetli malzemeler kullanılmaktadır.

### 3.1.1 Stirling çevrimi

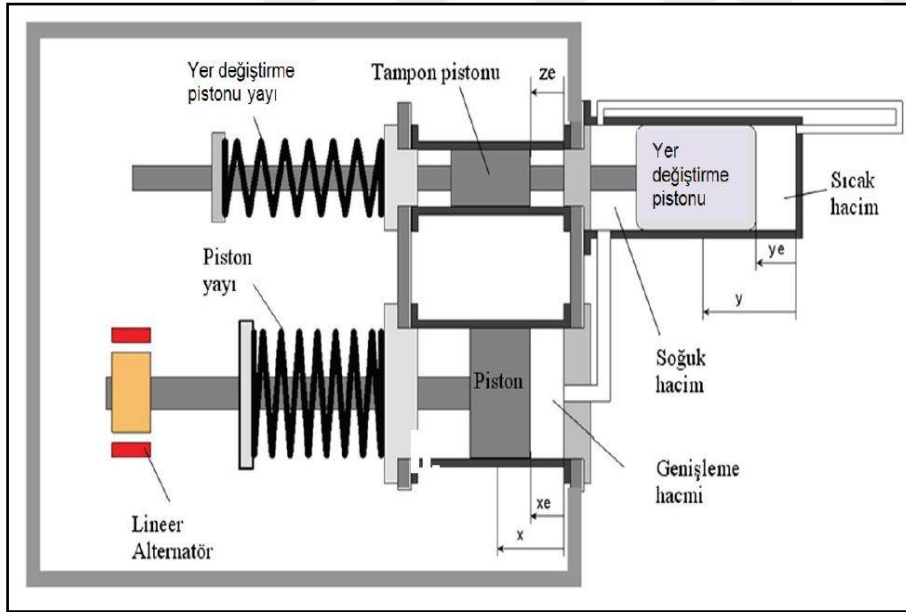
Şekil 3.1'de İdeal Stirling P-V Diyagramı görülmektedir. Stirling çevriminin, Carnot çevriminden farkı, iki izentropik hal değişiminin yerine iki sabit hacimde sistem içi ısı geçişinin olmasıdır. Gerçekleşen sistem içi ısı geçişi, rejenerasyon olarak adlandırılmaktadır. Bu işlemle akışkanın ısı enerjisi, çevrimin bir bölümünde sistem içerisinde yer alan ve rejeneratör olarak adlandırılan bir ısı deposuna verilmekte ve daha sonra çevrimin bir başka bölümünde bu enerji, rejeneratörden yeniden çalışma akışkana geçmektedir. Stirling çevriminin ısı verimi, Carnot çevrimi verimine eşittir [45].



Şekil 3.1. İdeal stirling P-V diyagramı [45]

### 3.1.2 Stirling motorundan elektrik enerjisi üretilmesi

Şekil 3.2’de gama tipi bir Stirling motorunun mekanizması görülmektedir. Motor bir yer değiştirme pistonu, bir güç pistonu, güç pistonu ve yer değiştirme pistonu yayları ile bir adet tampon pistonundan oluşmaktadır. Ayrıca güç pistonunun kuyruğuna bağlı bir lineer alternatör bulunmaktadır. Güç pistonu ile yer değiştirme pistonu arasında herhangi bir mekanik bağlantı bulunmamaktadır. Güç pistonu ve yer değiştirme pistonunun hareketleri çalışma gazı basıncıyla sağlanmaktadır. Motorun çalışma hacmi, sıcak hacim, rejeneratör, soğuk hacim ve genişleme hacimlerinden oluşmaktadır. Rejeneratör olarak isimlendirilen hacim aslında sıcak hacim ile soğuk hacim arasındaki akış kanalı olup çalışma gazı bu kanaldan geçiş esnasında ısı almakta ya da ısı vermektedir. Rejeneratörün içerisi bazı motorlarda gözenekli bir malzeme ile doldurularak ısı transfer yüzeyi genişletilmektedir. Basit yapılu motorlarda ise rejeneratördeki ısı alış verişi doğrudan akış kanalının yüzeyleri ile gerçekleştirilmektedir [46].

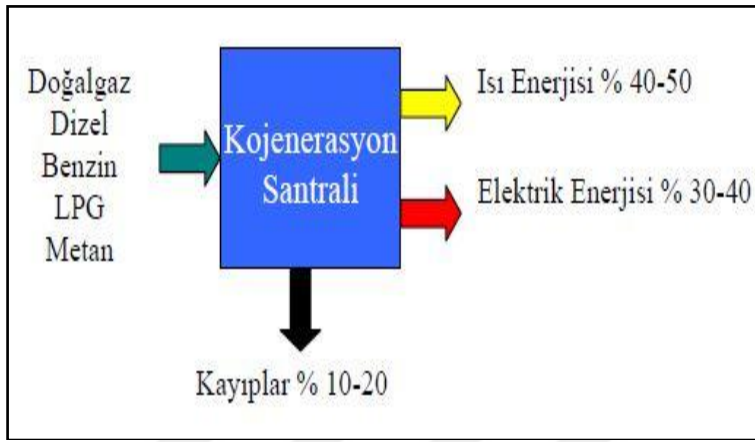


Şekil 3.2. Gama tipi serbest pistonlu Stirling motoru mekanizması [46]

Jeneratörler kullanılarak ta Stirling motorlarının hareket enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bunun için Stirling motoru pistonlarındaki aşağı – yukarı yönlü dögüsel hareket, jeneratörü çalıştıracak biçimdeki dairesel harekete çevrilmelidir. Stirling motoruna mil bağlantısı sağlanmış bir jeneratörün miline hareket enerjisi aktarıldığında, jeneratörün çıkış uçlarında bir elektrik akımı oluşacaktır.

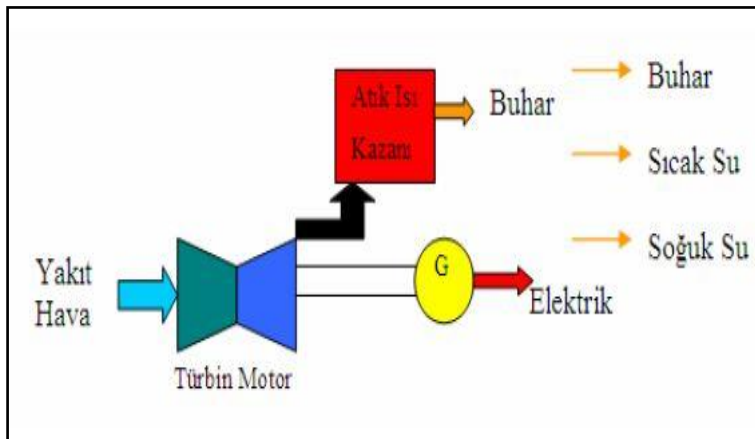
### 3.2. Kojenerasyon ve Trijenerasyon

Şekil 3.3'te kojenerasyon sisteminin şematik görünüşü görülmektedir. Kojenerasyon kelime olarak "Combined Generation" terimlerinin kısaltılmasından oluşmuştur. Isı ve elektriğin birlikte üretildiği "birleşik üretim" anlamına gelmektedir. Aynı yakıt kaynağından daha fazla kullanılabilir enerji açığa çıkarttığı için tek amaçlı üretim sistemlerinden daha verimlidirler. Verimli olmasının yanında egzoz gazlarını da değerlendirdiğinden CO<sub>2</sub> emisyonu azalır [47].



Şekil 3.3. Kojenerasyon sisteminin şematik görünüşü [47]

Şekil 3.4'te Trijenerasyon sisteminin şematik görünümü görülmektedir. Uygulamada, "üçlü üretim" anlamına gelen trijenerasyon sistemleri; ısı ve elektrik enerjisinin yanında kojenerasyonun atık gazından elde edilen sıcak su veya buhar ile soğuk suyun da elde edildiği sistemlerdir [47].



Şekil 3.4. Trijenerasyon sisteminin şematik görünüşü [47]

### 3.2.1. Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerin avantajları

Kojenerasyon sistemin avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [47].

- Kojenerasyon tesislerinin en büyük üstünlüğü, gereksinim duyulan enerji türlerini istenildiği zaman ve miktarda üretebilmesidir. Bu tesisler, kendi enerjilerini kendileri ürettiklerinden dışa bağımlı değildir.
- Üretilen enerjideki kalite ve devamlılık diğer bir üstünlüğüdür. Böylece elektrik kesilmesi, frekans ve voltajdaki düzensizlikler ortadan kalkmış olmaktadır.
- Kojenerasyon tesislerine yapılan kredi harcamaları uzun vadede geri ödemeli olduğu için enerji daha ucuz elde edilmektedir.
- Kojenerasyon tesislerinde egzoz gazlarından faydalandığından CO2 emisyonları oldukça düşüktür. Böylece sistem çevre kirliliği yönünden de avantajlı durumdadır.
- Geleneksel elektrik üretiminde elektrik enerjisinin uzak mesafelere naklinde önemli miktarlarda kayıplar oluşmasına karşın yerel elektrik üretimi sağlayan bu tesislerde nakil kayıpları ortadan kalkmaktadır.
- Küçük güç ve boyutlarda inşa edilebildiğinden, daha küçük ve yerel şirketlerce kurulup işletilebilmektedir.
- Enerjinin dönüşümü ve kullanımında verimliliği artırmaktadır.
- Üretim tesislerinin çeşitliliğini artırıp, endüstriyel ve ticari kuruluşlara üretimde rekabet gücü sağlamaktadır.
- Bu sistemler gelişip yaygınlaştıkça yeni yatırım ve iş olanakları sağlamaktadır.
- Ulusal enerji maliyetinde büyük miktarda azalma sağlanmaktadır.
- Birincil enerji kullanımındaki yüksek verimlilikten dolayı, yerel ve ithal enerji kaynaklarından tasarruf sağlanmaktadır.

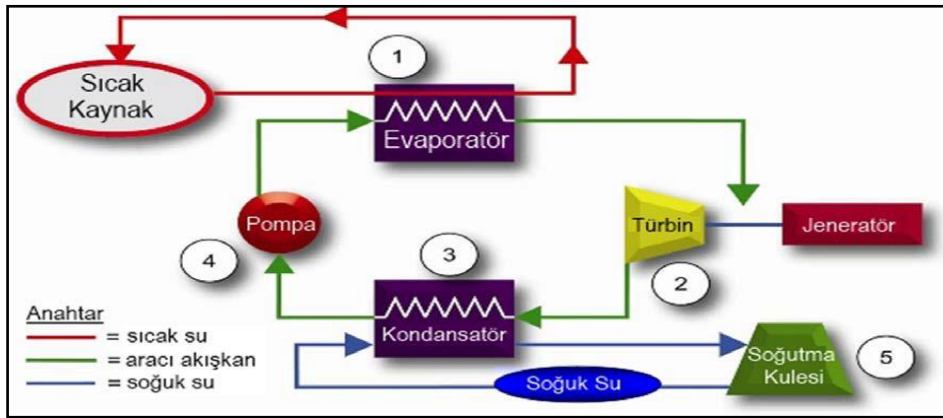
Kojenerasyon ve trijenerasyon kullanımı aşağıdaki tasarruf ve faydaları sağlayacaktır [48].

- Isı ve elektrik gücü %90 dolayındaki bir toplam verimle üretildiğinden, primer yakıt tasarrufu sağlanacaktır.
- Kojenerasyon ve tri-jenerasyon sistemlerinde elektrik gücü tüketildiği yerde üretildiği için, iletim ve dağıtım hatları, ve bunlarla ilgili enerji kayıpları söz konusu değildir.
- Emisyon değerlerinin düşüklüğünden dolayı çevrenin etkin bir biçimde korunmasına katkıda bulunacaktır.

### 3.3. Organik Rankine Çevrimi (ORC)

ORC sistemi ülkemizde yeni bir teknoloji olmasına rağmen dünya genelinde birçok bölgede uzun yıllardır kullanılmaktadır. ORC çalışma prensibi bilinen Rankine Çevrimine çok benzemektedir. Rankine Çevrimindeki iş yapan akışkan olan su yerine, daha düşük sıcaklıkta buhar fazına gelen ve yüksek basınçlara ulaşabilen organik akışkanlar kullanılmaktadır [49].

Isı kaynaklı elektrik üretim sistemi esasına göre çalışan örnek bir ORC sistemi Şekil 3.5’de gösterildiği gibi; Evaporatör (1) içerisinde ki aracı akışkanı buharlaştırmak için sıcak kaynaktaki ısıyı kullanır. Seçilen çalışma sıvısı olarak silikon bazlı sıvılar, düşük sıcaklıklar için hidrokarbon veya soğutucu bazlı sıvılar olabilir. Basınçlı buhar daha sonra Türbine (2) yollanır ve Jeneratörde elektrik üretilir. Buhar, Kondanser içinde tekrar sıvı hale gelir (3). Burada Su Soğutma Kulesi (5), ya da hava soğutmalı sistemler (mavi çizgi) soğutma aracı olarak kullanılır. Sonra bir Pompa (4) çalışma sıvısını tekrar Evaporatöre pompalar ve bu kapalı çevrim süreci tekrar eder [49].



Şekil 3.5. ORC sistem şeması [49].

#### 3.3.1. Organik Rankine çevrimi'nin avantajları

ORÇ ile çalışan bir güç bloğunun teknik aşağıdaki gibi sıralanabilir [50].

- Düşük basınçta çalışma
- Yüksek çevrim verimi
- Çok yüksek türbin verimi (% 90'a kadar)

- Türbinin düşük çevresel hızı nedeniyle, türbinde düşük mekanik gerilme
- Düşük devirli türbinin, dişli olmadan doğrudan jeneratöre bağlanabilmesi
- Türbinin buhar nozullarında nem olmaması sayesinde, türbin kanatlarının aşınmaması

ORC ile çalışan bir bloğun operasyonel avantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir [50].

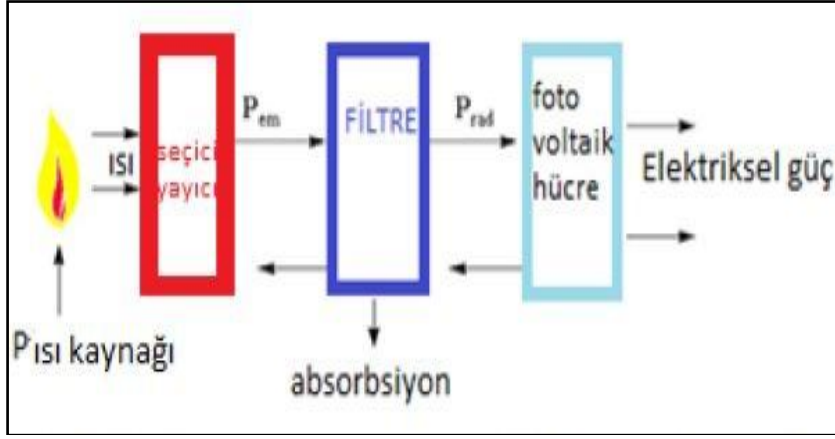
- Basit çalıştırma ve durdurma işlemleri
- Otomatik ve kesintisiz çalışabilme
- Operatör gerektirmeme
- Sessiz çalışma
- Yüksek kullanılabilirlik
- Kısmi yükte çalışırken bile yüksek verim
- Düşük işletim ve bakım gereksinimleri
- Uzun ömür (20 yıldan fazla)

### 3.4. Termofotovoltaik Teknolojisi

Termofotovoltaik, termal radyasyonun ısı enerjisinin fotovoltaik dönüşümü yoluyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemidir. Termofotovoltaik kavramı ısının doğrudan elektriğe dönüşümü için başlangıçta 1960'larda önerildi [8]. Bir Termo-Foto-Voltaik jeneratör (TPV), suni bir ısı kaynağından (yani yakıtın yanması) yayılan radyasyonun fotovoltaik hücrelerin kullanımı ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi için yenilikçi bir sistemdir [52].

#### 3.4.1. Termofotovoltaik (TPV) sistemler

Termofotovoltaik sistemler, yüksek sıcaklıklı atık ısılarından ve güneş radyasyonundan ısı enerjisi ve elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Fotovoltaik hücre üzerine gelen güneş ışınları hücre tarafından absorbe edilerek ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirirler. Şekil 3.6'daki TPV sistem; seçici yayıcı, ısı kaynağı, filtre ve bir fotovoltaik hücreden oluşmaktadır. Sistemdeki ısı kaynağı, ısı enerjisini seçici yayıcıya iletir, fotovoltaik hücre modülü de termal enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Bu dönüşüm mevcut elektrik üretimine alternatif olarak düşünülmektedir. Aynı zamanda elde edilecek elektrik enerjisi, endüstriyel sistemlerde üretim aşamasında meydana gelen atık ısıdan elde edilmektedir. Bu durum enerjiden ve maliyetten tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca çevreye salınan atık ısı değerlendirilmektedir [53].



Şekil 3.6. TPV sistemin şeması [53]

### 3.4.2. Termofotovoltaik (TPV) sistemlerin avantajları

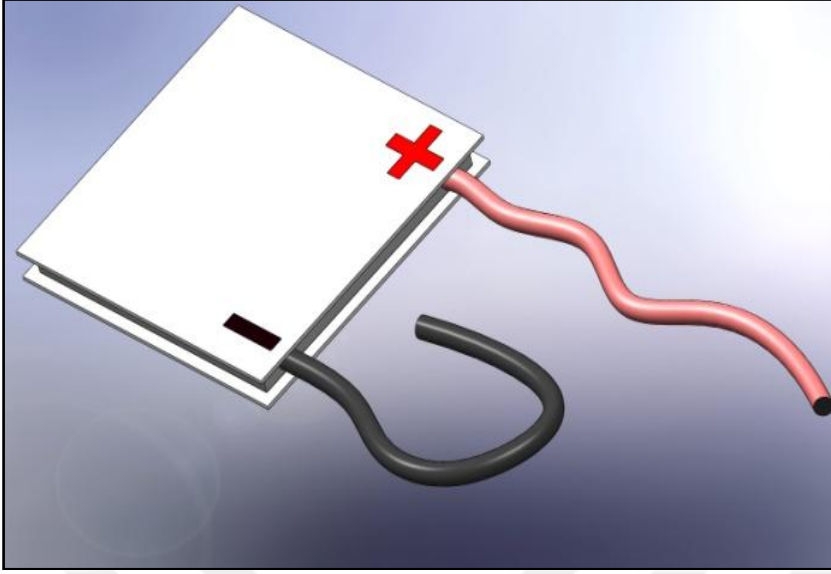
Yüksek sıcaklık değerlerinde ( $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  üzerinde) çalışabilen [54], TPV enerji sistemin ana avantajları aşağıda sıralanmıştır [53].

- Yüksek yakıt kullanım faktöründe, termal kayıpların çoğunun geri kazanımı sayesinde birliğe yakın, TPV sistemini kombine bir ısı ve güç olarak kullanmayı mümkün kılmaktadır.
- Hareketli parçaların bulunmaması nedeniyle üretilen gürültü seviyeleri düşüktür.
- Kolay bakım (ortak bir ev tipi kazana benzer şekilde) yapılabilir.
- Büyük yakıt esnekliği bulunmaktadır.

### 3.5. Termoelektrik Etkiler ve Termoelektrik Jeneratörler

Sıcaklık farkının elektriğe, elektriğin de sıcaklık farkına dönüştürülmesi Termoelektrik Etki olarak adlandırılır. Günümüz teknolojisinde bu dönüşüm, termoelektrik dönüştürücülerin kullanımı ile yapılmaktadır.

Şekil 3.7'deki termoelektrik dönüştürücünün yüzeylerine farklı sıcaklıklar uygulandığında, çıkış uçlarında bir potansiyel fark elde edilmektedir. İlk işlemin tersi olarak, termoelektrik dönüştürücünün pozitif (+) ve negatif (-) uçlarına gerilim uygulandığında ise termoelektrik dönüştürücünün yüzeylerinde sıcaklık farkı oluşmaktadır.



Şekil 3.7. Termoelektrik dönüştürücü

Termoelektrik dönüştürücüleri; cisimlerin soğutulması ve ısıtılmasında, elektrik üretiminde ve cisimlerin sıcaklığını ölçmede kullanmak mümkündür. Termoelektrik dönüştürücüler hassas cihazlar olduğundan, malzemelerin ısı iletim katsayısının ölçülmesinde ve hassas sıcaklık kontrollerinde de kullanılabilirler.

Isıtılan ve soğutulan yüzeyler, termoelektrik dönüştürücüye uygulanan voltajın, üretilen elektrik akımının yönü ise sıcak ve soğuk yüzeylerin yönüne göre belirlenebilir.

Termoelektrik etki tanımını üç tane ifadeyi içinde barındırır. Bunlar;

- a. Seebeck Etkisi
- b. Peltier Etkisi
- c. Thomson Etkisi olarak adlandırılır [55].

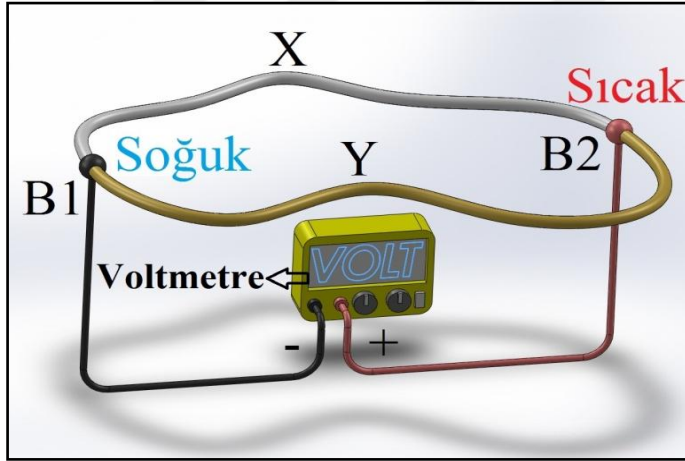
Peltier Etkisi ve Seebeck Etkisi birbirlerinin tersidir. Aynı zamanda bu iki etki, termoelektrik etkinin temelini oluşturmaktadır. Thomson Etkisi ise Peltier ve Seebeck etkilerinin farklı özellikte malzemelerin kullanılması ile performanslarının değişebileceğini göstermektedir.



### 3.5.1. Seebeck etkisi

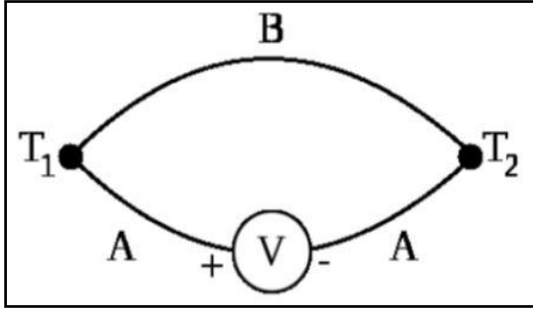
Seebeck Etkisi Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından 1821’de bulunmuştur. Seebeck deneyinde; iki iletken telden meydana gelen bir devrede teller ısıtıldığında yakın civara konan bir pusula ibresinin hareket ettiğini görmüş ve bu hareketin metallerin birleşme noktalarındaki sıcaklık farkından meydana geldiğini ileri sürmüştür [56,57]. Seebeck, yaptığı deneyde bir elektrik akımı meydana geldiğini ve bunun ibrenin sapmasına sebep olduğunu fark edememiştir. Seebeck bu olayı termomanyetik etki olarak açıklamıştır.

Şekil 3.8’de Seebeck tarafından kurulan deneyin şeması görülmektedir. Seebeck çalışmalarında, birbirinden farklı X ve Y metallerinin oluşturduğu halkadaki metallerin birleşme noktalarını farklı sıcaklıklarda tutmuştur.  $B_1$  ve  $B_2$  birleşme noktalarındaki sıcaklık farkına metallerin farklı tepki göstermesi sonucunda devrede bir elektrik akımı oluşmuş ve oluşan bu akımın sebep olduğu manyetik alan yakınlarda bulunan bir pusula iğnesini saptırmıştır.



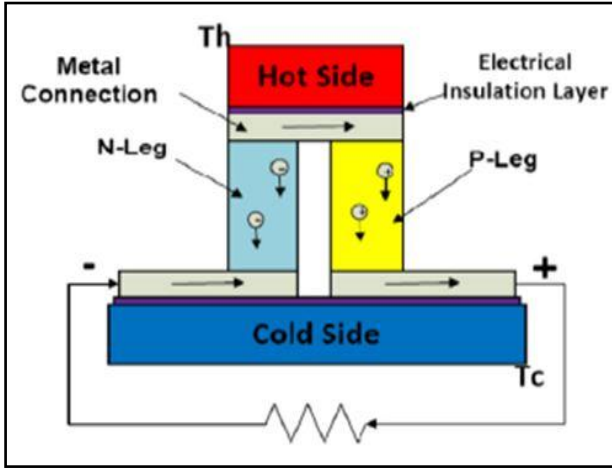
Şekil 3.8. Seebeck deneyi şeması

Şekil 3.9’da Seebeck Etkisi gösterilmiştir. Seebeck iki farklı iletkenin birleşme noktalarında sıcaklık farkı oluşturulduğunda, iletkenler üzerinde bir elektrik akımı oluşacağını bulmuştur. Birleşme noktalarında sıcaklık farkı olan iki farklı metal ya da yarı iletken arasına bir voltmetre bağlandığında bir gerilim değeri ölçülür [58].



Şekil 3.9. Seebek etkisi [58]

Termoelektrik jeneratörler, termoelektrik pillerden oluşmaktadır. Bu piller, termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılmakta ve günümüz teknolojisinde yarıiletken maddelerden üretilmektedir. Şekil 3.10’da basit bir termoelektrik pilin şekli görülmektedir. Seebeck olayı süresince, pile giren ısı pil içindeki elektronların bir kısmının enerji düzeyini artırır. Diğerlerinden daha yüksek enerji düzeyine ulaşan elektronlar, yarıiletkenin kristal yapısında hareket edecek şekilde serbest kalırlar. Elektronlar serbest kaldıkça, kristal yapıda bir boşluk (deşik) oluştururlar. Düşük enerjili elektronlar, materyalin içinde serbestçe hareket edememelerine rağmen, bir deşikten diğerine sıçrayabilirler. Bu şekilde, deşikler yarı iletken materyal içinde yer değiştirirler.



Şekil 3.10. Basit bir termoelektrik pilin şekli [58]

Şekil 3.10’da görüldüğü gibi, elektronlar N-tipi yarıiletken materyal, deşikler ise P-tipi yarıiletken materyal üzerinden taşınmaktadır. Böylece dış devre üzerinden akmaya başlayan elektronlar, bir elektrik akımı oluşturmaktadır. Elektronlar devrede oluşan akımın yönüne ters olarak hareket etmektedir. N-tipi yarıiletken maddeden hareket etmeye başlayan elektronlar, P-tipi yarıiletkende hareketlerini tamamlamaktadır. P-tipi yarıiletken

maddeye ulaşan elektronlar burada oluşan eşiklere düşmekte ve bu arada fazla enerjilerini ısı olarak eşiklere bırakmaktadır. Bahsedilen bu olaylar, pilin soğuk ucuna yakın kısımlarda meydana gelmektedir [58].

Pilin iki ucu arasında sıcaklık farkı olduğu sürece, elektronlar ve eşikler devamlı olarak yer değiştirecektir. Buna bağlı olarak devre üzerinden bir elektrik akımı akmaya devam edecektir. Sıcak ve soğuk kaynak uçlardan uzaklaştırıldığında ise, sistem sıcaklığı dengeye ulaşana kadar giderek azalan bir elektrik enerjisi elde edilecektir. İki yüzey arasında sıcaklık farkı olmadığına ise elektronların fazla enerjilerini bırakacakları boşluklar olmayacağından hareket etmeyeceklerdir. Bunun sonucunda çıkış uçlarında bir voltaj değeri ölçülemeyecektir.

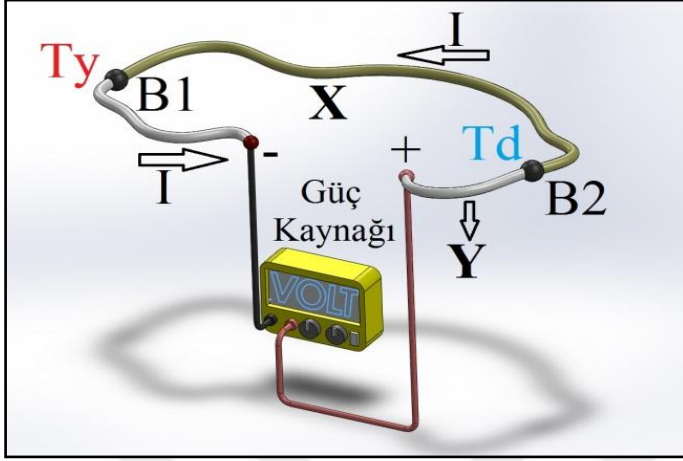
Seebeck deneyinin sonucunda; farklı metallerin birleşme noktalarında oluşan sıcaklık farkı ile gerilim üretilebileceği ortaya çıkmıştır. Buda termoelektrik çiftlerin doğuşunun temelini oluşturmuştur. Termoelektrik çiftler Seebeck etkisi oluşturarak; sıcaklık değerlerinin ölçümlerinde, sıcaklık farkı değerlerinin ölçümlerinde, termopillerin üretiminde kullanılabilirler.

### 3.5.2. Peltier etkisi

Peltier etkisi 1834'te bir Fransız saatçisi olan Jean Charles Athanase Peltier tarafından bulunmuştur. Peltier deneyinde iki farklı metalin birleşme noktalarından bir akım geçirildiğinde, birleşme noktalarında sıcaklık farkı oluştuğunu bulmuştur. Devre üzerinden akım aktığında, değişik metallerin elektrik akımına farklı tepkiler vermesi sonucunda sıcaklık birleşme noktalarından birinde artarken diğerinde azalmıştır [59, 60]. Fakat o da Seebeck gibi bulduğu şeyin farkına varamamıştır. Peltier, bu etkinin ohm kanununun hafif akımlar için geçerli olmadığını savunmuştur.

Şekil 3.11'de yüksek birleşme noktası  $B_1$ , düşük birleşme noktası  $B_2$ 'dir. Isı düşük birleşme noktasından soğrulurken, yüksek birleşme noktasından yayılır. Burada  $Q_1$  yayılan ısı,  $Q_2$  ise soğrulan ısıdır. Peltier etkisi oluşturulduğunda  $Q_1$ 'in temas ettiği yüzeyin sıcaklığı ilk sıcaklığına göre artarken,  $Q_2$ 'nin temas ettiği noktanın sıcaklığı ilk sıcaklığına göre azalacaktır. Buna bağlı olarak  $B_1$  noktasındaki sıcaklık değeri  $T_y$  değerini,  $B_2$

noktasındaki sıcaklıkta  $T_d$  değerini alacaktır. Noktaların sıcaklığı ölçülürse,  $T_d$  sıcaklığı sıcaklık  $T_y$  sıcaklığından küçük olacaktır.



Şekil 3.11. Peltier deneyi şeması

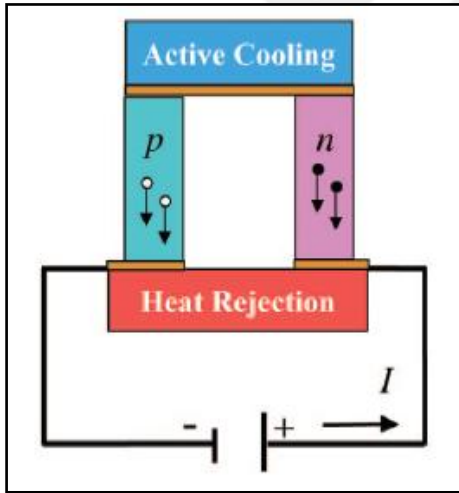
İki noktanın da aynı ortamda ve aynı sıcaklıkta bulunduğunu, ortam sıcaklığının da herhangi bir  $T$  değerinde olduğunu varsayarsak, sistemden  $I$  akımı akmaya devam ettiği sürece  $T_d < T < T_y$  olur. Peltier etkisi ile ortam sıcaklığının altında ve üstünde sıcaklık değerleri oluşturmak mümkün olacaktır.

Sabit bir akım değeri farklı türdeki iletken veya yarıiletken malzemelerin birleşim noktalarına uygulanacak olursa, birleşim noktalarında oluşan sıcaklık farkları da maddelerin özelliklerine göre değişim gösterecektir.

Sıcaklık farkının değişim göstermesini sağlayan diğer bir etkide devre üzerinden akan akım değeridir. İki farklı metalin ya da yarı iletkenin birleşim noktalarından bir elektrik akımı aktığında iki noktada farklı sıcaklık değerleri oluşacaktır. Devreden geçen akımın değeri arttırılırsa buna bağlı olarak noktalar arasındaki sıcaklık farkı artacak, akımın değeri azaltılır ise noktalar arasında oluşan sıcaklık farkı azalacaktır. Isı transferinin yönü, devreden geçen akımın yönü ile değiştirilebilir.

Şekil 3.12’de termoelektrik soğutucu modülün yapısı verilmiştir. P-tipi silikon maddeler pozitif Peltier katsayısı, n-tipi silikon maddeler negatif Peltier katsayısına sahip metallere benzer özellik gösterirler. Peltier etkisinden faydalanarak p-n eklemlerinin seri olarak bağlanmasıyla TEC “Termo elektrik soğutucu” modül oluşturulur.

Şekil 3.12'deki devreye  $V$  gerilimi uygulandığında, gerilim kaynağının bağlandığı uçlar arasında bir potansiyel fark oluşur. Oluşan bu fark P-tipi yarıiletkende deşikler oluştururken, N-tipi yarı iletkende bulunan elektronların enerjilerini artırır. Enerjileri artan elektronlar N-tipi yarıiletken materyalden, deşikler ise P-tipi yarıiletken materyalden üzerinden taşınırlar. Böylece devre bir  $I$  akımını oluşturur. N-tipi yarıiletken maddeden hareket etmeye başlayıp, P-tipi yarıiletkende hareketlerini tamamlayan elektronlar, P-tipi yarıiletkenin deşikleriyle karşılaşırlar. Bu olay, pilin soğuk ucuna yakın yerde meydana gelir. P-tipi yarıiletken maddeye ulaşan elektronlar burada oluşan eşiklere düşerler ve bu arada fazla enerjilerini ısı olarak eşiklere bırakırlar. Pilin iki ucu arasında potansiyel farkı olduğu sürece, elektronlar ve deşikler devamlı olarak yer değiştirir. Buna bağlı olarak da devredeki yüzeylerden birisinde ısı miktarı artarken diğerinde azalır. DC güç kaynağından uygulanan enerji sayesinde elektronların sürekli olarak aynı yönde hareketi ve sürekli olarak ısı akışı sağlanır.



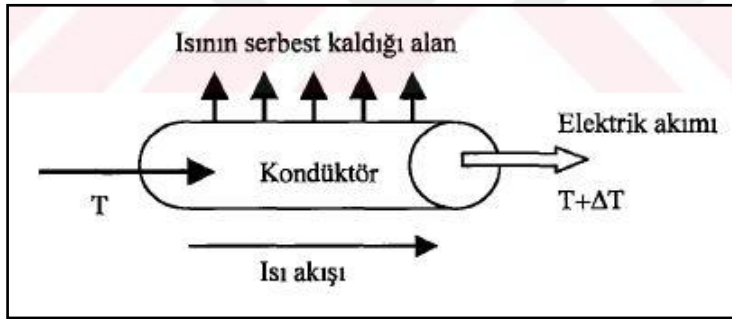
Şekil 3.12. Termoelektrik soğutucu modülün yapısı [60]

Peltier deneyinin sonucunda; farklı metallerin birleşme noktalarından geçen elektrik akımının, birleşme noktaları arasında ısı akışı sağladığı ortaya çıkmıştır. Buda termoelektrik soğutucuların altyapısını oluşturmuştur.

Termoelektrik soğutucular Peltier etkisi oluşturarak; soğutma sistemlerinde, ısıtma sistemlerinde, aynı anda hem soğutma hem ısıtmaya gereksinim duyan sistemlerde, kurutma sistemlerinde ve saf su üretiminde kullanılabilirler.

### 3.5.3. Thomson etkisi

1850'den itibaren tüm enerji çevrim şekilleri üzerine bilim adamları birçok çalışmalar yapmış ve bunun sonucunda da termodinamik gelişmelerle birlikte termoelektrik olayında yeni sonuçlar meydana çıkmıştır. 1851'de W.Thomson (Lord Kelvin) önceden bildirmiş olduğu üçüncü termoelektrik etkisi olan Thomson etkisini, deneysel metotlarla yaptığı incelemeler ve bağıntılarla kanıtlanmıştır. Şekil 1.5'te görülen Thomson etkisi; ısıtma veya soğutmada tek homojen kondüktör üzerinden akım geçtiği müddetçe sıcaklık değişim gradyanının meydana geldiğini anlatmaktadır. Isı akım ve gradyanının yönüne bağlı olarak absorplanır veya serbest bırakılır. Aynı yönde elektrik akımı varsa ısı aktığı için özellikle daha çok serbest bırakılır. Aksi takdirde ısı absorplanır. Birim uzunlukta absorbe edilen güç  $q$ , sıcaklık farkıyla  $dT/dx$  ve elektrik akımı  $I$  doğru orantılıdır [61].



Şekil 3.13. İletken bir telde oluşan Thomson etkisi [61]

### 3.5.4. Termoelektrik jeneratör (TEJ)

Sıcaklık farkının elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemi günümüzde termoelektrik jeneratörler ile yapılmaktadır. Termoelektrik jeneratör (TEJ), termoelektrik etkilere göre çalışmaktadır. Termoelektrik jeneratörler, iç yapısı ve dış yapısı olmak üzere iki ana bölümde incelenebilir.

#### Termoelektrik jeneratörün dış yapısı

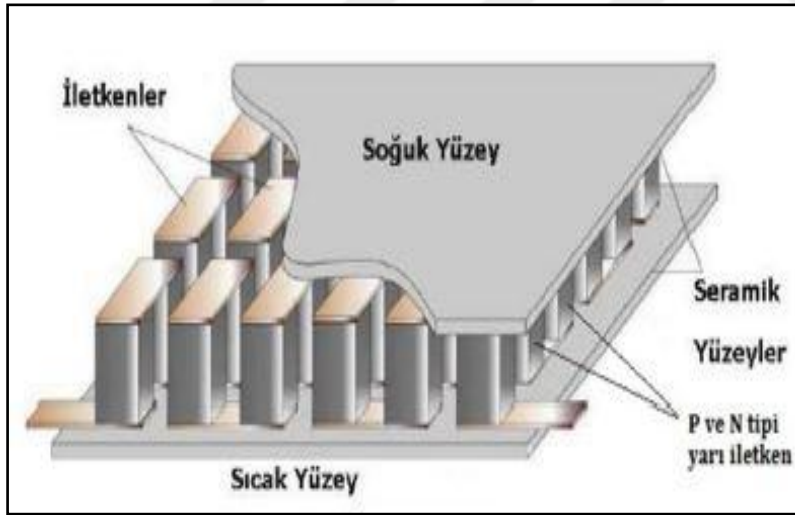
Termoelektrik jeneratörün dış yapısı iki tane iletken kablo ve birbirine paralel iki plakadan oluşur. İletken kabloların görevi termoelektrik etki oluşturulması için elektrik enerjisini iletme ve ya termoelektrik etkiler sonucunda iç devrede oluşan elektrik enerjisinin dış devrelere bağlantısının sağlanması için elektrik akımını taşımaktır. Plakalar ise yüksek

sıcaklık değerlerine ve ani ısı değişimlerine karşı dayanıklı olan, ısıyı iyi iletme özelliğine sahip (seramik, grafit ve benzeri) maddelerden yapılmaktadır.

### Termoelektrik jeneratörün içyapısı

Termoelektrik jeneratörün iç kısmında P ve N tipi yarıiletken maddeler ile iletken levhalar bulunmaktadır. P tipi ve N tipi maddeler farklı özelliklere sahip olduğundan sıcaklık farklılıklarına farklı tepkiler gösterirler ve iletken levhalarda yarıiletken maddeler arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlarlar. İletken levhaların bir diğer işlevi de yüzeylerde oluşan farklı sıcaklıkların seramik yüzeylere transferini gerçekleştirmektir.

Şekil 3.14'te bir termoelektrik modülün içyapısı görülmektedir. Bu modüllerin içerisinde birçok P-N birleşim noktaları bulunmakta ve bu birleşim noktaları da birbirine bağlanmaktadır. P ve N maddelerinin yapısında performansı arttırmak amacıyla elektron miktarını azaltacak ya da arttıracak olan özel katkı maddeleri de kullanılmaktadır.



Şekil 3.14. Termoelektrik modülün içyapısı [62]

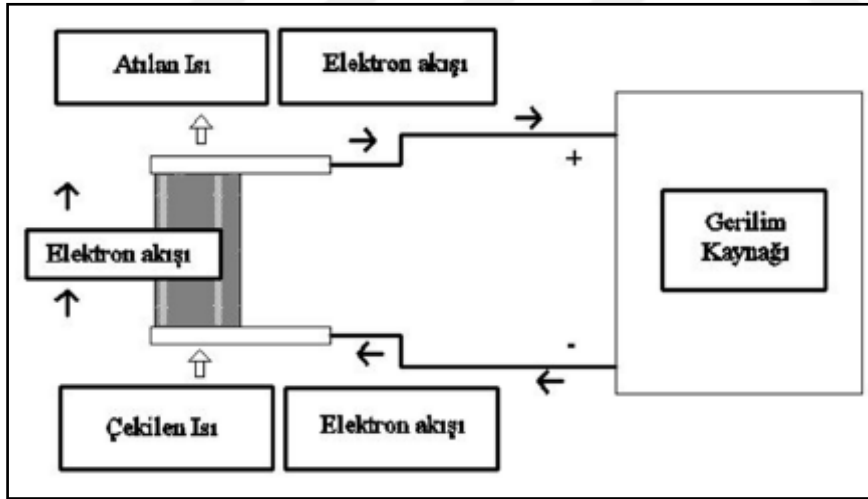
Modül içindeki yarı iletken maddeler ve iletkenler iki adet seramik plaka arasında kullanılacak ortamdan yalıtılmıştır. Böylece hem modülü oluşturan küçük parçaların bütünlüğü hem de hassas parçaların nem, toz ve ortam sıcaklığına direkt teması gibi unsurlardan korunması sağlanmıştır.

### P ve N tipi maddeler

P tipi ve N tipi maddelerde elektron akışı, sıcaklık farkı değeri ve ısı transferinin yönüne göre farklı özellikler göstermektedir. İletken veya yarıiletken malzemenin ısınması ile elektronlar, elektronca zengin olan bölgeden fakir olan bölgeye doğru ilerlemekte ve bunun sonucunda bir elektriksel potansiyel üretilmektedir.

### N tipi maddeler

Tüm termoelektrik soğutma sistemlerinin temel yapı taşı, bir DC gerilim kaynağından beslenen termoelektrik elemandır. Bu eleman, yüksek katkılı bir yarıiletken malzemenin, sıcak ve soğuk yüzeyleri oluşturan iki plaka arasına preslenmesi sonucunda meydana gelir. Şekil 3.15'teki n-katkılı malzemenin özelliği çok miktarda serbest elektronlar içermesidir. Bu elektronlar uygulanan gerilimin etkisiyle bir plakadan diğerine akarken, plakanın ısınımsını da beraberlerinde taşırlar. Bu nedenle ısı akımı, elektron akımıyla aynı yöndedir [63].

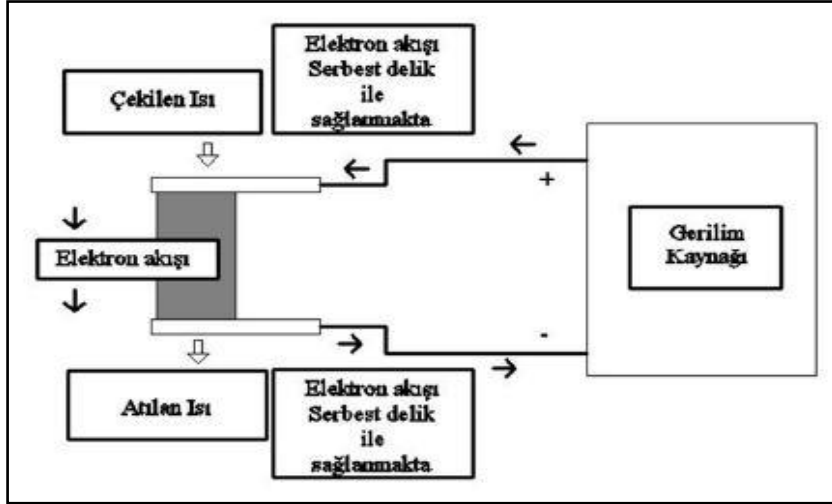


Şekil 3.15. N-tipi termoelektrik elemanın şematik görünümü [62].

### P tipi maddeler

Şekil 3.16'daki p-katkılı malzemeye üretilen elemanlarda ise elektrik akımı serbest "delikler" tarafından taşınmaktadır. Isı akımı da "delik" hareketiyle aynı yönde gerçekleşmektedir. Dikkat edilecek olursa, aynı yönde uygulanan gerilim altında p ve n katkılı malzemeler ısıyı zıt yönde iletmektedir [62].

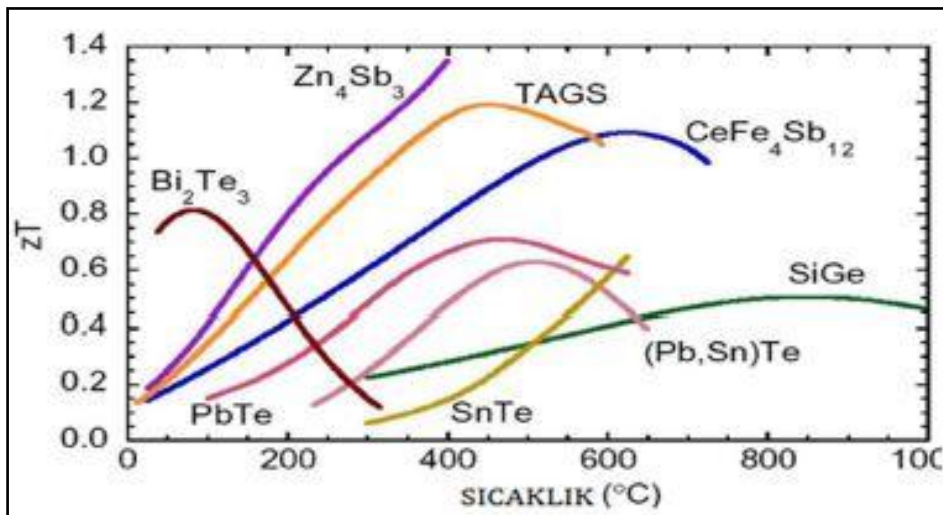




Şekil 3.16. P-tipi termoelektrik elemanın şematik görünümü [62].

### Yarı iletken malzemeler

Şekil 3.17’de farklı yarı-iletken malzemelerin sıcaklığa bağlı verimlerini ifade eden  $zT$  katsayısını gösteren bir grafik görülmektedir. Yarı-iletken malzeme olarak en çok bizmut-tellürit ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) kullanılmakla birlikte, bazı özel uygulamalarda kurşun-tellürit ( $\text{PbTe}$ ), silisyum-germanyum ( $\text{SiGe}$ ) ya da bizmut-antimon ( $\text{Bi-Sb}$ ) alaşımlarından da faydalanılmaktadır. Bizmut-tellürit, yüksek termoelektrik verimi ve uygun sıcaklık aralığı nedeniyle tercih edilmektedir. [62].

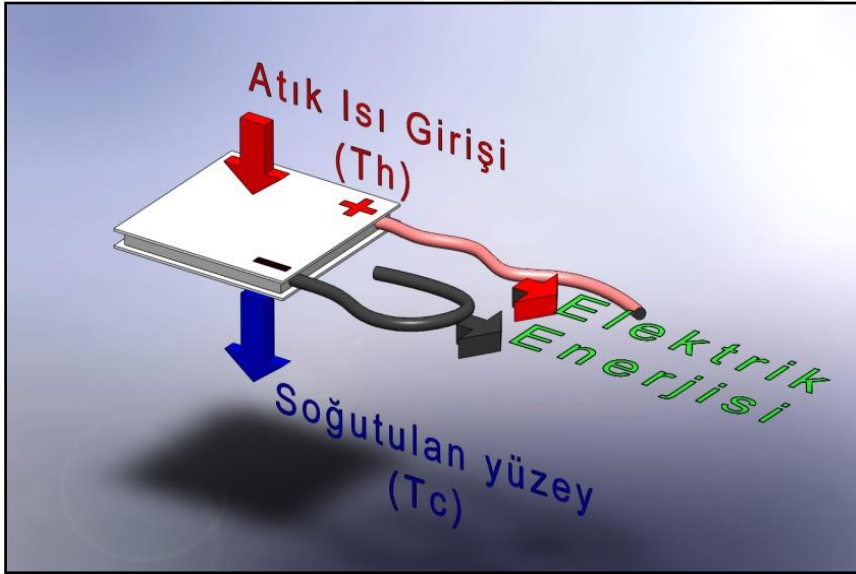


Şekil 3.17. Farklı yarı-iletken malzemelerin sıcaklığa bağlı verimleri [62]

Kullanılan yarı iletken malzemelerin verimleri arttıkça termoelektrik modüllerinde verimleri artmakta ve daha yüksek  $zT$  değerine sahip modüller üretilmektedir.

### Termoelektrik jeneratörün atık ısı enerjisi ile çalışma prensibi

Şekil 3.18’de termoelektrik jeneratörün atık ısı enerjisini kullanarak çalışması modellenmiştir. Termoelektrik jeneratörden elektrik enerjisi elde etmek için TEJ’in bir yüzeyine ortam sıcaklığından yüksek sıcaklık ( $T_h$ ) değeri uygulanmalıdır. Diğer yüzeyine ise ısıtılan yüzey sıcaklığı  $T_h$  değerinden daha düşük bir sıcaklık ( $T_c$ ) değeri uygulanmalıdır. Böylece TEJ’in bir yüzeyi ısıtılarak, diğer yüzeyi soğutulularak iki yüzey arasında bir sıcaklık farkı oluşacaktır. Bunun sonucunda TEJ’in çıkış uçlarından elektrik enerjisi üretilmiş olacaktır. Sıcaklık farkı ( $\Delta_T$ ), ne kadar fazla ise TEJ’in çıkış uçlarından elde edilen elektrik enerjisinin miktarı da o kadar fazladır. TEJ’lerin duyarlılığı yüksek olduğundan, sıcaklık farkı ne kadar küçük olursa olsun ( $1\text{ }^\circ\text{C} > \Delta_T$  olsa bile) TEJ in çıkışından çok küçükte olsa bir voltaj değeri ölçülebilecektir.



Şekil 3.18. Termoelektrik jeneratör ile elektrik enerjisi üretimi

Termoelektrik jeneratörlerin, termopil olarak ta adlandırıldığı bilinmektedir. Yüzeylerinde sıcaklık farkı olduğu sürece bir pil gibi elektrik enerjisi gereksinimi için kullanılabilirler. Elektrik enerjisinin gereksinimine göre sistemde kullanılan TEJ’lerin sayısı artırılarak, elde edilebilecek elektrik enerjisinin miktarı da artırılabilir. TEJ’ler de elektrik enerjisi sağlamak amacıyla birbirlerine seri bağlantı, paralel bağlantı ve ya karışık bağlantı (hem seri hem de paralel) şekillerinde bağlanabilirler.

### 3.5.5. Termoelektrik modüllerin avantajları ve dezavantajları

Termoelektrik modüllerin avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır ve bu avantajlar malzeme biliminin gelişmesine bağlı olarak artacaktır [63,64].

- Hareketli parçaları bulunmaz.
- Çevreye hiçbir zararı yoktur.
- Bileşiminde hiçbir gaz ve ya sıvı madde kullanılmaz.
- Çalışma sırasında ses ya da elektriksel gürültü oluşturmazlar.
- Bakım ve onarım gerektirmezler.
- Yer çekimine karşı duyarlı olmadığından herhangi bir konumda (uzay uygulamaları gibi) kullanılabilirler.
- Göreceli olarak çok küçük boyutta ve hafiftirler.
- Geniş aralıkta soğutma kapasitesi (Tek bir TE modül için miliwattlardan 350 W'a kadar)
- Yüksek dayanıklılık, kararlı durumda 300 000 saati aşkın çalışma süreleri vardır.
- Hassas sıcaklık ayarı (uygun bir kontrolörle 10-5 K'e kadar hassas ayarlama) yapabilirler.
- Soğutulan tarafın yönü güç kaynağının polaritesi değiştirilerek kolayca değiştirilmesi böylece soğutma ve ısıtma arasında kolay geçiş sağlanabilir.
- Geleneksel soğutma uygulamaları için çok küçük ya da hassas olan uygulamalar için daha güvenilirlerdir.
- Taşınan ısı miktarının akımla kolayca kontrol edilebilir.
- Bölgesel soğutma yeteneği vardır.

Termoelektrik modüller birçok avantajının yanında, birkaç probleme de sahiptirler ve bu problemler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [63,64].

- Şuan için pahalıdırlar.
- DC ile çalıştıklarından çeviriciye ihtiyaç duyarlar.
- COP katsayıları genellikle 0,3 ila 1 arasındadır. Klasik soğutucularda ise bu değer daha yüksektir.

- Yüksek soğutma yükleri için uygun değillerdir. Maksimum soğutma yükleri başta da belirtildiği gibi  $\Delta T = 0$  °C de olmaktadır yani  $\Delta T$  değeri büyüdükçe soğutma yükleri düşer.

Dünyada, enerji güvenliğinin sağlanması ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. İçten yanmalı motorlarda termoelektrik jeneratörlerin kullanılarak atık ısıların geri kazanılması taşıtlarda yakıt ekonomisini arttırmak, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için alternatif bir yeşil enerji teknolojisidir [65].

Performansı daha yüksek Termoelektrik modüllerin, daha düşük maliyetle üretilmesiyle önümüzdeki yıllarda kullanımları daha da yaygınlaşacaktır. Bu nedenle günümüz teknolojisinde termoelektrik jeneratörlerle elektrik üreten sistemler tasarlanmalı, daha verimli modüller üretildiğinde mevcut sistemlere adapte edilerek daha verimli şekilde kullanılmalıdır.



#### 4. TEORİK ANALİZ

Termoelektrik jeneratörlerin soğuk yüzey sıcaklığı  $T_c$ , sıcak yüzey sıcaklığı  $T_h$ , maksimum gücü  $P_{max}$  gibi parametreleri ticari olarak üretimde bulunan firmalar tarafından belirtilir. Maksimum gücün elde edilmesinde termoelektrik jeneratör iç direnci  $R$ , yük direnci  $R_L$  olmak üzere, yük karşılaşmasındaki ( $R_L=R$ ) yük gerilimi  $V_{max}$  ( $=VR$ ) ve maksimum verimlilik  $\eta_{max}$  olacaktır. Bu değerler kullanılarak devrenin elektriksel parametreleri hesaplanabilir. Bir termoelektrik jeneratörün verimliliğın yüksek olmasında; Seebeck sabitinin  $\alpha$  büyük, elektriksel direnç  $R$  ve termal iletkenliğın  $\kappa_{th}$  düşük değerde olması etkilidir. Termoelektrik jeneratörlerde kalite faktörü Eşitlik 4.1 ile hesaplanır [65,66].

$$Z = \frac{\alpha^2}{R \cdot \kappa_{th}} \quad (4.1)$$

Termoelektrik jeneratörün elektrik direnci  $R$  Eşitlik 4.2 ile hesaplanır.

$$R = R_L = \frac{V_{max}^2}{P_{max}} \quad (4.2)$$

Termoelektrik jeneratörün verimliliğı yüke bağılı olarak değışir. Yük direnci  $R_L=m.R$  olduğı varsayılır. Burada  $m$  yük direncinin iç dirence oranıdır. Akım denklemi ise Eşitlik 4.3 ile belirlenir.

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{[(1+m) \cdot R]} \quad (4.3)$$

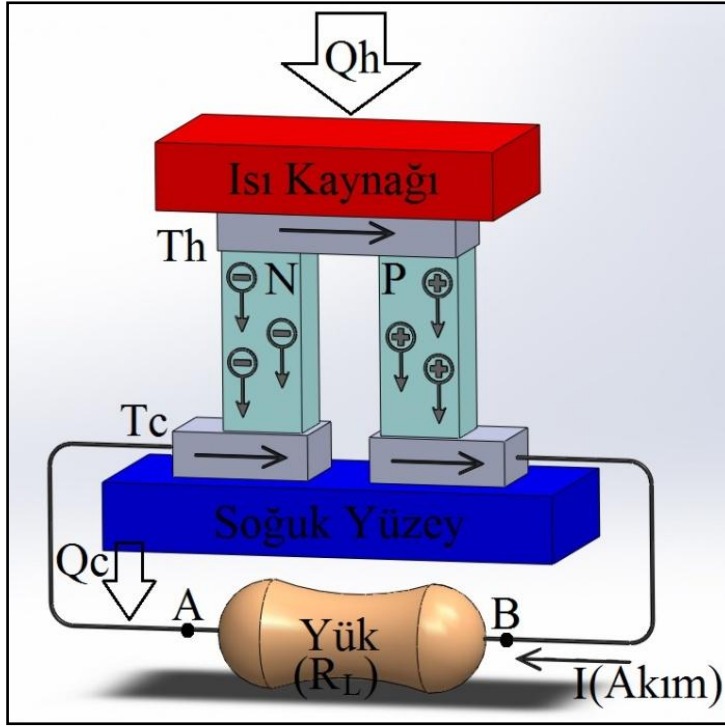
Termoelektrik jeneratörün verimliliğı elektrik güç çıkışının sıcak yüzeye uygulanan termal güç girişine oranıdır ve Eşitlik 4.4 ile bulunabilir.

$$\eta = \frac{I^2 \cdot R_L}{Q_H} \quad (4.4)$$

Termoelektrik jeneratörün termal iletkenliğı Eşitlik 4.5 ile hesaplanır [65,66].

$$\kappa_{th} = \frac{\alpha^2}{R \cdot Z} \quad (4.5)$$

Şekil 4.1’de basit bir mikro modül – termo çift modellenmiştir. Güç üretimi ve soğutma amaçlı kullanılan termoelektrik modüller çok sayıda termo çiftin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Şekil 4.1’de termo çiftin ısı kaynağı olan yüzeyine  $T_h$ , soğuk yüzeyine  $T_c$  sıcaklıklarının uygulandığı görülmektedir. Burada  $T_h$  sıcaklığı,  $T_c$  sıcaklığından büyük olduğundan devrede bir  $I$  akımı meydana gelmektedir.



Şekil 4.1. Basit bir termo çift katı modellemesi

Termo çiftte,  $R_L$  yükü olmadan A ve B noktaları arasındaki ölçülen açık devre gerilimi;  $V = \alpha \cdot \Delta T$  formülü ile hesaplanır. Termo çiftin uçlarına bir yük bağlandığında ise yükten geçen akım Eşitlik 4.6 ile belirlenir.

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{(R_c \cdot R_L)} \quad (4.6)$$

Termoelektrik mikro modüle toplam ısı ( $Q_h$ ) girişi Eşitlik 4.7 kullanılarak hesaplanır.

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_c + K_c \cdot \Delta T \quad (4.7)$$

Jeneratörün verimi ( $E_g$ ) Eşitlik 4.8 ile belirlenir.

$$E_g = \frac{V_o I}{Q_h} \quad (4.8)$$

Tam bir modül bir sıra termoelektrik mikro modülden meydana geldiğinden, gerçek bir modüle ait denklem Eşitlik 4.9'daki gibi olacaktır [65,66].

$$V_o = \alpha_M \cdot \Delta T = I \cdot (R_M \cdot R_L) \quad (4.9)$$

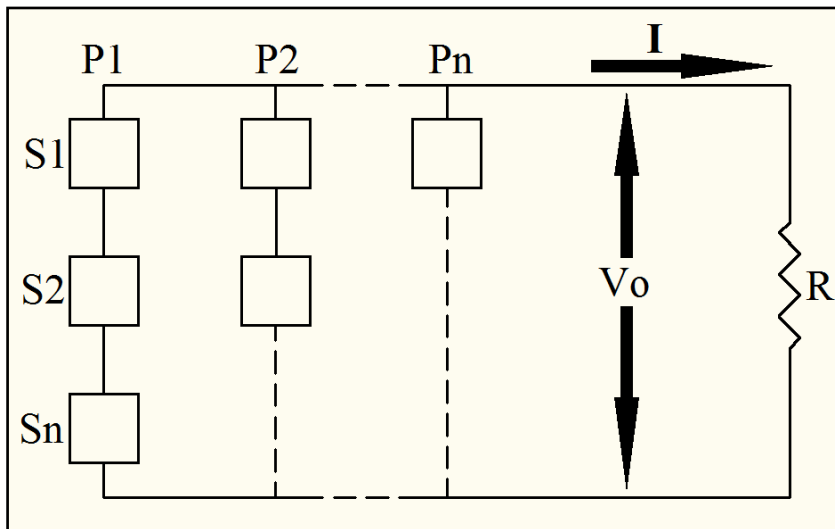
Ortalama modül sıcaklığı Eşitlik 4.10 yardımıyla belirlenir.

$$T_{avg} = \frac{(T_h + T_c)}{2} \quad (4.10)$$

Modülün güç çıkışı,  $P_o$ , Eşitlik 4.11 ile hesaplanır.

$$P_o = R_L \cdot [ (\alpha_M \cdot \Delta T) / (R_M \cdot R_L) ]^2 \quad (4.11)$$

Sonuç olarak, termoelektrik jeneratörlerin büyük bir kısmı elektriksel olarak seri, paralel veya seri - paralel düzende bağlı olan çok sayıda bireysel modülden oluşmaktadır. Bir termoelektrik jeneratörün iç yapısı Şekil 4.2'de görüldüğü gibi  $P_n$  adet paralel ve her paralel kolda  $S_n$  adet seri modülün birleşiminden meydana gelmektedir [66].



Şekil 4.2. Basit bir termo çiftin seri ve/veya paralel bağlantı şekli



#### 4.1. Belirsizlik Analizi

Deneyler yapılırken elde edilen verilerinin doğruluğu oldukça önemlidir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları farklı hassasiyet değerlerine sahiptir. Ölçümler yapılırken, cihazların hassasiyetlerinin neden olduğu belirsizlikler hesaplanmalıdır. Bu çalışmadaki belirsizlik analizi, aşağıdaki Eşitlik 4.12 kullanılarak hesaplanmıştır [67].

$$W = [(x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots + (x_n)^2]^{1/2} \quad (4.12)$$

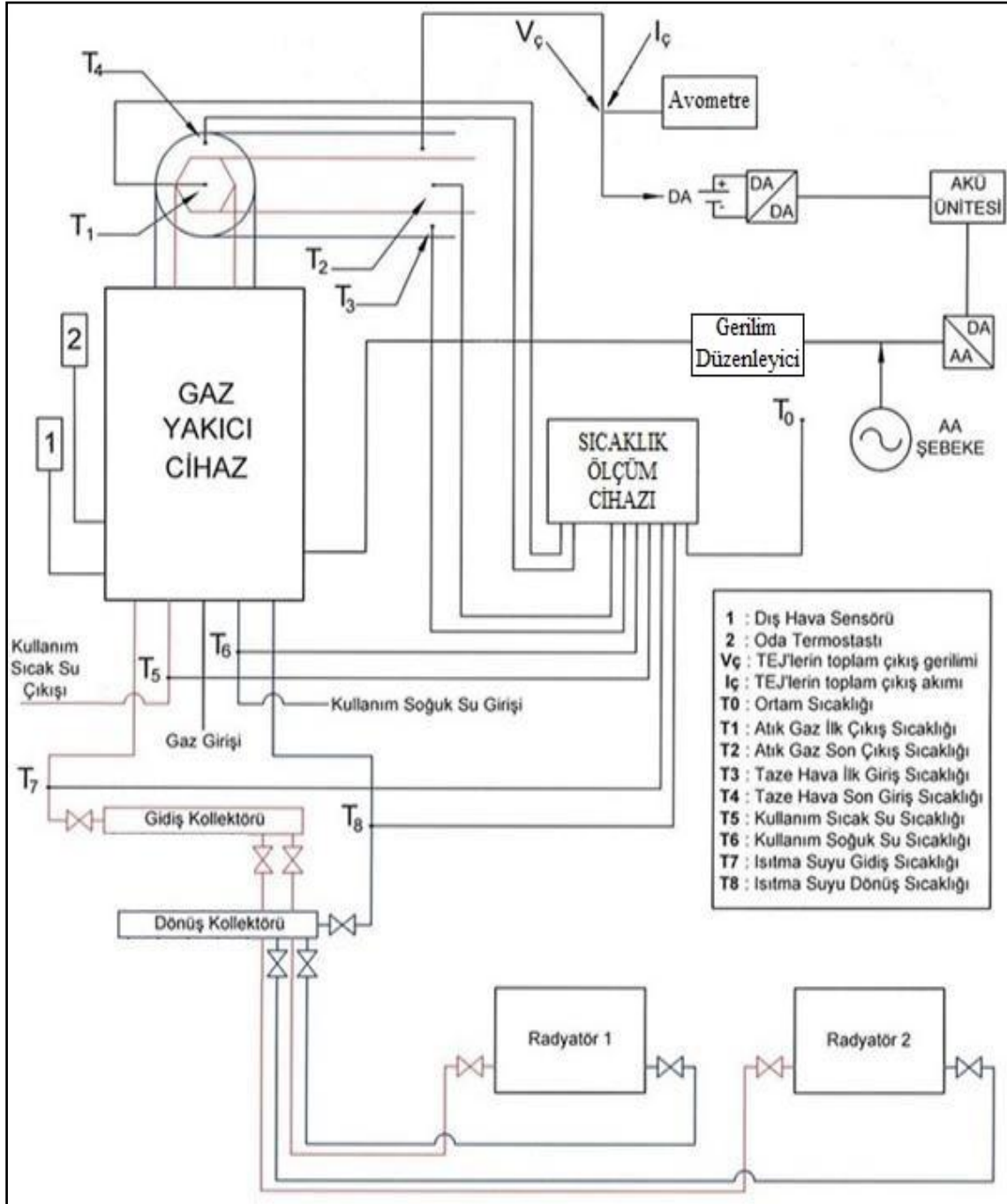
Bu çalışmada kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyeti ve belirsizliğini belirlemek için yapılan belirsizlik analizi hesaplaması sonucunda elde edilen sonuçlara ait veriler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ölçüm cihazlarının hassasiyeti ve belirsizliği

Ölçülen özellikler	Marka	Hassasiyet	Belirsizlik
Sıcaklık	Elimko	$\pm 1^\circ\text{C}$	$\pm 0.91^\circ\text{C}$
Gerilim	UT61A	$\pm 1\text{ V}$	$\pm 0.3\text{ V}$
Akım	UT61A	$\pm 1.2\text{ A}$	$\pm 0.6\text{ A}$

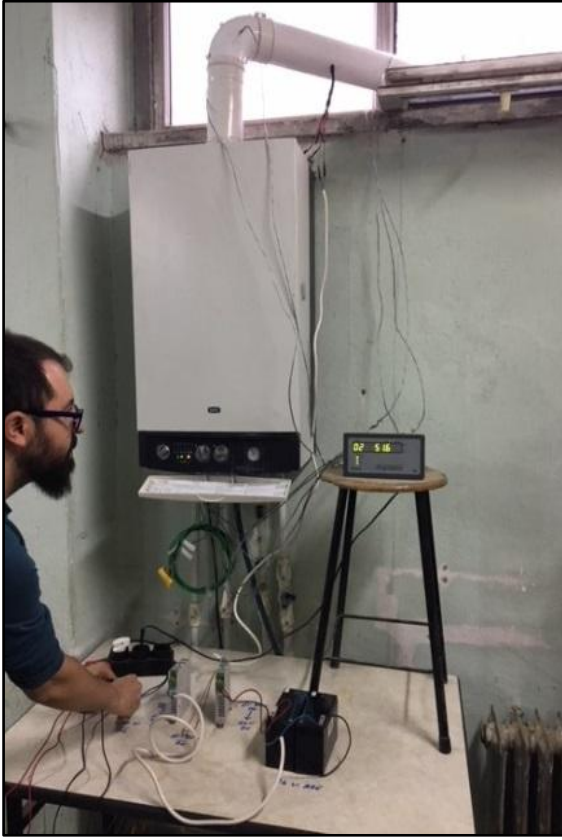
## 5. MATERYAL VE METOT

Tasarımı yapılan deney düzeneği Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü bünyesindeki atölye ve laboratuvar imkânları kullanılarak kurulmuştur. Şekil 5.1’de deney düzeneğine ait şematik görünümü görülmektedir.



Şekil 5.1. Deney setinin şematik görünümü

Resim 5.1'deki deney düzeneğinde 24 kW gücünde Baymak marka Luna 3 model hermetik tip kombi kullanılmıştır. Deney setinde kullanılan kombi için gerekli olan yanma havasının temin edilmesini ve yanma sonucu oluşan atık gazın atmosfere atılmasını sağlayan denge bacası tarafımızdan tasarlanmış ve Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Biriminin desteğiyle imal edilmiştir. Tasarlanan ve imalatı yapılan denge bacası bundan sonraki bölümlerde Termoelektrik Baca Sistemi olarak adlandırılacak ve TBS sembolü kullanılacaktır.



Resim 5.1. TBS deney düzeneği

TBS imalatında; termoelektrik jeneratörler, termal macun ve alüminyum sac plaka kullanılmıştır. Bunlara ek olarak kullanılan lehim havyası, avometre, lehim havyası, lehim teli, lehim pastası, lavabo, vida, dübel, matkap ucu, sızdırmazlık elemanları (keten, teflon, sülyen (bezir yağı vb.) ile sistem kurulumu için gerekli olan makine ve el aletleri bölümümüz mevcut imkânları kullanılarak sağlanmıştır.

## 5.1. Termoelektrik Baca Sistemi

Termoelektrik baca sistemi oluşturulurken; standart dışı baca borusu ve termoelektrik jeneratörlere ek olarak, tasarlanan ve imal edilen beşgen iç baca borusu kullanılmıştır.

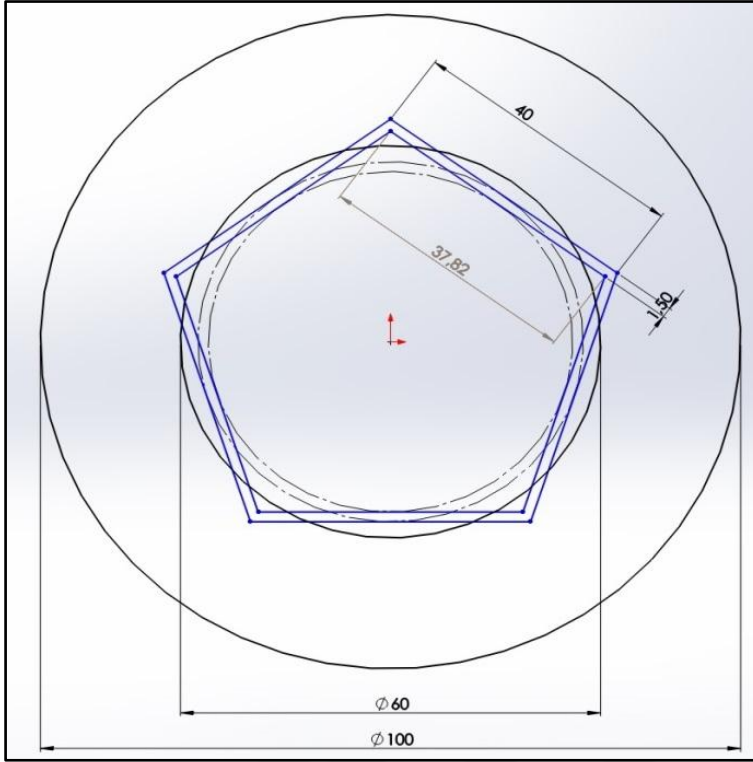
### 5.1.1. Hermetik baca borusu

Hermetik kombilerin iç baca borusu yanma için gerekli olan havayı atmosferden fan vasıtasıyla alırken, hava atık gazın sıcaklığı ile ısınarak yanma odasına girer. Bu nedenle Hermetik kombilerin iç baca borusu ısı iletim katsayısı yüksek olan alüminyumdan üretilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan TBS iç baca borusu, 1,5 mm kalınlığındaki alüminyum sacdan bir kenarı 4 cm ve 40 cm uzunluğunda beşgen şeklinde imal edilmiştir. Resim 5.2’de tasarımı ve imalatı yapılan iç baca borusu görülmektedir.



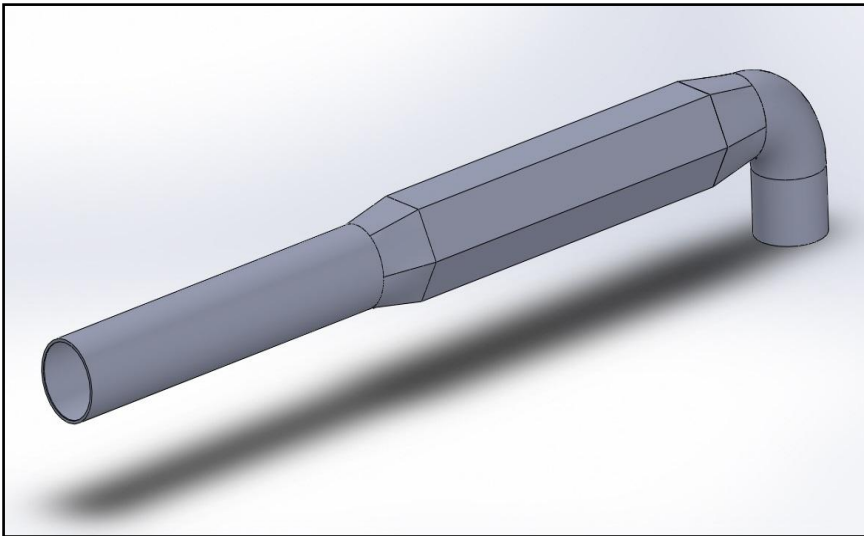
Resim 5.2. Tasarımı ve imalatı yapılan iç baca borusu

Alüminyum plakaya şekil verme işlemi elektrikli ve açı ayarlı saç bükme makinesi ile yapılmıştır. Tek parça halinde bükülen iç baca borusunun iki ucu TİG kaynağı yöntemiyle birleştirilerek beşgen şeklinde imal edilmiştir. TEJ’lere zarar gelmemesi ve ısı transferinin verimli olması için TEJ’lerin monte edileceği yüzeyler temizlenmiştir. Atık gaz sıcaklığının ölçülebilmesi için termokuplların ölçülerine uygun iç ve dış baca borunun iki ucuna 6 mm çapında delikler açılmıştır. Şekil 5.2’de imalatı yapılan TBS iç baca borusu geometrik ölçüleri görülmektedir.



Şekil 5.2. Beşgen TBS iç baca borusu imalat ölçüleri

Beşgen baca borusunun geometrik şekli standart baca borusundan farklıdır. Bu nedenle beşgen baca borusunun sisteme montajı için giriş ve çıkış kısımları 6 cm çapında standart baca borusuna dönüştürülmüştür. Şekil 5.3'te iç baca borusunun tamamlanmış hali modellenmiştir.



Şekil 5.3. İç baca borusunun tamamlanmış hali

Dış baca borusu ise 100 mm çapında ve 100 cm uzunluğunda standart ölçülerdedir. Dış baca borusunun iki ucuna da iç baca borusunda olduğu gibi temiz hava giriş ve çıkış sıcaklığını ölçmek için termokupulların ölçülerine uygun 6 mm çapında delikler açılmıştır.

### 5.1.2. TEG2-07025HT-SS termoelektrik jeneratör özellikleri

TBS'nin kurulumunda kullanılan Tecteg firmasının TEG2-07025HT-SS model termoelektrik jeneratörüne ait sıcaklık farkına bağlı güç değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Modülün yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluştuğunda, uçlarında DC akım meydana gelmektedir. Modül maksimum 190 °C sıcaklığa dayanabilmektedir.

Çizelge 5.1. TEG2-07025HT-SS modülün çeşitli sıcaklık farklarında güç değerleri

Sıcaklık Farkı (°C)	Eşdeğer Gerilim (V)	Eşdeğer Akım (A)	Maksimum Güç (W)
50	0,6	1,1	0,66
80	1,0	2,0	2,00
100	1,3	2,2	2,86
120	1,4	2,4	3,36
150	1,8	3,0	5,40
170	1,9	3,2	6,08
180	2,0	3,4	6,80

Resim 5.3'de TBS'de kullanılan TEJ modülün yüzeyleri grafit levhalardan oluşmaktadır. Modül geometrik olarak 40 x 40 x 4 mm boyutlarındadır. Kırmızı ve siyah renkte iki tane çıkış ucu bulunmaktadır.



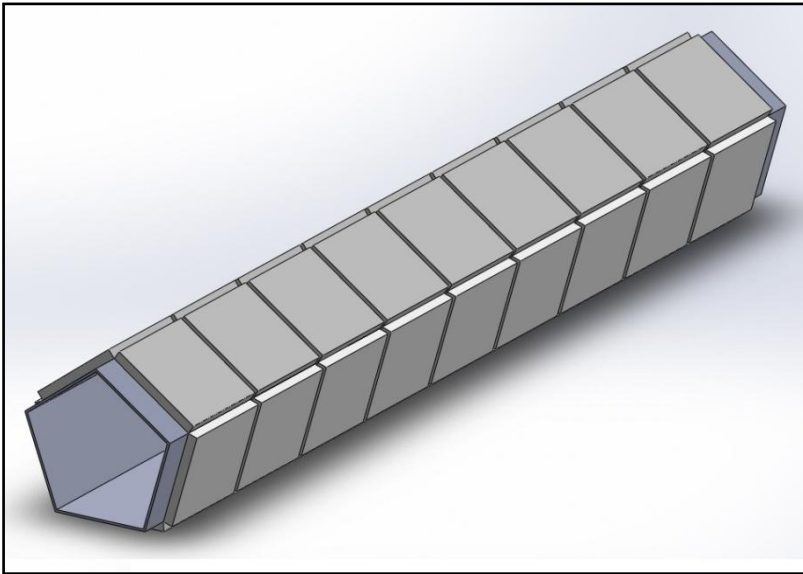
Resim 5.3. TEG2-07025HT-SS modül

Termoelektrik modüller hassas elemanlar olduğundan; üretimden kaynaklanan hatalar veya üretimden sonra kullanıma kadar geçen süreçteki yanlış müdahalelerden dolayı arızalanabilmektedir. Böyle bir durumda TEJ'lerin iç yapısındaki birleşme noktaları veya çıkış uçlarında oluşabilecek temassızlıklardan dolayı TEJ çıkışında bir voltaj ölçülememektedir.

Termoelektrik jeneratörlerin sağlamlık kontrolü için voltmetre ve alüminyum soğutucu kullanılmıştır. Termoelektrik jeneratörün çıkış uçları voltmetreye bağlanmış ve voltmetre mV kademesine getirilerek termoelektrik modülün bir yüzeyi alüminyum soğutucuya temas ettirilmiş ve yüzeyi sıcaklığı ortam sıcaklığının altına düşürülmüştür. Sağlamlık kontrolü yapılırken avuç içi TEJ'in ısıtılması gereken yüzeyine temas ettirilerek vücut ısısından yararlanılmıştır. Bu durumda voltmetrede çok küçük bir gerilim değeri ölçülmüştür. Satın alma yoluyla tedarik edilen TEJ'lerin sağlamlığı bu şekilde tek tek kontrol edilmiştir.

### 5.1.3. Termoelektrik jeneratörlerin iç baca borusuna montajı

Şekil 5.4'te TEJ'lerin montajı sonrası TBS iç baca borusunun şekli görülmektedir. İlk olarak TEJ'lerin iç baca borusuna temas edecek yüzeyinde ısı transferini arttırmak için termal macun kullanılmıştır.



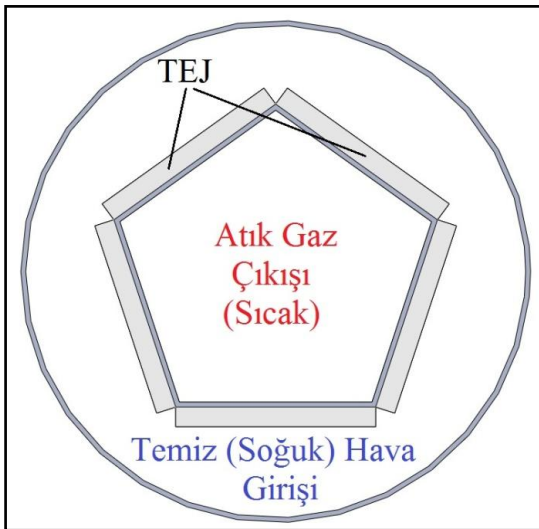
Şekil 5.4. TBS iç baca borusuna termoelektrik jeneratörlerin montaj detayı

Termoelektrik jeneratörlerin elektriksel bağlantıları gerilimi artırmak için birbirine seri olarak lehimlenmiştir. Beşgen baca borusunun her yüzeyine 9 adet TEJ gelmek üzere, toplam 45 adet TEJ baca borusu üzerine monte edilmiştir. Resim 5.4'te TEJ'lerin montajı tamamlandıktan sonraki TBS iç baca borusu görülmektedir.



Resim 5.4. TEJ montajları tamamlanmış TBS iç baca borusu

Şekil 5.5'te TEJ'lerin TBS iç baca borusuna montaj kesiti görülmektedir. TEJ'lerin atık gaz akışının olduğu iç baca borusuna temas eden yüzeyi ısınacak, temiz hava akışının olduğu kısımda bulunan yüzeyi ise soğuk hava akışı ile soğuyacaktır.

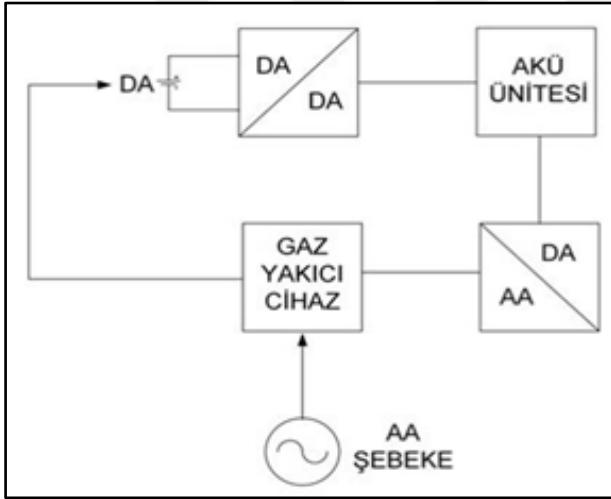


Şekil 5.5. TEJ'lerin TBS baca borusu içerisindeki görüntüsü



## 5.2. Güç Transferi ve Depolama Sistemi

Elektrik şebekesi, güç üretim sistemi, depolama birimi, DA-DA konvertör ve DA-AA invertör elektriksel bağlantısı yapılmıştır. Deney seti Şekil 5.6'da görüldüğü gibi sırasıyla 5 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler; gaz yakıcı cihazdan elde edilen doğru akımı (DA) akü ünitesine uygun hale getiren DA-DA konvertör, elde edilen enerjinin depolandığı akü ünitesi, depolanan enerjinin gaz yakıcı cihazın ihtiyaç duyduğu gerilim şekli olan alternatif akıma (AA) dönüştürülmesi için kullanılan DA-AA invertör, gaz yakıcı cihaz ve TBS'den elde edilen enerjinin yetersiz kalabileceği ve enerji üretiminde herhangi bir arıza olabilmesi durumları göz önünde bulundurularak AA şebekeden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde 2 adet 12 V, 9 A akü kullanılmıştır.



Şekil 5.6. Deney seti çalışma diyagramı

## 5.3. Ölçüm Cihazları

Sistemden elde edilen akım ve gerilim değerlerinin ölçülmesi için dijital avometre kullanılmıştır. Akım ölçmek için avometre seri, gerilim ölçmek için ise paralel bağlanarak çıkış güç değerleri ölçülmüştür.

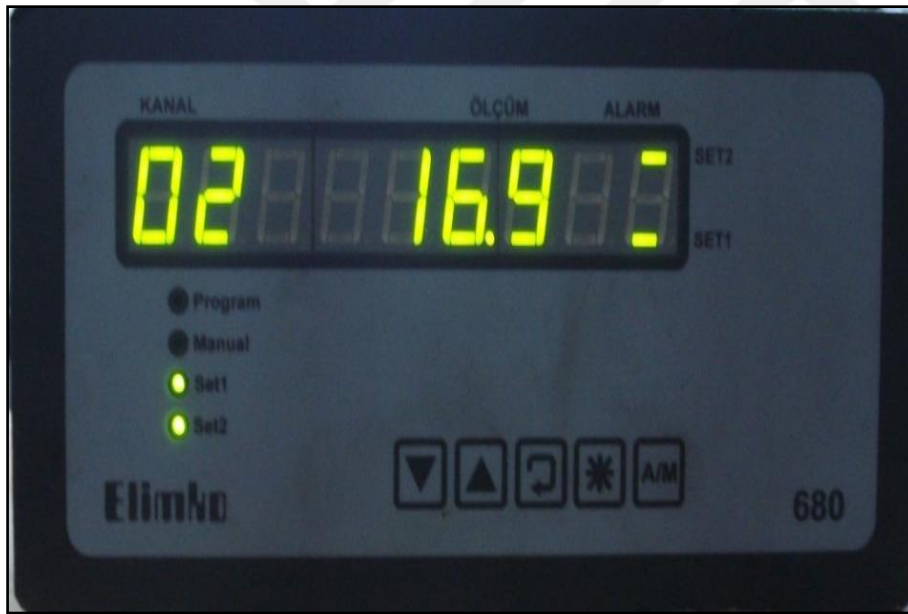
Atık gaz sıcaklığı ve temiz hava sıcaklığının ölçülmesi için 16 kanallı Elimko E-680 model sıcaklık ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümünde kullanılan ölçüm kabloları ise PT 100 RTD çelik sıcaklık probudur. İç ve dış baca borusuna monte edilen sıcaklık problemleri

ölçüm cihazına bağlanarak deney seti tamamlanmıştır. PT 100 RTD çelik sıcaklık probuna ait teknik özellikler Çizelge 5.2' de görülmektedir.

Çizelge 5.2. PT 100 RTD özellikleri

Ölçüm aralığı	-50 ~ 400 °C (-58 ~ 752 °F )
Kablo uzunluğu	2 metre
Prob uzunluğu	98 mm
Prob çapı	5 mm
Sonda malzeme	Paslanmaz

Deney esnasında dokuz noktadan ölçülen verilerin tespiti için Elimko marka E-680 Serisi universal girişli-gelişmiş tarayıcı seçilmiştir (Resim 5.5).



Resim 5.5. Elimko E-680 serisi universal girişli-gelişmiş tarayıcı

Deney esnasında dokuz noktadan ölçülen sıcaklıkların tespiti için kullanılan Elimko marka E-680 Serisi universal girişli-gelişmiş tarayıcı cihaza ait teknik özellikler Çizelge 5.3'te detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.3. Elimko E-680 sıcaklık ölçüm cihazının teknik özellikleri

	Özellikler
Doğruluk Sınıfı	0.5
Gösterge Ayırımı	1/9999
Gösterge	9 Digit LED (14 mm)
A/S Çevirim	16 bit
S/A Çevirim	12 bit
Giriş Seçme Aralığı	0.2–9.9 Saniye / Kanal
Gösterge Tarama Aralığı	1–99 Saniye / Kanal
Çalışma Ortam Sıcaklığı	-10 ÷ 55°C
T/C Ortam Sıc. Kom.	0–50°C
Kontak Formları	Alt (LO) veya üst (HI)
Sabit Band	0–9999 EU*
Çalışma Gerilimi	85–265 V AC 85–375 V DC 20–60 V AC 20–85 V DC
Güç Sarfı	Max. 10 VA
Kontak Kapasitesi	NA Kontak 250 V AC 5 amp
Giriş işareti	T/C, R/T, mA, mV, V
Ölçü Elemanı	Termokupl Rezistans termometre Diğerleri = Standart ve özel çıkışlı transmitter ve çeviriciler
Bellek	EEPROM max. 105 yazma
Ağırlık	650

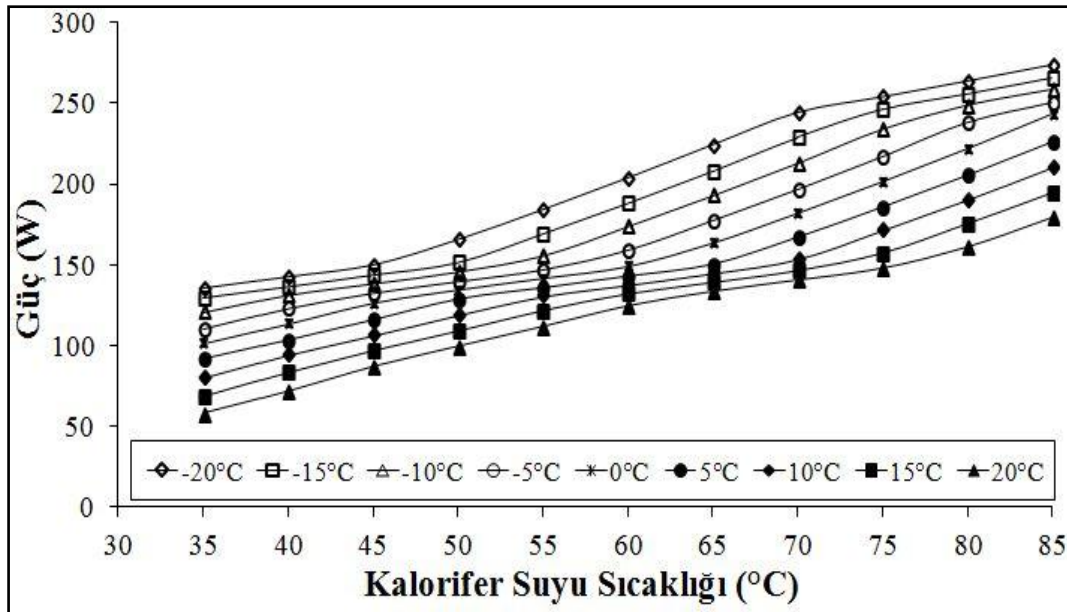
## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 6.1. Teorik Çalışma

Bu bölümde kalorifer konumu ve kullanım sıcak suyu konumunda hermetik gaz yakıcı cihazdan elde edilebilecek elektriksel parametrelere ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

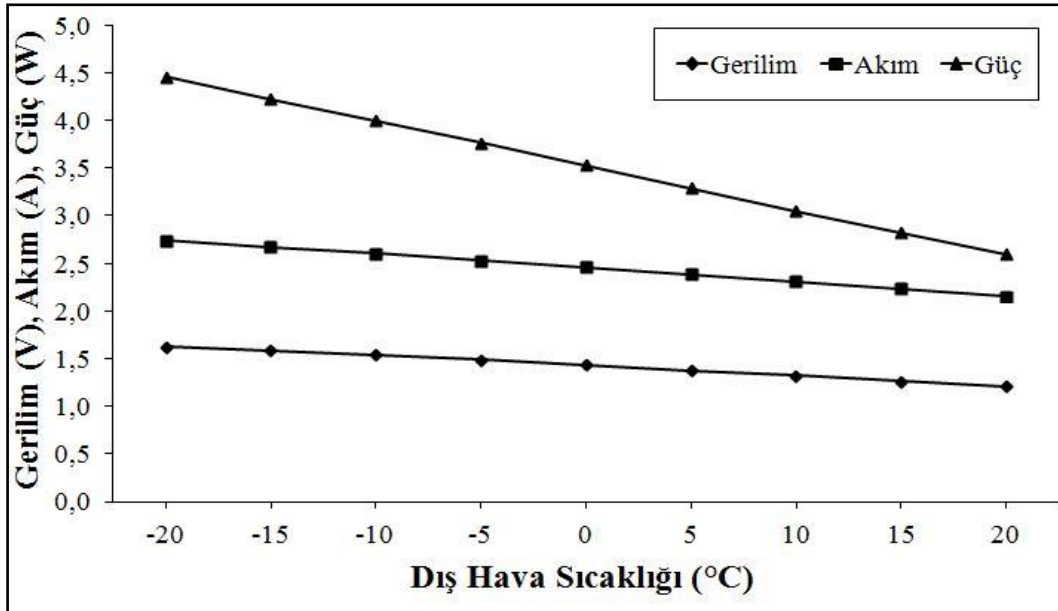
#### 6.1.1. Kalorifer konumu

Şekil 6.1’de kalorifer suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ’lerden elde edilebilecek güç değerleri görülmektedir. Hesaplamalar  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dış hava sıcaklıkları arasında  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  lik değişimlere göre yapılmıştır. Kalorifer suyu sıcaklığı ise  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasında  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralıklarla herbir dış hava sıcaklığı değerinde hesaplanmıştır. En düşük güç değeri dış hava sıcaklığı  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  olduğunda ve kalorifer suyu sıcaklığı  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de  $57,83\text{ W}$  ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  olduğunda ve kalorifer suyu sıcaklığı  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de  $273,6\text{ W}$  olarak hesaplanmıştır. Dış hava sıcaklığının azalması ve kalorifer suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak atık gaz sıcaklığının yükselmesi ile elde edilen güç miktarını arttırmaktadır.



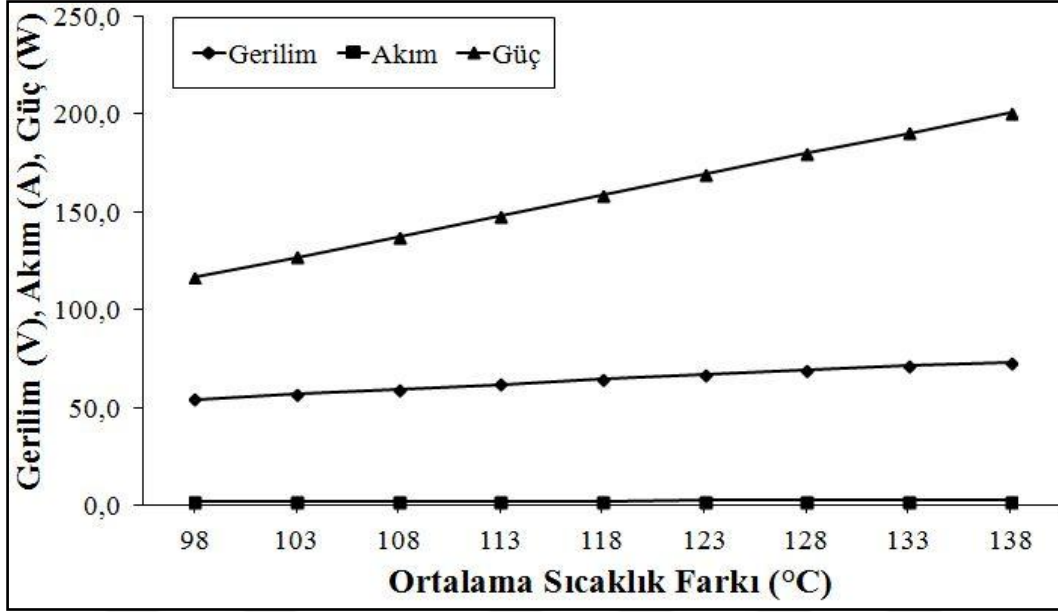
Şekil 6.1. Kalorifer suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ baca sisteminden elde edilebilecek güç değerleri

Şekil 6.2’de dış hava sıcaklığının elektriksel parametrelere etkisi görülmektedir. Dış hava sıcaklığı azaldıkça Termoelektrik jeneratörlerden elde edilebilecek ortalama akım, gerilim ve güç değerleri de artmaktadır. Dış hava sıcaklığı 20 °C iken sistemden elde edilen gerilim değerleri ortalaması 1,21 V olduğunda, akım değerleri ortalaması 2.15 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 2,59 W olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler minimum elektriksel parametrelerdir. Dış hava sıcaklığının değeri -20 °C olduğunda sistemden elde edilen gerilim değeri ortalaması 1,63 V olduğunda, elde edilen akım değeri ortalaması 2.74 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 4,46 W hesaplanmıştır. Bu değerler ise maksimum elektriksel parametrelerdir.



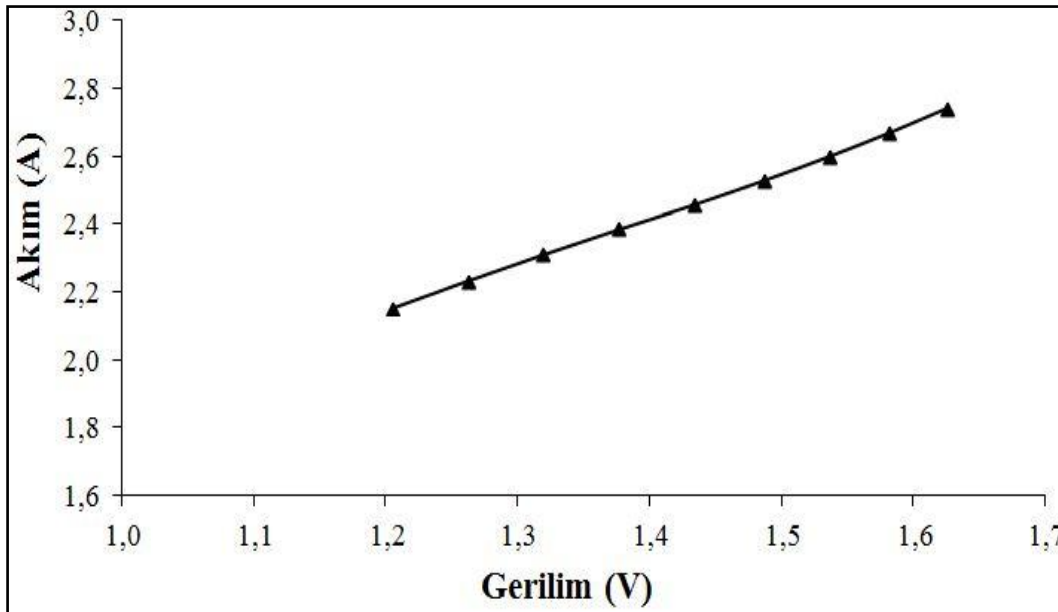
Şekil 6.2. Dış hava sıcaklığının TEJ baca sistemi elektriksel parametrelerine etkisi

Şekil 6.3’te yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS’den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir. Ortalama sıcaklık farkı, kalorifer suyu sıcaklığı değiştirildiğinde çevreye atılan atık gaz sıcaklığı ile yanma havası girişindeki dış hava sıcaklığına göre değişmektedir. En düşük ortalama sıcaklık değeri 98 °C, en yüksek ortalama sıcaklık değeri ise 138 °C olarak belirlenmiştir. Baca sistemine 45 adet TEJ gerilimi yükseltmek amacıyla birbirine seri bağlanmıştır. Sıcaklık farkına bağlı olarak ortalama gerilim değerinin 54,25 V ile 73,15 V arasında, ortalama akım değerinin 2,15 A ile 2,74 A arasında, ortalama güç değerinin ise 116,69 W ile 200,67 W arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 6.3. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri

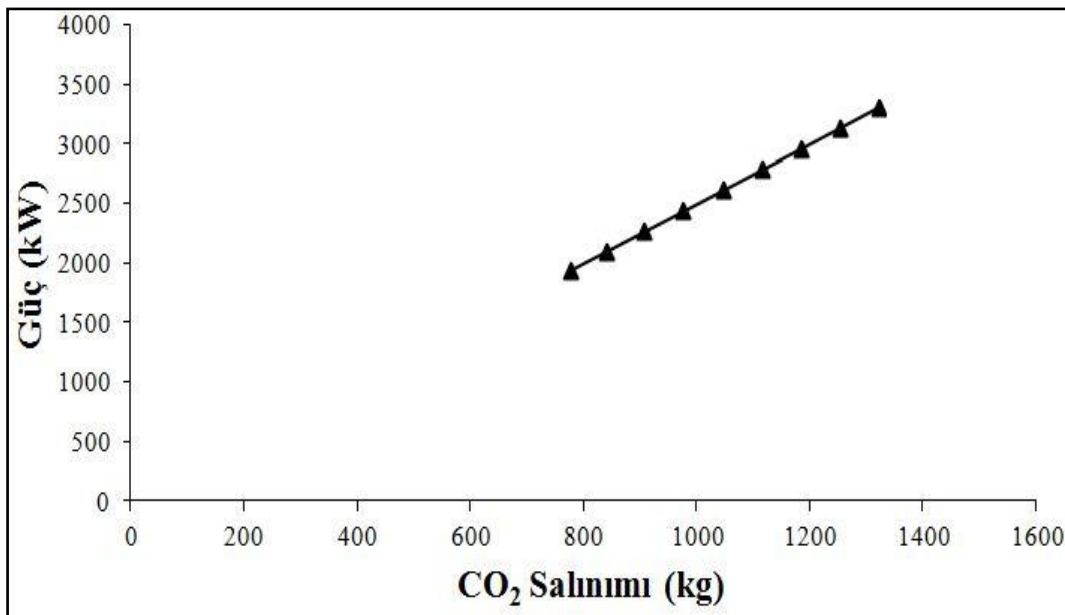
Şekil 6.4'te ortalama akım – gerilim eğrisi görülmektedir. Akım değeri 2,15 A iken gerilim değeri 1,21 V değerinde, akım değeri 2,74 A iken gerilim değeri 1,63 V değerindedir. Akım değeri arttıkça gerilim değeri de artmıştır. Buna bağlı olarak TEJ'lerden elde edilen güç miktarının da arttığı görülmektedir.



Şekil 6.4. Akım – Gerilim Eğrisi

Şekil 6.5'te üretilebilecek güç değerine bağlı olarak azalacak CO<sub>2</sub> salınımı miktarı görülmektedir. Gaz yakıcı cihazlarda fosil yakıtların yanması ile ısı enerjisi elde edilmekte bu enerjinin bir kısmı kullanılmadan baca gazları ile çevreye atılmaktadır. Tasarlanan sistemde atık gaz sıcaklığından elektrik enerjisi üretileceğinden, elde edilen enerjinin santrallerde üretilmesi sonucunda çevreye atılan CO<sub>2</sub> gazları oluşmayacaktır. Termik santrallerde 1 kWh elektrik enerji üretimi için çevreye ortalama olarak 0,4 kg CO<sub>2</sub> salınır. Fakat tek tek yakıtlara baktığımızda yerli kömürlü santrallerde bu değer 0.59 kg CO<sub>2</sub>'ye ulaşır [68]. Şekil 6.5'teki değerler 1 kWh elektrik üretimi için 0,4 kg CO<sub>2</sub> salınacağı kabul edilerek hesaplanmıştır. Grafik oluşturulurken gaz yakıcı cihazın ve TEJ sistemin ömrü 15 yıl, gaz yakıcı cihazın 6 ay boyunca günde ortalama 6 saat çalıştığı kabul edilmiştir.

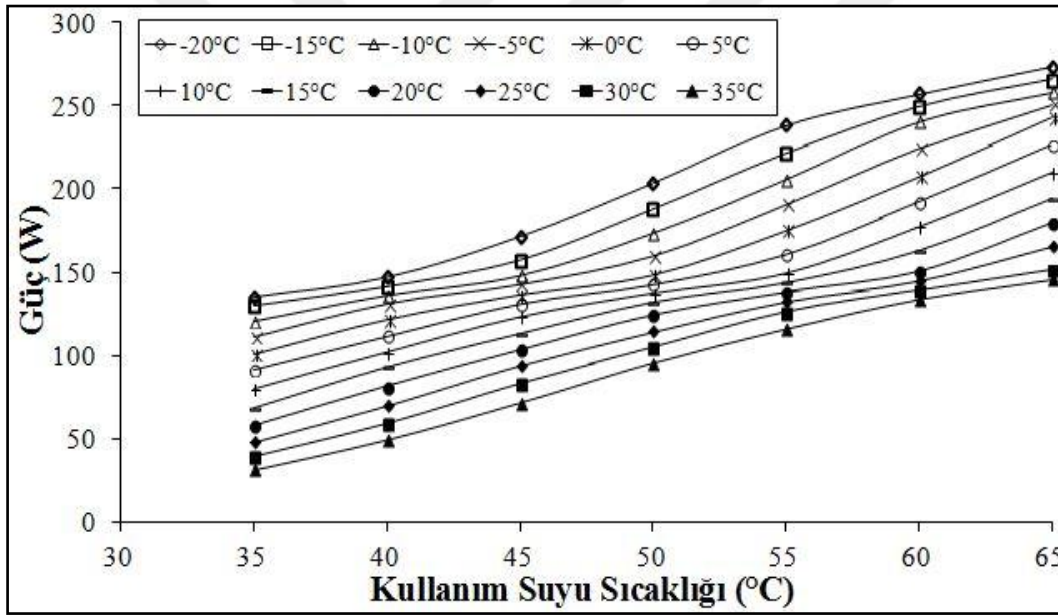
Kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C'de iken bir adet TBS ile gaz yakıcı cihazın ömrü boyunca ortalama 1936,51 kW elektrik enerjisi üretileceği ve buna bağlı olarak atmosfere 774,6 kg CO<sub>2</sub> salınımı engelleneceği tespit edilmiştir. Kalorifer suyu Sıcaklığı 85 °C'de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TBS ile ömrü boyunca ortalama 3299,38 kW elektrik enerjisi üretileceği ve buna bağlı olarak atmosfere 1319,75 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacağı tespit edilmiştir. Hermetik gaz yakıcı cihazlarda kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C – 85 °C arasında değişmektedir. Bu değerler arasında çalışan bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz ile ortalama 2614,35 kW elektrik enerjisi üretileceği ve buna bağlı olarak atmosfere 1045,74 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacağı aşikârdır.



Şekil 6.5. TBS'den elde edilebilecek güce bağlı olarak azalacak CO<sub>2</sub> salınımı miktarı

### 6.1.2. Kullanım sıcak suyu konumu

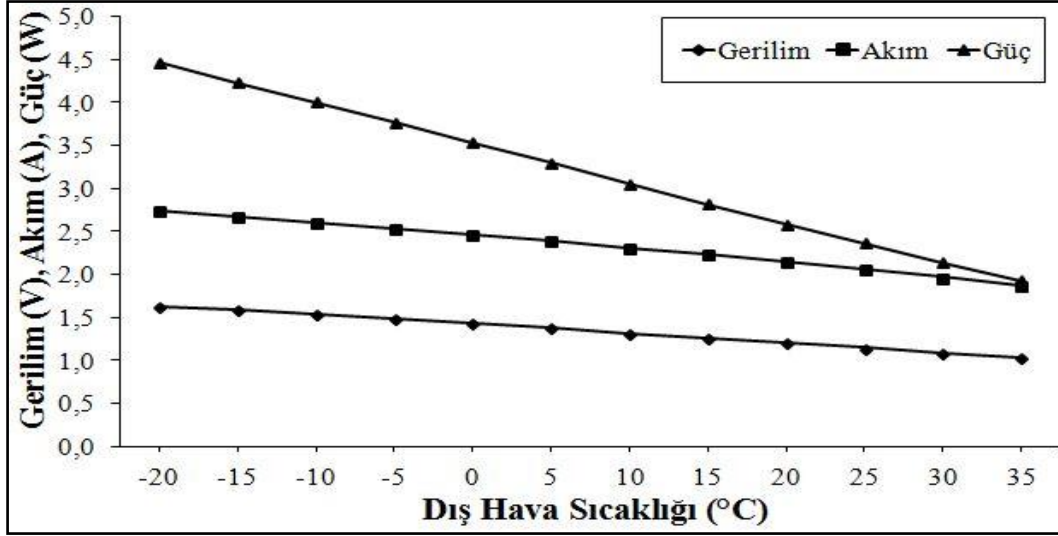
Şekil 6.6'da kullanım suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ'lerden elde edilebilecek güç değerleri görülmektedir. Hesaplamalar  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$  dış hava sıcaklıkları arasında  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  lik değişimlere göre yapılmıştır. Kullanım suyu sıcaklığı ise  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasında  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralıklarla herbir dış hava sıcaklığı değerinde hesaplanmıştır. En düşük güç değeri dış hava sıcaklığı  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  olduğunda ve kullanım suyu sıcaklığı  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de  $31,19\text{ W}$  ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  olduğunda ve kullanım suyu sıcaklığı  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de  $273,6\text{ W}$  olarak hesaplanmıştır. Dış hava sıcaklığının azalması ve kullanım suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak atık gaz sıcaklığının yükselmesi ile elde edilen güç miktarını arttırmaktadır.



Şekil 6.6. Kullanım suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ baca sisteminden elde edilebilecek güç değerleri

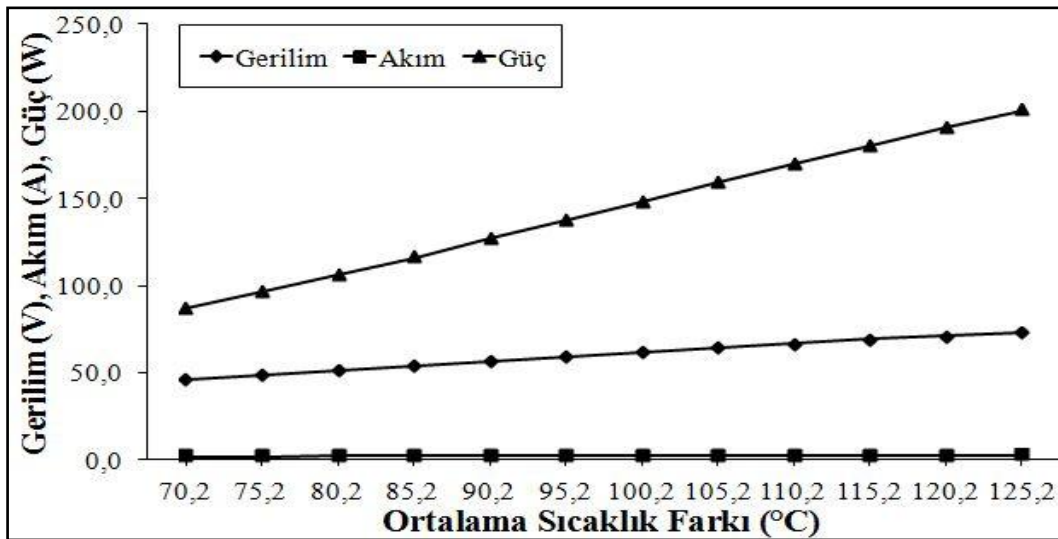
Şekil 6.7'de dış hava sıcaklığının elektriksel parametrelere etkisi görülmektedir. Dış hava sıcaklığı  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  iken sistemden elde edilecek gerilim değerleri ortalaması  $1,03\text{ V}$  olduğunda, akım değerleri ortalaması  $1,87\text{ A}$  ve bunlara bağlı olarak güç değeri de  $1,93\text{ W}$  olarak hesaplanmıştır. Dış hava sıcaklığının değeri  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  olduğunda sistemden elde edilen minimum gerilim değeri ortalaması  $1,63\text{ V}$  olduğunda, elde edilen akım değeri ortalaması  $2,74\text{ A}$  ve bunlara bağlı olarak güç değeri de  $4,46\text{ W}$  hesaplanmıştır. Bu değerler ise maksimum elektriksel parametrelerdir.





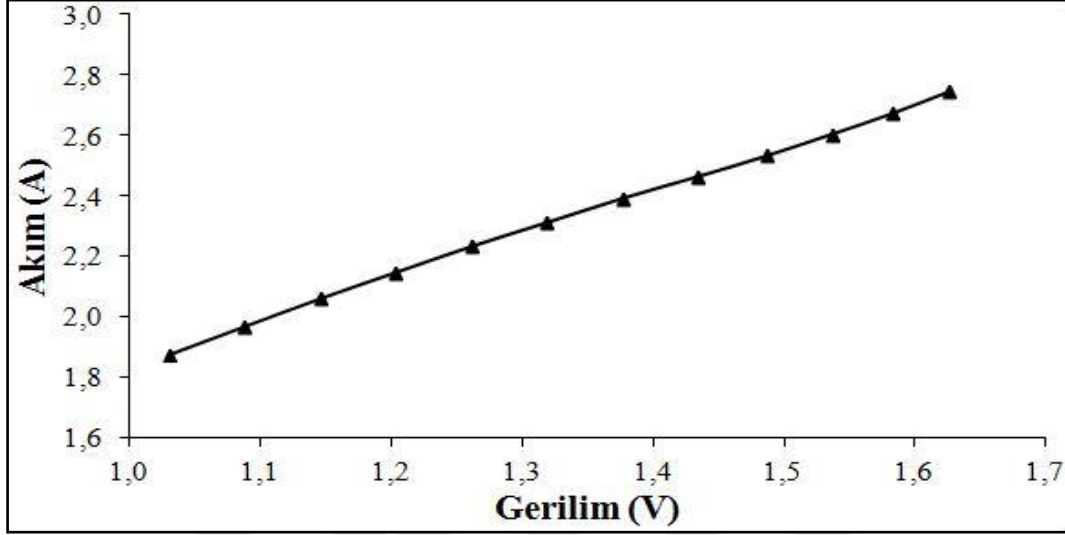
Şekil 6.7. Dış hava sıcaklığının TEJ baca sistemi elektriksel parametrelerine etkisi

Şekil 6.8’de yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS’den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir. Ortalama sıcaklık farkının, kalorifer suyu sıcaklığı değiştirildiğinde çevreye atılan atık gaz sıcaklığı ile yanma havası girişindeki dış hava sıcaklığına göre en düşük ortalama değeri 70,2 °C, en yüksek ortalama değeri ise 125,2 °C olarak belirlenmiştir. Baca sistemine 45 adet TEJ gerilimi yükseltmek amacıyla birbirine seri bağlanmıştır. Sıcaklık farkına bağlı olarak ortalama gerilim değeri 46,37 V ile 73,16 V arasında, ortalama akım değeri 1,87 A ile 2,74 A arasında, ortalama güç değeri ise 86,85 W ile 200,66 W arasında değiştiği görülmektedir.



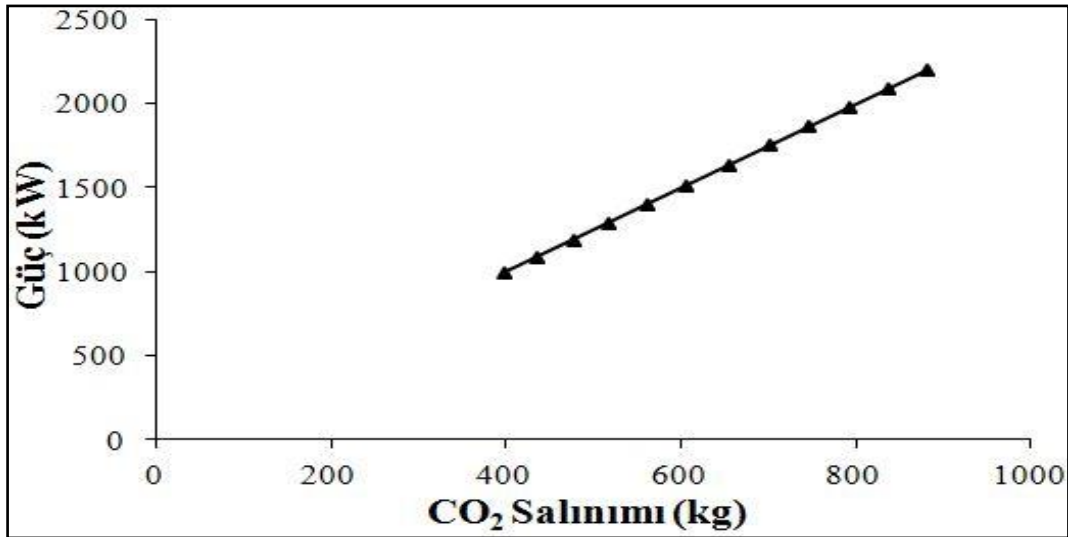
Şekil 6.8. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS’den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri

Şekil 6.9’da ortalama akım – gerilim eğrisi görülmektedir. Akım değeri arttıkça güç değeri de artmıştır. Buna bağlı olarak TEJ’lerden elde edilen güç miktarı da artmıştır.



Şekil 6.9. Akım – Gerilim Eğrisi

Şekil 6.10’da üretilebilecek güç değerine bağlı olarak azalacak CO<sub>2</sub> salınımı miktarı görülmektedir. Grafik oluşturulurken gaz yakıcı cihazın ve TBS’nin ömrü 15 yıl, gaz yakıcı cihazın 1 yıl boyunca günde ortalama 2 saat çalıştığı kabul edilmiştir.



Şekil 6.10. TBS’den elde edilebilecek güce bağlı olarak azalacak CO<sub>2</sub> salınımı miktarı

Kullanım suyu sıcaklığı 35 °C’de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TEJ baca sistemiyle ömrü boyunca ortalama 990,74 kW elektrik enerjisi üreteceği tespit edilmiş ve

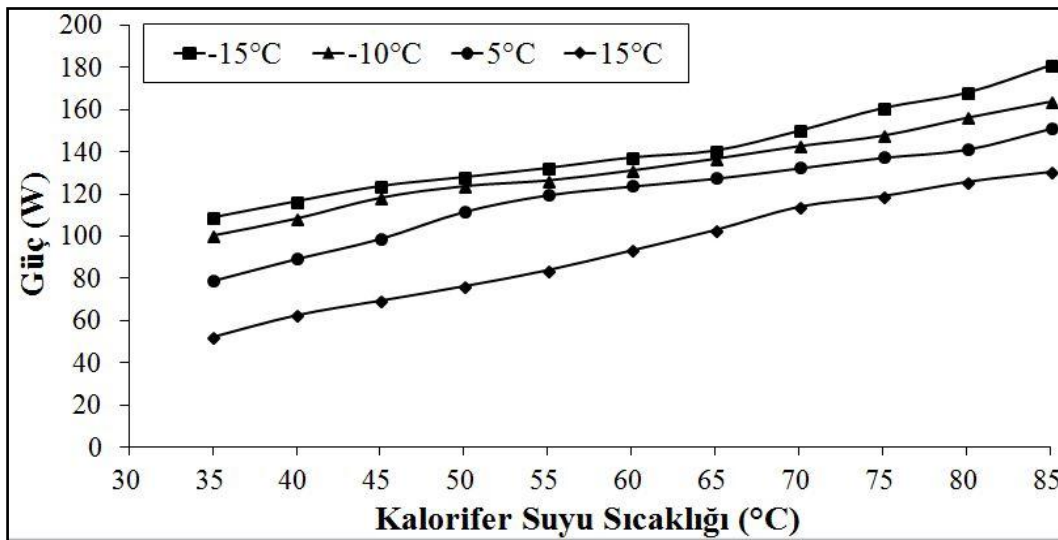
buna bağılı olarak atmosfere 396,3 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacaktır. Kullanım suyu Sıcaklığı 65 °C’de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TEJ baca sistemiyle ömrü boyunca ortalama 2201,71 kW elektrik enerjisi üreteceği tespit edilmiş ve buna bağılı olarak atmosfere 880,69 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacaktır. Hermetik gaz yakıcı cihazlar ile kullanım suyu sıcaklığı 35 °C – 65 °C arasında değişmektedir. Bu değerler arasında çalışan bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz ile ortalama 1581,78 kW elektrik enerjisi üretileceği ve buna bağılı olarak atmosfere 632,71 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacağı aşikârdır.

## 6.2. Deneysel Çalışma

Bu bölümde kalorifer konumu ve kullanım sıcak suyu konumunda hermetik gaz yakıcı cihazdan elde edilen ölçüm sonuçlarına ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

### 6.2.1. Kalorifer konumu

Şekil 6.11’de kalorifer suyu sıcaklığına bağılı olarak TEJ baca sisteminden elde edilen güç değerleri görülmektedir.

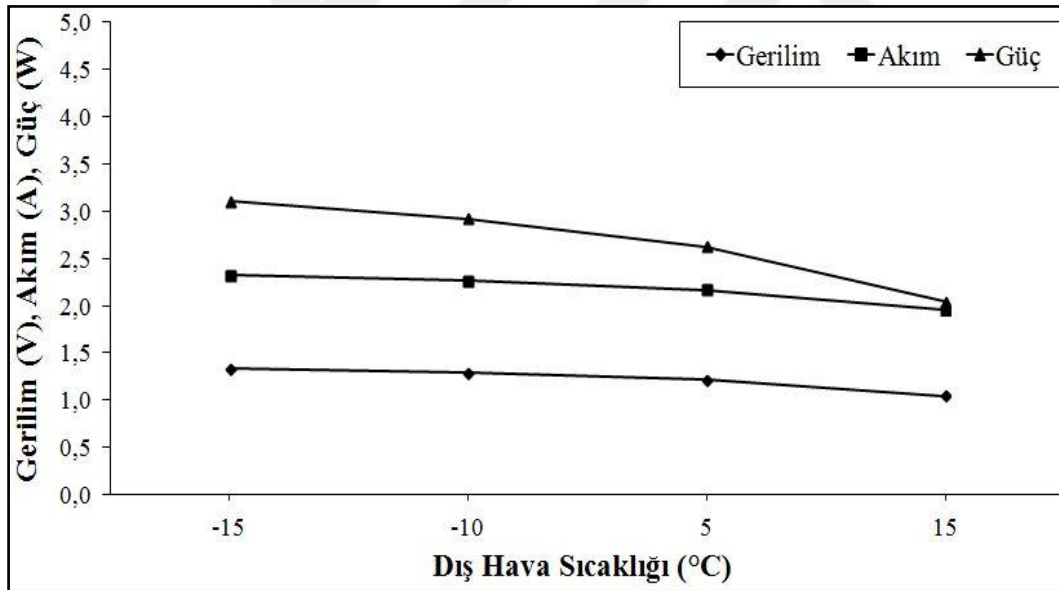


Şekil 6.11. Kalorifer suyu sıcaklığına bağılı olarak TEJ baca sisteminden elde edilen güç değerleri

Deneyler -15, -5, +5 ve +15 °C dış hava sıcaklıklarında, kalorifer suyu sıcaklığı ise herbir dış hava sıcaklığında 35 °C ile 85 °C arasında 5 °C aralıklarla değiştirilerek yapılmıştır. En

düşük güç değeri dış hava sıcaklığı 15 °C ve kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C olduğunda 51,98 W ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı -15 °C ve kalorifer suyu sıcaklığı 85 °C olduğunda 181,1 W olarak tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada da dış hava sıcaklığının azalması ve kalorifer suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak atık gaz sıcaklığının yükselmesi ile elde edilen güç miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

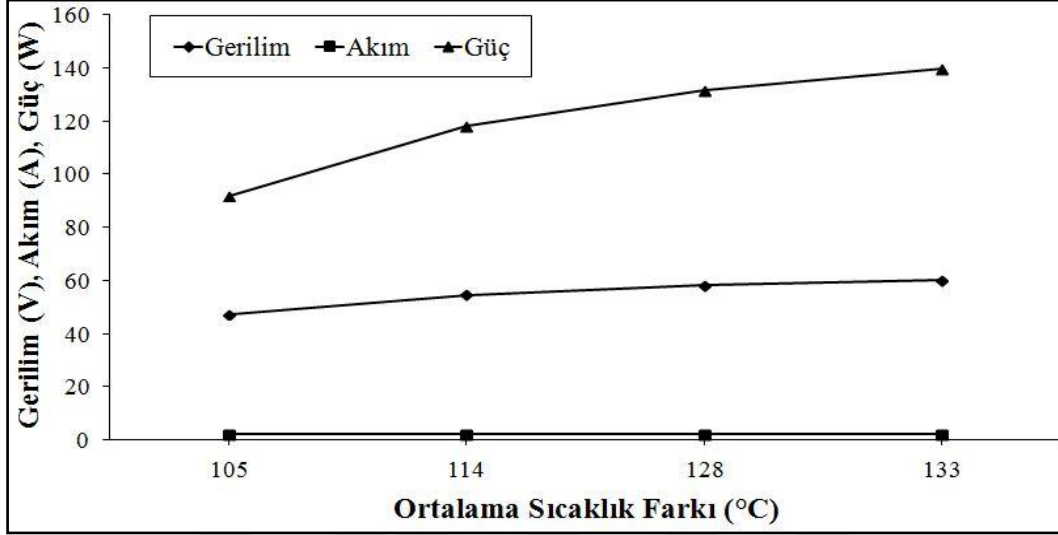
Şekil 6.12’de dış hava sıcaklığının elektriksel parametrelere etkisi görülmektedir. Dış hava sıcaklığı 15 °C iken sistemden elde edilecek gerilim değerleri ortalaması 1,04 V olduğunda, akım değerleri ortalaması 1,95 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 2,04 W olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler minimum elektriksel parametrelerdir. Dış hava sıcaklığının değeri -15 °C olduğunda sistemden elde edilen gerilim değeri ortalaması 1,34 V olduğunda, elde edilen akım değeri ortalaması 2.32 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 3,11 W olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ise maksimum elektriksel parametrelerdir.



Şekil 6.12. Dış hava sıcaklığının TEJ baca sistemi elektriksel parametrelerine etkisi

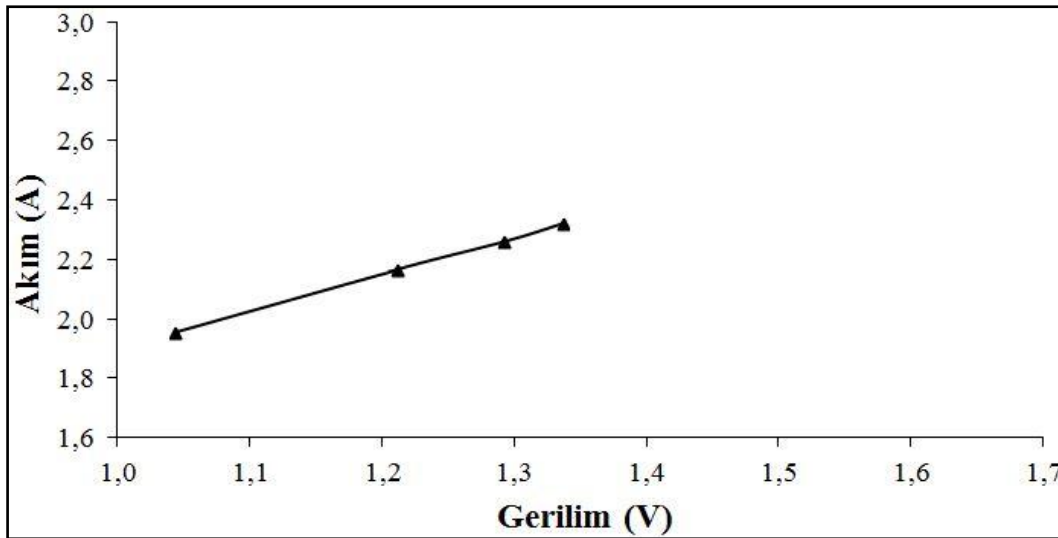
Şekil 6.13’te yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS’den elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir. Ortalama sıcaklık farkı, kalorifer suyu sıcaklığı değiştirildiğinde çevreye atılan atık gaz sıcaklığı ile yanma havası girişindeki dış hava sıcaklığına göre en düşük ortalama değeri 105 °C, en yüksek ortalama değeri ise 133 °C olarak belirlenmiştir. Baca sistemine 45 adet TEJ gerilimi yükseltmek amacıyla birbirine seri bağlanmıştır. Sıcaklık farkına bağlı olarak ortalama gerilim değeri 47 V ile

60,18 V arasında, ortalama akım değeri 1,95 A ile 2,32 A arasında, ortalama güç değeri ise 91,79 W ile 139,78 W arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 6.13. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

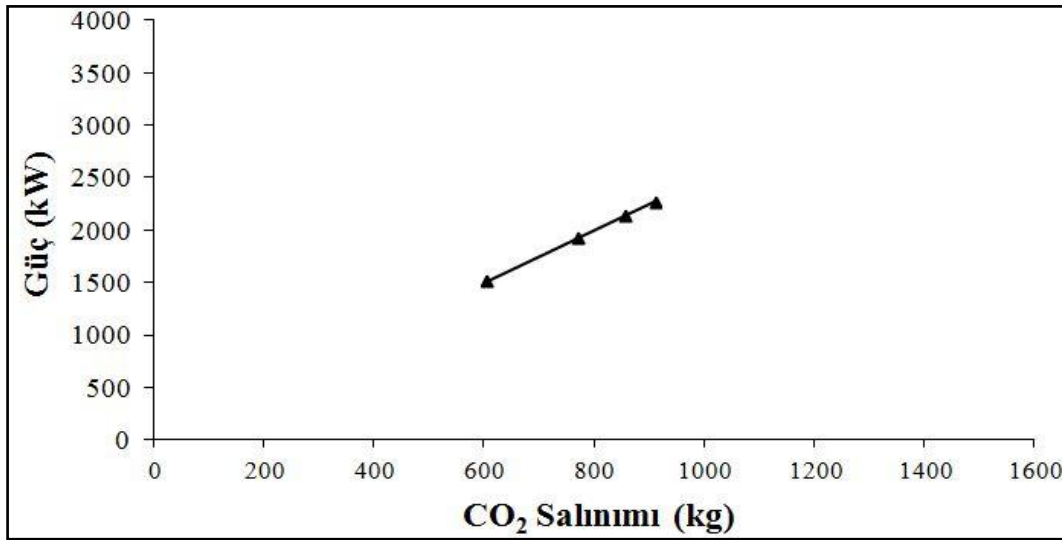
Şekil 6.14'te ortalama akım – gerilim eğrisi görülmektedir. Akım değeri 1,95 A iken gerilim değeri 1,04 V değerinde, akım değeri 2,32 A iken gerilim değeri 1,34 V değerleri ölçülmüştür.



Şekil 6.14. Akım – Gerilim Eğrisi

Şekil 6.15'te üretilen güç değerine bağlı olarak azalan CO<sub>2</sub> salınımı miktarı görülmektedir. Kalorifer suyu Sıcaklığı 35 °C'de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TBS ile ömrü

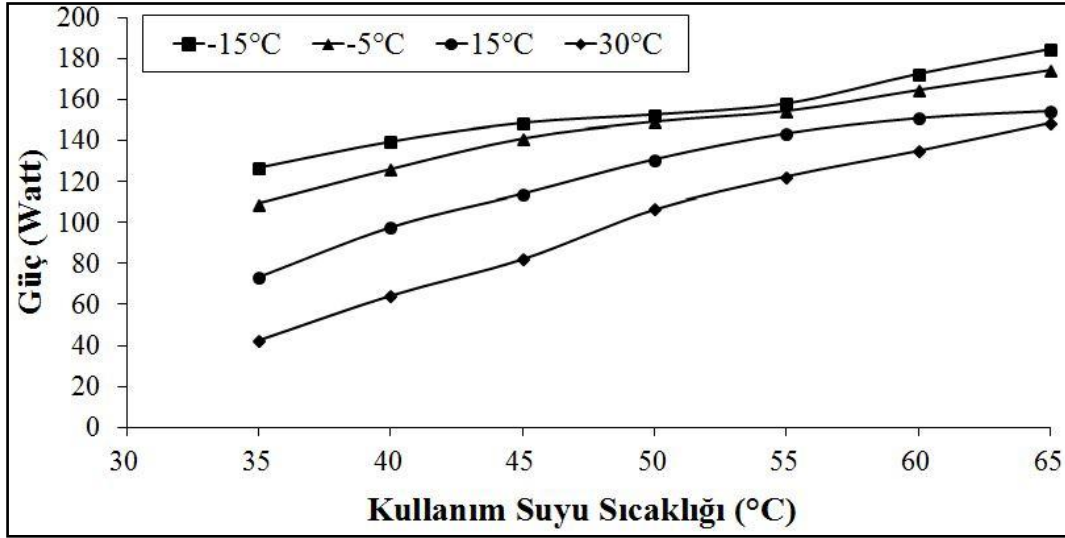
boyunca ortalama 1515,17 kW elektrik enerjisi üreteceği tespit edilmiş ve buna bağlı olarak atmosfere 606,07 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacaktır. Kalorifer suyu Sıcaklığı 85 °C’de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TEJ baca sistemiyle ömrü boyunca ortalama 2277,14 kW elektrik enerjisi üreteceği tespit edilmiş ve buna bağlı olarak atmosfere 910,86 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacaktır. Hermetik gaz yakıcı cihazlar ile kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C – 85 °C arasında değişmektedir. Bu değerler arasında çalışan bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz ile ortalama 1965,61 kW elektrik enerjisi üretileceği ve buna bağlı olarak atmosfere 786,25 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacağı aşikârdır.



Şekil 6.15. TBS’den elde edilen güce bağlı olarak azalan CO<sub>2</sub> salınımı miktarı

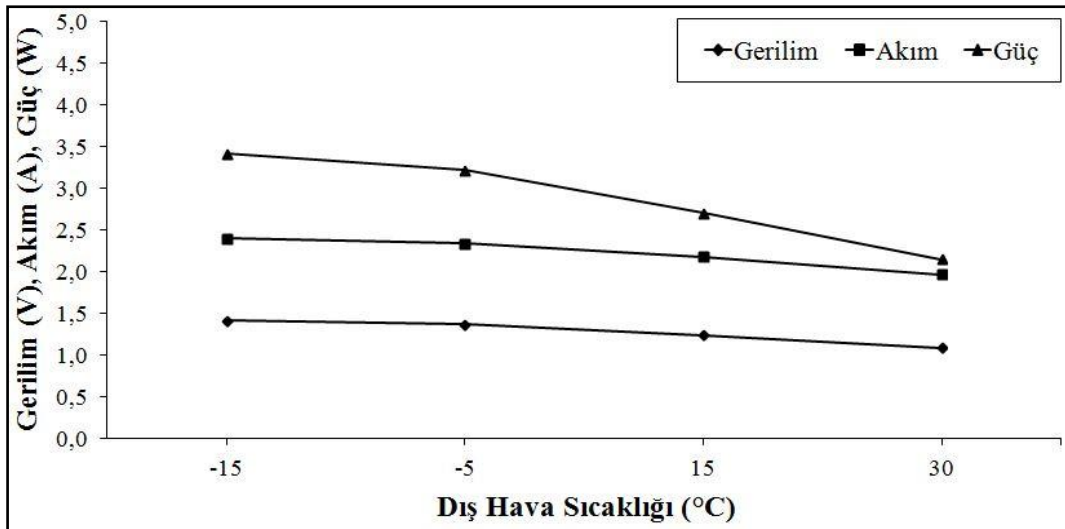
### 6.2.2. Kullanım sıcak suyu konumu

Şekil 6.16’da kullanım suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ’lerden elde edilen güç değerleri görülmektedir. Deneyler -15, -5, +15 ve +30 °C dış hava sıcaklıklarında, kullanım suyu sıcaklığı ise 35 °C ile 65 °C arasında 5 °C aralıklarla herbir dış hava sıcaklığı değerinde test edilmiştir. En düşük güç değeri dış hava sıcaklığı 30 °C olduğunda ve kullanım suyu sıcaklığı 35 °C’de 42,77 W ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı -15 °C olduğunda ve kullanım suyu sıcaklığı 65 °C’de 184,63 W olarak tespit edilmiştir. Dış hava sıcaklığının azalması ve kullanım suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak atık gaz sıcaklığının yükselmesi ile elde edilen güç miktarını arttırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.16. Kullanım suyu sıcaklığına bağlı olarak TEJ baca sisteminden elde edilen güç değerleri

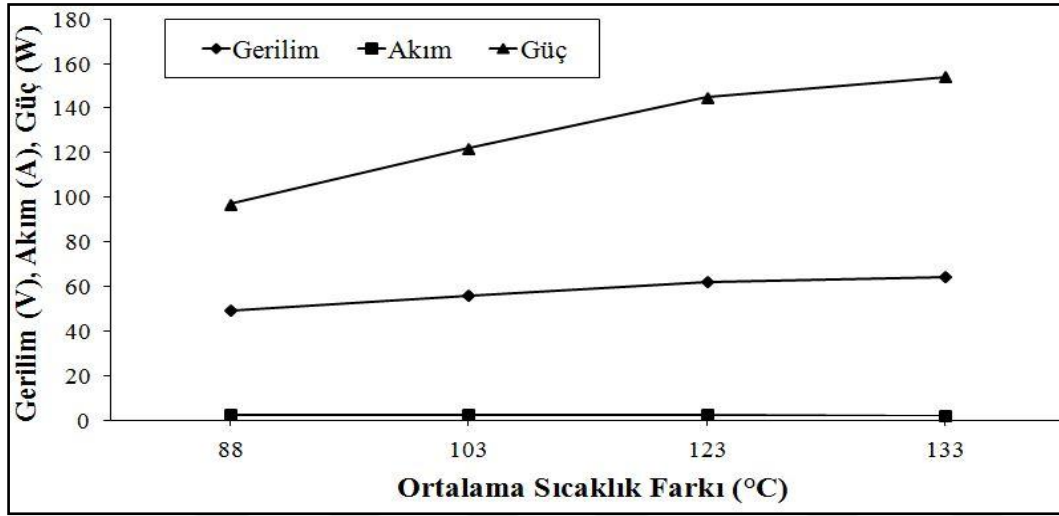
Şekil 6.17’de dış hava sıcaklığının elektriksel parametrelere etkisi görülmektedir. Dış hava sıcaklığı 30 °C iken sistemden elde edilecek gerilim değerleri ortalaması 1,09 V olduğunda, akım değerleri ortalaması 1,97 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 2,15 W olarak tespit edilmiştir. Dış hava sıcaklığının değeri -15 °C olduğunda sistemden elde edilen minimum gerilim değeri ortalaması 1,42 V olduğunda, elde edilen akım değeri ortalaması 2.41 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 3,43 W olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.17. Dış hava sıcaklığının elektriksel parametrelere etkisi

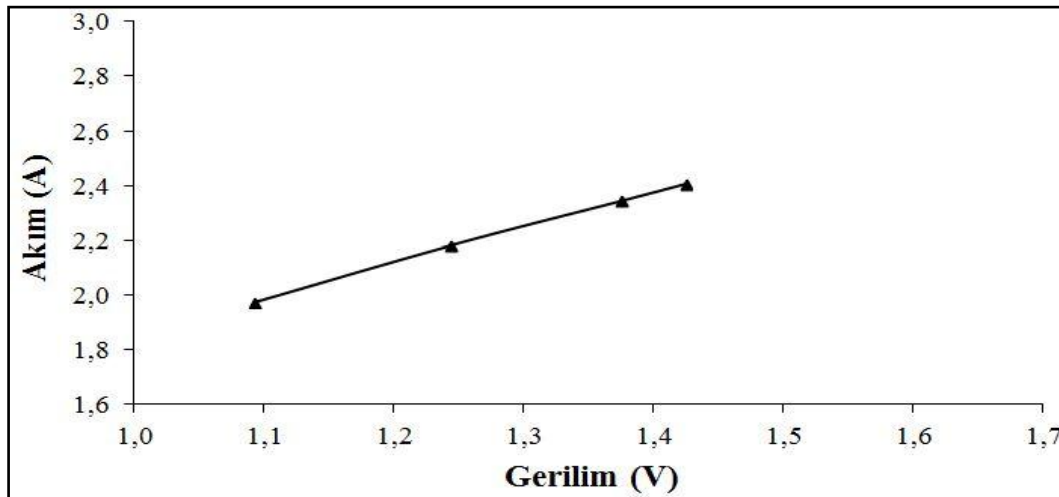
Şekil 6.18’de yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS’den elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir. Ortalama sıcaklık farkı, kalorifer suyu

sıcaklığı değiştirildiğinde çevreye atılan atık gaz sıcaklığı ile yanma havası girişindeki dış hava sıcaklığına göre en düşük ortalama değeri 88 °C, en yüksek ortalama değeri ise 133 °C olarak belirlenmiştir. Baca sistemine 45 adet TEJ gerilimi yükseltmek amacıyla birbirine seri bağlanmıştır. Sıcaklık farkına bağlı olarak ortalama gerilim değeri 49,18 V ile 64,09 V arasında, ortalama akım değeri 1,77 A ile 2,41 A arasında, ortalama güç değeri ise 96,95 W ile 154,19 W arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 6.18. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

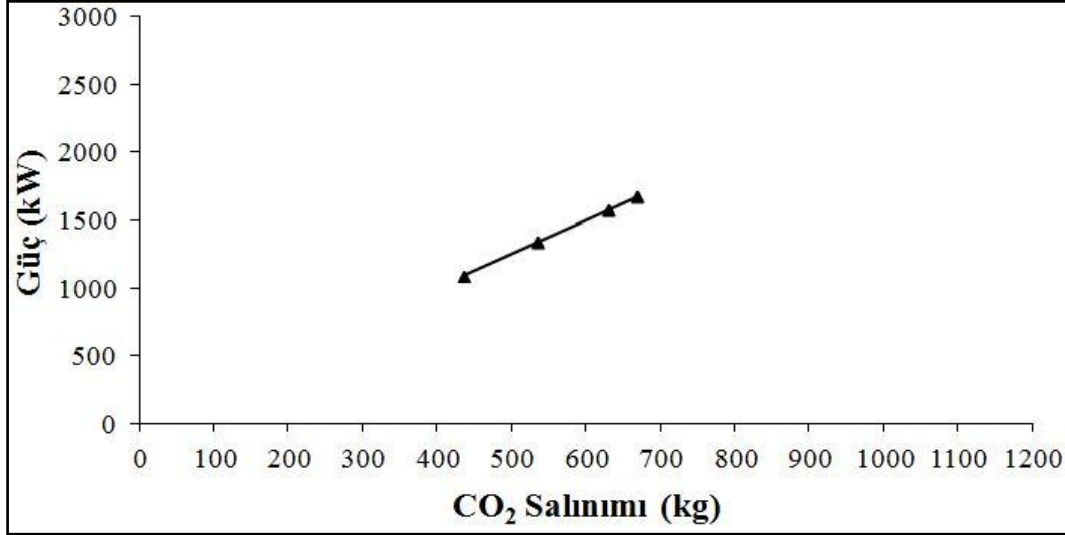
Şekil 6.19'da ortalama akım – gerilim eğrisi görülmektedir. Akım değeri 1,97 A iken gerilim değeri 1,09 V değerinde, akım değeri 2,41 A iken gerilim değeri 2,15 V değerleri ölçülmüştür.



Şekil 6.19. Akım – Gerilim Eğrisi



Şekil 6.20’de üretilen güç değerine bağlı olarak azalan CO<sub>2</sub> salınımı miktarı görülmektedir. Grafik oluşturulurken gaz yakıcı cihazın ve TBS’nin ömrü 15 yıl, gaz yakıcı cihazın 1 yıl boyunca günde ortalama 2 saat çalıştığı kabul edilmiştir.



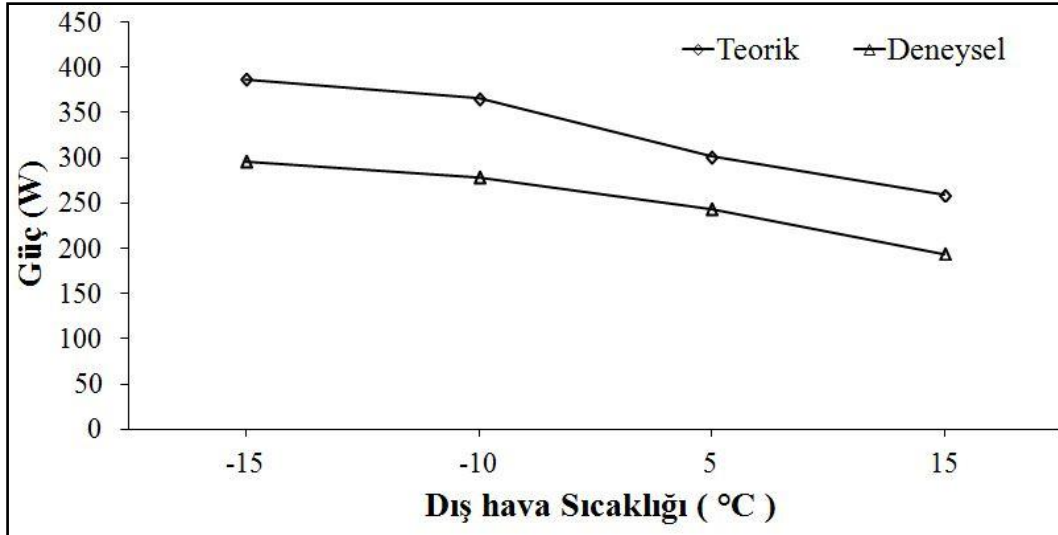
Şekil 6.20. TBS’den elde edilen güce bağlı olarak azalan CO<sub>2</sub> salınımı miktarı

Kullanım suyu Sıcaklığı 35 °C’de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TBS ile ömrü boyunca ortalama 1084,73 kW elektrik enerjisi üreteceği tespit edilmiş ve buna bağlı olarak atmosfere 433,89 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacaktır. Kullanım suyu Sıcaklığı 65 °C’de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TEJ baca sistemiyle ömrü boyunca ortalama 1673,9 kW elektrik enerjisi üreteceği tespit edilmiş ve buna bağlı olarak atmosfere 668,36 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacaktır. Hermetik gaz yakıcı cihazlar ile kullanım suyu sıcaklığı 35 °C – 65 °C arasında değişmektedir. Bu değerler arasında çalışan bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz ile ortalama 1415,71 kW elektrik enerjisi üretileceği ve buna bağlı olarak atmosfere 566,28 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacağı aşikârdır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kalorifer konumunda yapılan ölçümlerde; üretilen en düşük güç değeri dış hava sıcaklığı 15 °C ve kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C'de 51,98 W iken, aynı sıcaklık değerleri için yapılan hesaplamada güç değeri 68,51 W olmuştur. Benzer şekilde, ölçümlerde en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı -15 °C ve kalorifer suyu sıcaklığı 85 °C'de 181,1 W olarak tespit edilmiş, fakat yapılan hesaplamalarda bu güç değeri 265,78 W olmuştur. Ölçüm sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırıldığında düşük en güç değerleri için güç üretiminde % 26, en yüksek güç değerleri için ise % 32'lik bir azalma olduğu görülmüştür.

Sıcaklık farkına bağlı olarak ortalama güç değerlerinin kalorifer ve kullanım sıcak suyu konumundaki toplamının; teoride 259,18 W ile 386,68 W arasında, deneysel çalışmada ise 193,97 W ile 295,27 W arasında değiştiği görülmüştür. Bu değerler baz alındığında; ortalama en düşük sıcaklık farkında yaklaşık % 25, ortalama en yüksek sıcaklık farkında ise yaklaşık % 23,6 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.1'de teorik ve deneysel sonuçlara göre -15 °C, -10 °C, 5 °C ve 15 °C dış hava sıcaklığı değerlerindeki ortalama güç değerlerinin toplamı verilmiştir.



Şekil 7.1. Teorik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Teorik hesaplama sonuçlarına göre, bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz ile ortalama 2614,35 kW elektrik enerjisi üretileceği ve buna bağlı olarak atmosfere 1045,74 kg CO<sub>2</sub> salınımı

engellenmiş olacağı belirlenmiş olup, deneysel çalışma sonuçlarına göre bu değerlerin sırasıyla 1965,61 kW ve 786,25 kg CO<sub>2</sub> olduğu gözlemlenmiştir.

Kalorifer konumunda yapılan deney sonuçlarında teorik hesaplamalara göre daha düşük güç ve emisyon değerlerinin elde edilmesinin nedeni, soğuk yüzeyin sıcaklığının teorideki sıcaklığın elde edilememesi ve deneysel hatalardan kaynaklandığı öngörülmektedir.

Kullanım sıcak suyu konumunda en düşük güç değeri dış hava sıcaklığı 30 °C olduğunda ve kullanım suyu sıcaklığı 35 °C'de 39,17 W ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı -15 °C olduğunda ve kullanım suyu sıcaklığı 65 °C'de 265,78 W olarak hesaplanmıştır. Aynı sıcaklık değerlerinde tespit edilen deneysel sonuçlarda ise bu değerler sırasıyla 42,77 W ve 184,63 W seviyesindedir. Düşük sıcaklık değerinde ölçümlerde % 9 oranında bir artış gözlenirken, yüksek güç değerlerinde % 31 oranında azalma görülmüştür.

Kullanım sıcak suyu eldesi için kullanımda; hesaplamalara göre ortalama güç değerleri 86,85 W ile 200,66 W arasında değişirken, deneysel çalışma sonuçlarında bu değerlerin 96,95 W ile 154,19 W arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ortamama en düşük sıcaklık farkında yaklaşık % 11 oranında artış, ortalama en yüksek sıcaklık farkında ise yaklaşık % 23 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz ile ortalama 1581,78 kW elektrik enerjisi üretileceği ve buna bağlı olarak atmosfere 632,71 kg CO<sub>2</sub> salınımı engellenmiş olacağı belirlenmiş olup, deneysel çalışma sonuçlarına göre bu değerlerin sırasıyla 1415,71 kW ve 566,28 kg CO<sub>2</sub> olduğu gözlemlenmiştir.

Kullanım sıcak suyu konumunda, düşük sıcaklık değerleri için deney sonuçlarında az miktarda artış olmasının sebebi gaz yakıcı cihazın şebeke suyunu ısıtmak için alev boyunu maksimuma çıkarmasından kaynaklanmış olduğu, yüksek sıcaklık değerlerinde ise daha düşük güç elde edilmesinin nedeni yüksek baca gazı sıcaklıklarında soğutma performansının düşmesinden kaynaklandığı öngörülmektedir.

Çizelge 7.1'de 2008 – 2018 yılları arasında elektrik fiyatlarına gelen zamlar görülmektedir. 2008 – 2018 yılları arasında elektrik fiyatlarına yılda ortalama % 11,19 zam gelmiştir. Fiyatlara son zam, 1 Nisan 2018'de yapılmıştır. Bu zamdan sonra, 1 kWh vergi hariç elektrik fiyatı vergiler ve bedeller de dâhil edildiğinde % 12 oranında artmıştır.

Çizelge 7.1. Vergiler hariç mesken elektrik fiyatı zamları

Yıllar	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2016	2017	2018 (Ocak)	2018 (Nisan)
Değişim (%)	19,55	33,53	9,37	9,58	19,6	0	9	6,8	2,65	6,8	5,95

İmalatı yapılan sistemin maliyeti 1020 Dolar civarındadır. TBS sistemi kullanımı ile yılda toplam 225,16 kW elektrik üretilmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun 1 Nisan 2018 tarihinden itibaren geçerli ulusal elektrik tarifelerinde, mesken aboneleri için kWh başına elektrik fiyatı 46,12 kuruş olmuştur. 1 Nisan 2018 tarihinde 1 Dolar yaklaşık 3,96 TL değerindedir. Bu değerler kullanılarak yapılan hesaplamada sistemin geri ödeme (amortisman) süresi 13,9 yıl olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken elektrik fiyatlarındaki yıllık fiyat artış oranı ise 2018 yılının Nisan ayına kadar yapılan zam oranı olan % 12 olarak hesaba katılmıştır. Termoelektrik jeneratörlerin enerji üretimindeki verimi ve sistem performansı arttıkça geri dönüşüm süresi azalacaktır.

Sonuç olarak gaz yakıcı cihazlardaki atık ısı enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Sistemin mevcut gaz yakıcı cihaz baca sistemlerinde kullanılması ile atık ısıdan elektrik enerjisi üretilebileceği ve CO<sub>2</sub> salınımının azaltılabileceği görülmüştür.

Farklı tasarımlarla ve kullanılan malzeme kalitesinin artırılması ile sistemden elde edilebilecek güç miktarları da artacaktır. Sistemde soğutma amaçlı olarak mevcut sisteme bir ekleme yapılmamıştır. Tasarlanarak sisteme eklenecek bir soğutma ünitesi, sistem performansını arttıracaktır. Ayrıca iç baca borusu ile dış baca borusu arasında bir yalıtım işlemi yapılmamıştır. İç baca borusunun TEJ montajı yapılmayan yüzeyleri ısı yalıtım malzemesi ile kaplanarak soğutma havasının ısınması önemli ölçüde azaltılabilir.

Yarı iletken malzemelerin performansı gün geçtikçe artmakta ve yeni yarı iletken malzemeler üretilmektedir. Buna bağlı olarak TEJ'lerin verimleri de artmaktadır. Tasarlanan sistem daha da geliştirilerek yüksek performanslı TEJ'lerin sisteme montajı ile önümüzdeki yıllarda konutlarda şebekeden bağımsız olarak yüksek miktarda enerji elde etmek mümkün olabilir.

Elektrik üretiminde fosil yakıtların kullanımı sonucunda yüksek miktarda ısı çevreye atılmakta, elektrik iletim ve dağıtımında yüksek kayıplar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda fosil yakıtlar verimsiz kullanılmaktadır. 100 birim yakıtın ortalama % 30 u faydalı enerji olarak kullanılmakta, % 70 ise atık enerji olarak çevreye atılmaktadır. Ayrıca Elektrik iletim dağıtım sistemlerinin kurulumu oldukça maliyetlidir. Teknolojinin ilerlemesiyle; TEJ baca sistemi ile PV panellerden oluşan hibrit bir sistem ile konutlarda şebekeden bağımsız olarak elektrik üretimi sağlanabilir. Böylece fosil yakıtlar % 90 üzerinde verimle kullanılabilir ve kullanılmadan çevreye atılan enerji % 10 seviyelerinin altına düşürülebilir.

Tüm bunlara ek olarak böyle bir sistemin geliştirilmesi soğuk savaş stratejisi olarak kullanılabilir. Enerji kaynaklarında büyük çaplı bir kesinti yaşandığında, TEJ baca sistemi ile iletişim kaynakları aktif olarak kullanılabilir. Bu nedenle bu konu üzerinde yapılacak çalışmalar ile geliştirilecek yüksek performanslı bir sistem birçok soruna çözüm getirebilecektir.

## KAYNAKLAR

1. Koç, E., ve Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 54(639), 32-44.
2. Kılıç, A. M., ve Kılıç, Ö. (2014). Türkiye’de Elektrik Üretiminde Kömür Kullanımı ve Stratejik Önemi. *Madencilik Türkiye*, 40, 74-83.
3. Keçebas A. Gedik E., ve Kayfeci M. (2010). Fosil Yakıtların Kullanımından Kaynaklanan Hava Kirliliği Üzerine Jeotermal Enerji ve Doğalgaz Kullanımının Etkisi: Afyon Örneği. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 23-30.
4. Bayraç H. N. (2010). Enerji Kullanımının Küresel Isınmaya Etkisi ve Önleyici Politikalar. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 229-260.
5. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun. (10 Mayıs 2005). Resmi Gazete, 9385-9390.
6. Enerji Verimliliği Kanunu. (18 Nisan 2007). Resmi Gazete, 10059-10072.
7. Özlüer, I. Ö., Turhan, E. ve Özlüer, F. (Editörler). (2016). *Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin 21. Taraflar Konferansı-COP 21 Paris Anlaşması*, Ankara: Ekoloji Kolektifi Derneği, 1-27.
8. United Nations. (2015). *Adaption of the Paris Agreement*, Paris, France, 9-25.
9. Özdemir A. D., ve Yazıcı D. D., Tahmiscioğlu M. S. (2013). *BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Kapsamında Sürdürülen Müzakere Sürecinin Değerlendirilmesi*. III. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi (TİKDEK 2013), İstanbul.
10. Özmen M. T. (2009). Sera Gazı-Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 453, 42-46.
11. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (1998). Kyoto Protokolü.
12. IEA (International Energy Agency). (2017). Key World Energy Statistics, Paris, France.
13. Etrürk F., Akkoyunlu A. ve Varınca K. B. (2006). *Enerji Üretimi ve Çevresel Etkileri*. İstanbul: Tasam Yayınları, 85-86.
14. Remelia, M.F., Kiatbodina, L., Singh, B., Verojporna, K., Datea, A., and Akbarzadeha A. (2015). Power generation from waste heat using Heat Pipe and Thermoelectric Generator. *Science Direct*, 75(2015), 645-650.
15. Montecucco, A., Siviter, J., and Knox, A. R. (2015). Constant heat characterisation and geometrical optimisation of thermoelectric generators. *Applied Energy*, 149(2015), 248-258.

16. Faraji, A. Y., Date, A., Singh, R., and Akbarzadeh, A. (2014). Base-load thermoelectric power generation using evacuated tube solar collector and water storage tank. *Science Direct*, 57(2014), 2112 – 2120.
17. Terhan, M., ve Çomaklı, K. (2015). Baca Gazı Atık Isısı ile Kazan Yakma Havasının Ön Isıtılmasının Fizibilitesi. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 56-63.
18. Kara, O., Hürdoğan, E., ve Kaşka, Ö. (2015). Endüstriyel bir fırının atık ısısının enerji verimliliğine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12(4), 95-101.
19. Çomaklı, K., ve Terhan, M. (2011). Sıcak su üretimi için baca gazı atık enerjinin kullanımı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 124, 43-51.
20. Çomaklı, K., ve Terhan, M. (2015). Doğalgaz Yakıtlı Kazandan Çıkan Atık Baca Gazının Ekserji Analizi. *Mühendis ve Makina*, 56(670), 58-64.
21. Yılmaz, O. T. (2015). *Doğalgazlı ısıtma cihazlarında (kombi) atık gazdan enerji kazanımı sağlayan yeni nesil plakalı reküperatörün simülasyon tabanlı geliştirilmesi*. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
22. Yılmaz, S. (2008). Termoelektrik Modüllü Soğutucuda Farklı Soğutma Uygulamalarının Sistem Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi*, 11(2), 201-206.
23. Özgün, H. (2009). *Termoelektrik Jeneratörlerin Çok Düşük Sıcaklıklarda Teorik ve Deneysel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 135-136.
24. Ünsaç, A. (2010). *Kriyojenik Isı Değiştiricisinde Termoelektrik Jeneratör Uygulaması Ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 85-86.
25. Gür, S. (2009). *Yogunlaştırıcılı Güneş Kollektörü Kaynaklı Termoelektrik Jeneratörlerden Elde Edilecek Elektrik Enerjisinin Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 36-37.
26. Atik, K., ve Kayabası, R. (2009). Jeotermal Enerji Kullanılarak Termoelektrik Jeneratör ile Elektrik Enerjisi Üretimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(3), 59-64.
27. Kaya, A. Y. (2010). *Egzoz Gazındaki Isı ile Çalıştırılan Termoelektrik Sistemin Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 35-36.
28. Döşkaya, H. E. (2010). *Güneş Enerjisi ve Atık Isı Kullanılarak Termoelektrik Modül ile Deneysel Elektrik Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 41.

29. Kılıç, T. (2010). *Termoelektrik Jeneratörler Kullanılarak Yapılardaki Atık Enerjinin Geri Kazanılması Üzerine Bir Çalışma*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 79-81.
30. Çevik, Ö. (2011). *Termoelektrik Tabanlı Portatif Bir Jeneratörün Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 60-61.
31. Ahıska, R., Mamur H., Korkmaz F., Topaloğlu İ., Dönertaş M.A., İçyer A., ve Şahin U. (2012). *Termoelektrik Jeneratör Sistemleri ve Fotovoltaik Sistemlerin Enerji Üretiminde Karşılaştırılması*. Proje Tabanlı Mekatronik Eğitim Çalıştayı, Cankırı-İlgaz.
32. Özkaymak, M., Baş, Ş., Acar, B., Yavuz, C., Boran, K., Tabak, S. A., Variyenli, H.İ., ve Asal, Ö. (2014). Atık Baca Gazı Kullanımı ile Termoelektrik Jeneratörlerde Elektrik Üretiminin Faydalı Kullanımının Deneysel İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C Tasarım ve Teknoloji*, 2(4), 289-298.
33. Ahıska, R., Mamur, H., ve Uliş, M. (2011). Termoelektrik Modülün Jeneratör Olarak Modellenmesi ve Deneysel Çalışması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(4), 889-896.
34. Ahıska, R., Nykyruy, L. I., Omer, G., and Mateik G. D. (2016). The Thermoelectric Solar Panels. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*, 3(1), 9-14.
35. Baatar, N., and Kim, S. (2011). A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles. *Telkomnika*, 9(3), 523-530.
36. Liu, C., Chen, P., and Li, K. (2014). *A 1 KW Thermoelectric Generator for Low-temperature Geothermal Resources*. Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California.
37. Baskar, P., Seralathan, S., Dipin, D., Thangavel, S., Norman, C. F. I. J., and Arnold, C. (2014). Experimental Analysis of Thermoelectric Waste Heat Recovery System Retrofitted to Two Stroke Petrol Engine. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*. 4 (1), 9-14.
38. Kumar, C. R., Sonthalia, A., and Goel R. (2011). Experimental Study On Waste Heat Recovery From An Internal Combustion Engine Using Thermoelectric Technology. *Thermal Science*, 15 (4), 1011-1022.
39. AravindKaruppaiah, C., Ganesh, S., Dileepan, T., and Jayabharathi, S. (2014). Fabrication And Analysis Of Thermo Electric Generator For Power Generator. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(1), 1508-1513.
40. Adavbiele, A.S. (2013). Generation of Electricity from Gasoline Engine Waste Heat. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 3(5), 16-3.



41. Jadhao, J. S., and Thombare, D. G. (2013). Review on Exhaust Gas Heat Recovery for I.C. Engine. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2(12), 93-100.
42. Tzer-Ming J., and Sheng-Chung T. (2013). Technical Development Of Heat Energy Recovery For Vehicle Power System. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 37(3), 885-894.
43. Martins, J., Brito, F. P., Goncalves, L.M., and Antunes J. (2011). Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes. *SAE International*, 1-19.
44. Akhan, H. (2007). *Güneş Enerjili Bir Sıcak Hava Motoru Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 8-9.
45. Demir, B., ve Güngör A. (2010). Alfa Tipi Tek Yer Değiştirmeli Bir Stirling Motoru Tasarımı Ve Performansının Testi. *C B Ü Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2(13), 1-10.
46. Karabulut, H., Solmaz, H., Okur, M., ve Şahin, F. (2013). Gama Tipi Serbest Pistonlu Bir Stirling Motorunun Dinamik Ve Termodinamik Analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 265-273.
47. Yenice, O. T. (2005). *Kırsal Kesimde Kurulabilecek Doğalgaz Yakıtlı Otoprodüktör Kojenerasyon Santralleri Üzerine Bir Araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-12.
48. Topuz, G. (2007). Isıtma, Sogutma Temini ve Elektrik Güç Üretiminin Birarada Gerçekleştiği Ekonomik, Çevre Dostu Teknoloji: Tri-Jenerasyon. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 48(2007), 42-44.
49. Şahin, C. (2016). *Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Sahalarda Organik Rankin Çevrimi (Orc) İle Elektrik Enerjisi Üretiminde Afyon Jeotermal Elektrik Üretim A.Ş. Modellemesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 32.
50. Acar, E. (2014). *Bir Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Santrali İçin Organik Rankine Çevrimi Dizaynı Ve Modellemesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 6.
51. Wedlock B. D. (1963). Thermo-photo-voltaic conversion. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 51(5), 694-698.
52. Ferraria, C., and Melinob, F. (2014). Thermo – Photo – Voltaic Generator Development. *Science Direct*, 45 (2014), 150-159.
53. Önal, B. Ş., ve Utlü, Z. (2017). *Endüstriyel Sistemlerde Yüksek Sıcaklıklı Atık Isı Kazanım Amaçlı Termofotovoltaik Uygulamalarında Teorik Modelleme*. 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.

54. Dyachenko, P. N., Molesky, S., Petrov, A. Y., Störmer, M., Krekeler, T., Lang, S., Ritter, M., Jacob, Z., and Eich M. (2016). Controlling thermal emission with refractory epsilon-near-zero metamaterials via topological transitions. *Nature Communications*, 11809 (2016), 1-8.
55. Dişlitaş, S., ve Ahıska, R. (2003). *Jeotermal Termoelektrik Jeneratör*. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri.
56. Jieting, W., Linchang, X., and Hao, W. (2012). The Study of Thermoelectric Power Generation in The Cooling of Fin and Vibration Heat Pipe. *SciVerse ScienceDirect*, 17(2012), 1570-1577.
57. Zhua, N., Matsuura, T., Suzukib, R., and Tsuchiyaa, T. (2014). Development of a Small Solar Power Generation System based on Thermoelectric Generator. *ScienceDirect*, 52(2014), 651-658.
58. Karpe, S. (2016). Thermoelectric Power Generation using Waste Heat of Automobile. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 144-148.
59. Zhang, X., and Zhao, L. D. (2015). Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity. *ScienceDirect*, 1(2015), 92-105.
60. Tritt, T. M., and Subramanian, M. A. (2006). Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View. *Mrs Bulletin*, 31, 188-198.
61. Dikmen, E. (2002). *Termoelektrik Soğutucuların Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 4.
62. Kavak, B. B. (2014). *Güneş Enerjili Termoelektrik Soğutma Sistemlerinde Ardışık (Kaskat) Soğutma Yöntemi Uygulanabilirliğinin Deneysel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 14-17.
63. Bulut, H. (2005). Termoelektrik Soğutma Sistemleri. *Soğutma Dünyası Dergisi*, 31, 9-16.
64. Doğdu, M. F. (2013). *Termoelektrik Soğutucuların Performansına Doğrudan Temaslı Isı Değiştiricilerin Etkilerinin Deneysel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 26-27.
65. Kunt, M. A. (2016). İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2), 192-203.
66. Baş, Ş. (2014). *Atık Baca Gazı Kullanımı İle Termoelektrik Jeneratörlerde Elektrik Üretiminin Faydalı Kullanımının Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 36-39.

67. Abuşka, M., ve Akgül, M. B. (2016). Experimental study on thermal performance of a novel solar air collector having conical springs on absorber plate. *Arabian J. Sci Eng.*, 41(11), 4509-4516.
68. Yumurtacı, Z., ve Dönmez, A. H. (2013). Konutlarda Enerji Verimliliği. *Mühendis ve Makina*, 54(637), 38-43.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÖKTEKİN, Koray  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 21.09.1984, Ankara  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (543) 658 99 56  
 e-mail : goktekin.koray@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Müh.	Devam Ediyor
Lisans	İstanbul Teknik Üni. / Elk. ve Hab. Müh.	Devam Ediyor
Lisans	Kocaeli Üni. / Elektronik Öğretmenliği	2011
Lise	Yıldırım Beyazıt ATL / Telekomünikasyon	2003

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-2017	Akıllı Okul	Elektronik Öğretmeni
2013-2014	Sınav Dergisi Dershaneleri	Matematik Öğretmeni
2012-2013	KOÇ Sistem - EML Elk. Sis. San. A.Ş	Teknisyen
2007-2012	Türkiye Otomobil Sporları Federasyonu	Teknik Kontrol Hakemi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

- Variyenli, H. İ., Göktekin, K. (2018). *Hermetik Kombilerin Atık Isı Enerjisinden Termoelektrik Baca Sistemi Vasıtasıyla Elektrik Üretimi ve Türkiye'deki Potansiyeli*. International Engineering and Technology Symposium, Batman.

### Hobiler

Futbol, Rafting, Araba kullanmak, Kitap okumak, Seyahat etmek

## DİZİN

**A**

alternatif · 3, 4, 6, 9, 22, 36, 49  
atık ısı · 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13,  
14, 15, 23, 34, 71

**B**

bakım · 3, 4, 22, 23  
birincil enerji · 2, 3

**C**

CO<sub>2</sub> · 1, 6, 12, 19, 20, 36, 57, 58,  
61, 64, 65, 68, 70, 71

**Ç**

çevre dostu · 2

**D**

dağıtım · 1, 4, 72  
depolama · 4, 49  
doğalgaz · 1, 3

**E**

elektrik enerjisi · 1, 4, 6, 7, 8, 9,  
10, 11, 13, 15, 17, 22, 27, 34,  
35, 57, 61, 64, 68, 70, 71

**F**

fosil · 3, 4, 5, 57, 72  
fotovoltaik · 10, 11, 22

**G**

gaz yakıcı cihaz · 49, 57, 61, 64,  
68, 70, 71  
geri kazanım · 12, 13

**H**

Hermetik · 15, 44, 57, 62, 65, 69

**İ**

ileri · 2, 3, 25  
iletim · 1, 4, 16, 20, 24, 44, 72

**J**

jeotermal · 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11

**K**

Kalorifer · 53, 54, 57, 62, 64, 69,  
70  
Kullanım sıcak suyu · 70  
küresel · 1, 2, 4, 13

**M**

maksimum · 8, 11, 14, 38, 46, 54,  
59, 63  
minimum · 54, 59, 63, 66  
modül · 8, 9, 29, 36, 39, 40, 41

**O**

onarım · 3, 4, 36

**P**

Peltier Etkisi · 24  
petrol · 1, 2, 3

**R**

Rankine · 13, 21

**S**

Seebeck Etkisi · 24, 25, 26  
sıcaklık farkı · 9, 10, 11, 24, 26,  
27, 28, 29, 32, 34, 35, 46, 55,  
60, 63, 67  
Stirling · 13, 16, 17, 18, 76, 77

**T**

termoelektrik jeneratör · 4, 8, 10,  
11, 12, 14, 38, 46  
Thomson Etkisi · 24, 25

**Ü**

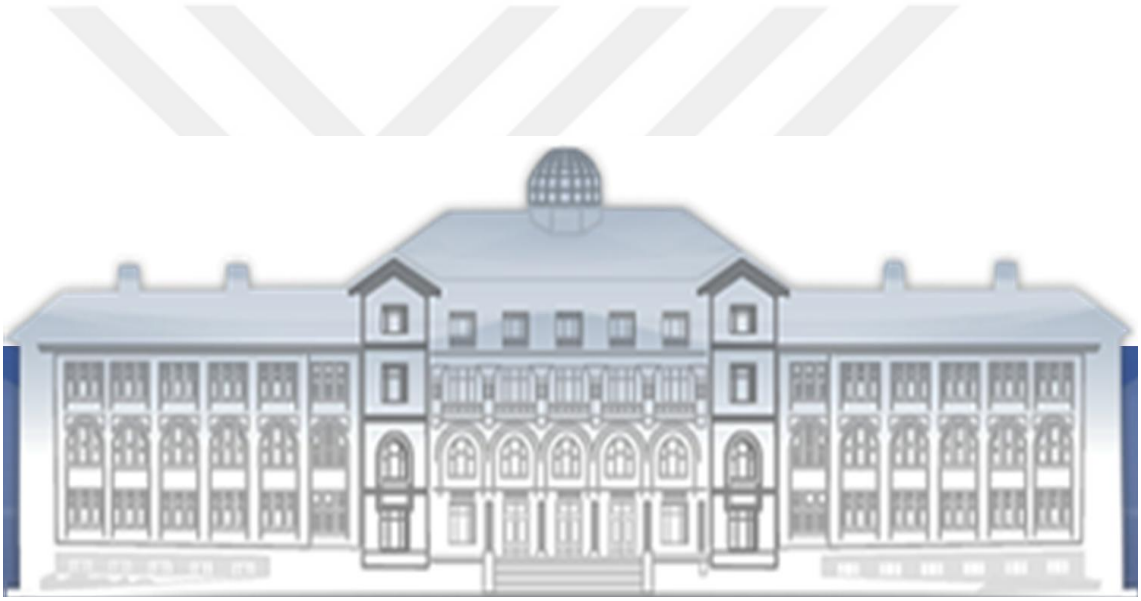
üretim · 1, 3, 4, 8, 9, 12, 13, 16,  
19, 21, 23, 49

**V**

verim · 5, 9, 11, 12, 22

**Y**

yenilenebilir enerji · 1, 2, 3, 5, 36



*GAZİ GELECEKTİR..*