

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ISIL SİSTEMLERDE MEVCUT ATIK ISI POTANSİYELİNDEN YARARLANARAK
TERMOFOTOVOLTAİK YÖNTEMLERLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİM
TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra Selenay ÖNAL

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı**

ARALIK 2017

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



**ISIL SİSTEMLERDE MEVCUT ATIK ISI POTANSİYELİNDEN
YARARLANARAK TERMOFOTOVOLTAİK YÖNTEMLERLE ELEKTRİK
ENERJİSİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Büşra Selenay ÖNAL
Y1613.080017**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU

Aralık 2017





T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı Y1613.080017 numaralı öğrencisi **Büşra Selenay ÖNAL**'ın "**ISIL SİSTEMLERDE MEVCUT ATIK ISI POTANSİYELİNDEN YARARLANARAK TERMOFOTO VOLTAİK YÖNTEMLERLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 05.12.2017 tarih ve 2017/29 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **Özge Kisi** ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak **kabul** edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

İmzası

Tez Savunma Tarihi : 20/12/2017

1) Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU

2) Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Behiye YÜKSEL

3) Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Barış KINACI

.....
.....
.....

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



YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “**ISIL SİSTEMLERDE MEVCUT ATIK ISI POTANSİYELİNDEN YARARLANARAK TERMOFOTOVOLTAİK YÖNTEMLERLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (21.12.2017)

Büşra Selenay ÖNAL



TEŐEKKÖR

Bu tez TÜBİTAK 1001 kapsamında yürütölen 114R088 nolu **”Isıl Sistemlerde Mevcut Atık Isı Potansiyelinden Yararlanarak Termofotovoltaik Yöntemlerle Elektrik Enerjisi Üretim Teknolojilerinin Geliştirilmesi”** adlı projeden üretilmiştir. Projeye vermiş oldukları desteklerden dolayı TÜBİTAK a teşekkür ederiz.





ÖNSÖZ

Isıl sistemlerde atık ısıların değerlendirilmesi enerji yönünden tasarruf sağlamaktadır. Termofotovoltaik yöntemlerle, atık ısılardan elektrik üretimi gerçekleştirilerek temiz ve yenilenebilir enerji olarak mevcut elektrik üretimine katkı sağlanmaktadır. Bu yöntem, maliyet, atık ısının etkin kullanımı ve enerji tasarrufu açısından alternatif sunarken aynı zamanda sera etkisini azaltarak çevre dostu bir üretim modeli olarak kabul edilmelidir. Bu çalışmanın amacı atık ısı kazanım yöntemlerini tanıtmak, termofotovoltaik yöntemlerle endüstriyel ve merkezi ısıtma sistemlerinde mevcut elektrik üretimine katkı sağlamaktır.

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmam boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Zafer UTLU' ya, tez kapsamında yapılan analizlerde yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Barış Kınacı hocama, ayrıca destekleri ile her zaman yanımda olan kadim dostlarıma, aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

Aralık 2017

Büşra Selenay ÖNAL
Makine Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
ABSTRACT	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Yapılan Çalışmalar	3
2. ATIK ISI KAZANIM YÖNTEMLERİ	7
2.1 Atık Isıların Sınıflandırılması.....	7
2.2 Atık Isı Kazanım Yöntemleri, Teknolojileri ve Kullanım Alanları	9
2.2.1 Reküperatörler.....	9
2.2.2 Rejeneratörler.....	10
2.2.3 Isı borulu ısı eşanjörü.....	11
2.2.4 Ekonomizer	11
2.2.5 Atık ısı kazanları	12
2.2.6 Termoelektrik teknolojisi	13
2.2.7 Termofotovoltaik (TPV) teknolojiler.....	14
3. IŞINIM	17
3.1 Elektromanyetik Dalga Spektrumu	18
3.2 Foton ve Yapısı.....	19
3.3 Siyah Cisim Işınması	20
3.4 Fotoelektrik Olay.....	22
4. ENDÜSTRİYEL VE MERKEZİ ISITMA SİSTEMLERİNDE MEVCUT ATIK ISI POTANSİYELLERİNİN BELİRLENMESİ	23
4.1 Demir-Çelik Üretim Yöntemleri	23
4.2 Endüstriyel Sistemlerde Atık Isı Potansiyellerinin Belirlenmesi	25
4.2.1 Yüksek sıcaklıklı atık ısılar.....	26
4.2.2 Orta sıcaklıklı atık ısılar	27
4.2.3 Düşük sıcaklıklı atık ısılar.....	27
4.3 Konut Sektörü Isıtma ve Soğutma Sistemleri	27
4.4 Merkezi Isıtma Sistemlerine Mevcut TPV Teknolojisinin Uygulanması ...	29
5. TERMOFOTOVOLTAİK SİSTEM VE YAPISI	33
5.1 Isı Kaynağı.....	34
5.2 Seçici Yayıcı.....	35
5.3 Filtre	36
5.4 Fotovoltaik Hücreler.....	36
6. TEORİK MODELLEME	39

7. TERMOFOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN DÜŞÜK VE YÜKSEK SICAKLIKLI ATIK ISI SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ.....	45
7.1 Termofotovoltaik Sistemin Kurulumu ve Deneysel Çalışma.....	45
7.2 Termofotovoltaik Sistemlerin Yüksek Sıcaklıklı Atık Isı Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi ve Analizi	54
7.3 Termofotovoltaik Sistemlerin Düşük Sıcaklıklı Atık Isı Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi ve Analizi	66
8. TERMOFOTOVOLTAİK SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ	75
8.1 Isı Kaynağı.....	75
8.2 Seçici Yayıcı.....	76
8.3 Optik Filtre	76
8.4 Fotovoltaik Hücre	77
8.5 Soğutma Sistemi	78
8.6 Termofotovoltaik Sistemin Genel Verimliliği.....	78
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKÇA	85
ÖZGEÇMİŞ.....	89

SİMGELER VE KISALTMALAR

TPV	: Termofotovoltaik
nm	: Nanometre (Uzunluk birimi)
μm	: Mikrometre
h	: Planck sabiti (J.s)
c	: Işık hızı (m/s)
k	: Boltzmann sabiti (J/K)
q	: Elektron yükü (C)
Trad	: Radyasyon (kaynak) sıcaklığı (K)
Tcell	: hücre sıcaklığı (K)
Eg	: Enerji bant aralığı (eV)
Iph	: Işınım ile orantılı akım (A)
Io	: Ters doyum akımı (A)
Isc	: Kısa devre akımı (A)
Voc	: Açık devre gerilimi (V)
Vm	: Optimum gerilim (V)
Im	: Optimum akım (A)
FF	: Doldurma faktörü ($=V_m \times I_m / I_{sc} \times V_{oc}$)
Rs	: Seri direnç (Ω)
Rsh	: Paralel direnç (Ω)
S	: Hücre alanı (m^2)
λ	: Dalga boyu (nm)
X	: Etkin yayılım katsayısı
η	: TPV system verimliliği
η_{ex}	: Ekserji verimliliği



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Düşük, Orta ve Yüksek Sıcaklıkta Farklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Değerleri	8
Çizelge 4.1 : 2008-2014 Dönemi Türkiye Nihai, Sanayi ve Demir Çelik Enerji Tüketim Değerleri (BİN TEP).	25
Çizelge 4.2 : 2010-2014 Dönemi Çelik Enerji Tüketiminde Kullanılan Enerji Kaynakları ve Kullanım Değerleri (BİN TEP).	26
Çizelge 4.3 : Endüstriyel Sistemlerde Yüksek Sıcaklıklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri	26
Çizelge 4.4 : Endüstriyel Sistemlerde Orta Sıcaklıklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri.....	27
Çizelge 4.5 : Endüstriyel Sistemlerde Düşük Sıcaklıklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri.....	27
Çizelge 4.6 : Konut Sektöründe Kullanılan Farklı TPV Sistemlerinin Performans Verileri.	30
Çizelge 6.1 : Sabit Hücre Parametreleri.	41
Çizelge 6.2 : Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Atık Işınım Enerjilerinin TPV Sistemleri ile Geri Kazanımı ve Verimliliği	42
Çizelge 7.1 : Kaynak Sıcaklığına Karşı Elde Edilen Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri.....	50
Çizelge 7.2 : Sürüklenme Difüzyon Modelinde Kullanılan Parametreler.....	57
Çizelge 8.1 : Yüksek Sıcaklıklı Termofotovoltaik Sistemlerde $T_{ışınım}$ Ve $T_{hücre}$ Sıcaklıklarına Bağlı Olarak Elde Edilen Hücre Verimlilik Değerleri.....	79
Çizelge 8.2 : Düşük Sıcaklıklı Termofotovoltaik Sistemlerde $T_{ışınım}$ Ve $T_{hücre}$ Sıcaklıklarına Bağlı Olarak Elde Edilen Hücre Verimlilik Değerleri.....	80



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Reküperatör	10
Şekil 2.2 : Sabit Levha Isı Değiştiricide Hava Akımları	10
Şekil 2.3 : Isı Borulu Isı Eşanjörü.....	11
Şekil 2.4 : Ekonomizer	12
Şekil 2.5 : Atık Isı Kazanı.....	13
Şekil 2.6 : Peltier Etkisi	14
Şekil 2.7 : TPV Sisteminin Şeması ve Geliştirilen Bir TPV Prototipi	15
Şekil 3.1 : Farklı Yüzeylerden Meydana Gelen Işıma.....	17
Şekil 3.2 : Elektromanyetik Dalga Spektrumu	18
Şekil 3.3 : Fotonun İki Boyutta Görüntüsü.....	20
Şekil 3.4 : Siyah Cisim Işıması Dalga Boyu-Sıcaklık İlişkisi	21
Şekil 3.5 : Siyah Cisim Işımasının Deneysel Veri Grafiği	21
Şekil 3.6 : Fotoelektrik Olay.....	22
Şekil 4.1 : BOF Yönteminin Aşamaları: (1) Hurda Yükleme, (2) Yüksek Fırından Gelen Pik Demir, (3) O ₂ Üfleme, (4) Sıvı Çeliğin Alınması, Alaşım Elementleri Ve Bazı İlavelerin Katılması, (4) Cürufun Alınması	24
Şekil 4.2 : Elektrik Ark Fırınının Genel Yapısı	25
Şekil 4.3 : Örnek Bir Merkezi Isıtma Sistemi.....	29
Şekil 4.4 : Isıtıcılarda Uygulanan TPV Sisteminin Bileşenleri	29
Şekil 4.5: (a) Isıtıcı TPV Sistemine Eklenen Spektral Kontrol İçin Eklenen NiO/MgO Çit IR Emmitter Ve Yeni Sistemin Şematik Görüntüsü b) Firmanın Isıtıcı TPV Sisteminde Kullandığı GaSb Hücrelerinin Birleştirilmiş Devresi	30
Şekil 5.1 : TPV Sisteminin Genel Yapısı	33
Şekil 5.2 : Isı Kaynağı	35
Şekil 5.3 : Seçici Yayıcı.....	35
Şekil 5.4 : GaSb Hücresi.....	37
Şekil 5.5: TPV Sisteminin Şematik Olarak Gösterimi	37
Şekil 6.1 : Fotodiyot Eşdeğer Devresi	39
Şekil 6.2 : Demir-Çelik Sanayi TPV Uygulamaları İçin Yüksek Görme Faktörü	41
Şekil 6.3 : Akkor Halindeki Çeliğin İki Yüzeyine Yerleştirilmiş 4 Düzlemsel TPV Modülü	42
Şekil 7.1 : GaSb TPV Hücresi Üzerinde Yapılan Deneysel Çalışma.....	46
Şekil 7.2 : Deneysel Çalışma Sırasında Kullanılan Voltmetre ve Datalogger	46
Şekil 7.3 : Deneysel Çalışma Sırasında Kullanılan Termal Kamera ve GaSb Hücresi	47
Şekil 7.4 : 205 °C ve 306 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı ve Gerilim Değerleri.....	47
Şekil 7.5 : 310°C ve 389 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri.....	48
Şekil 7.6 : 489 °C ve 491 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri.....	48

Şekil 7.7 : 554 °C ve 593 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri.....	49
Şekil 7.8 : 697 °C ve 748 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri.....	49
Şekil 7.9 : 862 °C ve 898 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri.....	49
Şekil 7.10 : 949 °C ve 950 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri.....	50
Şekil 7.11 : Deney Başlangıcında Termal Kamera ile Kızaran Tel Üzerinde Ölçülen Sıcaklık Değeri.....	51
Şekil 7.12 : Işımanın Gözle Görülür Olduğu Noktada Meydana Gelen Sıcaklık Değeri.....	52
Şekil 7.13 : Kaynak Sıcaklığı Artışına Bağlı Olarak Meydana Gelen Yüksek Işıma Sonucu Kızaran Tel Üzerinde Ölçülen Sıcaklık Değeri.....	52
Şekil 7.14 : En Yüksek Kaynak Sıcaklığında Kızaran Tel Üzerinde Ölçülen Sıcaklık Değeri.....	53
Şekil 7.15 : Deney Sonunda Soğumaya Bırakılan Kızaran Tel Üzerinde Ölçülen Maksimum Sıcaklık Değeri.....	53
Şekil 7.16 : Kaynak Sıcaklığı Boyunca Değişen Siyah Cisim Radyasyon Spektrumu.....	56
Şekil 7.17 : $T_{ışırma} = 1300$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiğı.....	58
Şekil 7.18 : $T_{ışırma} = 1600$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiğı.....	58
Şekil 7.19 : $T_{ışırma} = 1900$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiğı.....	59
Şekil 7.20 : $T_{ışırma} = 2200$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiğı.....	60
Şekil 7.21 : $T_{ışırma} = 2400$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiğı.....	60
Şekil 7.22 : $T_{ışırma} = 2800$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiğı.....	61
Şekil 7.23 : $T_{ışırma} = 3100$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiğı.....	62
Şekil 7.24 : Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{hücre} - V_{oc}$ Grafiğı.....	63
Şekil 7.25 : Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{hücre} - J_{sc}$ Grafiğı.....	63
Şekil 7.26 : Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{hücre} - FF$ Grafiğı.....	64
Şekil 7.27 : Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{hücre} - \eta$ Grafiğı.....	65
Şekil 7.28 : Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{ışırma} - \eta$ Grafiğı.....	65
Şekil 7.29 : Merkezi Isıtma Sistemlerinde Termofotovoltaik Uygulama Örneğı.....	66
Şekil 7.30 : Hücre Sıcaklığı Değişiminin Enerji Verimliliğine Etkisi.....	67
Şekil 7.31 : Radyasyon Sıcaklığı Değişiminin Enerji Verimliliğine Etkisi.....	68
Şekil 7.32 : Hücre Sıcaklığı Değişiminin Doldurma Faktörüne Etkisi.....	69
Şekil 7.33 : Radyasyon Sıcaklığı Değişiminin Doldurma Faktörüne Etkisi.....	70
Şekil 7.34 : Hücre Sıcaklığı Değişiminin Kısa Devre Akımına Etkisi.....	71
Şekil 7.35 : Radyasyon Sıcaklığı Değişiminin Kısa Devre Akımına Etkisi.....	72
Şekil 7.36 : Hücre Sıcaklığı Değişiminin Açık Devre Gerilimine Etkisi.....	73
Şekil 7.37 : Radyasyon Sıcaklığı Değişiminin Açık Devre Gerilimine Etkisi.....	74

ISIL SİSTEMLERDE MEVCUT ATIK ISI POTANSİYELİNDEN YARARLANARAK TERMOFOTOVOLTAİK YÖNTEMLERLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Günümüzde enerji tüketiminin giderek artması, yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ve minimum girdi ile maksimum verim elde etme talebi yeni teknoloji arayışlarına hız kazandırmıştır. Atık ısıların değerlendirilmesi enerji yönünden tasarruf sağlamaktadır. Atık ısılarından elektrik üretimi gerçekleştirilerek temiz ve yenilenebilir enerji olarak mevcut elektrik üretimine katkı sağlanmaktadır. Bu yöntem, maliyet, atık ısının etkin kullanımı ve enerji tasarrufu açısından alternatif sunarken aynı zamanda sera etkisini azaltarak çevre dostu bir üretim modeli olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada mevcut atık ısı potansiyelinden yararlanarak termofotovoltaik enerji dönüşümü ile elektrik üretim teknolojisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde termofotovoltaik enerji dönüşümü ile endüstriyel sistemlerde ve merkezi ısıtma sistemlerinde kullanılabilirliği araştırılmış ve endüstriyel sistemlerde teorik bir model geliştirilmiştir. Bu modelde, endüstriyel sistemlerdeki atık ısılar, sisteme ısı geçişi yöntemlerinden biri olan ışınım yolu ile incelenmiştir. Üretim aşamasından sonra meydana gelen atık ısı, sisteme termofotovoltaik dönüşüm ile elektrik üretimi sağlanarak geri kazandırılmıştır. Yapılan çalışmada endüstriyel ve merkezi ısıtma sistemlerinde termofotovoltaik sistemin analizi yapılmıştır. GaSb hücre yapısının tabaka kalınlıkları optimize edilmiş ve nihai örnek tasarımı Matlab programı kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan analizde, TPV sıcaklık grafikleri GaSb hücresi kullanılarak elde edilmiştir. Kullanılan sıcaklık parametreleri hücre sıcaklığı ve kaynak sıcaklığıdır. Bu grafiklerle enerji verimliliği, dolum faktörü, açık devre voltajının etkisi ve kısa devre akım değerleri belirlenmiştir. Ayrıca termofotovoltaik sistemin termodinamik analizi yapılarak sonuçlar sunulmuştur. Öncelikli olarak termofotovoltaik sistem üç ayrı bölgeye ayrılarak analizi yapılmıştır. Analizde sistemin her bir parçası ayrı ayrı yapılırken sistemin bütünü ayrıca ele alınmıştır. Sistem öncelikle birinci kanun analizi yapılarak değerlendirilmiştir daha sonra ikinci kanun analizi yapılmıştır. Birinci bölge ısı kaynağının ışınım ile filtrelere ulaşana kadar meydana gelen enerjinin termodinamik analizidir. İkinci bölge ise fotovoltaik sistem olarak değerlendirilen filtre, seçici-yayıcı ve fotovoltaik hücrelerin yer aldığı bölümdür. Son bölge olarak ifade edilen üçüncü bölge ise elektrik enerjisinin depolandığı kısım olarak değerlendirilmiştir. Her bölgenin termodinamik analizi kapsamında, enerji ve ekserji analizi yapılarak sistem parçadan bütüne doğru incelenmiştir. Sonuçlar formüller ve grafikler ile desteklenmiştir. Yapılan çalışmanın mevcut elektrik üretimine alternatif olması ve ileride yapılacak çalışmalara bir kaynak oluşturması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termofotovoltaik, Atık ısı, Termodinamik Analiz, Termodinamiğin 1. kanunu ve 2. kanunu, Elektrik üretimi, Enerji, Ekserji.



DEVELOPMENT OF ELECTRICAL ENERGY PRODUCTION TECHNOLOGIES WITH THERMOPHOTOVOLTAIC METHODS BY USING EXISTING WASTE HEAT POTENTIAL IN THERMAL SYSTEMS

ABSTRACT

Increasing energy consumption today the rapid depletion of renewable energy sources and request to obtain maximum efficiency with minimum input have been speed up the search for new technologies. Assessment of waste heat saves energy. Electricity produced from waste heat, as clean and renewable energy contributes to the current electricity production. This method should be regarded as an environmentally friendly production model by reducing the greenhouse effect at the same time while providing an alternative in terms of cost, efficiency and energy saving. In this study, it is aimed to develop electricity production technology by thermophotovoltaic energy conversion by exploiting existing waste heat potential. In the literature, the use of thermophotovoltaic energy conversion in industrial systems and central heating systems have been researched and a theoretical model in industrial systems has been developed. In this model, waste heat in industrial systems was investigated by radiation, which is one of the heat transfer methods in the system. The waste heat produced after the production phase is recovered by supplying electricity to the system with thermophotovoltaic conversion. In this study, the analysis of the thermophotovoltaic system was made in industrial and central heating systems. The layer thicknesses of the GaSb cell structure were optimized and the final sample design has been calculated using the Matlab program. In the analysis made, TPV temperature graphs has been obtained using GaSb cell. The temperature parameters used are cell temperature and welding temperature. With these graphs, energy efficiency, fill factor, effect of open circuit voltage and short circuit current values are determined. Thermodynamic analysis of thermophotovoltaic system is also presented. Firstly, the thermophotovoltaic system was analyzed in three different regions. In the analysis, each part of the system is taken separately, while the whole system is handled separately. The system was evaluated first analyzing by the first law and then the second analyzed by second law. The first region is the thermodynamic analysis of the heat source of energy that occurs with radiation until it reaches the filter. The second region is where the filter, selective-emitter and photovoltaic cells, considered as photovoltaic systems, take place. The third region, which is expressed as the last region, is considered to be the part where electric energy is stored. Within the thermodynamic analysis of each region, energy and exergy analysis were carried out and the system was analyzed from part to part. The results are supported by formulas and graphs. It is aimed that the work done will be an alternative to the existing electricity generation and will form a resource for future works.

Keywords: Thermophotovoltaic, Waste heat, Thermodynamic analysis, First law of thermodynamics and Second law of thermodynamics, Electricity generation, Energy, Exergy.



1. GİRİŞ

Enerji tüketiminin giderek artması, kullanılan enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ve bu enerji kaynaklarının çevreye zarar vermesi yeni, temiz ve doğa dostu enerji kaynakları arayışını kaçınılmaz bir hale getirmektedir. Isıl sistemlerde mevcut atık ısılar kullanılarak elektrik üretimi mümkün olmaktadır. Endüstriyel sistemlerde üretim aşamasında meydana gelen atık ısılar, sisteme geri kazandırılarak termal enerji elektrik enerjisine termofotovoltaik sistemler ile dönüştürülebilmektedir. Böylece yüksek sıcaklıklı atık ısılarından elektrik üretimi gerçekleştirilerek temiz ve yenilenebilir enerji olarak mevcut elektrik üretimine katkı sağlanmaktadır. Bu yöntem, maliyet, atık ısının etkin kullanımı ve enerji tasarrufu açısından alternatif sunarken aynı zamanda sera etkisini azaltarak çevre dostu bir üretim modeli olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmada endüstriyel sistemlerde meydana gelen atık ısının geri kazanım yöntemleri incelenerek, üretim aşamasında yüksek sıcaklıklı atık ısı meydana getiren demir-çelik sektörü ele alınmıştır. Atık ısıları kullanarak termal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren termofotovoltaik sistem tasarlanıp teorik modeli oluşturulmuştur.

Bölüm I'de literatür taraması yapılarak termofotovoltaik sistemler hakkında yapılan çalışmalar özet halinde sunulmuştur.

Bölüm II'de atık ısı kazanım yöntemleri anlatılmıştır. Endüstriyel sistemlerdeki atık ısılar; düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar, orta sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar ve yüksek sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar olmak üzere üç gruba ayrılmış ve endüstriyel proses ekipmanlarının yüksek sıcaklık aralıklarındaki atık gaz sıcaklık değerleri verilmiştir.

Bölüm III' te termofotovoltaik sistemin temelini oluşturan ışınım, siyah cisim ışıması, elektromanyetik spektrum, fotoelektrik olay ve foton kavramlarına yer verilmiştir.

Bölüm IV' te endüstriyel ve merkezi ısıtma sistemlerinde mevcut atık ısı potansiyelleri incelenmiş ve demir-çelik üretim yöntemleri anlatılmıştır. Endüstriyel sistemlerde atık

ısı potansiyelleri ile konut sektöründe ısıtma ve soğutma sistemleri incelenmiştir. Ayrıca konut sektöründe kullanılan farklı TPV sistemlerinin performans verilerine yer verilmiştir.

Bölüm V' te termofotovoltaik sistem, bu sistemi oluşturan ısı kaynağı, seçici yayıcı, filtre ve fotovoltaik hücrelerin sistem içerisindeki görevleri anlatılmıştır.

Bölüm VI'da endüstriyel sistemlerde kullanılmak üzere termofotovoltaik sistemin teorik modellenmesi yapılmıştır. Uygulamada fotovoltaik hücre olarak GaSb ve InGaAsSb hücresi kullanılmıştır. Hücre parametreleri olarak enerji bant aralığı, hücre alanı, akseptör yoğunluğu ve donör yoğunluğu alınmıştır. Bant aralıklarının sıcaklıkla değişimi hesaplanarak verim değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bölüm VII'de öncelikle termofotovoltaik sistemin kurulumu ve laboratuvar ortamında deneysel modellenmesi yapılmıştır. Kaynak sıcaklığının hücre sıcaklığına ve hücre gerilimine olan etkisi belirlenmiş ve termal kamera kullanılarak ısı kaynağı olan kızaran tel üzerinde en yüksek sıcaklık değeri tespit edilmiştir. Ayrıca termofotovoltaik sistemlerin düşük ve yüksek sıcaklıklı atık ısı sistemlerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla endüstriyel ve merkezi ısıtma sistemleri üzerinde teorik modelleme yapılmıştır. Endüstriyel sistemlere uygulanan GaSb hücreli termofotovoltaik güneş hücre yapısı tasarlanmıştır. Değişen ışınım kaynağı sıcaklığına bağlı olarak, hücre sıcaklığına karşı temel parametreler olan açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (J_{sc}), doluluk faktörü (FF) ve enerji dönüşüm verimliliği değeri (η) davranışları grafiklerle sunulmuştur. Ayrıca termofotovoltaik sistemlerin merkezi ısıtma sistemlerindeki kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla farklı parametrelerdeki değerler girilerek analiz yapılmıştır. Bu analizde GaSb hücresi kullanılarak TPV düşük sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Analizde bu değerlerin enerji verimliliğine, doldurma faktörüne, açık devre gerilimine ve kısa devre akımına etkisi tespit edilmiştir.

Bölüm VIII'de termofotovoltaik sistemin termofotovoltaik analizi yapılmıştır. Bu aşamada sistem üç bölgeye ayrılmıştır. Her bir bölgenin enerji ve ekserji analizi yapılarak formüller verilmiştir.

Bölüm IX'de sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmada termofotovoltaik sistemlerin endüstriyel sistemlerde ve merkezi ısıtma sistemlerinde kullanılabilirliği araştırılmış ve diğer araştırmacılara kaynak oluşturması amaçlanmıştır.

1.1 Yapılan Çalışmalar

Günümüzde enerji kaynaklarının ömrünün kısalması ve hızlı enerji tüketimi yeni enerji arayışına gereksinim duyulmasına sebep olmuştur. Enerjiden maksimum verim elde etmek ve enerji maliyetini minimize etmek temel hedefler arasında yer almaktadır. Bu düşünceden hareketle mevcut elektrik üretimine alternatif olarak yeni nesil TPV sistemi araştırma konusu olmuştur [1,2].

TPV'nin kökenleri 1970'li yılların başlarına kadar uzanmaktadır [3]. Termofotovoltaik, 20. yüzyılın son on yılında ısı / elektrik birikimi için bir teknoloji olarak yoğun olarak araştırılmıştır. Bununla birlikte, henüz geniş çaplı bir ticarileştirme sağlanamamıştır [4]. Çoğu literatür referansı, 1947'da MIT 'de yapılan bir dizi konferans sırasında kavramı öneren TPV'nin mucidi olarak Aigrain 'i belirtmektedir. [4, 7]. Nelson, Kolm tarafından TPV sistemi ve " Güneş pilleri güç kaynağı " başlıklı bir yayın hakkında bilgi verilmiştir [7, 8]. TPV dönüşümünü kullanarak endüstriyel atık ısı geri kazanımı, 1990'ların sonunda Coutts tarafından önerilmiştir [9]. Ayrıca, 1990'lı yılların sonunda Yakın Alan TPV (NF-TPV) alanındaki temel araştırmalar başlamıştır. 2000'li yılların başından itibaren elektrik gücü 10 W'ın altındaki minyatür TPV jeneratörlerinin gelişimi hızlanmıştır.

2008 yılında Tobler ve Durisch, intermetalik alaşım $MOSi_2$ üzerinde erbiyum katkılı $Er_{1.4} Y_{1.4} Al_4 O_{12}$ ve $Er_2 O_3$ 'ün vakum plazma spreysi kaplamasıyla seçici radyatörler üretmiştir. Radyatörler, oksijen içeren bir atmosferde 1700°C sıcaklıkta tam çalıştırılabilir, oldukça termal şok istikrarına ve iyi seçici yayan özelliklere sahiptir. Mao ve Ye, 2010 yılında, geçiş bandında 1.44-1.74 μm civarında büyük salınımlarla tek boyutlu Si / SiO_2 fotonik kristallerini modifiye etmiştir. Daha sonra, modifiye fotonik kristal filtresi kullanılarak TPV sistem performansının geliştirilmesi öngörülmüştür [10].

2011 yılında düzlemsel bir SiC radyatörü olan deneysel bir TPV sistemi kurulmuştur. Ayrıca, radyatör ve hücre sıcaklığının tek bir TPV hücresinin çıkış performansı

üzerindeki etkilerini analiz etmek için matematiksel bir fiziksel model geliştirilmiştir. Bununla birlikte, modülün performansı sadece deneysel olarak analiz edilmiştir [11].

Yang ve arkadaşları laboratuvar testlerine dayalı olası ısı geri kazanımını incelemiştir. Yanma odasında alev yayan spektrum da Li ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. Pascale ve arkadaşları TPV'nin entegrasyonunu incelemiş ve giriş enerjisinin yoğunluğunu azaltabilmişlerdir. Cockeram ve Hollenbeck, etkili emisyon sistemlerinin geliştirilmesine yol açan yüksek emissivite maddeleri ile kaplanmış bir emitör yüzeyi kullanarak seçici yayıcının spektrumuyla orantılı olarak bir enerji band aralığına sahip olan hücrelerin, TPV sisteminin geliştirilmiş verimliliği ile sonuçlanacak şekilde kullanılması gerektiğini göstermişlerdir [12].

Daha sonraki üç eserde Badescu, partiküler bir TPV cihazını analiz etmiş ve TPV cihazlarının ana bileşenlerini bütünleyen bir teori kullanmıştır. Bileşenler birincil lens (veya ayna), absorbe edici, PV hücresi ve bir foton reküperatör sistemi içermektedir. TPV verimliliğini emici, PV hücre sıcaklıkları ve hücre gerilimi olmak üzere üç optimizasyon parametresi kullanarak maksimize etmiştir. Bu çalışmaların temel sonuçları olarak termal tasarımın, optimum PV hücre band aralığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Normal bir termal tasarım söz konusu olduğunda, hücre sıcaklığının genellikle yüksek ve bant aralığına doğrudan bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Doğru termik tasarım göz önüne alındığında, optimum hücre sıcaklığının, çevre sıcaklığından 30 derece daha düşük ve band aralığındaki bir artış ile azaldığı tespit edilmiştir [12].

Bitnar ve arkadaşları bir yerleşim merkezi gaz ısıtma sisteminde TPV sisteminin bir başka uygulamasını açıklamıştır. Elektrikli şebekeden bağımsız gaz ısıtma sistemini çalıştırmak ve elektrik enerjisi sağlamak için bir TPV sistemi geliştirmişlerdir [13].

Butcher ve arkadaşları, 119 W'lık bir elektrik enerjisi üreterek şebekeden bağımsız çalışma sağlamak için TPV teknolojisini kullanan, kendi kendine çalışan bir yağlı-hidrolik ısıtma sisteminin başarılı bir şekilde çalışabildiğini bildirmiştir [14].

Bitnar ve arkadaşları radyasyon yayıcılar, filtreler ve foto-hücreler gibi TPV sistem bileşenleri ile ilgili bazı gelişmeleri gözden geçirmiş ve teorik sistem simülasyonlarını, sistem verimliliği ve elektrik çıkış gücü ile ilgili deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. TPV'nin yeni uygulamalarını önermişler ve bu teknolojinin ticari potansiyelini değerlendirmişlerdir [15].

Utlu yapmış olduğu çalışmada Türk endüstri sektöründe düşük, orta ve yüksek sıcaklık kademelerinde mevcut atık ısı geri kazanım potansiyellerini incelemiş ve TPV'nin bu atık ısı sıcaklık kademelerinde uygulamalarını değerlendirmiştir [1].

TPV'nin endüstriyel uygulaması Utlu ve Parali tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmada TPV teknolojisi ve yüksek sıcaklıklı atık ısı ile ilgili olgular gözden geçirilmiş ve yüksek sıcaklık endüstrisinde, ürün, baca gazı ve duvar ısı geri kazanımında kullanılan ve açıklanan ısı geri kazanım cihazlarının kullanıldığı toplam teknik potansiyel enerji geri kazanımının 447.8 PJ / yıl olduğu tahmin edilmiştir. Bununla birlikte, TPV verimliliklerine göre 22.40 PJ / yıl ile 77.44 PJ / yıl arasında bir enerji geri kazanımı tahmini yapılmıştır [2].

Utlu ve Hepbaşı enerji ve ekserji analizi yöntemini kullanarak Türk endüstri sektöründe enerji kullanma verimliliğini değerlendirmiştir [16].

Johansson ve arkadaşları TPV'nin çelik ve demir üretim birimlerinde uygulanmasını önermişlerdir. Yapılan çalışmada, hem entegre hem de hurda bazlı çelik tesisleri için fırsatlar sunulmuş ve elektrik üretimi, yakıt dönüşümü, kok fırını gazının metan reformu seçenekleri bir sistem perspektifinden değerlendirilmiştir [17].

Laroche ve arkadaşları bir TPV hücresinin yakın alanında bulunan bir termal kaynaktan oluşan bir yakın alan termofotovoltaik (TPV) cihazın niceliksel modelini incelemişlerdir. Kısa mesafede gelişmiş radyasyon transferinin, fotojenasyon akımının artmasına neden olduğunu belirlemişler ve kantitatif olarak, diğer potansiyel yakın-alan etkilerini gözlemlemiş, özellikle de karanlık akım üzerinde analiz etmişlerdir. Geliştirilen modelde, alanın yakınında bulunan TPV cihazının elektrik gücü ve verimliliği nicel olarak değerlendirilmiştir [18].



2. ATIK ISI KAZANIM YÖNTEMLERİ

Atık ısı, sistemde yapılan iş sonucu oluşan düşük enerjili ısıdır. Makineler, fırınlar ve soba gibi sistemler çalıştıkları süre boyunca ısı yayarlar [19]. Üretim aşamasında atık ısı; üründen, ısıtıcıdan (fırın duvarı, soba vb.) ve baca gazından çıkabilmektedir.

Atık ısı kazanım yolları farklı endüstrilere göre değişebilmektedir. Atık ısı kazanım yolları arasında eşanjörler, reküperatörler, ısı kazanları, pasif hava ısıtıcılar, rejeneratif ve ekonomizerler sayılabilir. Isı eşanjörleri genellikle egzoz gazları ısınıfını fırına giren yanma havasına transfer etmek için kullanılır. Reküperatörler baca gazındaki atık ısıfının yakma havasına aktarıldığı ısı değıştiricilerdir. Atık ısı kazanları, sıcak gazın önüne yerleştirilerek atık sıcak gazın enerjisinden yararlanılıp suyun ısıtılması sağlanmaktadır. Pasif hava ısıtıcılar, düşük ve orta sıcaklık uygulamaları için gazdan gaza ısı kazanımı yapan cihazlardır. Ekonomizerler düşük ve orta sıcaklıktaki sıvıları ısıtmak için kullanılan egzoz gazlarından ısıyı geri kazanmak için kullanılırlar [19]. Bu sisteme ilave olarak elektrik üretme amaçlı termoelektrik ve termofotovoltaik (TPV) sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Termoelektrik sistemler ısıfının doğrudan elektriğe çevrilmesi yöntemi ile çalışırken, termofotovoltaik sistemler ışınım ile elektrik üretimini hedeflemektedir.

2.1 Atık Isıların Sınıflandırılması

Endüstriyel sistemlerdeki atık ısılar; düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar, orta sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar ve yüksek sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Düşük sıcaklık atık ısıfısı düşük buhar basıncı ihtiyacı ve ön ısıtma amacı için tamamlayıcı bir yol olarak yararlı olabilir [16].

Endüstriyel proses ekipmanlarının orta sıcaklık aralıklarındaki atık gaz sıcaklık değeri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Bu orta sıcaklıktaki değeriin çoğu yanma süreçlerinden elde edilmiştir [16]. Endüstriyel proses ekipmanlarının yüksek sıcaklık

aralıklarındaki atık gaz sıcaklık değerleri de Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Bütün bu sonuçlar direkt olarak yanma süreçlerinden elde edilmiştir [16].

Çizelge 2.1 : Düşük, Orta ve Yüksek Sıcaklıkta Farklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Değerleri [16].

Düşük Sıcaklık		Orta Sıcaklık		Yüksek Sıcaklık	
Isı Kaynağı	Sıcaklık (°C)	Isı Kaynağı	Sıcaklık (°C)	Isı Kaynağı	Sıcaklık (°C)
Buhar Yoğuşurma Prosesleri	44-88	Buhar Kazanı Egzozları	230-480	Nikel Rafine Fırınları	1370-1740
Soğutma Suyu	-	Gaz Türbini Egzozları	370-440	Alüminyum Rafine Fırınları	740-770
Kaynak Makineleri	32-88	Pistonlu Motor Egzozları	314-700	Çinko Rafine Fırınları	770-1100
Enjeksiyon Makineleri	32-88	Pistonlu Motor Egzozları (Turbo Şarjlı)	230-370	Bakır Rafine Fırınları	770-814
Tavlama Fırınları	77-230	Isıl İşlem Fırınları	424-740	Çelik Isıtma Fırınları	924-1040
İçten Yanmalı Motorlar	77-120	Kurutma ve Pişirme Fırınları	230-700	Bakır Reverber Fırını	900-1100
Kalıp Şekillendirme	27-88	Katalitik Krakerler	424-740	Açık Ocak Fırınları	740-700
Klima ve Soğutma Kondansatörleri	32-43	Tavlama Fırını Soğutma Sistemleri	424-740	Çimento Fırınları (Kurutma Süreci)	720-730
Kurutma, Pişirme ve Kütleme Fırınları	93-232	-	-	Cam Eritme Fırınları	1000-1440
-	-	-	--	Hidrojen Tesisleri	740-1000
-	-	-	-	Katı Atık Yakma Tesisleri	740-1000
-	-	-	-	Çöp Yakma Fırını	740-1440

Atık ısılar sınıflandırılırken sıcaklık değerleri dikkate alınmaktadır. 740 °C ve üzeri sıcaklıklar yüksek sıcaklıklı atık ısı, 230 °C ve 740 °C arası sıcaklıklar orta sıcaklıklı atık ısı, 230 °C ve altı sıcaklıklar düşük sıcaklıklı atık ısı grubuna girmektedir.

Genel olarak tesislerde atık gaz sıcaklıkları metal ve cam üretim tesislerinde 1000 °C – 1400 °C, çimento sanayisinde 700 °C, yakma tesislerinde 740 °C – 1000 °C, buhar tesislerinde 230 °C – 480 °C, gaz türbinlerinde 370 °C – 440 °C, gaz motorlarında 230 °C – 700 °C ve kurutma fırınlarında 230 °C – 740 °C arasında olmaktadır [18].

2.2 Atık Isı Kazanım Yöntemleri, Teknolojileri ve Kullanım Alanları

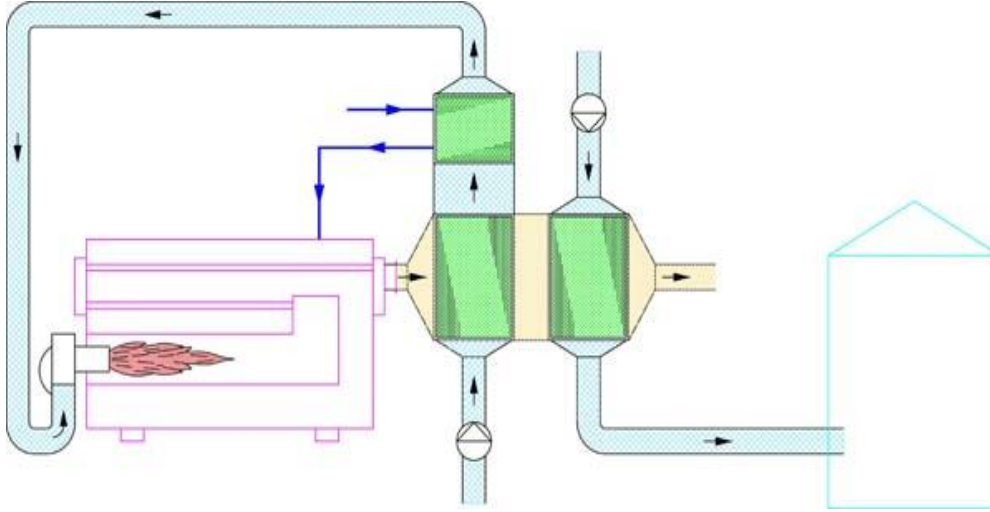
Atık gaz, ısı geri kazanımı için önemli olan faktör kullanılabilir değeri olmasıdır. Atık ısı kazanım yöntemleri arasında reküperatörler, rejeneratörler, ısı borulu ısı eşanjörü, ekonomizer, atık ısı kazanları, termoelektrik ve termofotovoltaik (TPV) teknolojileri sayılabilir.

Atık ısı kullanım alanları sektörlere göre değişmektedir. Demir-çelik endüstrisi termal enerjiyi elektriğe dönüştürmek için atık ısıyı kullanır. Tekstil sektöründe kullanılan atık su; yıkama, boyama, bitirme işlemlerinde ısı enerjisi kullanılarak sisteme geri kazandırılır. Çimento sektöründe, WHR (Atık Isı Kazanımı) sistemi ile atmosfere salınan sıcak gazlar elektrik enerjisine dönüştürülür. Cam endüstrisinde, yüksek sıcaklıklı atık ısı sisteme geri yüklenir. Böylece mevcut gazları bir atık ısı kazanından geçirerek gerekli buhar üretmek mümkündür.

Atık ısı kullanım alanlarından bir tanesi de deniz suyunun işlenmesidir. Bu işlemde tuzlu su ısıtılır ve buharlaştırılır. Buhar ilk önce soğutulur, sonra saf su elde etmek için yoğunlaştırılır. Bu su içme, yıkama ve sulama amaçlı kullanılır. Isının bir kısmı binaları ısıtmak için kullanılır. WHP üniteleri, atık ısıyı elektriğe dönüştürür ve yakıt masraflarını ve enerji tüketimini azaltır. Bu işlem atık ısının bulunduğu durumlarda uygulanabilir ve sera gazı emisyonlarının ve fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olur. Atık ısı geri kazanım uygulamaları, özellikle endüstriyel tesislerde önemli enerji tasarrufu sağlar. Endüstriyel tesislerde kullanılan kazanlar, fırınlar, kojenerasyon tesisleri vb. makinalarda atmosfere atılan bacadaki atık ısı enerjisi bir ekonomizer veya reküperatör sistemiyle geri kazandırılır. Elde edilen atık ısı ile sıcak su veya sıcak hava elde etmede kullanılarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır [20].

2.2.1 Reküperatörler

Bu sistemlerde baca gazı ile hava ısıtılması metal ya da seramik ayırıcılar üzerinden ısı değişimi ile gerçekleşmektedir. İç içe geçirilmiş metal malzemeler kullanılarak ısıyınım yoluyla havanın ısıtılması sağlanmaktadır. İmalatı ve uygulanması kolaydır. Reküperatörlerde; parçacıklar içermeyen atık gaz mümkün olan en küçük çaplı borulardan geçirilerek ısı transfer yüzey alanı artırılır; ısıtılacak akışkan yönlendirici plakalar yoluyla birden fazla geçiş yaparak ısı transfer süresi artırılmış olur. Yüksek verimli ısı transferi için tercih edilen bu sistemler hacimsel sıkıntı olmayan tesislerde tercih edilmektedir [21].



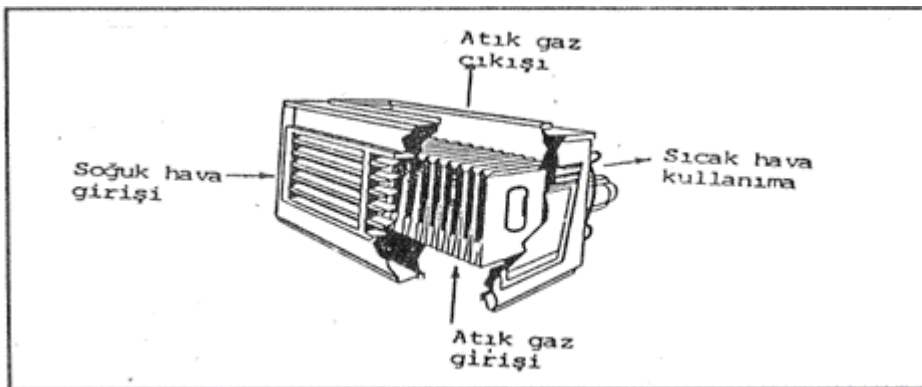
Şekil 2.1 : Reküperatör [22].

2.2.2 Rejeneratörler

Yüksek sıcaklık ve büyük kapasiteli sistemlerde, demir- çelik vb. büyük tesislerde tercih edilmektedir. Toz ve parçacık birikimleri nedeniyle zamanla verimlilik düşüşü görülür ve gazların karışması önlenemez [21].

Sabit levhalı tip rejeneratörlerde hareketli bir parça yoktur. Levha tabakaları ile egzoz ve taze hava geçiş kanalları ayrılmış ve sızdırmaz hale getirilmiştir. Isı doğrudan ılık egzoz hava akımı ile soğuk taze hava akımı arasında transfer edilir. Atık egzoz ısısının %80'ine kadar kısmını geri kazanan üniteler gerçekleştirilebilir [23].

Döner rejeneratörler veya ısı tekerleri, çok geniş iç yüzey alanlı hava geçirgen bir ortamla doldurulmuş döner bir silindire sahiptir. Isı tekerinde taze hava ve egzoz hava akımları ısı değiştiricinin yarım kesitinden karşıt yönlü paralel akım biçiminde akar. Isı tekerinin iç yapısına doldurulan malzemeler duyulur ısı veya toplam ısı (duyulur + gizli ısı) transfer edecek biçimde seçilebilir [23].

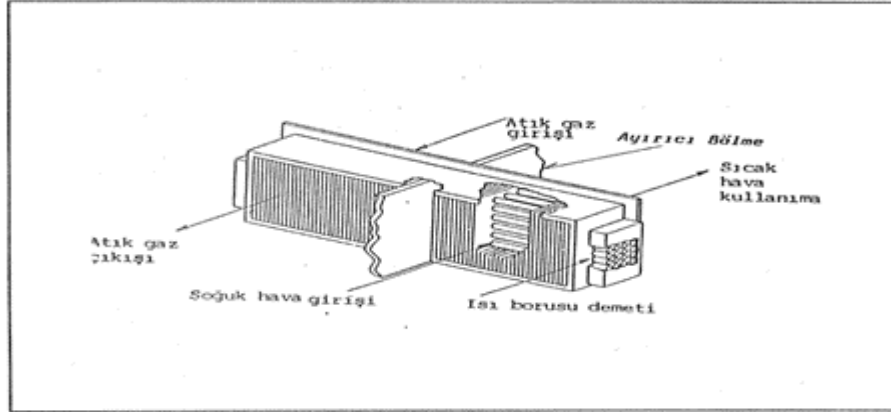


Şekil 2.2 : Sabit Levha Isı Değiştiricide Hava Akımları [23].

2.2.3 Isı borulu ısı eşanjörü

Isı boruları, vakum altında çalışma sıvısı ile doldurulmuş iki ucu kapalı metal borudur. Sıcak bölgede kaynayıp buharlaşan sıvı, soğuk bölgeye doğru hareket eder. Soğuk bölgeye geldiğinde taşıdığı ısıyı boru cidarlarından dışarı vererek yoğuşur ve yoğuşma ısısının ısıtılacak akışkana geçmesini sağlar. Mekanik katkı olmadan düşük basınç altında düşük sıcaklıklarda da buharlaşarak doğal ısı pompası olarak çalışır [21].

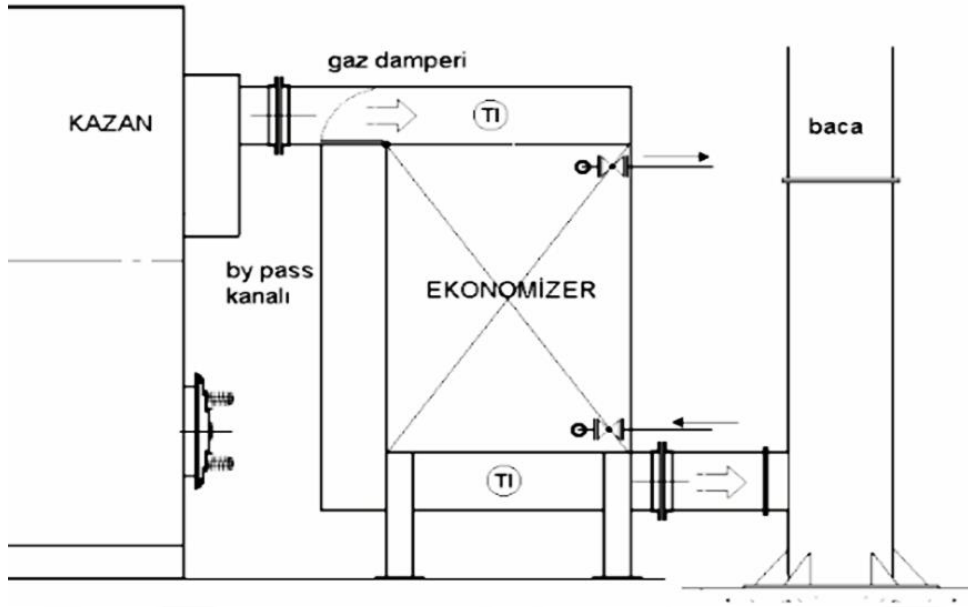
Isı geri kazanım verimliliği % 80'e kadar çıkar. 30 °C – 1400 °C baca gazı sıcaklıklarına kadar çalıştırılabilir. Bakırın ilettiğinden 100 kat daha fazla ısı transferi sağlar. Aynı zamanda çok hafif bir yapısı vardır. Mekanik bakım, ilave güç kullanımı, soğutma suyu ve yağlama gerektirmez. Dış yüzey kirlenme oranı düşük olduğu için daha düşük fan/pompa motor gücü ile sistem verimliliği yükseltilmiş olur. Boruları birbirlerinden bağımsız çalıştığı için boruda çıkabilecek sorun sistem verimliliğini ve çalışmasını etkilemez [21].



Şekil 2.3 : Isı Borulu Isı Eşanjörü [23].

2.2.4 Ekonomizer

Besi suyu ısıtıcıları düz borulu veya kanatlı borulu olarak imal edilirler. Genellikle kazan besiy suyu ön ısıtılmasında kullanılırlar. Besi suyunun 70 °C arttırılması yaklaşık olarak kazanın yakıt giderini %1 azalmaktadır. Gaz tarafında ısı transfer alanının ısı transferine yeterli düzeyde olması için genellikle kullanılan kanat seçiminin doğru olarak yapılması şarttır. Doğru yapılmayan kanat seçimleri ısı transferine karşı direnç oluşturabilmektedir [21].



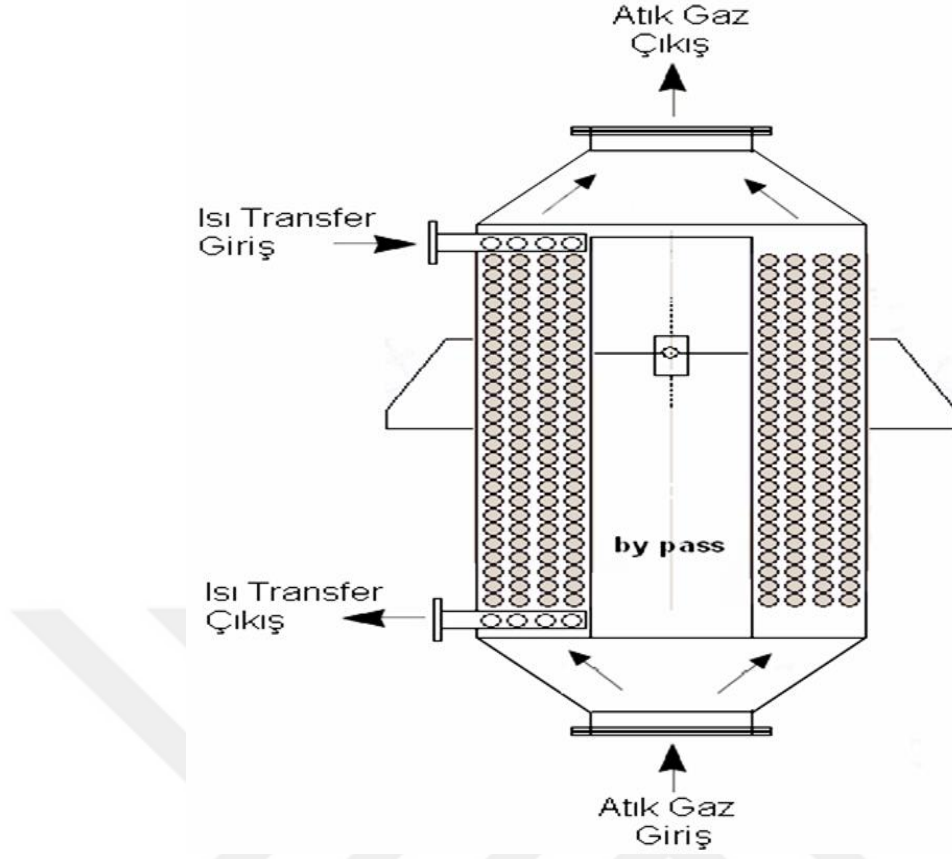
Şekil 2.4 : Ekonomizer [24].

Ekonomizerlerin uygulama alanları incelendiğinde buhar kazanlarında;

- Kazan besleme suyunun ön ısıtılmasında,
- Taze kazan besleme suyunun ısıtılmasında,
- Tesiste herhangi bir amaçla kullanılan sıcak suyun ısıtılmasında,
- Tesiste herhangi bir mahallin ısıtılması amacıyla kullanılan kalorifer sistemi suyunun ısıtılmasında veya ısı takviyesinde kullanılmaktadır [24].

2.2.5 Atık ısı kazanları

Atık ısı kazanları, atık sıcak gazın önüne yerleştirilerek bu gazın enerjisinden yararlanarak suyun ısıtılmasını sağlamaktadır. Elde edilen sıcak su, ısıtmada ya da sıcak su kullanımı amacıyla değerlendirilir [25]. Özellikle gaz türbinleri ve motorlarından egzozuna veya atık yakma tesislerinin baca çıkışlarına sistem toplam verimliliğini yükseltmek amacıyla doymuş ve kızgın buhar elde edilmesi amacıyla yerleştirilir [21].



Şekil 2.5 : Atık Isı Kazanı [24].

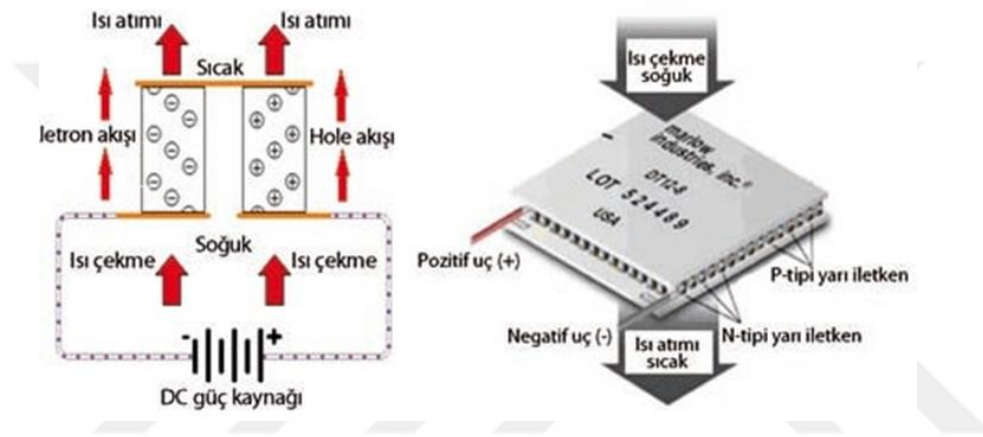
2.2.6 Termoelektrik teknolojisi

Termoelektrik, sıvı ve katı maddelerdeki ısı farklılıkları ve elektrik akımlarının sebeplerini inceleyen bir bilim dalı olarak tanımlanır. Özellikle elektriğin ısıya ve ısının elektriğe dönüşmesiyle alakalıdır. Üç ana termoelektrik etki söz konusudur. Bunlar Seebeck, Peltier ve Thomson etkileridir. Termoelektrik etkiler ısı ölçümünde, buzdolabı ve ısıtma tesislerinde ve ısıdan elektrik elde etmede kullanılır [26].

Seebeck etkisi; Thomas Johann Seebeck 1821’de Seebeck etkisini bulmuştur. Yaptığı deney sonucu iki iletken telden meydana gelen bir devrede teller ısıtıldığında yakına konan bir pusulanın ibresinin hareket ettiğini görmüş ve bu hareketin kondüktördeki ısıdan ileri geldiğini söylemiştir. Aslında yaptığı deneyde bir elektrik akımı meydana geldiğini ve bunun ibrenin sapmasına sebep olduğunu fark edememiştir. İletken bir çubuğun bir ucu ısıtıldığında bu uç diğerinden daha sıcak olur ve iletken çubuktan elektrik akımı geçmesi sağlanır. Buna Seebeck etkisi denir. a ve b gibi iki çubuk

birleştirildikleri zaman T1 ve T2'deki ısılar da farklı olursa V voltajı elde edilir ve buna Seebeck Voltajı denir. Bu voltaj T1 ve T2'nin ısı miktarlarına bağlıdır [26].

Peltier etkisi 1834'te bir Fransız saatçisi olan Jean Charles Athanase Peltier tarafından bulunmuş, fakat o da Seebeck gibi bulduğu şeyin farkına varamamıştır. Peltier, bu etkinin ohm kânununun hafif akımlar için geçerli olmadığını savunmuştur. Peltier'in buluşunun uygulama ve içeriği sonradan St. Petersburg Akademisi'nin bir üyesi olan Emil Leuz tarafından açıklanmıştır. Herhangi bir iletkenin elektrik enerjisi geçirildiğinde iletkenin bir ucu soğur, diğeryse sıcak kalır. Buna Peltier etkisi denilmektedir [26].



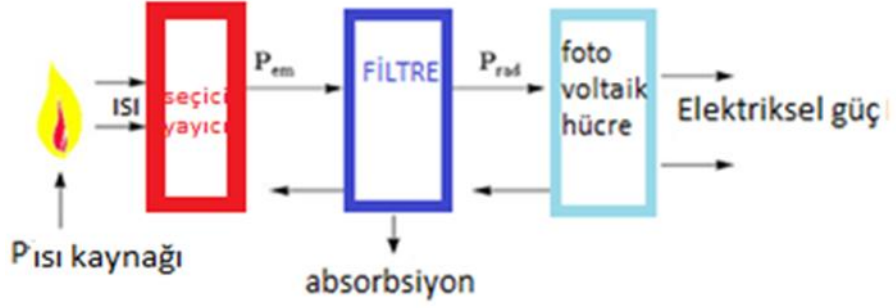
Şekil 2.6 : Peltier Etkisi [26].

Thomson etkisi; elektrik akımı geçen bir çubuk, ısı kazanır. Çubuktan geçen akımın yönü veya çubuğun soğuk ve sıcak uçları değiştirildiğinde çubuk sıcaklık kaybeder. Bu, ısı alıp verme işlemine Thomson ısısı denir [26].

2.2.7 Termofotovoltaik (TPV) teknolojiler

Termofotovoltaik sistem, termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu sistemler mevcut elektrik enerjisi üretimine alternatif oluşturmaktadır. Bu sistemde ısı kaynağı, seçici yayıcı, filtreler ve fotovoltaik hücreler ana bileşenler arasında yer alır. Termofotovoltaik sistemlerde ısı kaynağı olarak güneş kullanılabileceği gibi aynı zamanda yanmalı sistemler, yakıtlar gibi başka ısı kaynakları da kullanılabilir. Isı kaynağı TPV sistemlerinde foton elde etmek için kullanılmaktadır. Seçici yayıcı, sistem verimini arttırmak için kullanılırken, filtre yeterli enerjiye sahip olmayan ışınları geri yansıtarak seçici yayıcıya geri gönderir. Fotovoltaik hücreler ise yayıcıdan çıkan foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler. Elde edilen doğrusal

akım, alternatif akıma çevrilerek elektrik enerjisi farklı alanlarda kullanılabilir. Mevcut elektrik üretimine alternatif olarak değerlendirilen termofotovoltaik sistemler, ısıdan elektrik enerjisi üreten ve atık ısı geri dönüşümünü sağlayan çevrimlerdir.

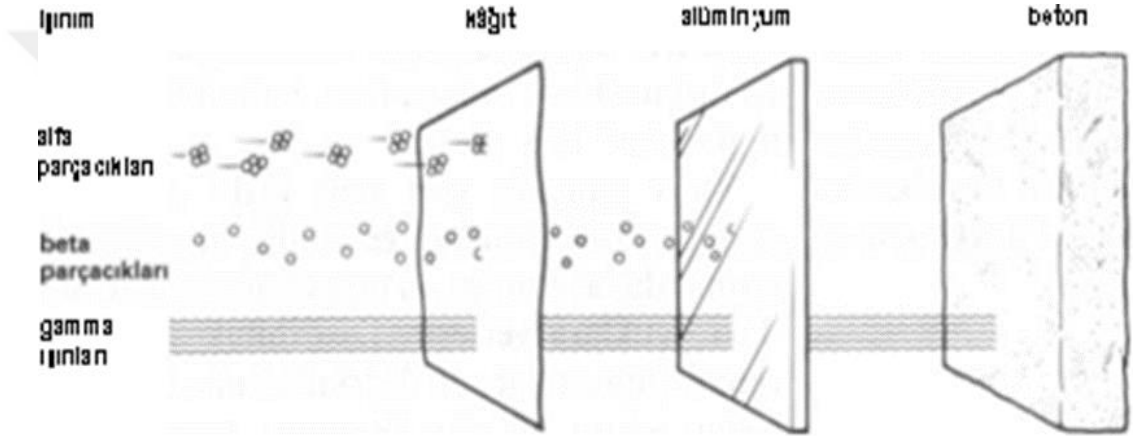


Şekil 2.7 : TPV Sisteminin Şeması ve Geliştirilen Bir TPV Prototipi [16].



3. IŞINIM

Işınım (radyasyon), elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar biçimindeki enerji yayımı ya da aktarımıdır. Atom çekirdeğinde yer alan nötronlar alfa, beta, gama gibi çeşitli ışınlar yayarak parçalanmaktadırlar. Çevresine ışın saçarak parçalanmış maddelere "radyoaktif madde", çevreye yayılan alfa, beta ve gama gibi ışınlara ise "radyasyon" adı verilmektedir [27].



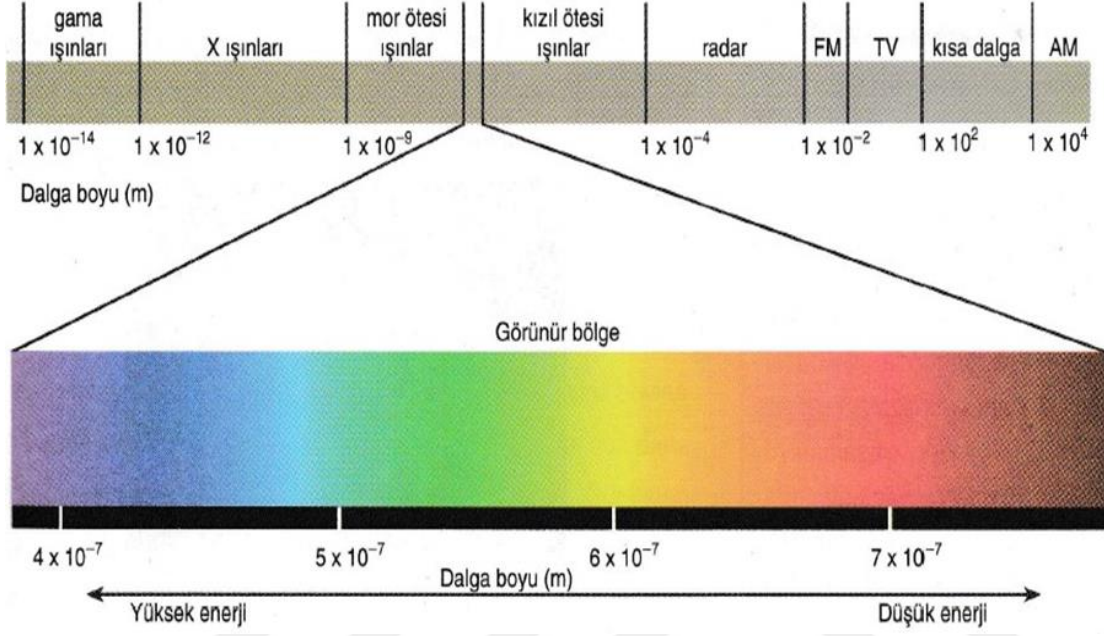
Şekil 3.1 : Farklı Yüzeylerden Meydana Gelen Işıma [28].

Herhangi bir yüzeyden meydana gelen ışınım, elektromanyetik dalgalar yaymaktadır. Elektromanyetik dalgalar; frekans ve dalga boyu ile ifade edilmektedir. Gama ışınları, X ışınları, mor ötesi ışınlar, görünür ışık, kızılötesi ışınım, mikrodalga ve radyo dalgaları elektromanyetik ışınım biçimleridir. Elektromanyetik dalgalar, boşlukta yayılır ve saniyede 300.000 km gibi olağanüstü bir hızla yayılır [28].

Elektromanyetik dalgaların frekans ve dalga boyları değerleri birbirinden farklıdır. Dalga boyu, art arda iki tepe noktası arasındaki uzaklığı ifade ederken; frekans, belli bir zaman aralığında belirli bir noktadan geçen çevrim sayısını ifade etmektedir. Dalga boyu arttıkça frekans azalmaktadır.

3.1 Elektromanyetik Dalga Spektrumu

Elektromanyetik ışımının dalga boyuna ve frekansına göre gruplandırıldığı ışın dizisine elektromanyetik dalga spektrumu denir. Elektromanyetik ışınların enerjisi ile frekansı doğru orantılıdır. Frekansı düşük olan ışınların enerjisi de düşüktür [29].



Şekil 3.2 : Elektromanyetik Dalga Spektrumu [29].

Dalga boyu yüksek olan ışınların ise frekansı ve enerjileri düşüktür. Elektromanyetik dalga spektrumundaki ışınları dalga boyu en düşük olandan en yüksek olana doğru sıraladığımızda gama ışınları, X ışınları, mor ötesi ışınlar, görünür ışık, kızılötesi ışınım, mikrodalga ve radyo dalgaları yer almaktadır. Bu sıralamada enerji ve frekans değerleri gama ışınlarından radyo dalgalarına doğru azalmaktadır. İnsan gözüyle görülebilir olarak tanımladığımız görünür bölge ise 400-700 nm dalga boyları arasında yer almaktadır. Görünür bölge de mavi 400 nm, yeşil 440 nm ve kırmızı 700 nm aralığındadır.

Bütün renklerin birleşimi olan beyaz ışık, görünür ışık dalgalarını oluşturur. Beyaz ışık, prizmadan geçerken kırılır ve renklere ayrılır. Bunun nedeni prizmadan geçirildiğinde farklı dalga boylarına sahip ışınların farklı şekilde kırılarak kırmızıdan mora tüm renkleri içeren spektrumun oluşmasıdır. Bu spektrum görünür bölge spektrumudur. Gökkuşağı bir görünür bölge spektrumudur. Görünen tüm farklı renkler, farklı dalga boylarındaki ışıktan oluşur. Tek bir dalga boyuna sahip ışığa

monokromatik (tek renkli) ışık, farklı dalga boylarına sahip ışığa ise polikromatik (çok renkli) ışık denir. Güneş ışığı polikromatik ışıktır [29].

Gama ışınları, elektromanyetik dalgalar içinde enerjisi en büyük olan ve ışık hızında yayılan dalgalardır. Atom çekirdeğindeki proton ve nötronların hareketliliği nedeniyle oluşur. X ışınları Wilhelm Konrad Roentgen tarafından Crookes tüpüyle yapılan çalışmalar sırasında keşfedilmiş ışınlardır. Röntgen ışınları olarak da bilinen bu ışınlar floresan parıldamaya neden olup fotoğraf filmine etki eder. Tıpta bazı görüntüleme sistemlerinde, bazı kanser tedavilerinde ve dişçilikte kullanılır. Mor ötesi ışınlar; frekansı ve enerjisi görünür ışıktan daha büyük, dalga boyları ise daha küçük olan ışınlardır. Güneş mor ötesi ışık kaynağıdır. Ultraviyole ışın olarak da bilinen morötesi ışınlar bazı kimyasal maddeler üzerine düştüğünde gözle gözlenebilen bir parıldama oluşturur. Buna floresan denir. Ayrıca morötesi ışınlar fotoğraf filmine etki eder, gazları iyonlaştırır ve kimyasal tepkimeleri hızlandırır. Kızılötesi ışınların dalga boyları, görünür bölgedeki kırmızı ışıktan daha büyüktür. Bu dalgalar ilk kez Sir William Herschel tarafından keşfedilmiştir. Fizik tedavi, spektroskop, ev ve hastanelerin ısıtılması gibi uygulama alanları vardır. Mikrodalgalar da bir iletken üzerinde yüklü taneciklerin ivmelendirilmesiyle oluşur. Mutfaklarda kullandığımız mikrodalga fırınların çalışmasında, maddelerin atom ve molekül özelliklerini incelemeye mikrodalgalardan yararlanılır. En düşük enerjiye sahip olan radyo dalgaları ise Hertz tarafından keşfedilmiştir. Radyo dalgaları bir iletken üzerinde yüklü taneciklerin ivmeli hareketleriyle elde edilmektedir [29].

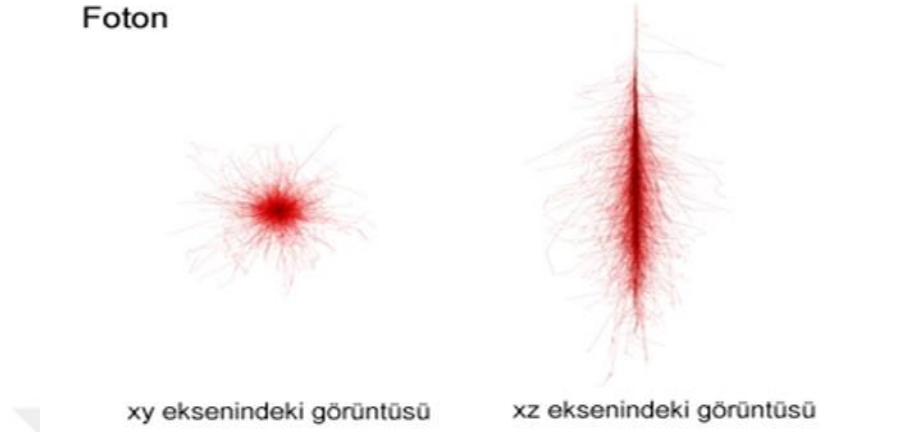
3.2 Foton ve Yapısı

Foton, elektromanyetik dalgaların toplam enerjisini meydana getiren enerji paketçikleridir. Fotonlar ışık hızıyla hareket ederler. Durağan kütleleri sıfırdır. Dalga olarak yayılırlar. Parçacık olarak etkileşime girebilirler. Kütle çekiminden etkilenirler. Fiziksel büyüklükleri olmamakla birlikte içyapıları olmadığı için parçalarına ayrılamazlar.

Fotonun enerjisi (E), ışık hızı (c), Planck sabiti ($h=7.727 \times 10^{-34}$ J.s) ve dalga boyu (λ) ile gösterilirse fotonun sahip olduğu enerji aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$E = (h \times c)/\lambda \quad (3.1)$$

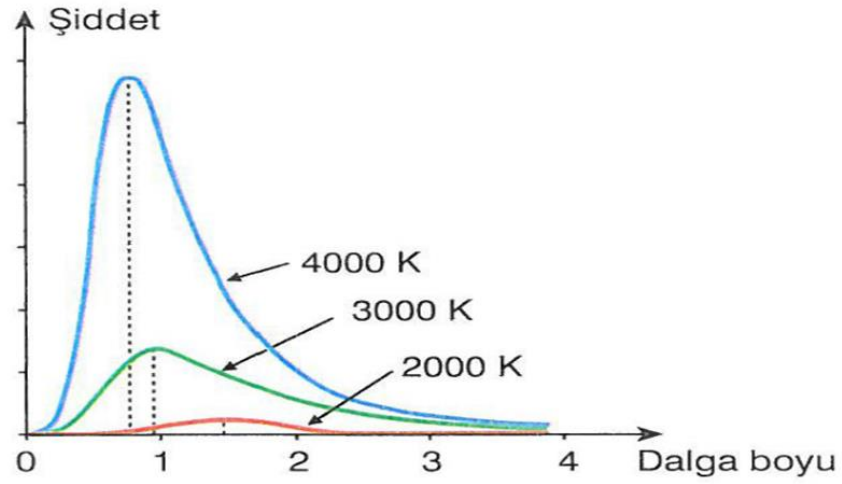
Enerji paketçikleri olarak tanımlanan bu fotonlar termofotovoltaik (TPV) sistemlerde de ısı kaynağı tarafından üretilmektedir. Isı kaynağından elde edilen fotonlar fotovoltaik hücrelere gelerek elektrik üretimi sağlamaktadır.



Şekil 3.3 : Fotonun İki Boyutta Görüntüsü [30].

3.3 Siyah Cisim Işıması

Siyah cisim, ışığı hiçbir şekilde yansıtmayan cisimlere verilen genel isimdir. Sıcaklıklarına göre termal ışımaya yapan cisimlerin düşük sıcaklıkta yaptıkları ışımaya gözle görülemezken, yüksek sıcaklıktaki cisimlerin yaptıkları ışımalar gözle görülebilir. Sıcaklığı artan cisim ilk başlangıçta kırmızı ışık yayarken sıcaklık daha da arttırılırsa cisim beyaz ışık yaymaya başlar. Siyah cisim tarafından yayılan ışının dalga boyu incelendiğinde siyah cisim sıcaklığı arttıkça iki etki gözlenmiştir. İlk etki olarak sıcaklık arttıkça tepe noktası daha kısa dalga boylarına doğru kaymıştır. Bu durum Şekil 3.4'te görüldüğü gibidir.

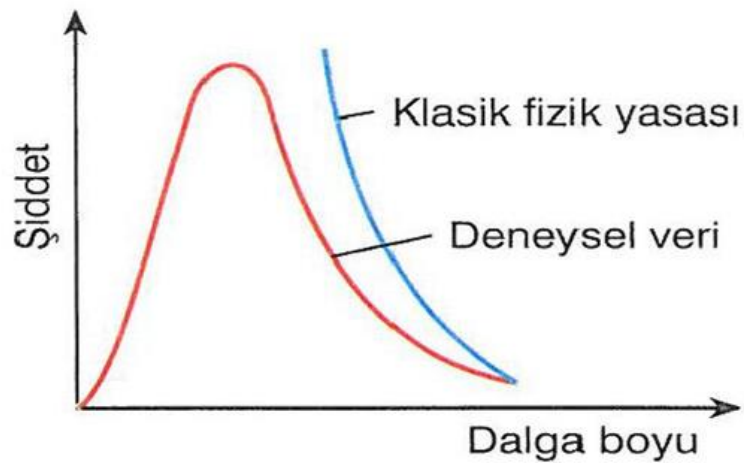


Şekil 3.4 : Siyah Cisim Işıması Dalga Boyu-Sıcaklık İlişkisi [31].

Sıcaklık arttıkça, yayınlanan ışınım enerjisinin dalga boyu, elektromanyetik spektrumda kızıl ötesi bölgesinden, mor ötesi bölgesine doğru kayar. Sıcaklık arttıkça dalga boyunun azaldığı görülmektedir. Işığın dalga boyundaki bu kayma Wien Yer Değiştirme Yasası ile açıklanabilir. Bu yasaya göre elde edilen formül aşağıdaki gibidir [31]:

$$\lambda_{max} \times T = 2,898 \times 10^{-3} m.K \quad (3.2)$$

Siyah cisim ışınımında ikinci etki olarak sıcaklığın artması ile birlikte enerjinin ve frekansın da arttığı gözlenmiştir. Klasik fizik yasalarına göre ışınımın sürekli bir dalga boyu dağılımına sahip olması beklenirken, deneysel verilerde böyle olmadığı tespit edilmiştir [31]. Şekil 3.5'te siyah cisim ışınımının deneysel veri grafiğini göstermektedir.

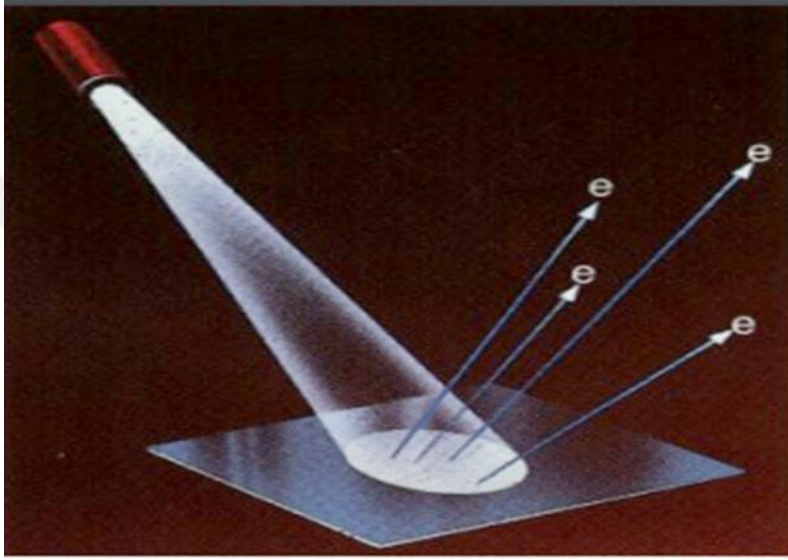


Şekil 3.5 : Siyah Cisim Işımasının Deneysel Veri Grafiği [31].

3.4 Fotoelektrik Olay

Metal bir yüzeye ışık düşürüldüğünde ışık metal yüzeyden elektron koparır. Bu olaya fotoelektrik olay denilmektedir. Fotoelektrik olayda gelen ışığın şiddeti arttıkça kopan elektron sayısı artar.

Gelen ışığın frekansı arttıkça kopan elektronların kinetik enerjisi de artmaktadır. Kopan elektronların kinetik enerjisi ışığın şiddetine bağlı değildir. Fotoelektrik olayda ışığın tanecik gibi davrandığı kabul edilmiştir [32].



Şekil 3.6 : Fotoelektrik Olay [32].

4. ENDÜSTRİYEL VE MERKEZİ ISITMA SİSTEMLERİNDE MEVCUT ATIK ISI POTANSİYELLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde endüstriyel sistemlerde atık ısı potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla demir-çelik üretim yöntemleri anlatılmış ve demir-çelik sektörü atık ısı potansiyelleri ile konut sektöründe ısıtma ve soğutma sistemleri incelenmiştir. Konut sektöründe kullanılan farklı TPV sistemlerinin performans verilerine yer verilmiştir.

4.1 Demir-Çelik Üretim Yöntemleri

Demir ve çelik üretiminde kullanılan başlıca cevher hematit (Fe_2O_3) 'tir. Diğer demir cevherleri manyetit (Fe_3O_4), siderit ($FeCO_3$) ve limonittir ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$, x tipik olarak 1.4'tir). Demir cevherleri %40 - %70 arası demir içerir. Demir-çelik üretiminde demir cevherlerinin yanı sıra hurda demir-çelik de kullanılmaktadır. Demiri cevherden indirgemek için gerekli diğer hammaddeler kok ve kireçtaşıdır. Kok yüksek karbonlu yakıt olup, bitumin kömürün sınırlı oksijen atmosferinde birkaç saat ısıtılması ve su püskürtülmesiyle elde edilir [33].

Cevherden demir indirgeme işleminde, kokun iki işlevi vardır:

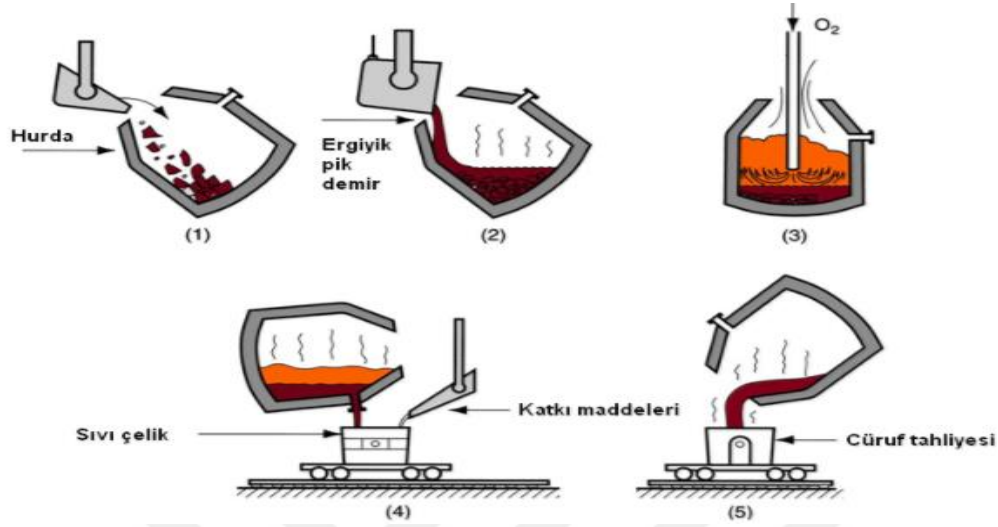
- 1) Kimyasal tepkimeler için ısı sağlar.
- 2) Demir cevherini indirgemek için gerekli olan CO'ı üretir.

Kireçtaşı ise yüksek oranda kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) içeren bir kayadır. Kireçtaşı ergiyik demirden safsızlıkları çekmek için kullanılan bir temizleyicidir. 1800'lerin ortasından itibaren pik demiri çeliğe dönüştürmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Günümüzde en önemli iki yöntem Bazik Oksijen Fırını (BOF) ve elektrik ark fırınıdır. Her ikisi de karbon çeliklerinin ve alaşımlı çeliklerin kullanımında kullanılır [33].

Çelik üretim tesislerinde ergiyik pik demir yüksek fırından alınıp bazik oksijen fırınına taşınır. Hammadde olarak hurda demir-çelik de kullanılır. Ayrıca kireç (CaO) ilave edilir. Yüklemeden sonra saf oksijen borusu fırına daldırılır. Bu borunun alt ucu ergiyik demir yüzeyinin 1.4 m üzerinde olacak şekilde ayarlanır. Saf oksijen borudan

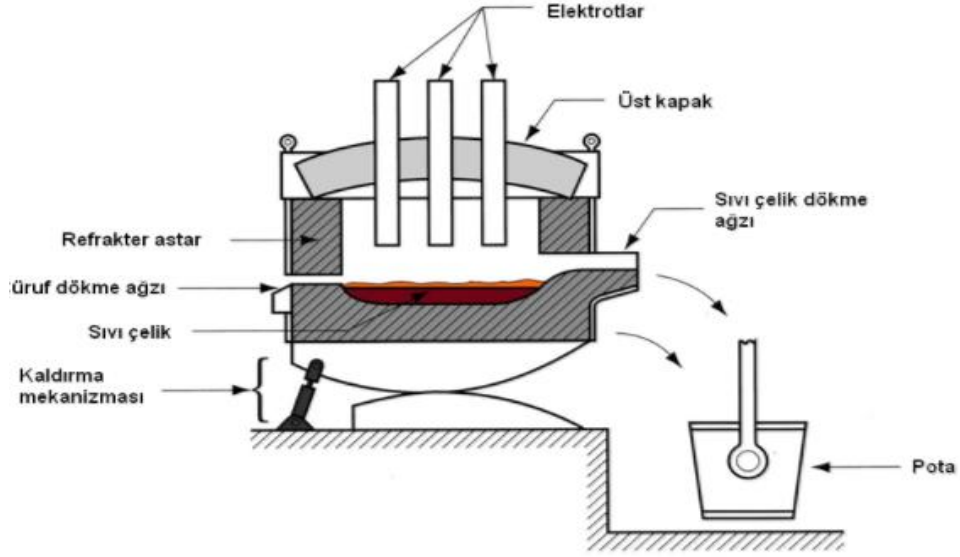
yüksek hızda üflenir. Bu durum ergiyik havuzun yüzeyinde yanma ve ısınmaya yol açar. Fazla C sıvı çelikten uzaklaşır; Si, Mn ve P gibi safsızlıklar oksitlenir [33].

Şekil 4.1' de bazik oksijen fırınında(BOF) çelik üretim aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : BOF Yönteminin Aşamaları: (1) Hurda Yükleme, (2) Yüksek Fırından Gelen Pik Demir, (3) O₂ Üfleme, (4) Sıvı Çeliğin Alınması, Alaşım Elementleri Ve Bazı İlavelerin Katılması, (4) Cürufun Alınması [33].

Elektrik ark fırınında daha çok hurda demir-çelik kullanılmaktadır. Birkaç farklı elektrik ark fırını vardır. Doğrudan ark tipi en yaygın olanıdır. Bu fırınların üst kapağı hareketli olup yükleme burada yapılır, boşaltma ise fırının eğilmesi ile gerçekleştirilir. Fırına hurda demir-çelik ile alaşım elementleri ve kireçtaşı yüklenir. Bunlar elektrik arkı ile ısıtılır. Ark, elektrotlar ve metal arasında oluşur. Tam ergime 2 saat sürer, tüm işlem ise 4 saat sürer. Bu fırınların kapasitesi 24-100 ton arasındadır. Bu yöntemle, BOF yöntemine kıyasla daha kaliteli çelik üretilir, fakat daha pahalıdır. Genelde alaşımlı çeliklerin, takım ve paslanmaz çeliklerin üretiminde kullanılır [33]. Şekil 4.2'de elektrik ark fırınının genel yapısı yer almaktadır.



Şekil 4.2 : Elektrik Ark Fırınının Genel Yapısı [33].

4.2 Endüstriyel Sistemlerde Atık Isı Potansiyellerinin Belirlenmesi

TPV, yüksek sıcaklığa sahip bir ısı kaynağı gerektiren bir teknoloji olduğundan, böyle bir durumda bir prosesin işletildiği endüstrilerde kullanılabilir. TPV hücresi vasıtasıyla atık ısı geri kazanımı örneği, çelik endüstrisinde sıcak haddelenmiş çelik levhaların sürekli olarak dökülmesi durumudur. Bu plakaların başlangıç sıcaklığı 1200 ° C ve 1000 ° C'den daha düşük bir sıcaklığa soğutulur. TPV hücreleri, soğutma işlemi sırasında sıcak plakaların üzerine konacaksa, emisyon işlemi yoluyla bir elektrik akımı üretilebilir [12].

Enerji Bakanlığı verilerine göre demir-çelik sektörü enerji kullanımını 2014 yılında nihai enerji tüketiminin %7,43'ünü, sanayi enerji tüketiminin %23,33'ü gibi önemli bir kısmını oluşturmuştur [16].

Çizelge 4.1'de 2008-2014 döneminde Türkiye nihai, sanayi ve demir-çelik enerji tüketim değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 : 2008-2014 Dönemi Türkiye Nihai, Sanayi ve Demir Çelik Enerji Tüketim Değerleri (BİN TEP) [16].

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Nihai Enerji Tüketimi	78279	79327	81987	87942	89007	89424	87131
Sanayi Tüketimi	27277	24424	29982	30929	30411	30137	28114
Demir Çelik	4044	4084	7437	7401	7189	7780	7471

Çizelge 4.2’de 2010-2014 dönemi çelik enerji tüketiminde kullanılan enerji kaynakları ve kullanım değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.2 : 2010-2014 Dönemi Çelik Enerji Tüketiminde Kullanılan Enerji Kaynakları ve Kullanım Değerleri (BİN TEP) [16].

	T.Köm	Linyit	Kok	Toplam K. Yakıt	Petrol	D. Gaz	Elektrik	Jeo. Isı Diğer Isı	Toplam
2010	1017	48	2904	3977	347	712	1424	177	7437
2011	491	30,9	2920	3884	27	1173	1489		7401
2012	410	28	2911	3421	48	832	1771	127	7189
2013	741		2941		14	1141	1792	144	7780
2014	487		3042		14	1129	1779		7471

Demir-çelik üretimi esnasında büyük miktarda atık ısı meydana gelmektedir. Bu durum atık ısının değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Atık ısıdan yararlanarak fotovoltaik hücreler vasıtasıyla elektrik üretimi mümkündür.

Sıcaklık değerlerine göre endüstriyel proseslerden elde edilen atık ısı sıcaklık değerleri incelendiğinde yüksek sıcaklıklı atık ısılar, orta sıcaklıklı atık ısılar ve düşük sıcaklıklı atık ısılar olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

4.2.1 Yüksek sıcaklıklı atık ısılar

Yanma süreçlerinden elde edilen yüksek sıcaklıklı atık ısı potansiyelleri Çizelge 4.3’te yer almaktadır.

Çizelge 4.3 : Endüstriyel Sistemlerde Yüksek Sıcaklıklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri [34].

Cihazın Türü	Sıcaklık (°C)
Nikel Rafine Fırınları	1370-1740
Aluminyum Rafine Fırınları	740-770
Çinko Rafine Fırınları	770-1100
Bakır Rafine Fırınları	770-814
Çelik Isıtma Fırınları	924-1040
Bakır Reverber Fırını	900-1100
Açık Ocak Fırınları	740-700
Çimento Fırınları	720-730
Cam Eritme Fırınları	1000-1440
Hidrojen Tesisleri	740-1000
Katı Atık Yakma Tesisleri	740-1000
Çöp Yakma Fırını	740-1440

4.2.2 Orta sıcaklıklı atık ısılar

Direkt olarak yanma süreçlerinden elde edilen orta sıcaklıklı atık ısı potansiyelleri Çizelge 4.4'te yer almaktadır.

Çizelge 4.4 : Endüstriyel Sistemlerde Orta Sıcaklıklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri [34].

Cihazın Türü	Sıcaklık (°C)
Buhar Kazanı Egzozları	280-480
Gaz Türbini Egzozları	370-440
Pistonlu Motor Egzozları	314-700
Isıl İşlem Fırınları	424-740
Kurutma ve Pişirme Fırınları	230-700
Katalitik Krakerler	424-740
Tavlama Fırını Soğutma Sistemi	424-740

4.2.3 Düşük sıcaklıklı atık ısılar

Ön ısıtma amacıyla kullanılan düşük sıcaklıklı atık ısı potansiyelleri Çizelge 4.5'te yer almaktadır.

Çizelge 4.5 : Endüstriyel Sistemlerde Düşük Sıcaklıklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri [34].

Kaynak	Sıcaklık (°C)
Buhar Yoğuşturma Prosesleri	44-88
Soğutma Suyu	
Kaynak Makineleri	32-88
Enjeksiyon Makineleri	32-88
Tavlama Fırınları	77-230
İçten Yanmalı Motorlar	77-120
Kalıp Şekillendirme	27-88
Klima Ve Soğutma Kondansatörleri	32-43
Kurutma, Pişirme Ve Kürleme Fırınları	93-232

Türkiye'de demir-çelik sektöründe TPV uygulamaları ile enerji verimliliğinin sağlanabildiği belirlenmiştir. Demir çelik endüstrisinde yıllık TPV sistemleri ile kurtarılabilir enerji potansiyeli 11,44 TJ, enerji verimliliği GaSb hücreli TPV sistemlerinde %2.04 ve InGaAsSb hücreli TPV sistemlerinde ise %7.31 olduğu belirlenmiştir [16].

4.3 Konut Sektörü Isıtma ve Soğutma Sistemleri

Konut sektöründe ısıtma ve soğutma sistemleri olarak duvardan ısıtma ve soğutma sistemleri, fan coil, merkezi ısıtma sistemleri ve bölgesel ısıtma sistemleri sayılabilir.

Düşük sıcaklıklı merkezi ısıtma sistemlerine termofotovoltaik (TPV) teknolojisi uygulanarak atık ısı değerlendirilmekte ve elektrik üretimine katkıda bulunmaktadır.

Konut ısıtma ve soğutma sektöründe, sistemler çoğunlukla iki farklı sistem olarak tesis edilmektedir. Sektörde en çok kullanılan sulu ısıtma sistemlerinde radyatöre gelen su sıcaklığı 80-90°C arasındadır. En çok kullanılan soğutma sistemleri mahalle serinletilmiş havanın üflendiği klimalar ve fan-coil üniteleridir. Klima sistemlerinde soğutma yapılabildiği gibi ısıtma da yapılabilmektedir ancak enerji kaynağı olarak elektrik tükettiğinden sulu ısıtma sistemleri ısıtmada daha ekonomik olmaktadır [35].

Konutlarda kullanılan ısıtma sistemlerinin bir diğeri de duvardan ısıtma ve soğutma sistemleridir. Bu sistemlerde ısıtma ve soğutma aynı panelden sağlanmaktadır. Bu tür bir yapı, yüklerin kararlı olduğu ve bina tasarımının güneş ısı kazancını en aza indirdiği yerler için uygundur [35]. Ayrıca konutlarda metal panelli sistemler de ısıtma sistemleri olarak kullanılabilir. Bu aşamada konut sektöründe kullanılan merkezi ısıtma sistemlerinde atık ısı meydana gelmektedir.

Merkezi ısıtma, genel olarak soğuk iklimlerdeki büyük yapılarda kullanılır. Sistem, kullanılacak akışkanı (su, hava veya buharı) ısıtmak için merkezi kazan veya ısıtıcı, ısıtılmış akışkanın dağıtımı için boru tesisatı ve ısıyı ortam havasına transfer etmek için nihai ısı ileticilerini (radyatör, fancoil vs) içerir. Nihai ısı ileticileri, ısıyı ortama konveksiyon (taşıma) yolu ile ileten bir ısı eşanjörüdür. Binalarda özel boruların zemin altına gömme yapılması ile zeminden ısıtma yapılan merkezi ısıtma tesisatları da mevcuttur.

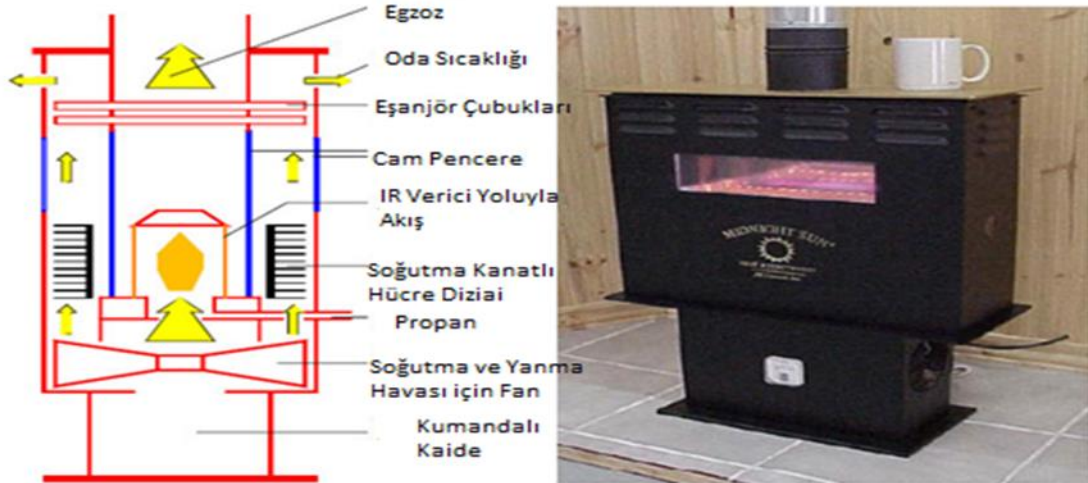
Tüm sistem ısıtma suyunu sirküle ettiren bir pompaya sahiptir. Sıcak su, genellikle bir su deposu içinde saklanan sıcak kullanım suyu sağlamak için başka bir ısı eşanjörünü beslemek içinde kullanılır. Hava kullanılan ısıtma sistemlerinde, hava kanal sistemleri boyunca dolaştırılır. Kanal sistemleri, soğutma ve klima(kombi) için de kullanılabilir ve havayı filtrelerden geçirerek temizleyebilir [36].



Şekil 4.3 : Örnek Bir Merkezi Isıtma Sistemi [36].

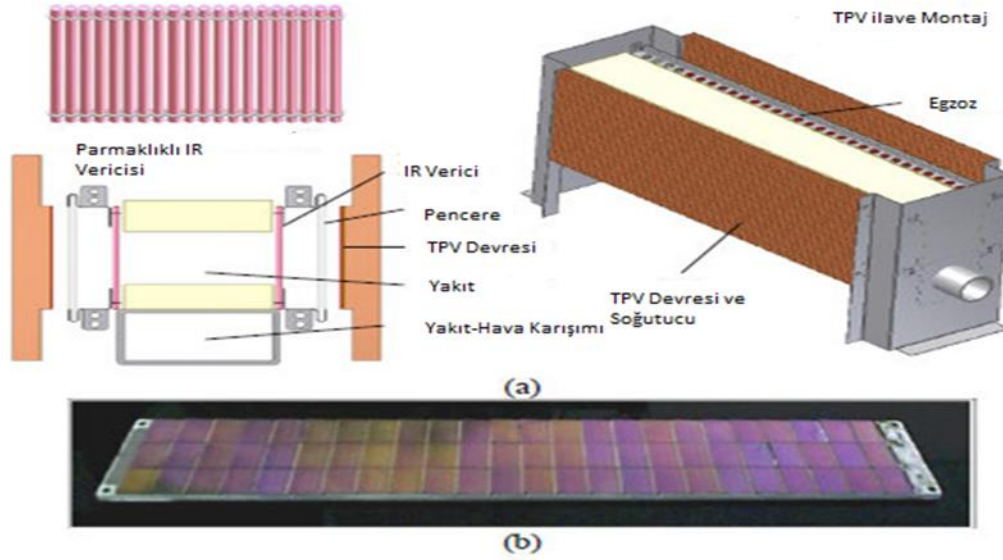
4.4 Merkezi Isıtma Sistemlerine Mevcut TPV Teknolojisinin Uygulanması

Düşük sıcaklıklı merkezi ısıtma sistemlerine termofotovoltaik sistem uygulandığında merkezi ısıtma sistemlerinde meydana gelen atık ısı değerlendirilerek elektrik enerjisi elde edilir. Bu yaklaşımdan hareketle Ev tipi TPV Combined Heat and Power (CHP) sistemi olan ısıtıcı yabancı bir firma tarafından üretilmiştir. Bu uygulama bu alandaki ilk ve tek ticari ürün olma özelliğini taşımaktadır. Propan yakıt kullanıldığında 7.4 kW ısı ve 40 W hava sirkülasyon ve fan gücü kaybı ile net olarak 100 W elektrik üretmektedir. Şekil 4.4'te üretilen sistemin bileşenleri verilmiştir.



Şekil 4.4 : Isıtıcılarda Uygulanan TPV Sisteminin Bileşenleri [37].

Firmanın başka bir ev tipi TPV sistemi uygulaması ise bu sistemin biraz daha geliştirilerek, sistemdeki spektral kontrolün daha iyi sağlandığı NiO/MgO çit IR emitter eklendiği ve su ısıtma içinde kullanılabildiği bir sistem Şekil 4.5 'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4.5: (a) Isıtıcı TPV Sistemine Eklenen Spektral Kontrol İçin Eklenen NiO/MgO Çit IR Emitter Ve Yeni Sistemin Şematik Görüntüsü b) Firmanın Isıtıcı TPV Sisteminde Kullandığı GaSb Hücrelerinin Birleştirilmiş Devresi [37].

Çizelge 4.6'da konut sektöründe kullanılan farklı TPV sistemlerinin performans verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : Konut Sektöründe Kullanılan Farklı TPV Sistemlerinin Performans Verileri [38].

TPV Sistemi	Değişken	Spektral Verimlilik	TPV Çevrim Alanı	Görünüm Faktörü	Elektrik Sistem Verimliliği	Yakıt Isıl Yanma Oranı	TPV Elektrik Gücü
TPV Fırın	SiC Yayıcı	%28 1240°C	240cm ²	0.4	%1.4	8.8 KW	122 W
TPV Fırın	Eşleşmiş Yayıcı	%71 1240°C	240cm ²	0.4	%2.8	4.4 KW	122 W
TPV Kazan	Eşleşmiş Yayıcı	%71 1240°C	400cm ²	0.7	%3.9	8.8 KW	342 W
TPV CHP	Eşleşmiş Yayıcı	%71 1240°C	1000cm ²	0.8	%4.4	14.4 KW	794 W

Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi termofotovoltaik sistemler fırınlarda, kazanlarda ve birleşik ısı ve elektrik üretiminin bir arada olduğu (CHP) sistemlerinde kullanılabilir. TPV sistemi olarak fırın kullanıldığında çevrim alanı 240 cm², sıcaklık 1240°C ve görünüm faktörü 0.4 iken seçici yayıcı olarak SiC yayıcı

kullanıldığında sistemin elektrik verimliliği %1.4 ve yakıt ısıl yanma oranı 8.8 KW değerine ulaşmıştır. Aynı koşullarda seçici yayıcı olarak eşleşmiş yayıcı kullanıldığında sistemin elektrik verimliliği %2.8 ve yakıt ısıl yanma oranı 4.4 KW olarak belirlenmiştir. Bu durumda TPV elektrik gücü 122 W değerine ulaşmıştır. Seçici yayıcının değiştirilmesi TPV elektrik gücünü değiştirmemiştir.

TPV sistemi olarak kazan kullanıldığında çevrim alanı 400 cm^2 , sıcaklık 1240°C ve görünüm faktörü 0.7 iken seçici yayıcı olarak eşleşmiş yayıcı kullanıldığında sistemin elektrik verimliliği %3.9 ve yakıt ısıl yanma oranı 8.8 KW olarak belirlenmiştir. Bu durumda TPV elektrik gücü 342 W değerine ulaşmıştır.

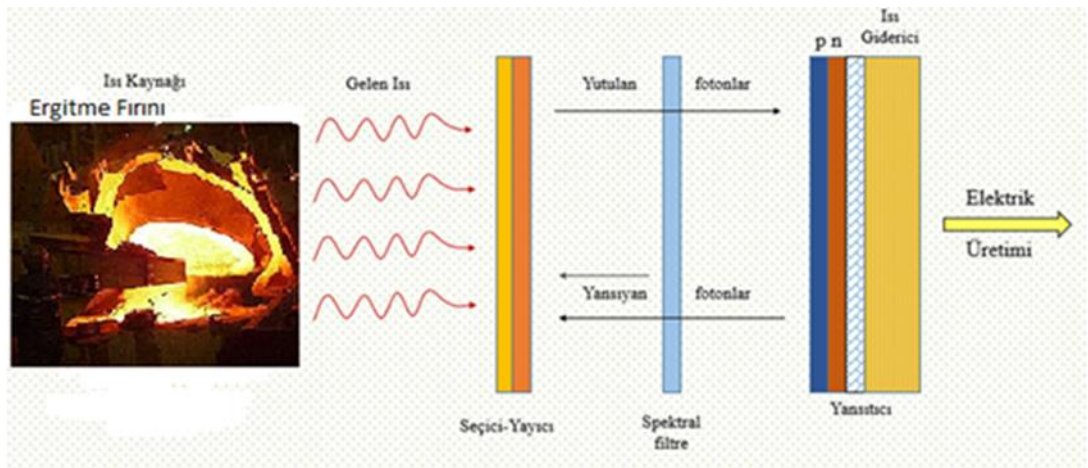
TPV CHP kullanıldığında çevrim alanı 1000 cm^2 , sıcaklık 1240°C ve görünüm faktörü 0.8 iken seçici yayıcı olarak eşleşmiş yayıcı kullanıldığında sistemin elektrik verimliliği %4.4 ve yakıt ısıl yanma oranı 14.4 KW olarak belirlenmiştir. Bu durumda TPV elektrik gücü 794 W değerine ulaşmıştır.



5. TERMOFOTOVOLTAİK SİSTEM VE YAPISI

Termofotovoltaik sistemler (TPV), yüksek sıcaklıklı atık ısılardan 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 [39]. Fotovoltaik (PV) cihazlarının gözle görülebilir ışığı (güneş enerjisi) elektriğe dönüştürmesiyle aynı şekilde çalışırlar. Güneş fotovoltaiklerinin aksine, TPV sistemleri, düşük enerji bant aralığı ve TPV diyotunun aktif bölgesi ile yayıcı arasındaki daha yakın mesafeden dolayı daha yüksek verimlilik ve daha yüksek çıktı enerji yoğunluğu sağlayabilirler.

Termofotovoltaik 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 [39]. Şekil 5.1’de TPV sisteminin genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.1 : TPV Sisteminin Genel Yapısı

Bu enerji sisteminin ana avantajları;

- a) Yüksek yakıt kullanım faktöründe (termal kayıpların çoğunun geri kazanımı sayesinde birliğe yakın, TPV sistemini kombine bir ısı ve güç olarak kullanmayı mümkün kılmaktadır)
- b) Düşük üretilen gürültü seviyeleri (hareketli parçaların bulunmaması nedeniyle),
- c) Kolay bakım (ortak bir ev tipi kazana benzer şekilde) ve
- d) Büyük yakıt esnekliği [40].

TPV sistemini oluşturan bileşenler; ısı kaynağı, seçici yayıcı, filtre ve fotovoltaiik hücredir. Her bir sistem bileşeni aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

5.1 Isı Kaynağı

Isı kaynağı, foton elde etmek için kullanılan kaynaklardır. Çalışma sıcaklığı 1000°C ve 1400°C arasında olan ısı kaynakları TPV sistemlerde kullanılabilir [18]. .Bu kaynaklar arasında güneş ışığı, radyoaktif izotop (β -fotonları) ve alevli yanma sayılabilir. Isı kaynağından gelen ısı enerjisi ışıınım yoluyla seçici yayıcı, filtre ve hücrelere geçmektedir. Isı kaynağı, fotovoltaiik hücrelere gelerek foton elde edilmesini sağlar. Planck yasasına göre ışımanın güç yoğunluğu sıcaklığın 4. kuvvetiyle değiştiği için yeterli sıcaklığa ulaşmak oldukça önemlidir. Bu nedenle TPV sistemlerinde kullanılan ısı kaynakları genellikle yanmalı sistemler içerir [16].

Endüstriyel sistemlerde demir-çelik proseslerinden çıkan atık ısı sıcaklıkları TPV sistemleri için uygundur. Atık ısı kaynakları olarak bazik oksijen fırını, elektrik ark fırını ve kok fırını gazı kullanılabilir. Bu kaynakların sıcaklıkları aşağıda verilmiştir:

- Bazik oksijen fırını: 1973°K
- Elektrik ark fırını: 1473°K
- Kok fırını gazı:1247°K

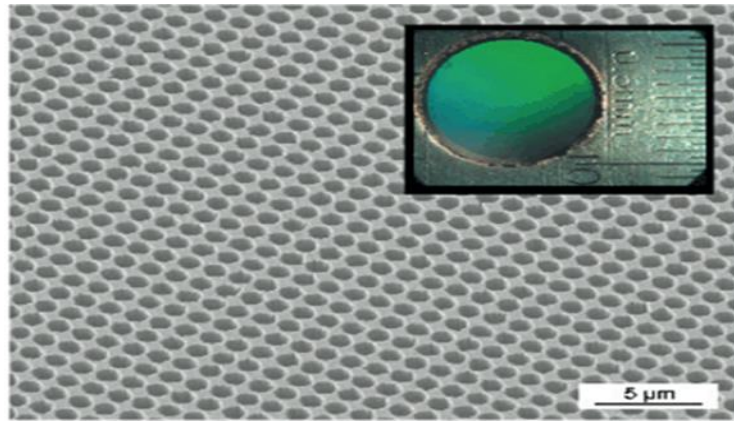


Şekil 5.2 : Isı Kaynağı [41].

5.2 Seçici Yayıcı

Seçici yayıcı, sistem verimini arttırmak için kullanılır. Seçici yayıcı, ısı kaynağından gelen ısıyı filtrelere aktarmadan önce uygun alıcı hücre hassasiyetini sağlayarak yayılım spektrumuna çevirir. Çünkü alıcı hücreler sadece bant aralıklarının üstündeki bir enerjiyi absorbe ederek kullanabilirler. Bu durum da daha az miktarda elektrik üretimine sebep olmaktadır [39].

Seçici yayıcılar, spektral olarak PV hücreleriyle uyuşan belirli bir dalga boyu bandında foton yayar ve sistemin verimini artırırlar. Seçici yayıcı olarak Yb_2O_3 kullanılabilir. Ayrıca toprak seçici yayıcı, mikro yapı yüzey yayıcı gibi çeşitli spektral seçici yayıcılar kullanılabilir. Ayrıca Wu , $MgO + NiO$, $Er + TiO_2$ gibi seçici yayıcılar da kullanılabilir. Bu seçici yayıcıların fotovoltaiik hücrelere uyum sağlaması gerekmektedir [41].



Şekil 5.3 : Seçici Yayıcı [42].

5.3 Filtre

Seçici yayıcıdan çıkan fotonlar hücrelere gelmeden önce filtrelere ulaşırlar. Filtreler seçici yayıcı ile benzer özellik gösterir. Yeterli enerjiye sahip olmayan ışınları geri yansıtarak seçici yayıcıya geri gönderir. Böylece sistem verimi artırılmış olur [39].

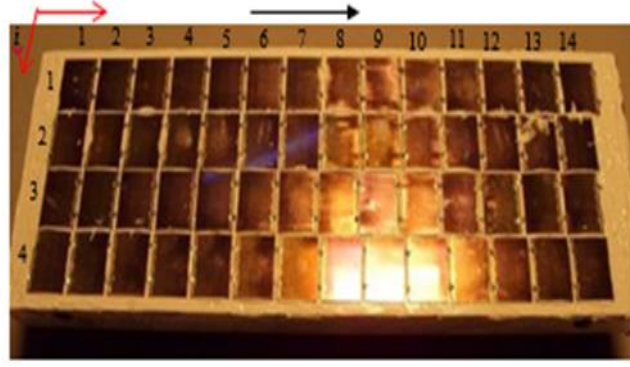
Literatürde birden fazla filtre türü kullanılmaktadır. TPV için en uygun filtrenin seçimi verimlilik açısından önemlidir. Sistem için çift katmanlı filtre olarak $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ kullanılabilir. Bu filtre, yansıtmayı önleyici kaplama görevi görmektedir. Basit bir seçici filtre olarak cam da kullanılabilir. Çünkü dalgaboyu $4 \mu\text{m}$ 'den daha uzun dalga boyuna sahip fotonları durdurarak seçici yayıcıya geri göndermektedir [34].

5.4 Fotovoltaik Hücreler

Fotovoltaik hücreler; yayıcıdan gelen fotonları absorbe ederek termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Mümkün olduğunca çok fotonun soğurulması gereksinimi düşük bant aralığına sahip malzemelerin kullanımını zorunlu kılar [16].

TPV dönüştürücüleri üzerindeki çalışmalar, esas olarak silikon ve germanyum dönüştürücüler üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, bu elemental yarı iletkenlerin kalitesi zayıftır. Cihazlardaki etkileyici ilerleme, modern TPV cihazlarının yüksek performansa ve sonuçta bu "alana" olan ilginin tekrar canlanmasına yol açmıştır [43]. Birden fazla fotovoltaik hücre tipi bulunmaktadır. Genel olarak GaInAs ve GaInAsSb hücreleri kullanılmaktadır. Bu yarı iletken malzemelerin bant aralıkları birbirinden farklıdır. GaInAs bant aralığı 0,7 eV'a denk gelmektedir. Bu bant aralığı optimum verimlilik ve enerji için oldukça geniş bir skalaya sahiptir. Bu hücrelere ek olarak InGaSb ve InGaAsSb gibi dörtlü alaşım oluşturularak da elde edilir. InGaSb 0,4 eV bant aralığına sahiptir ve bu aralık oldukça dar bant aralığıdır. InGaAsSb ise elementlerin oranına bağlı olarak bant aralığı 0,38 eV-0,7 eV arasında ayarlanabilir.

Bu çalışmada TPV modellenmesinde GaSb ve InGaAsSb hücreleri baz alınmıştır. Bu hücrelerin bant aralıkları çalışma için uygundur. Gasb dezavantajları; GaSb'nin toksisitesi ve GaSb fotosellerinin yüksek maliyetidir. GaSb hücreleri seri bağlanır ve soğutma sisteminin iç yüzeyine yerleştirilir.

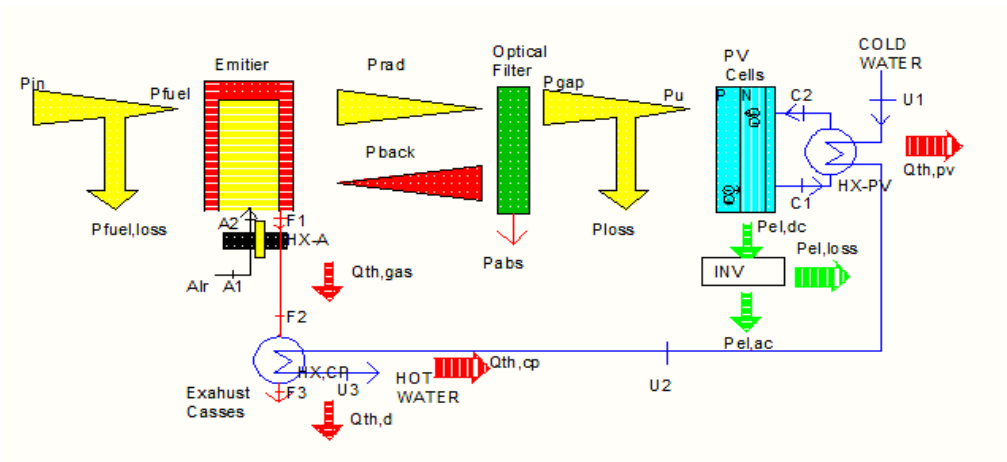


Şekil 5.4 : GaSb Hücresi [11].

TPV'nin çalışma mekanizması aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Isı kaynağından (atık ısılardan) elde edilen termal enerji(fotonlar) ışığa ile seçici yayıcıya aktarılır.
- Seçici yayıcı, sistemin verimliliğini arttırmak için gelen ısıyı uygun yayılım spektrumuna çevirmektedir. Üretilen elektrik enerjisi miktarını arttırmak için seçici yayıcı kullanılır. Seçici yayıcıdan geçen fotonlar filtrelere geçmektedir.
- Filtreler seçici yayıcıya benzer özellik göstermektedir. Filtre, yeterli enerjiye sahip olmayan ışınları geri yansıtarak seçici yayıcıya geri gönderir. Böylece sistem verimi artırılmış olur. Seçici yayıcıdan yeterli enerjiye sahip olan ışınlar hücrelere ulaşabilmektedir. Filtreler aynı zamanda yayıcının sıcaklığının korunmasında yardımcı olur.
- Yeterli enerjiye sahip fotonlar fotovoltaik hücrelere gelerek doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür.

Şekil 5.5'te termofotovoltaik sistemin çalışma mekanizması yer almaktadır.



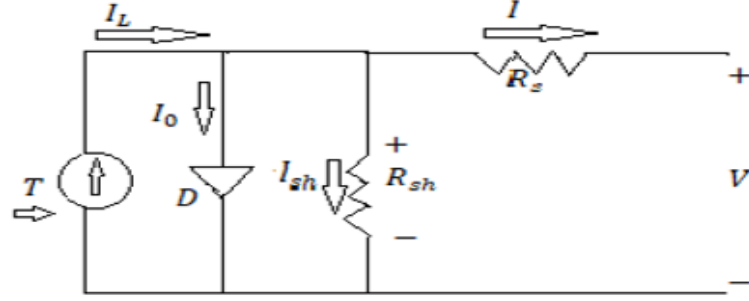
Şekil 5.5: TPV Sisteminin Şematik Olarak Gösterimi [38].

Şekil 5.5' te TPV sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Bu gösterime göre ısı kaynağı olarak yakıt kullanılmıştır. Yakıt, hava ile karışarak seçici yayıcıya gelir. Egzoz gazı sistemden dışarı atılmaktadır. Seçici yayıcıdan çıkan fotonlar ışınla optik filtreye gelerek enerji açısından düşük seviyede olan fotonlar filtreden seçici yayıcıya geri yansır. Enerji açısından uygun bant aralığına sahip olan fotonlar ise fotovoltaik hücreye ulaşır. Fotovoltaik hücrede termal enerji elektrik enerjisine dönüşür. Fotovoltaik hücreden çıkan elektrik doğru akımdır. Invertör (dönüştürücü) doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştürür. Sisteme bağlanmış olan soğutucu, fotovoltaik hücrenin aşırı ısınmasını azaltarak hücrenin sıcaklığını korumaktadır. Hem soğutma sistemi hem de filtre; hücrenin aşırı ısınmasını engeller.



6. TEORİK MODELLEME

Fotovoltaik sistemin eşdeğer devresi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:



Şekil 6.1 : Fotodiyot Eşdeğer Devresi

Işınım ile orantılı radyasyon akımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_{Ph} = \int_0^{\lambda_{max}} q \cdot S \cdot F(\lambda) \cdot SR(\lambda) d\lambda \quad (6.1)$$

Burada λ uyarıcı fotonun dalga boyudur. q elektron yükü, λ_{max} bant boşluğu enerjisine karşılık gelen kesim dalga boyudur. $SR(\lambda)$ ise azaltılmış bölge beyz ve emiterin toplamıyla verilen TPV hücresinin iç spektral karşılığıdır. $F(\lambda)$, TPV hücresi tarafından absorbe edilen gelen ışımın spektral foton akısıdır. $\lambda < \lambda_{max}$ için $F(\lambda)$ aşağıdaki gibi hesaplanır [16].

$$F(\lambda) = \chi \cdot \frac{2\pi \cdot c}{\lambda^4 \left[e^{\frac{hc}{\lambda k T_{Rad}}} - 1 \right]} \quad (6.2)$$

Burada T_{Rad} TPV radyatör sıcaklığı, h planck sabiti, c ışık hızı, k boltzmann sabiti, χ TPV sistemindeki spektral kontrol performansını karakterize eden etkin boşluk yayma kuvvetidir.

Bunun değeri en iyi rapor edilen spektral kontrol sistem performanslarına göre 0,78 alınmıştır [18].

Bir TPV sistemin I-V karakteristiği aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$I = I_L - I_o \left[e^{\frac{q}{nKT}(V+IR_S)} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (6.3)$$

Burada I_L ışınım ile orantılı akım, R_s seri direnci, R_{sh} paralel direnci temsil eder [18].

Açık devre gerilimi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V_{oc} = \frac{nKT_{cell}}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \right) \quad (6.4)$$

Burada n ideallik faktörü, T_{cell} hücre sıcaklığı, I_o ters doyum akımını ifade eder.

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{V_{mp}}{kT/q} + 1 \right] \quad (6.5)$$

Doluluk oranı maksimum gücün, kısa devre akımı ve açık devre geriliminin çarpımına oranından hesaplanır:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (6.6)$$

Bir TPV sisteminin verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{inc} - P_{ret}} \quad (6.7)$$

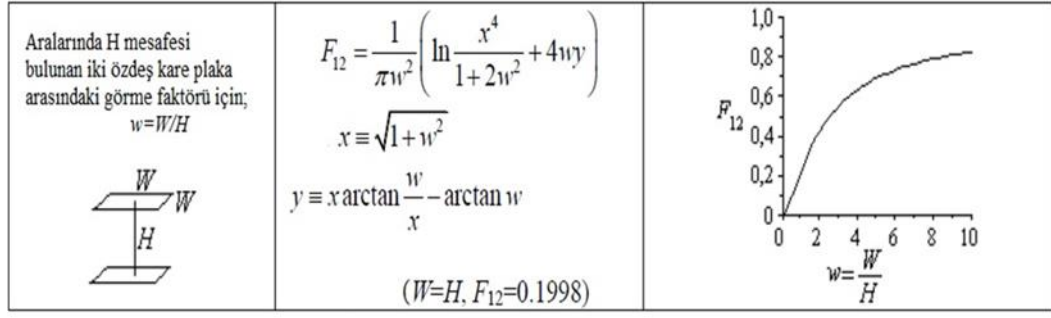
Burada P_{inc} fotovoltaiik hücreye gelen ışınım gücünü, P_{ret} hücre tarafından yansıtılan gücü ifade eder.

Sistemin enerji verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_e = \frac{P_{cell}}{P_{inc}} \quad (6.8)$$

Burada η_e sistem verimliliğini, P_{cell} TPV sistem tarafından üretilen gücü ifade eder.

Spektral kontrol için bir diğer önemli parametre IR emitter ve IR PV katman arasındaki iyi bir görme faktörüdür. Şekil 6.2' de, emitter genişliği olan W 'nin, dielektrik filtre ve IR emitter arasındaki mesafe olan H 'a oranı F_{12} görme faktörünün bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Şekil 6.2'den anlaşılacağı üzere W/H oranı 8 değerinden büyük ise görme faktörü % 80'nin üstünde bir değer olacaktır [16].



Şekil 6.2 : Demir-Çelik Sanayi TPV Uygulamaları İçin Yüksek Görme Faktörü [16].

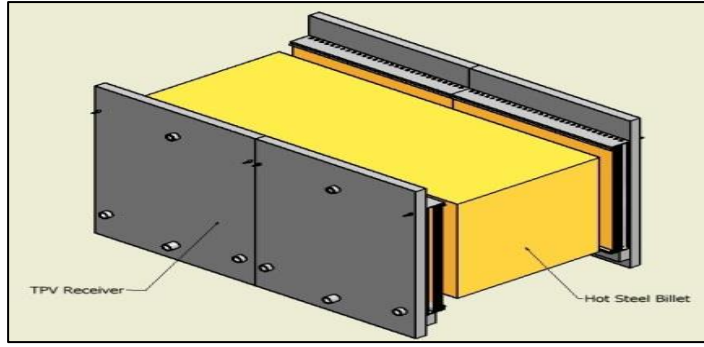
Bu çalışmada endüstriyel sistemlerde kullanılmak üzere teorik modelleme yapılmıştır. Bu model demir çelik sektöründe kullanılmak ve bu sektörde çıkan atık ısılar değerlendirilmek üzere tasarlanmıştır [39].

Uygulamada fotovoltaik hücre olarak GaSb ve InGaAsSb hücresi kullanılmıştır. Hücre parametreleri olarak enerji bant aralığı, hücre alanı, akseptör yoğunluğu ve donör yoğunluğu alınmıştır. Bant aralıklarının sıcaklıkla değişimi hesaplanarak verim değerlendirilmesi yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan 300 K hücre sıcaklığındaki sabit parametreler Çizelge 6.1’de verilmiştir [39].

Çizelge 6.1 : Sabit Hücre Parametreleri [39].

	E_g (eV) Enerji bant aralığı	S (cm^2) Hücre alanı	X	N_a (cm^{-3}) Akseptör yoğunluğu	N_d (cm^{-3}) Donör yoğunluğu	I_o (A)
GaSb	0.72	1	0.78	5×10^{19}	2×10^{18}	1.26×10^{-10}
In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82}	0.555			2×10^{19}		1.91×10^{-7}

Işımada seçici yayıcı ve filtreden geçen dalga boyu büyük ışımaların veya çalışma ortamının sıcaklığının oda sıcaklığından yüksek olması durumunda hücrelerde ısınma ihtimaline karşın, normal koşullarda, hücrenin ısınması ve soğutulması durumlarında verimlerin değişikliklerinin gözlemlenmesine ilişkin yapılan çalışmada, hücre sıcaklığının artması durumunda verimin düştüğü görülmüştür [16].



Şekil 6.3 : Akkor Halindeki Çeliğin İki Yüzeyine Yerleştirilmiş 4 Düzlemsel TPV Modülü [39].

Teorik hesaplamalarda kullandığımız hesaplamalar için referans aldığımız çelik kütüğün ölçüleri 0,16m x 0,16m ebatlarında ve 5,6m uzunluğunda olup ağırlığı 1MT'a eşittir. Türkiye çelik üretimi bakımından 2014 yılı üretimi 34,04 milyon metrik tondur. Saatlik üretim olarak hesaplırsak bu değer yaklaşık 3940 adet kütüğe eşittir [39].

Şekil 6.3' de şematik olarak gösterilen TPV modülü kütüklerin her iki yüzeyine uygun koşullarında yerleştirildiği takdirde, TPV modül alanının 0,15m x 0,15m ve 5,6m uzunluk boyunca uygulandığını varsayarsak bu bize 6619,2 m² gibi bir alan verecektir. GaSb termofotovoltaik hücreler yüksek kızılötesi radyant enerjiye maruz kaldıklarında 1W/cm² gibi bir güç üretmektedir. Bulduğumuz alan değeriyle birlikte hesapladığımızda, Türkiye demir-çelik sektöründeki atık ışınım enerjisi potansiyelinden geri kazanılabilir güç yaklaşık olarak 66,192 MW diyebiliriz. Hesaplamalarda GaSb yerine InGaAsSb hücre kullandığımız takdirde üretilen güç 2,87W/cm²'dir. Bu durumda üretilen toplam güç yaklaşık olarak 189,971 MW olacaktır [44].

Çizelge 6.2 : Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Atık Işınım Enerjilerinin TPV Sistemleri ile Geri Kazanımı ve Verimliliği

Sektör	Işınım Yayan Cisim Sıc. (K)	Hücre Sıcaklığı (K)	Siyah Cisim Işınımı (W/cm ²)	Referans Alınan Ortalama Çelik Ölçüleri	Çelik Kütük Adedi (adet/saat)	TPV Sistem Alanı (m ²)	Hücre Tipi	TPV ile Geri Kazanılan Enerji (MW/h)
Demir Çelik Sektörü	1256	300	3,4	0,16x0,16	3940	6619,2	GaSb	66,192
							InGaAsSb	189,971

Çizelge 6.2'de Türkiye demir-çelik sektörünün atık ışınım enerjilerinin TPV sistemleri ile geri kazanımı ve verimliliği gösterilmektedir. Sistem verimliliği üretilen enerjinin absorbe edilen enerjiye oranı ile elde edilirken, enerji verimliliği üretilen enerjinin

kurtarılabılır potansiyeldeki tüm enerjiye oranı ile hesaplanır. Dolayısıyla sistem verimliliklerinin benzer görüntüler sergilemesi enerji verimliliği sonuçlarını yansıtmaz, enerji verimliliği GaSb hücreli TPV sistemlerinde %2,04 ve $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücreli TPV sistemlerinde %7,31 olarak hesaplanmıştır.



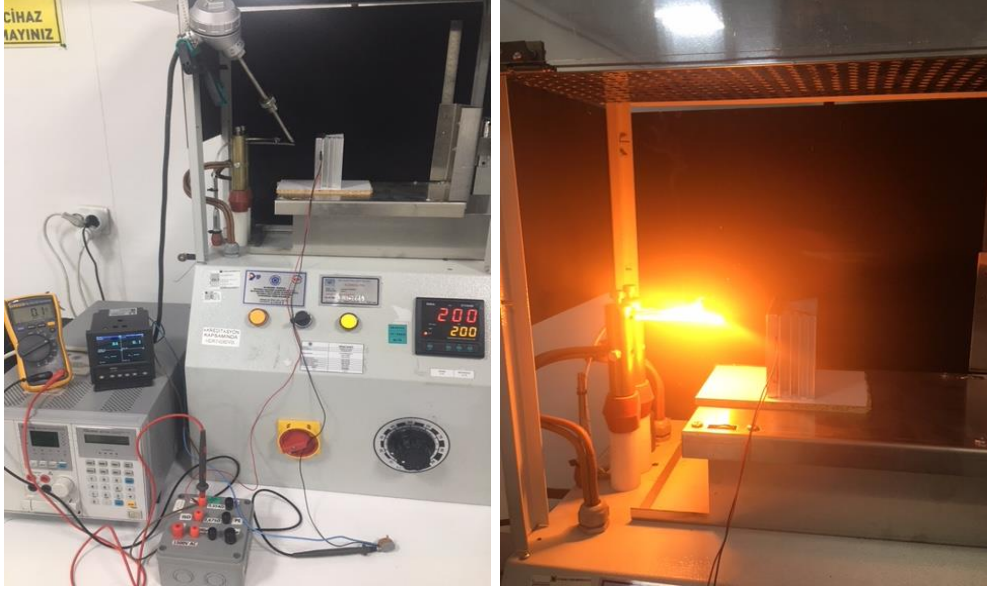


7. TERMOFOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN DÜŞÜK VE YÜKSEK SICAKLIKLI ATIK ISI SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ

Bu bölümde termofotovoltaik sistemin kurulumu, kullanılan ölçüm cihazları, deneysel çalışma, termal kamera ölçüm sonuçları yer almaktadır. Analiz kapsamında yüksek sıcaklıklı atık ısılarına sahip endüstriyel sistemlere uygulanan GaSb hücreli termofotovoltaik güneş hücre yapısı tasarlanmıştır. Değişen ışıma kaynağı sıcaklığına bağlı olarak, hücre sıcaklığına karşı temel parametreler olan açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (J_{sc}), dolun faktörü (FF) ve enerji dönüşüm verimlilik değerlerinin (η) davranışları grafiklerle sunulmuştur. Ayrıca termofotovoltaik sistemlerin, düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarına sahip merkezi ısıtma sistemlerindeki kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla farklı parametrelerdeki değerler girilerek analiz yapılmıştır. Bu analizde GaSb hücresi kullanılarak TPV düşük sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Analizde bu değerlerin enerji verimliliğine, doldurma faktörüne, açık devre gerilimine ve kısa devre akımına etkisi tespit edilmiştir.

7.1 Termofotovoltaik Sistemin Kurulumu ve Deneysel Çalışma

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deney düzeneğinde ısı kaynağı olarak kızaran tel kullanılmıştır. Değişen kaynak sıcaklığının hücre sıcaklığına olan etkisi ve gerilim değerleri incelenmiştir. Hücre tipi olarak GaSb hücresi kullanılmıştır. Deney düzeneğinde ısı kaynağı olarak kızaran tel, GaSb hücresi, voltmetre, datalogger ve termocouple yer almaktadır. Kaynak sıcaklık değerleri 200°C ile 1000°C arasında alınmıştır. Ayrıca termal kamera ile ölçüm yapılarak kızaran tel üzerindeki en yüksek sıcaklık değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 7.1 : GaSb TPV Hücresi Üzerinde Yapılan Deneysel Çalışma

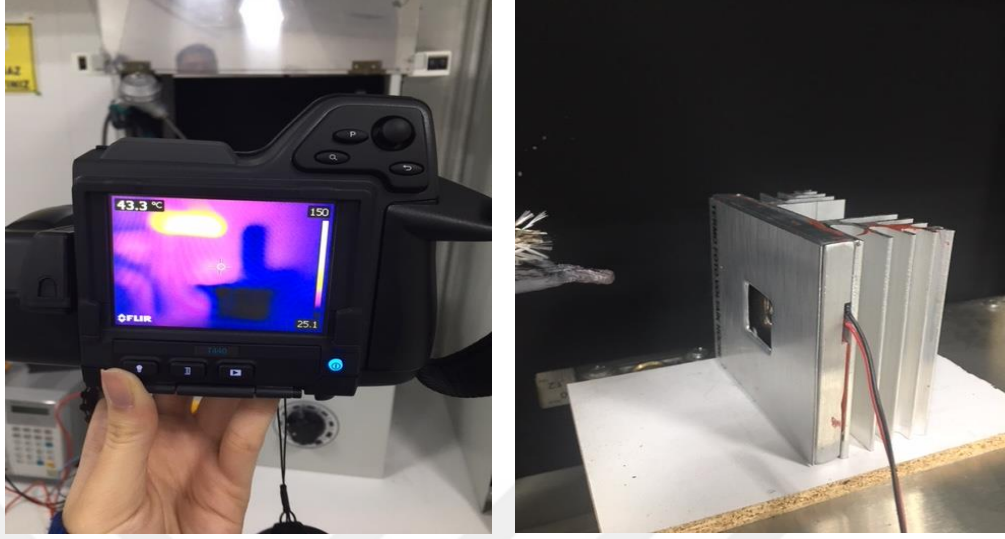
Sisteme bağlanmış olan voltmetre, hücrede ölçülen gerilim değerlerini göstermektedir. Datalogger (veri kayıt cihazları) ise GaSb hücresi üzerinde ölçülen sıcaklık ve gerilim değerlerini belirli bir süre boyunca kaydeden cihazlardır.



Şekil 7.2 : Deneysel Çalışma Sırasında Kullanılan Voltmetre ve Datalogger

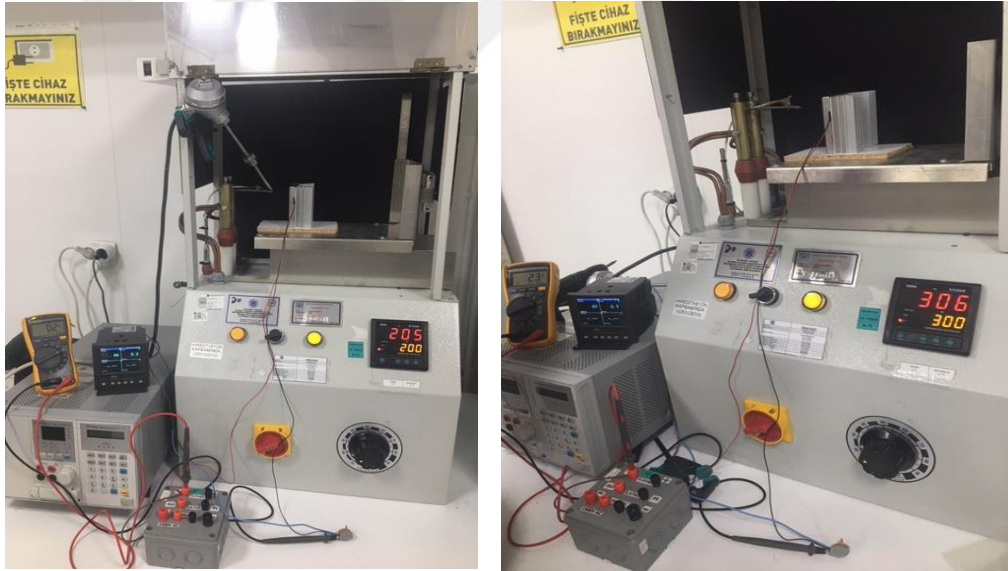
Deneysel çalışmada bir diğer ölçüm cihazı olarak termal kamera kullanılmıştır. Termal kameralar, gözle görülemeyen infrared enerjisi (ısıyı) kullanan ve görüntünün genel yapısını infrared enerjiye göre oluşturduğu renkler ve şekiller ile ifade eden görüntüleme sistemidir. Temassız ölçüm cihazları olan termal kameralar nesnelere

yaymış oldukları görünmez infrared enerjiyi algılayarak kamera ekranında termal görüntü şeklinde gösterirler.

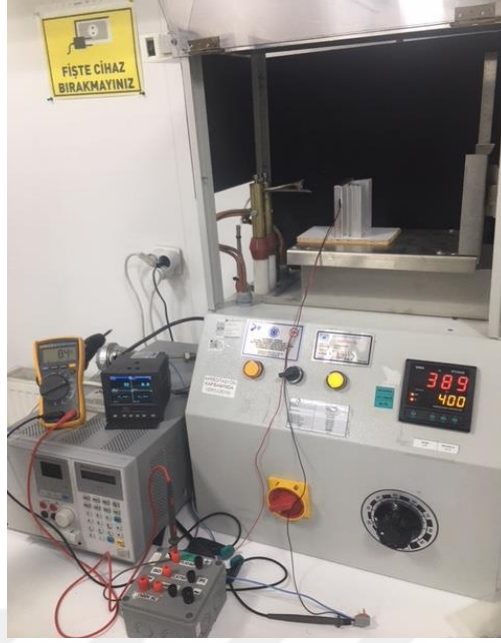
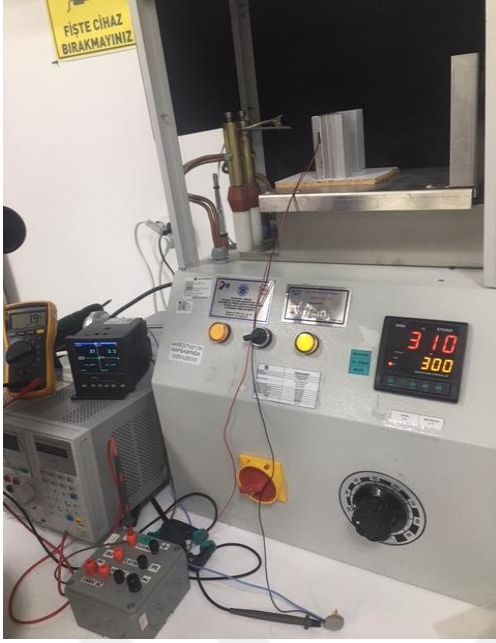


Şekil 7.3 : Deneysel Çalışma Sırasında Kullanılan Termal Kamera ve GaSb Hücresi

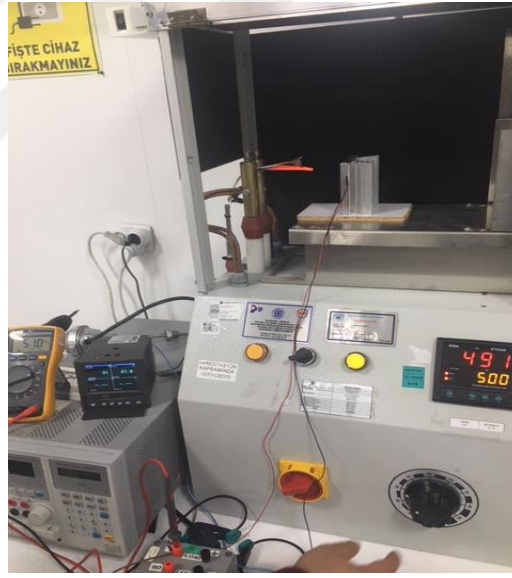
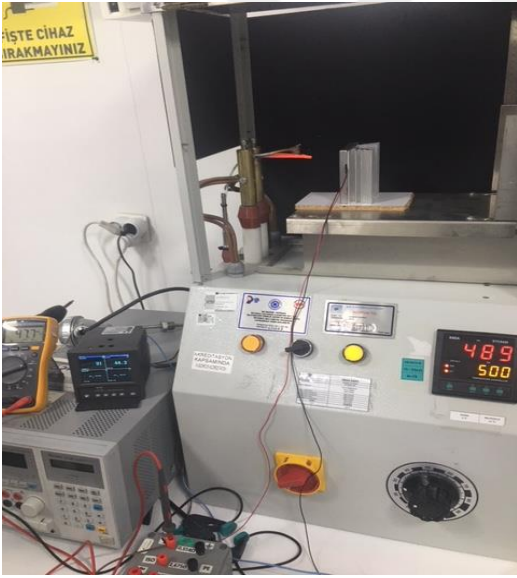
Kaynak sıcaklığı değişiminin hücre sıcaklığına ve oluşan gerilime etkisini belirlemek için yapılan deneyde başlangıç sıcaklığı olarak 200°C alınmıştır.



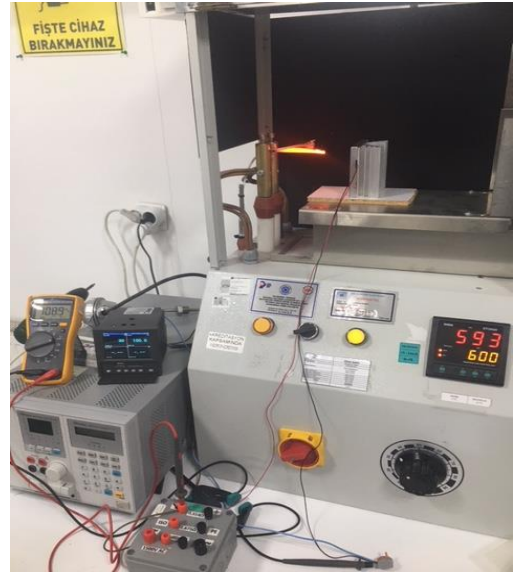
Şekil 7.4 : 205°C ve 306 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı ve Gerilim Değerleri



Şekil 7.5 : 310°C ve 389 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri



Şekil 7.6 : 489 °C ve 491 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri



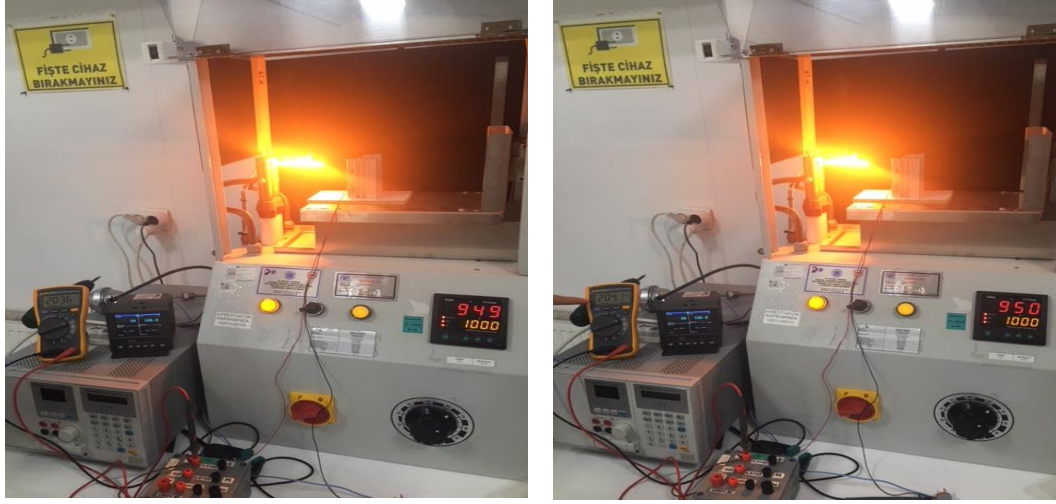
Şekil 7.7 : 554 °C ve 593 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri



Şekil 7.8 : 697 °C ve 748 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri



Şekil 7.9 : 862 °C ve 898 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri



Şekil 7.10 : 949 °C ve 950 °C Kaynak Sıcaklığında Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri

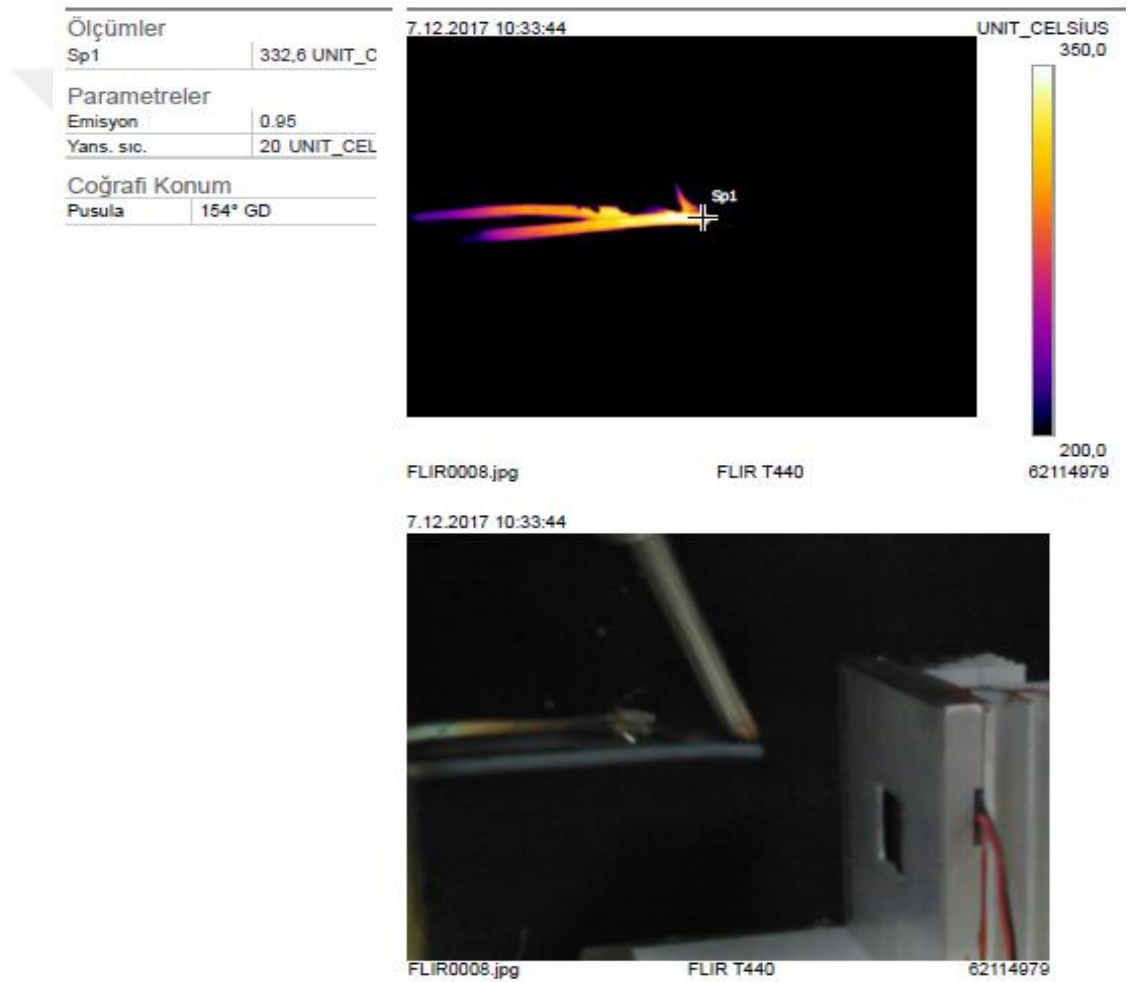
Yapılan deney doğrultusunda ısı kaynağı olarak kullanılan kızaran telin 489 °C kaynak sıcaklığında ışımaya başlamaya başladığı görülmektedir. Kaynak sıcaklığı 697 °C ile 748 °C arasında iken gözle görülür bir ışımaya meydana gelmektedir. Kaynak sıcaklığı 949 °C ve 950 °C ‘ye ulaştığında meydana gelen ışımaya gözle görülecek oranda arttığı belirlenmiştir. Çizelge 7.1’de yapılan deney doğrultusunda her bir kaynak sıcaklığına karşı elde edilen hücre sıcaklığı ve hücrede meydana gelen gerilim değerleri verilmektedir.

Çizelge 7.1 : Kaynak Sıcaklığına Karşı Elde Edilen Hücre Sıcaklığı Ve Gerilim Değerleri

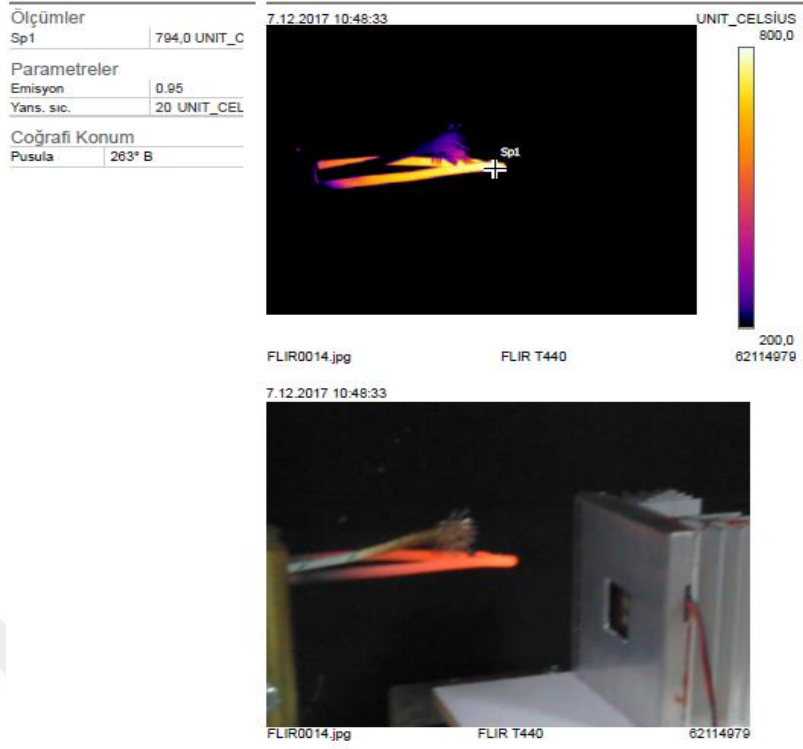
Kaynak Sıcaklığı (°C)	Hücre Sıcaklığı (°C)	Gerilim (mV)
200	84	0,1
205	86	0,2
306	37	2,3
310	37	1,9
389	32	8,4
489	31	47,7
491	31	51
554	30	93,1
593	30	108,9
697	29	153,9
748	29	172,3
862	29	188,4
898	29	195,7
949	28	203,6
950	28	204,1

Çizelge 7.1’de görüldüğü gibi kaynak sıcaklığı arttıkça hücre sıcaklığının azaldığı gerilimin ise arttığı görülmektedir. Kaynak sıcaklığı arttıkça meydana gelen ışımaya miktarı artar. Böylece GaSb hücresi üzerine daha yüksek oranda ışımaya düşer ve elde edilen gerilim artar. Kaynak sıcaklığı arttıkça hücre sıcaklığının azalması ise hücrenin dış yüzeyinde bulunan soğutucu sistemin devreye girmesi ve hücrenin aşırı ısınmasını önleyerek zarar görmesini engellemesidir. Soğutucu sistem devreye girdikçe hücre sıcaklığı giderek azalmakta ve daha sonra sabit bir sıcaklık değerine ulaşmaktadır.

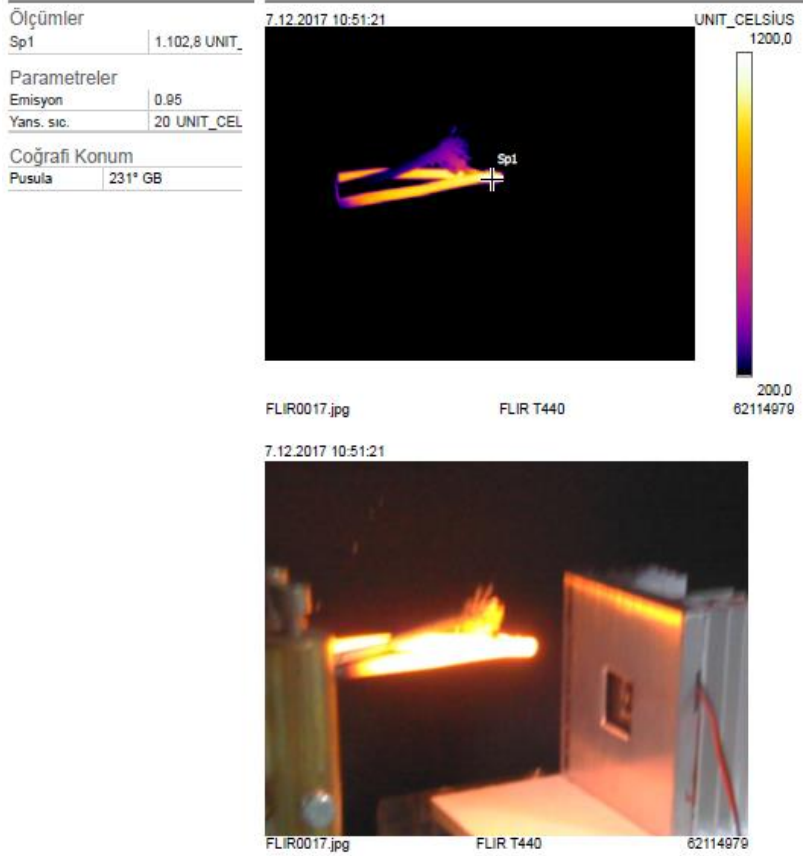
Deneysel çalışmaya ek olarak yapılan termal kamera ölçümleri, kızaran tel üzerinde meydana gelen en yüksek sıcaklık değerlerini göstermektedir.



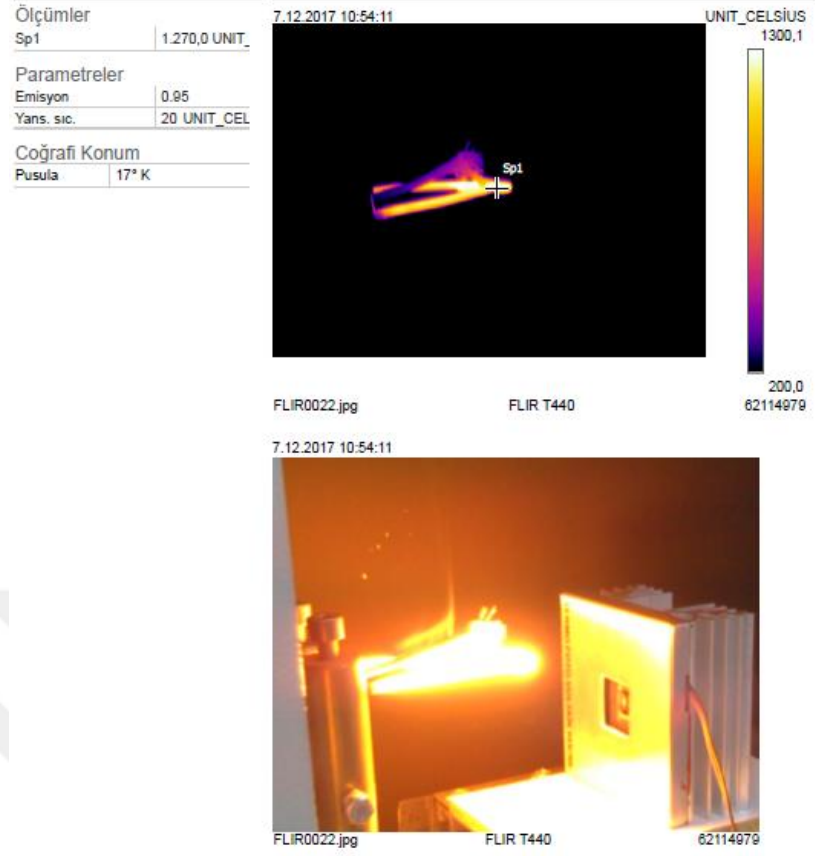
Şekil 7.11 : Deneysel Başlangıcında Termal Kamera ile Kızaran Tel Üzerinde Ölçülen Sıcaklık Değeri



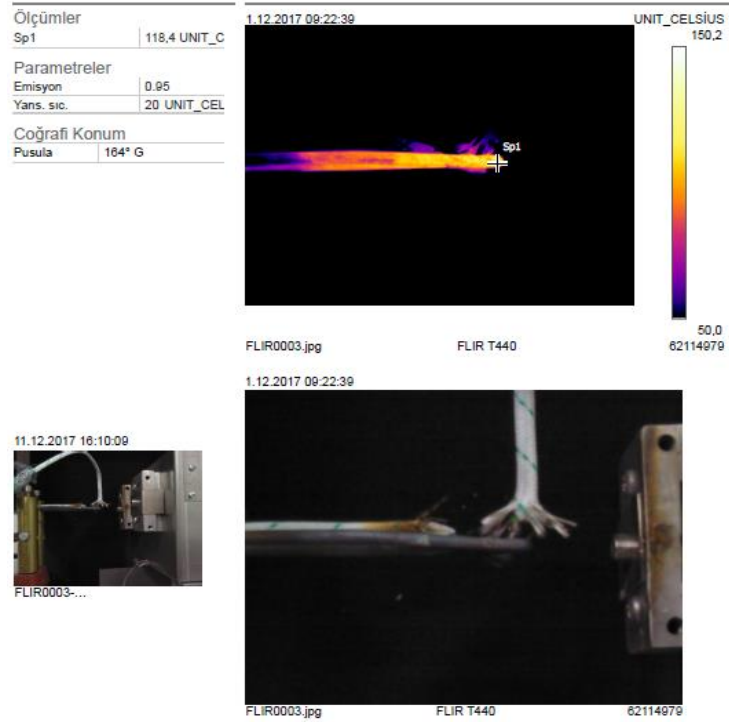
Şekil 7.12 : Işımanın Gözle Görülür Olduğu Noktada Meydana Gelen Sıcaklık Değeri



Şekil 7.13 : Kaynak Sıcaklığı Artışına Bağlı Olarak Meydana Gelen Yüksek Işıma Sonucu Kızaran Tel Üzerinde Ölçülen Sıcaklık Değeri



Şekil 7.14 : En Yüksek Kaynak Sıcaklığında Kızaran Tel Üzerinde Ölçülen Sıcaklık Değeri



Şekil 7.15 : Deney Sonunda Soğumaya Bırakılan Kızaran Tel Üzerinde Ölçülen Maksimum Sıcaklık Değeri

Termal kamera sonuçlarına göre kaynak sıcaklığı arttıkça kızaran tel üzerinde ölçülen sıcaklık değeri artmış ve daha yüksek oranda ışıma meydana gelmiştir. En yüksek sıcaklık değerinin kızaran telin uç kısmında meydana geldiği görülmüştür. Tel üzerindeki en yüksek sıcaklık değeri 1270 °C iken en düşük sıcaklık 118,4 °C olarak ölçülmüştür.

7.2 Termofotovoltaik Sistemlerin Yüksek Sıcaklıklı Atık Isı Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi ve Analizi

Termofotovoltaik sistemler, atık ısı enerjisinden elektrik üreten sistemlerdir. Sistem bileşenleri arasında ısı kaynağı, seçici yayıcı, filtre ve fotovoltaik hücreler bulunur. Fotovoltaik hücreler termal enerji elektrik enerjisine dönüşürler. Endüstriyel sistemlerde üretim aşamasında meydana gelen yüksek sıcaklıklı atık ısılar termofotovoltaik sistemlerde kullanılmaktadır. Termofotovoltaik sisteme yüksek sıcaklıklı ısı kaynağı sağlayan bu atık ısılar elektrik enerjisine çevrilebilmektedir. Yüksek sıcaklıklı atık ısı kaynakları endüstriyel sistemlerden elde edilmektedir.

Analizler, endüstriyel termofotovoltaik sistemlerde yüksek sıcaklıklı atık ısı değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Sürüklenme-difüzyon modeli kullanılarak GaSb hücre yapısının tabaka kalınlıkları optimize edilmiş ve nihai örnek tasarımı MATLAB programı kullanılarak hesaplanmıştır. Analiz sonucuna göre elde edilen grafiklere bu çalışmada yer verilmiştir.

Yapılan analizde, TPV yüksek sıcaklık grafikleri GaSb hücresi kullanılarak elde edilmiştir. Kullanılan sıcaklık parametreleri hücre sıcaklığı ve kaynak sıcaklığıdır. Bu grafiklerle enerji verimliliği, dolum faktörü, açık devre voltajının etkisi ve kısa devre akım değerleri belirlenmiştir [45].

GaSb termofotovoltaik hücre sistemlerinin verimlilik değeri hesaplanırken, radyasyon kaynağı sıcaklığı değerleri 1300 K ile 3100 K aralığında 300 K artışlarla alınmıştır. Hücre sıcaklık değerleri ($T_{\text{hücre}}$) 300 K'den 400 K'e 24 K 'lik artışlarla alınmıştır. Nihai tasarıma göre, GaSb güneş pil yapısının optimum enerji dönüşüm verimliliği değeri, $T_{\text{kaynak}} = 2200 \text{ K}$ ve $T_{\text{hücre}} = 300 \text{ K}$ 'de % 33.14 olarak bulunmuştur [45].

Termofotovoltaik (TPV) hücrenin verimlilik değeri, TPV hücrenin ışık altında akım-voltaj (I-V) karakteristiğinden belirlenir. TPV hücrenin toplam akım değeri (I_{Total}) aşağıdaki gibi ifade edilir [46]. Dolum faktörü, ya da yaygın olarak kullanılan

kısaltmasıyla “FF”, termofotovoltaik hücreden alınabilecek olan en fazla gücü belirleyen bir ölçüdür. FF tanım olarak; termofotovoltaik hücre içindeki gözenin maksimum gücünün, V_{OC} ve I_{SC} değerlerinin çarpımına oranıdır. Grafikselsel olarak ise gözenin Akım-Voltaj eğrisi ne kadar kareye benzerse dolun faktörü o kadar büyük olur [47].

$$I_{Total} = I_{Ph} - I_D \quad (7.1)$$

I_D karanlık akım, I_{Ph} foto akımdır. Karanlık akım, I_D , Shockley diyodu denklemlle tanımlanır:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7.2)$$

Burada, q temel yüküdür, k Boltzman sabiti, T sıcaklık, I_0 ters doyum akımıdır. I_0 aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I_0 = \frac{qSD_e n_i^2}{I_e N_a} \times \frac{\frac{S_e I_e}{D_e} \cosh\left(\frac{h}{I_e}\right) + \sinh\left(\frac{h}{I_e}\right)}{\frac{S_e I_e}{D_e} \sinh\left(\frac{h}{I_e}\right) + \cosh\left(\frac{h}{I_e}\right)} + \times \frac{\frac{S_h I_h}{D_h} \cosh\left(\frac{x_j}{I_h}\right) + \sinh\left(\frac{x_j}{I_h}\right)}{\frac{S_h I_h}{D_h} \sinh\left(\frac{x_j}{I_h}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{I_h}\right)} \quad (7.3)$$

Burada, n_i asıl taşıyıcı yoğunluğudur, N_a ve N_d sırasıyla alıcı ve verici konsantrasyonlarıdır, S_h ve S_e sırasıyla n- ve p- tipi bölgedeki rekombinasyon hızlarıdır, S hücre yüzeyidir, D_e ve D_h sırasıyla elektronların ve boşlukların difüzyon sabitleridir, I_e ve I_h sırasıyla elektronların ve boşlukların azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluklarıdır.

n_i aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (7.4)$$

Burada, N_C ve N_V sırasıyla iletkenlik ve valans bandındaki efektif durum yoğunluklarıdır, E_g band aralığı enerjisidir.

D_e ve D_h denklem 7.5'te verildiği gibi ifade edilir:

$$D_{e/h} = \frac{kT}{q} \times \mu_{e/h} \quad (7.5)$$

Burada μ_e ve μ_h sırasıyla elektron ve hollerin mobiliteleleridir.

Fotoakım, I_{Ph} , güneş hücresinin emiter, base ve tüketim bölgesinde üretilen fotoakımların toplamı şeklinde verilir. I_{Ph} denklem aşağıdaki gibi ifade edilir:

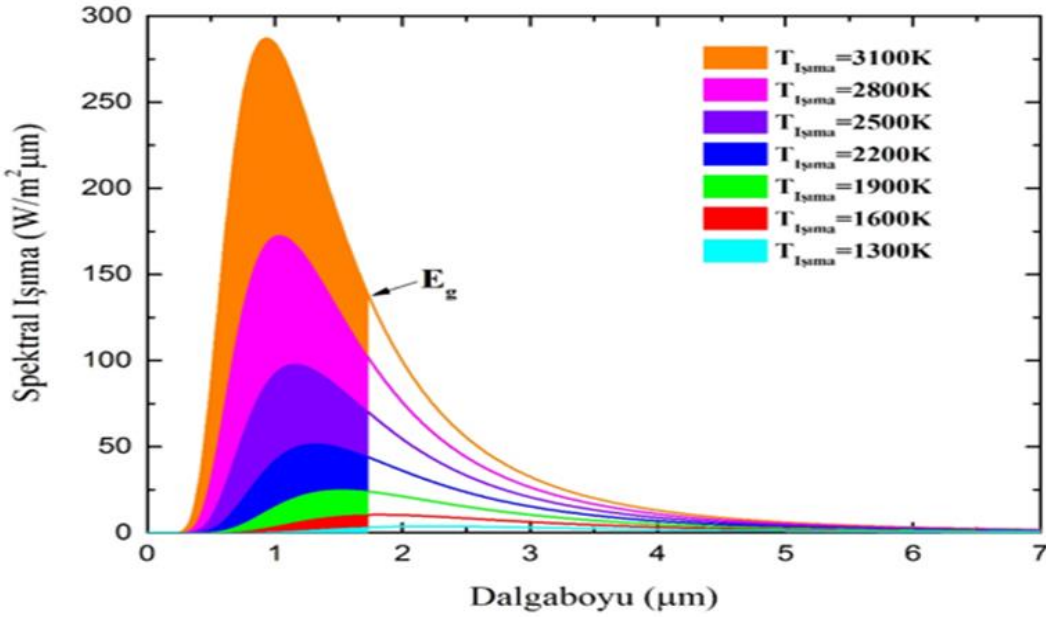
$$I_{Ph} = \int_0^{\lambda_{max}} qSF(\lambda)SR(\lambda)d\lambda \quad (7.6)$$

$F(\lambda)$ TPV hücre tarafından absorbe edilen ışımın spektral fotonlarının akısıdır. $F(\lambda)$ $\lambda < \lambda_{\max}$ için aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$F(\lambda) = \chi \times \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{hc}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_{Işılma}} - 1}} \quad (7.7)$$

Burada, $T_{Işılma}$ siyah cisim ışılma kaynağının sıcaklığıdır, h plank sabitidir, c ışık hızıdır, χ TPV sistemde spektral kontrolün performansını karakterize eden yayma oranıdır. χ' 'in değeri en iyi rapor edilen spektral kontrol sistem performansına dayanılarak 0.78 olarak alınmıştır [46].

Aşağıda GaSb hücresine uygulanan farklı kaynak sıcaklığı ve hücre sıcaklıklarında meydana gelen analiz sonuçlarına yer verilmiştir.



Şekil 7.16 : Kaynak Sıcaklığı Boyunca Değişen Siyah Cisim Radyasyon Spektrumu

Şekil 7.16’da değişen radyasyon sıcaklığına bağlı olarak farklı dalga boylarında siyah cisim radyasyon spektrumunun değişimi görülmektedir. Örneğin 3100 K radyasyon sıcaklığında 1 μm dalga boyunda spektral radyasyon yaklaşık olarak 280 $W/m^2 \mu m$ iken, 2 μm dalga boyunda yaklaşık 100 $W/m^2 \mu m$ değerine düştüğü görülmektedir. Radyasyon sıcaklığı 2800 K olduğunda dalga boyu 1 μm iken spektral radyasyon yaklaşık 180 $W/m^2 \mu m$ iken, 2 μm dalga boyunda yaklaşık 80 $W/m^2 \mu m$ değerine düştüğü görülmektedir. Bu durumda dalga boyu arttıkça spektral radyasyonun düştüğü

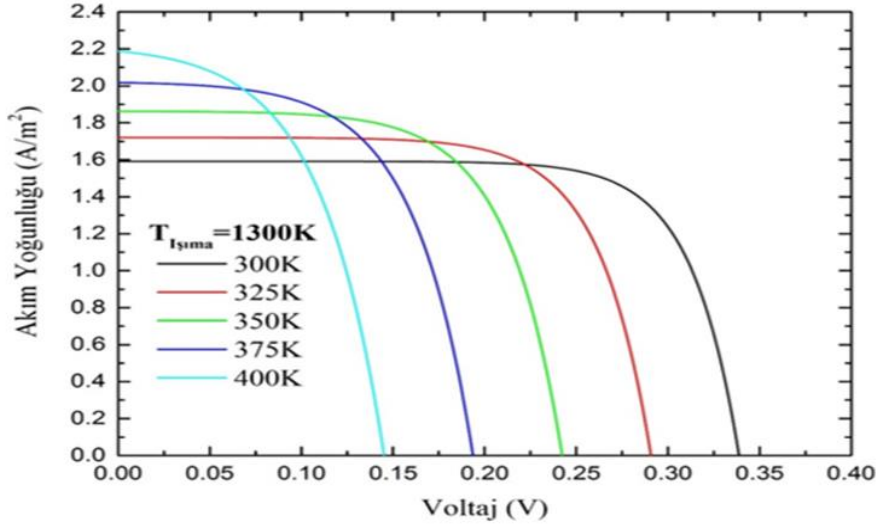
gözenmektedir. Ayrıca şekilde ışıma kaynağının sıcaklığına göre GaSb yarıiletkenin bant aralığından daha büyük enerjideki foton sayısının artacağı da görülmektedir.

Işık altındaki bir p-n eklemnin her bölgesinde oluşan fotoakım, taşıyıcıların sürüklenmesi ve difüzyon mekanizmaları göz önüne alınarak modellendiği için sürüklenme-difüzyon modeli olarak adlandırılır. Sürüklenme difüzyon modelinde kullanılan parametreler Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 : Sürüklenme Difüzyon Modelinde Kullanılan Parametreler [46].

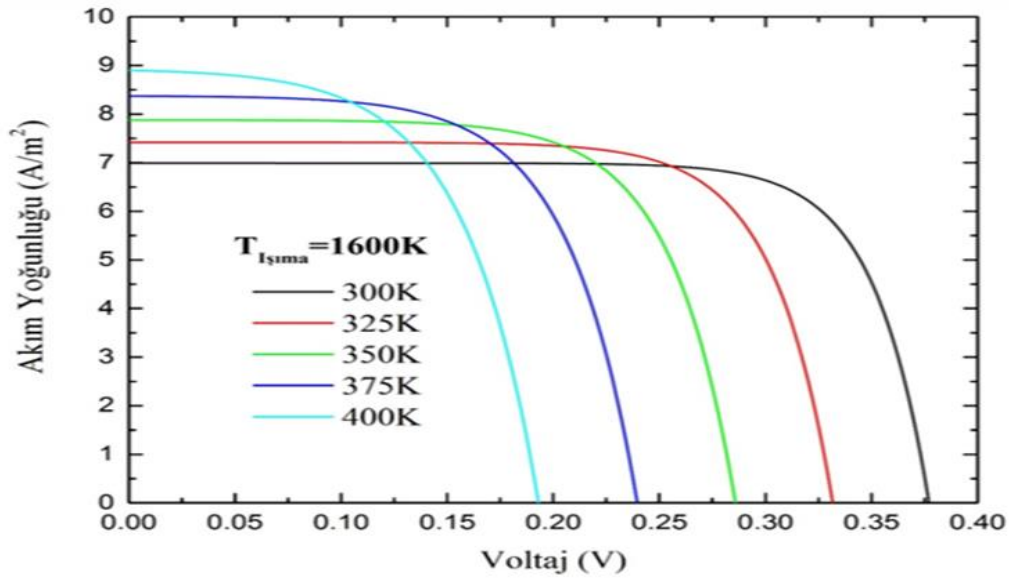
Parametre	Sembol	Birim	Değer
Bant aralığı (300K’de)	E_g	eV	0.7174
Boşluk etkin kütlesi	m_h^*	kg	$0.4m_0$
Elektron etkin kütlesi	m_e^*	kg	$0.041m_0$
Boşluk rekombinasyon zamanı	τ_p	ms	0.1
Elektron rekombinasyon zamanı	τ_n	ns	10
Boşluk mobilitesi (300K’de)	μ_p	$cm^2/s.V$	271
Elektron mobilitesi (300K’de)	μ_n	$cm^2/s.V$	1101
p-tipinde yüzey rekombinasyon hızı	S_e	cm / s	4000
n-tipinde yüzey rekombinasyon hızı	S_h	cm / s	200
Kırılma indisi	n	-	3.8
Statik dielektrik sabiti	ϵ_s	F / m	$14.7\epsilon_0$

Modelleme yapılırken, $T_{ışıma}$ değerleri 1300 K, 1700 K, 1900 K, 2200 K, 2400 K, 2800 K ve 3100 K olacak şekilde, $T_{Hücre}$ sıcaklık değerleri ise 300 K, 324 K, 340 K, 374 K ve 400 K olarak alınmıştır. Her bir ışıma sıcaklığı için $T_{Hücre}$ değerleri kullanılarak grafikler elde edilmiştir.



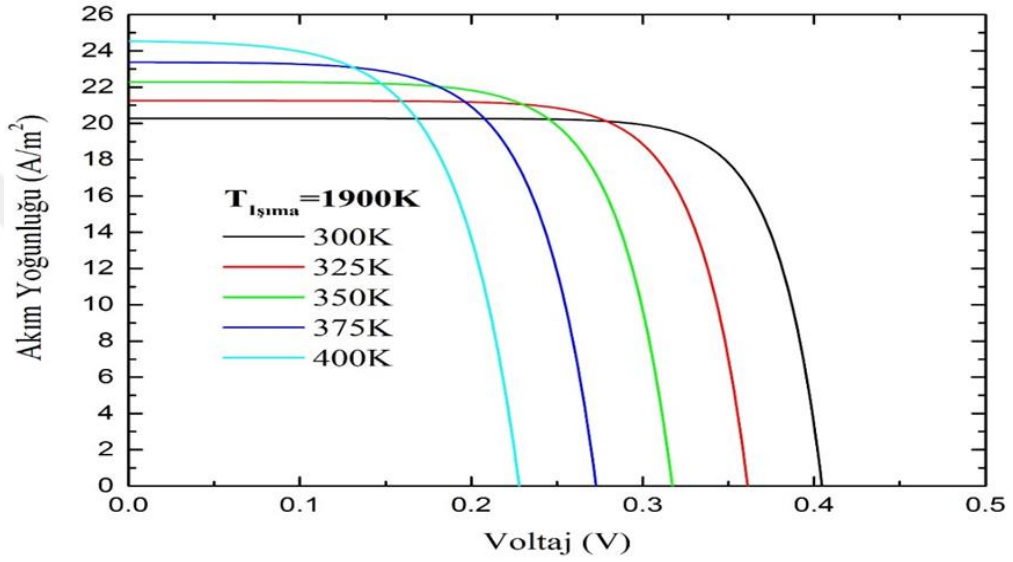
Şekil 7.17 : $T_{ışma} = 1300$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiği

Şekil 7.17’de 1300 K radyasyon sıcaklığında farklı hücre sıcaklıklarında değişen gerilim değerlerine göre akım yoğunlukları görülmektedir. Örneğin 400 K hücre sıcaklığında gerilim değeri 0.04 V olduğunda akım yoğunluğu 2.2 A/ m² iken gerilim değeri 0.10 V olduğunda akım yoğunluğu 1.7 A/ m² değerine düşmektedir. 340 K kaynak sıcaklığında gerilim değeri 0.10 olduğunda akım yoğunluğu 1.9 A/ m² iken gerilim değeri 0.20 V olduğunda akım yoğunluğu 1.7 A/ m² değerine düşmektedir. Bu durumda gerilim arttıkça akım yoğunluğunun düştüğü gözlenmektedir.



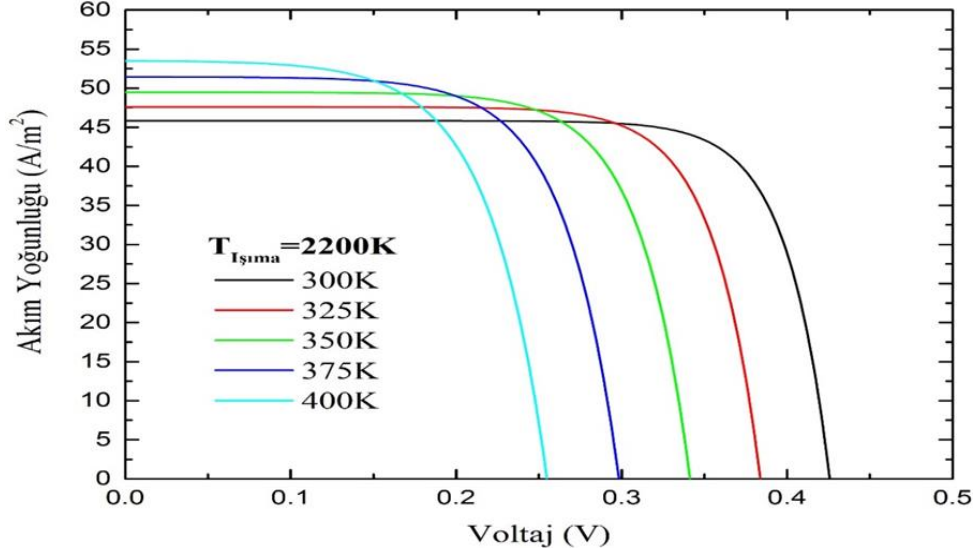
Şekil 7.18 : $T_{ışma} = 1600$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiği

Şekil 7.18’de 1700 K radyasyon sıcaklığında farklı hücre sıcaklıklarında değişen gerilim değerlerine göre akım yoğunlukları görülmektedir. Örneğin 400 K hücre sıcaklığında gerilim değeri 0.04 V olduğunda akım yoğunluğu 9 A/ m² iken gerilim değeri 0.14 V olduğunda akım yoğunluğu 7 A/ m² değerine düşmektedir. 340 K kaynak sıcaklığında gerilim değeri 0.10 olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 8 A/ m² iken gerilim değeri 0.24 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 7.4 A/ m² değerine düşmektedir. Bu durumda gerilim arttıkça akım yoğunluğunun düştüğü gözlenmektedir.



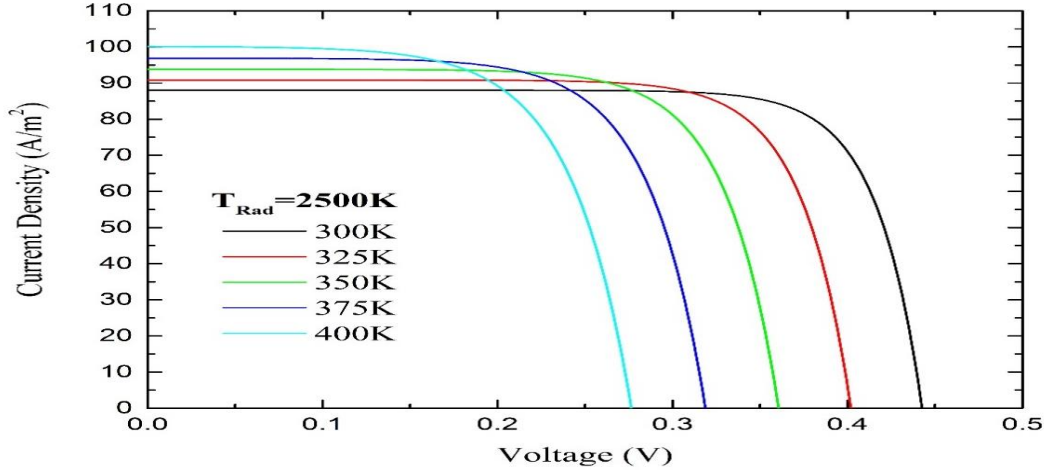
Şekil 7.19: $T_{ışma} = 1900$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiği

Şekil 7.19’da 1900 K radyasyon sıcaklığında farklı hücre sıcaklıklarında değişen gerilim değerlerine göre akım yoğunlukları görülmektedir. Örneğin 400 K hücre sıcaklığında gerilim değeri 0.1 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 24 A/ m² iken gerilim değeri 0.2 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 17 A/ m² değerine düşmektedir. 340 K kaynak sıcaklığında gerilim değeri 0.1 olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 22 A/ m² iken gerilim değeri 0.3 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 13 A/ m² değerine düşmektedir. Bu durumda gerilim arttıkça akım yoğunluğunun düştüğü gözlenmektedir.



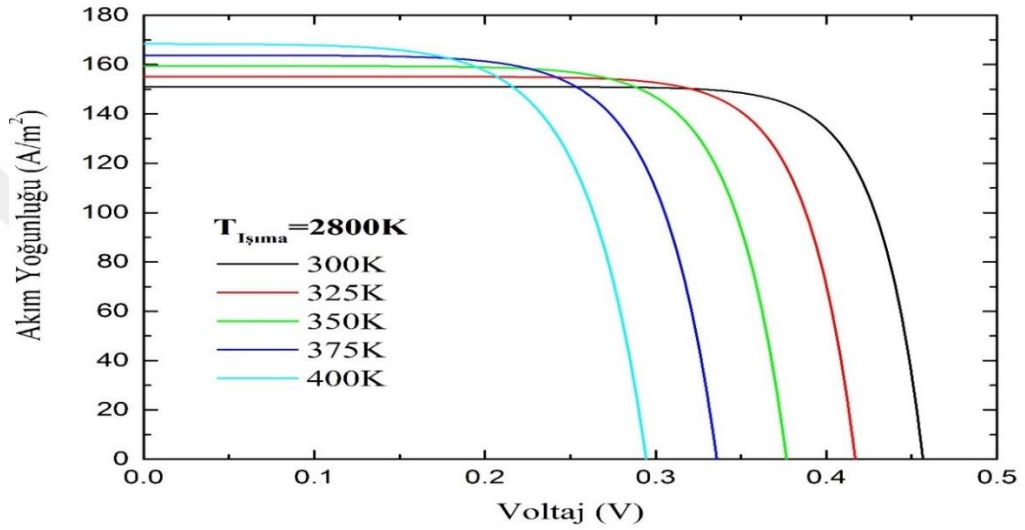
Şekil 7.20 : $T_{ışınma} = 2200$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiği

Şekil 7.20’de 2200 K radyasyon sıcaklığında farklı hücre sıcaklıklarında değişen gerilim değerlerine göre akım yoğunlukları görülmektedir. Örneğin 400 K hücre sıcaklığında gerilim değeri 0.1 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 44 A/ m² iken gerilim değeri 0.2 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 48 A/ m² değerine düşmektedir. 340 K kaynak sıcaklığında gerilim değeri 0.1 olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 49 A/ m² iken gerilim değeri 0.3 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 47 A/ m² değerine düşmektedir. Bu durumda gerilim arttıkça akım yoğunluğunun düştüğü gözlenmektedir.



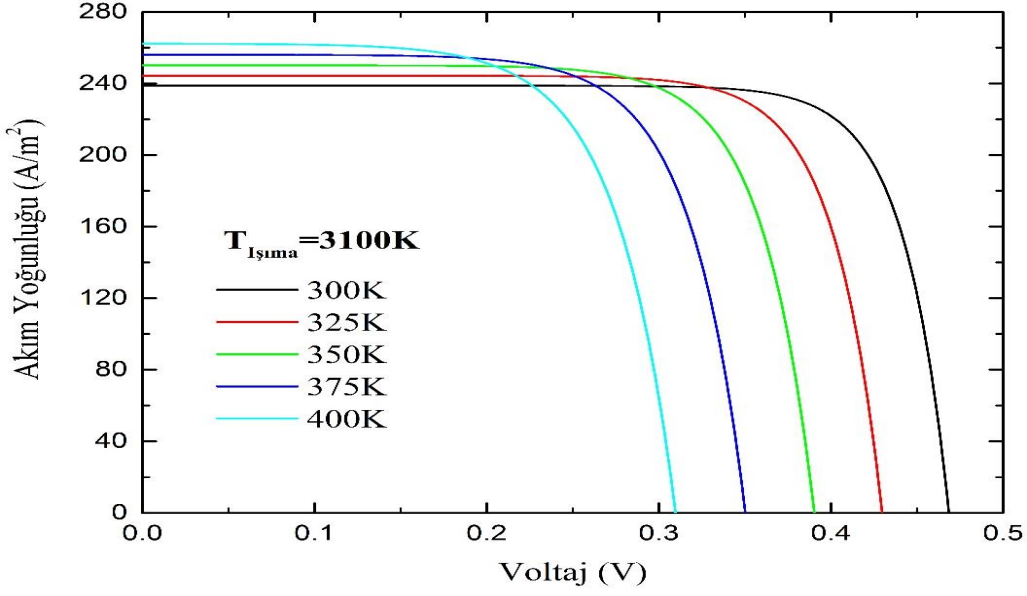
Şekil 7.21: $T_{ışınma} = 2400$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiği

Şekil 7.21’de 2400 K radyasyon sıcaklığında farklı hücre sıcaklıklarında değişen gerilim değerlerine göre akım yoğunlukları görülmektedir. Örneğin 374 K hücre sıcaklığında gerilim değeri 0.1 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 97 A/ m² iken gerilim değeri 0.3 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 44 A/ m² değerine düşmektedir. 340 K kaynak sıcaklığında gerilim değeri 0.1 olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 93 A/ m² iken gerilim değeri 0.3 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 90 A/ m² değerine düşmektedir. Bu durumda gerilim arttıkça akım yoğunluğunun düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 7.22: $T_{ışınma} = 2800$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiği

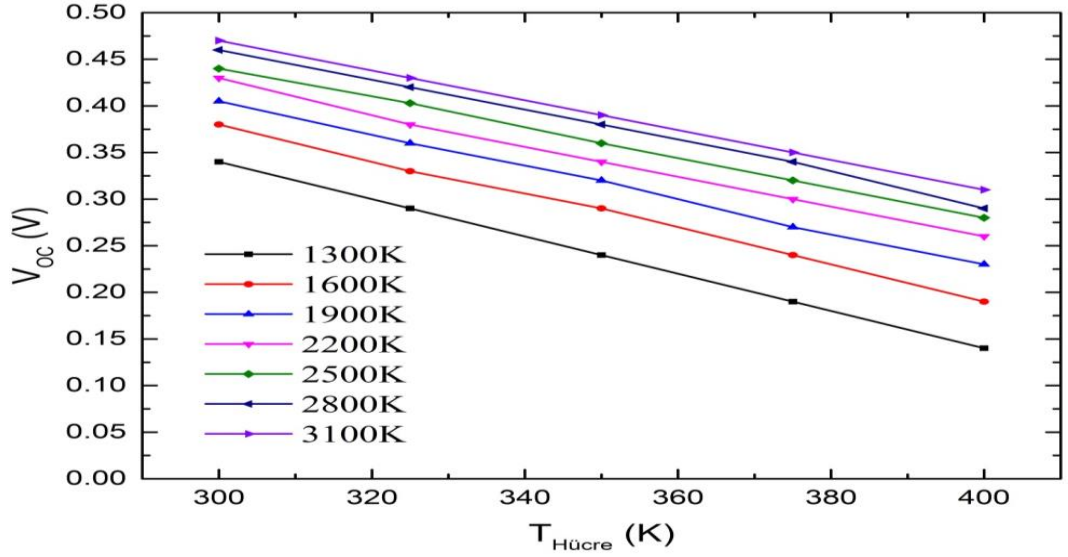
Şekil 7.22’de 2800 K radyasyon sıcaklığında farklı hücre sıcaklıklarında değişen gerilim değerlerine göre akım yoğunlukları görülmektedir. Örneğin 400 K hücre sıcaklığında gerilim değeri 0.1 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 170 A/m² iken gerilim değeri 0.24 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 140 A/m² değerine düşmektedir. 340 K kaynak sıcaklığında gerilim değeri 0.1 olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 170 A/m² iken gerilim değeri 0.34 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 110 A/m² değerine düşmektedir. Bu durumda gerilim arttıkça akım yoğunluğunun düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 7.23: $T_{ışma} = 3100$ K için Değişik Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Yoğunluğu – Voltaj Grafiği

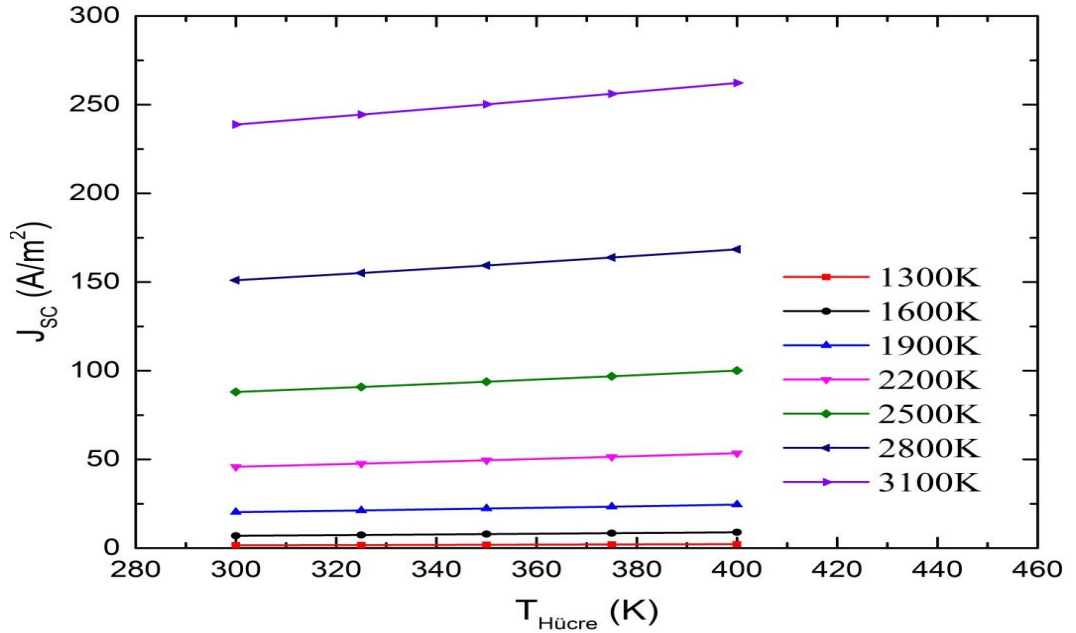
Şekil 7.23’de 3100 K radyasyon sıcaklığında farklı hücre sıcaklıklarında değişen gerilim değerlerine göre akım yoğunlukları görülmektedir. Örneğin 374 K hücre sıcaklığında gerilim değeri 0.1 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 248 A/m² iken gerilim değeri 0.3 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 242 A/m² değerine düşmektedir. 400 K kaynak sıcaklığında gerilim değeri 0.1 olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 270 A/m² iken gerilim değeri 0.24 V olduğunda akım yoğunluğu yaklaşık 240 A/m² değerine düşmektedir. Bu durumda gerilim arttıkça akım yoğunluğunun düştüğü gözlenmektedir.

Değişen ışıma kaynağı sıcaklığına bağlı olarak, hücre sıcaklığına karşı temel parametreler olan açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (J_{sc}), dolun faktörü (FF) ve enerji dönüşüm verimlilik değeri (η) değerlerinin davranışlarına aşağıda yer verilmektedir.



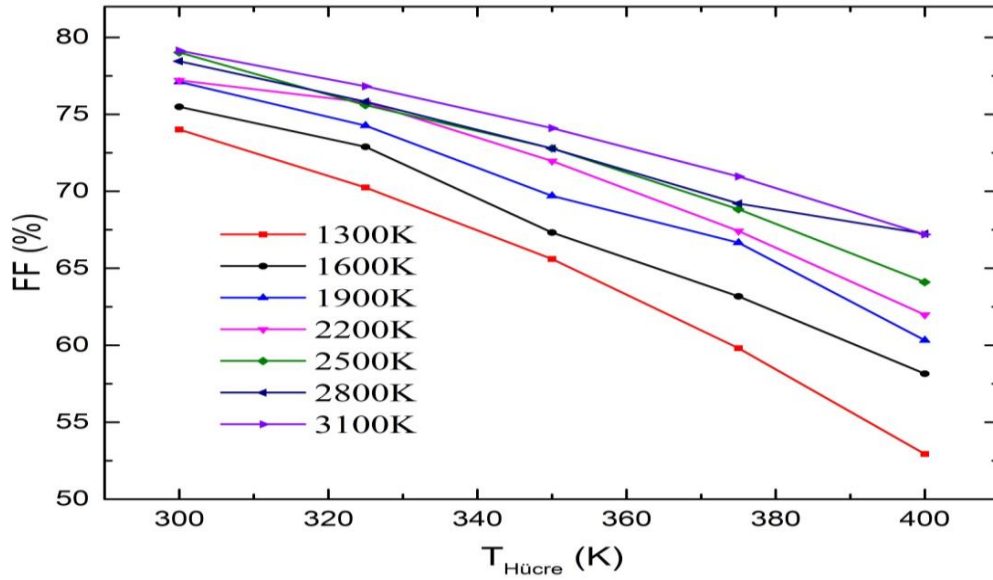
Şekil 7.24 : Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{\text{hücre}} - V_{\text{oc}}$ Grafiği

Şekil 7.24'te değişen kaynak sıcaklığına bağlı olarak hücre sıcaklığı ve açık devre voltajı ilişkisi gösterilmektedir. Örneğin 1900 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K olduğunda açık devre gerilimi 0.4 V iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda açık devre gerilimi 0.24 V değerine düşmektedir. 1300 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K olduğunda açık devre gerilimi yaklaşık 0.33 V iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda açık devre gerilimi yaklaşık 0.14 V değerine düşmektedir. Bu durumda hücre sıcaklığı arttıkça açık devre geriliminin düştüğü gözlenmektedir.



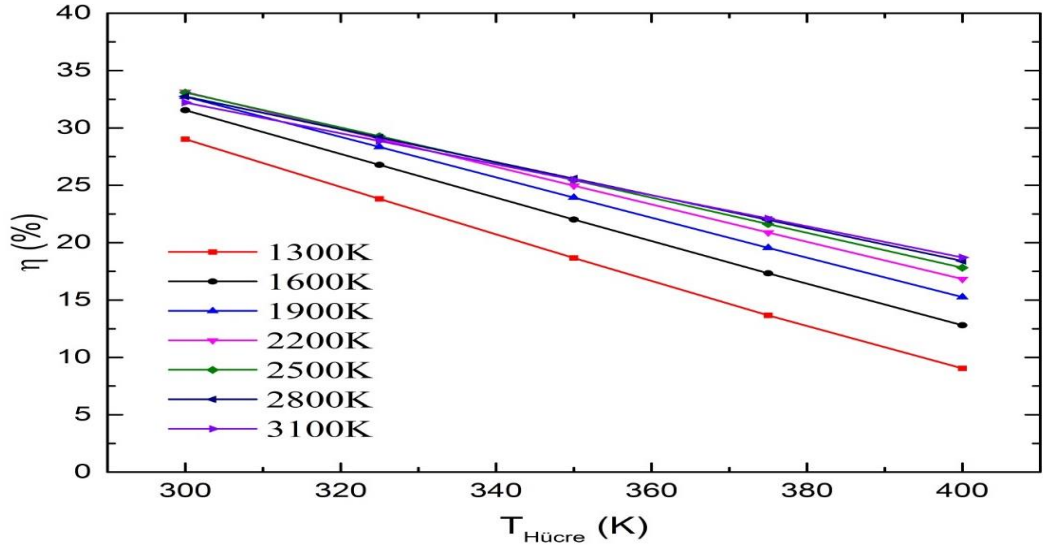
Şekil 7.25 : Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{\text{hücre}} - J_{\text{sc}}$ Grafiği

Şekil 7.25'te değişen kaynak sıcaklığına bağlı olarak hücre sıcaklığı ve kısa devre akımı ilişkisi gösterilmektedir. Örneğin 2400 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K olduğunda kısa devre akımı yaklaşık 80 A/m² iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda kısa devre akımı yaklaşık 100 A/m² değerine yükselmektedir. 3100 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K olduğunda kısa devre akımı yaklaşık 230 A/m² iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda kısa devre akımı yaklaşık 270 A/m² değerine yükselmektedir. Bu durumda hücre sıcaklığı arttıkça kısa devre akımının yükseldiği gözlenmektedir.



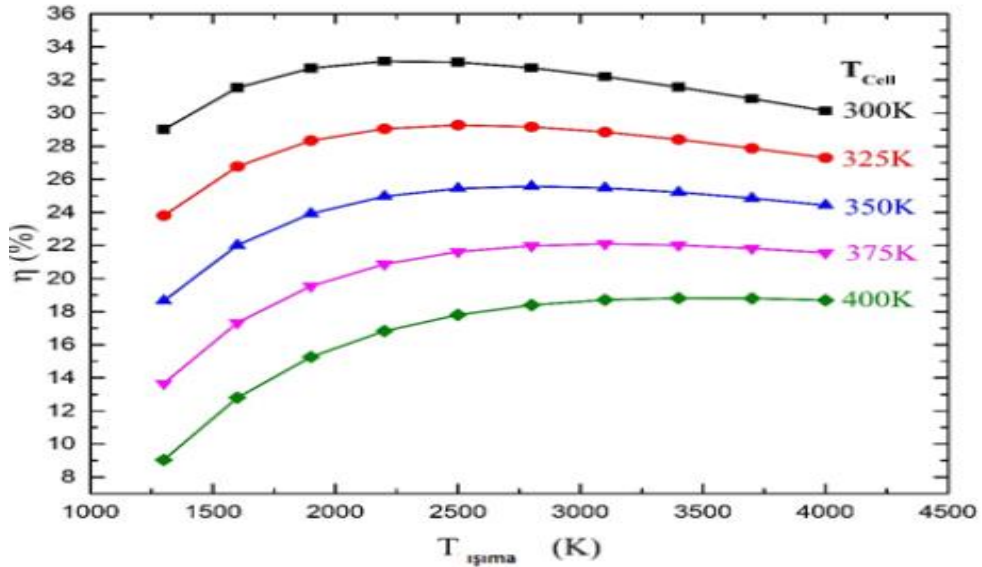
Şekil 7.26: Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak T_{hücre} – FF Grafiği

Şekil 7.26'da değişen kaynak sıcaklığına bağlı olarak hücre sıcaklığı ve doldurma faktörü ilişkisi gösterilmektedir. Örneğin 1300 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K olduğunda doldurma faktörü yaklaşık %74 iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda doldurma faktörü yaklaşık %43 değerine düşmektedir. 3100 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K olduğunda doldurma faktörü yaklaşık %80 iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda doldurma faktörü yaklaşık %70 değerine düşmektedir. Bu durumda hücre sıcaklığı arttıkça kısa devre akımının düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 7.27: Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{hücre} - \eta$ Grafiği

Şekil 7.27'de değişen kaynak sıcaklığına bağlı olarak hücre sıcaklığı ve enerji verimi ilişkisi gösterilmektedir. Örneğin 1300 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K olduğunda enerji verimi yaklaşık %30 iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda enerji verimi yaklaşık %10 değerine düşmektedir. 3100 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K olduğunda enerji verimi yaklaşık %33 iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda enerji verimi yaklaşık %22 değerine düşmektedir. Bu durumda hücre sıcaklığı arttıkça enerji veriminin düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 7.28 : Değişen Işıma Kaynağı Sıcaklıklarına Bağlı Olarak $T_{ışınım} - \eta$ Grafiği

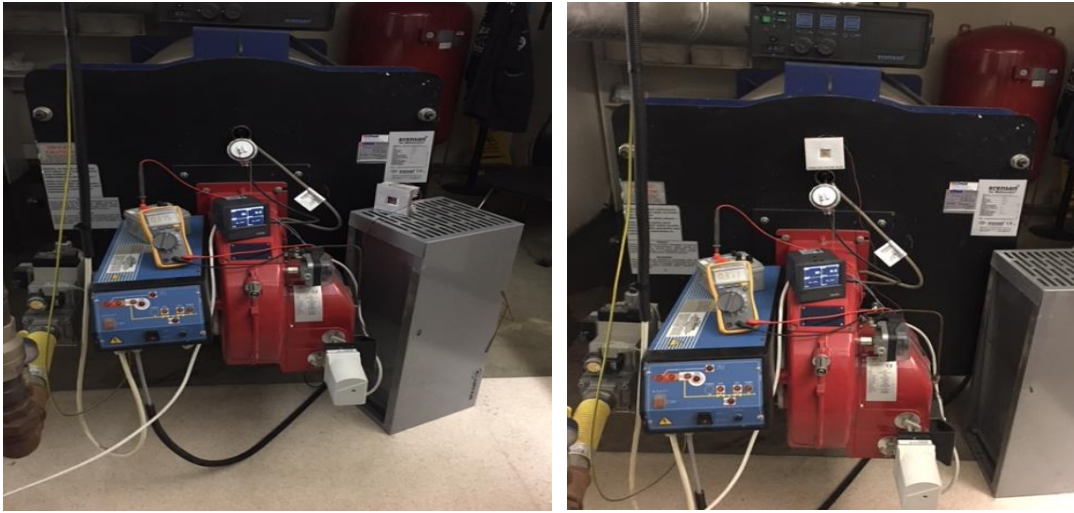
Şekil 7.28'de değişen hücre sıcaklığına bağlı olarak kaynak sıcaklığı ve enerji verimi ilişkisi gösterilmektedir. Örneğin 400 K hücre sıcaklığında kaynak sıcaklığı 2000 K

olduğunda enerji verimi yaklaşık %14 iken kaynak sıcaklığı 4000 K olduğunda enerji verimi yaklaşık %18 değerine yükselmektedir. 324 K hücre sıcaklığında kaynak sıcaklığı 1300 K olduğunda enerji verimi yaklaşık %24 iken kaynak sıcaklığı 4000 K olduğunda enerji verimi yaklaşık %28 değerine yükselmektedir. Bu durumda kaynak sıcaklığı arttıkça enerji veriminin yükseldiği gözlenmektedir.

Bu analiz doğrultusunda, şekillerden görülebileceği gibi ideal bir GaSb TPV hücre için optimum çalışma değerleri olan $T_{İşima} = 2200K$ ve $T_{Hücre} = 300K$ 'de enerji dönüşüm verimlilik değeri %33.14 olarak hesaplanmıştır. Bu değer tek eklemli bir hücre için optimum ulaşılabilecek bir değerdir.

7.3 Termofotovoltaik Sistemlerin Düşük Sıcaklıklı Atık Isı Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi ve Analizi

Düşük sıcaklıklı atık ısı sistemlerine örnek olarak merkezi ısıtma sistemleri verilebilir. Merkezi ısıtma sistemlerinde termofotovoltaik uygulama olarak GaSb hücresi kullanılmıştır. Deney düzeneğinde ısı kaynağı olarak ısı kazanı, GaSb hücresi, voltmetre, datalogger ve termocouple yer almaktadır. Kaynak sıcaklık değerleri 200°C ile 600°C arasında alınmıştır. Şekil 7.29'da sistemin kurulumu yer almaktadır.

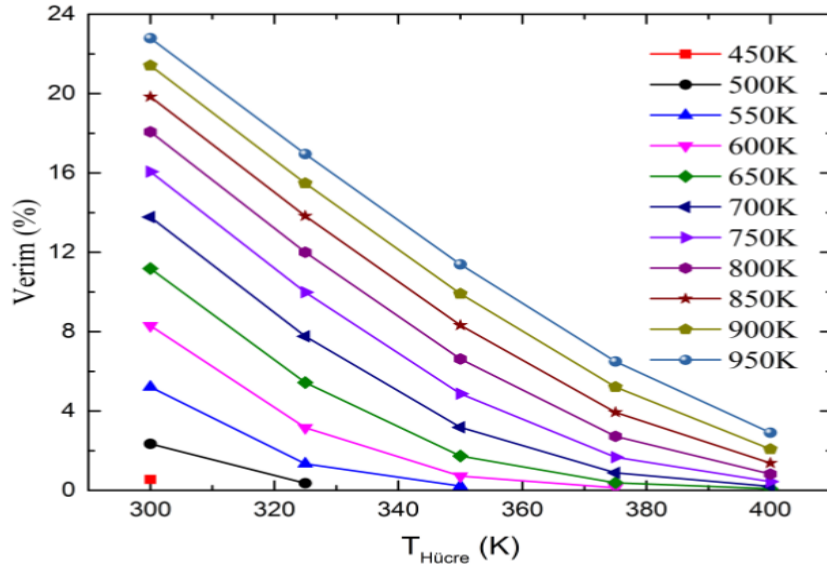


Şekil 7.29 : Merkezi Isıtma Sistemlerinde Termofotovoltaik Uygulama Örneği

Deney düzeneğine yerleştirilen datalogger hücre üzerinde oluşan sıcaklık ve gerilim değerlerini kaydetmektedir. Voltmetre ise hücrede meydana gelen gerilimi ölçmektedir.

Ayrıca termofotovoltaik sistemlerin merkezi ısıtma sistemlerindeki kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla farklı parametrelerdeki değerler girilerek analiz yapılmıştır. Bu analizde GaSb hücresi kullanılarak TPV düşük sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Analizde bu değerlerin enerji verimliliğine, doldurma faktörüne, açık devre gerilimine ve kısa devre akımına etkisi tespit edilmiştir [38].

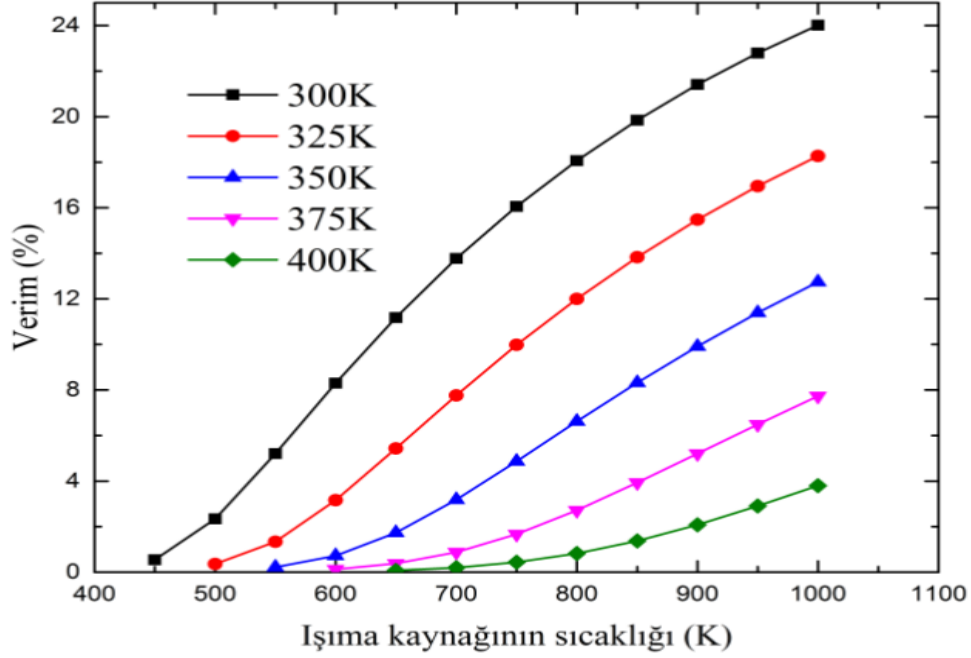
Şekil 7.30'da farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığı değişiminin enerji verimliliğine etkisi incelenmiştir.



Şekil 7.30 : Hücre Sıcaklığı Değişiminin Enerji Verimliliğine Etkisi

Şekil 7.30'da 450-950 K arasındaki farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığının değişimi ile enerji verimliliği incelenmiştir. Örneğin 750 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K iken enerji verimliliği %14 civarında iken hücre sıcaklığı 350 K olduğunda enerji verimliliği %6'ya inmiştir. Bir başka kaynak sıcaklığı olarak 850 K ele alındığında hücre sıcaklığı 300 K iken enerji verimliliği %20 iken hücre sıcaklığı 340 K olduğunda enerji verimliliği %10'a inmiştir. Bu durumda hücre sıcaklığı arttıkça enerji verimliliğinin düştüğü görülmektedir.

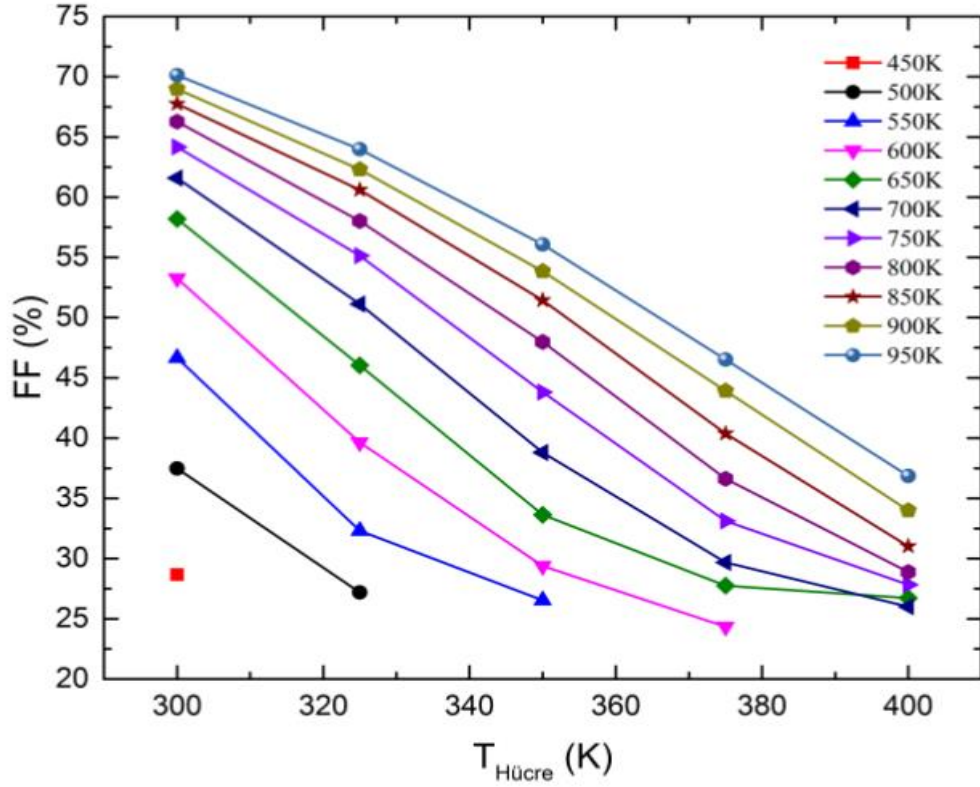
Şekil 7.31'de farklı hücre sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığı değişiminin enerji verimliliğine etkisi incelenmiştir.



Şekil 7.31 : Radyasyon Sıcaklığı Değişiminin Enerji Verimliliğine Etkisi

Şekil 7.31’de 300-400 K arasındaki farklı hücre sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığının değişimi ile enerji verimliliği incelenmiştir. Örneğin 325 K hücre sıcaklığında radyasyon sıcaklığı 800 K iken enerji verimliliği %12 civarında iken radyasyon sıcaklığı 1000 K olduğunda enerji verimliliği %17’ye yükselmiştir. Bir başka hücre sıcaklığı olarak 375 K ele alındığında radyasyon sıcaklığı 800 K iken enerji verimliliği yaklaşık %2 iken hücre sıcaklığı 1000 K olduğunda enerji verimliliği yaklaşık %7’ye yükselmiştir. Bu durumda radyasyon sıcaklığı arttıkça enerji verimliliğinin arttığı görülmektedir.

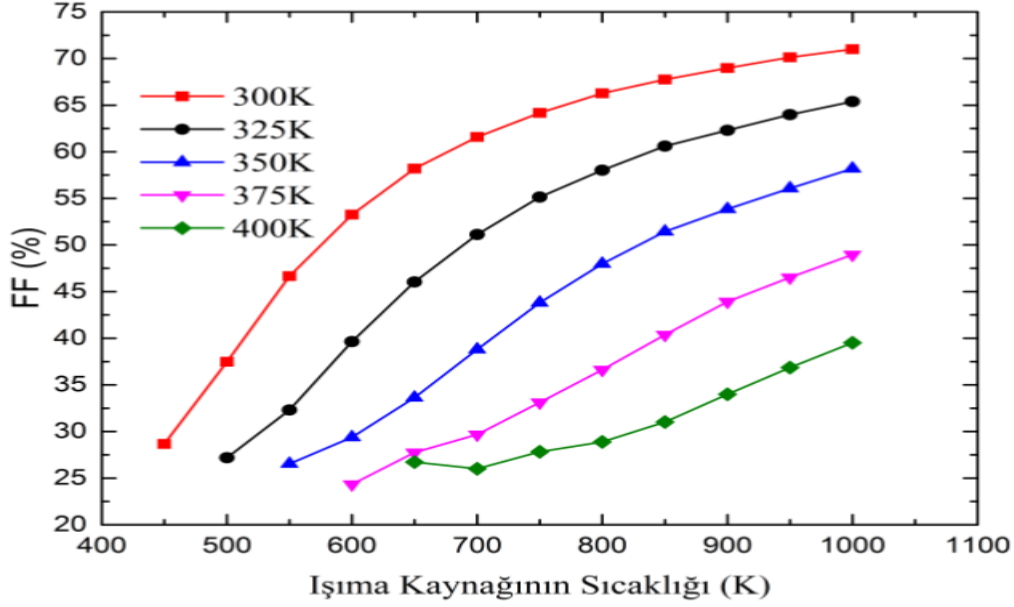
Şekil 7.32’de farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığı değişiminin doldurma faktörüne etkisi incelenmiştir.



Şekil 7.32 : Hücre Sıcaklığı Değişiminin Doldurma Faktörüne Etkisi

Şekil 7.32’de 450-950 K arasındaki farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığının değişimi ile doldurma faktörü incelenmiştir. Örneğin 750 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 300 K iken doldurma faktörü %63 iken hücre sıcaklığı 380 K olduğunda doldurma faktörü yaklaşık %33’e inmiştir. Bir başka kaynak sıcaklığı olarak 950 K ele alındığında hücre sıcaklığı 300 K iken doldurma faktörü %70 iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda doldurma faktörü yaklaşık %38’e inmiştir. Bu durumda hücre sıcaklığı arttıkça doldurma faktörünün düştüğü görülmektedir.

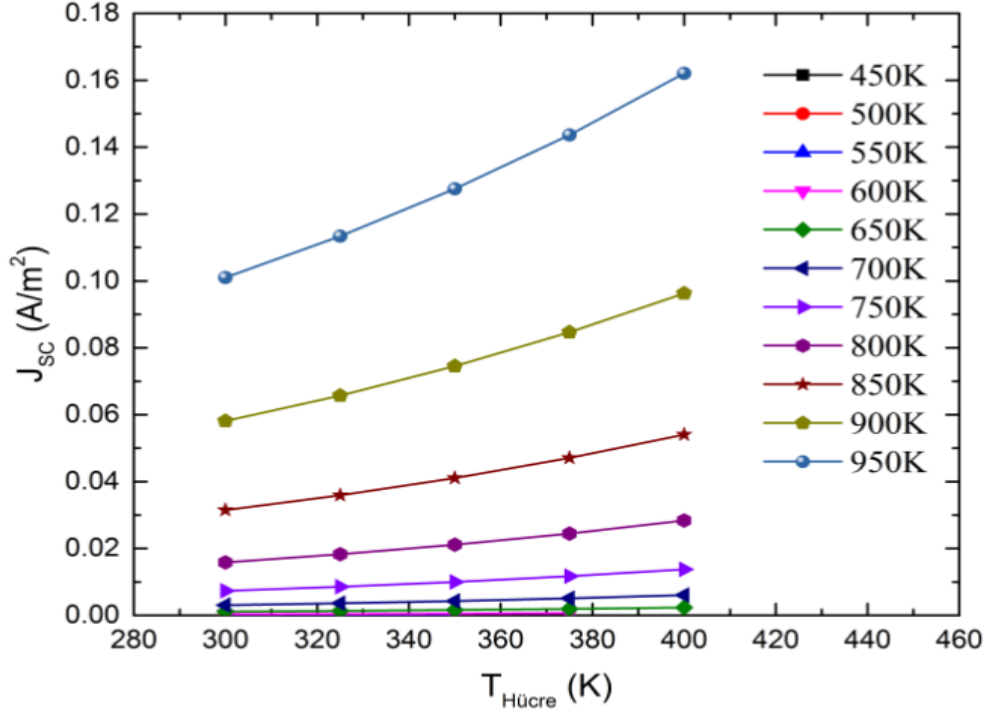
Şekil 7.33’de farklı hücre sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığı değişiminin doldurma faktörüne etkisi incelenmiştir.



Şekil 7.33 : Radyasyon Sıcaklığı Değişiminin Doldurma Faktörüne Etkisi

Şekil 7.33’de 300-400 K arasındaki farklı hücre sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığının değişimi ile doldurma faktörü incelenmiştir. Örneğin 300 K hücre sıcaklığında radyasyon sıcaklığı 700 K iken doldurma faktörü %62 civarında iken radyasyon sıcaklığı 900 K olduğunda doldurma faktörü yaklaşık % 70’e yükselmiştir. Bir başka hücre sıcaklığı olarak 400 K ele alındığında radyasyon sıcaklığı 800 K iken doldurma faktörü yaklaşık %27 iken hücre sıcaklığı 1000 K olduğunda doldurma yaklaşık %40’a yükselmiştir. Bu durumda radyasyon sıcaklığı arttıkça doldurma faktörünün arttığı görülmektedir.

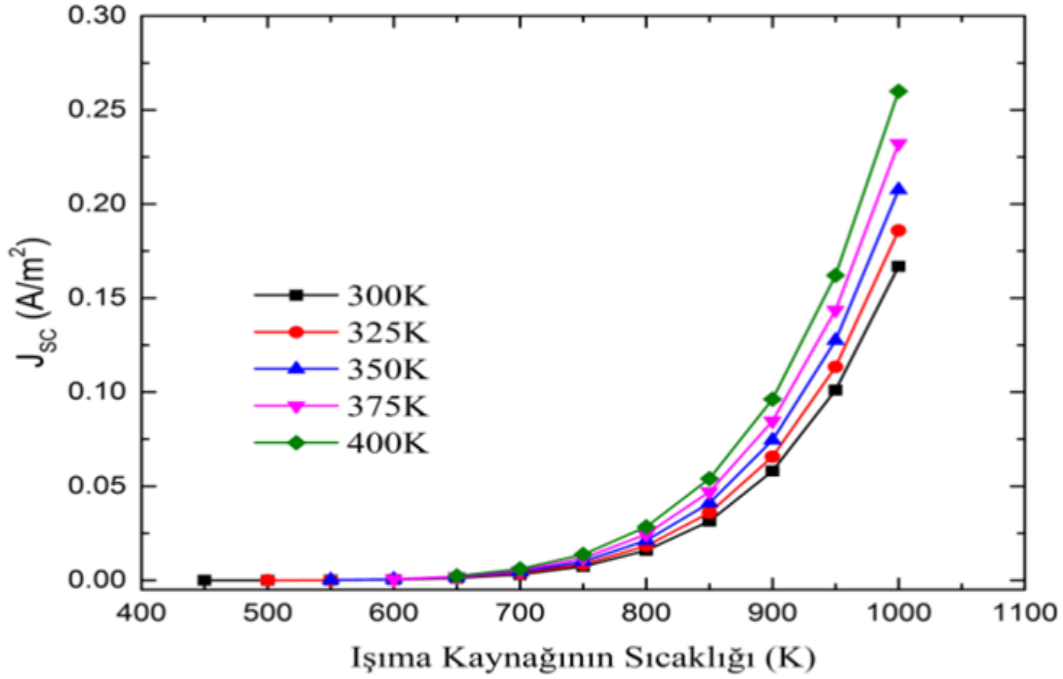
Şekil 7.34’te farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığı değişiminin kısa devre akımına etkisi incelenmiştir.



Şekil 7.34 : Hücre Sıcaklığı Değişiminin Kısa Devre Akımına Etkisi

Şekil 7.34'te 450-950 K arasındaki farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığının değişimi ile kısa devre akımı incelenmiştir. Örneğin 800 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 340 K iken kısa devre akımı yaklaşık 0.02 A/m² iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda kısa devre akımı yaklaşık 0.03 A/m²'ye yükselmiştir. Bir başka kaynak sıcaklığı olarak 950 K ele alındığında hücre sıcaklığı 300 K iken kısa devre akımı 0.10 A/m² iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda kısa devre akımı yaklaşık 0.17 A/m²'ye yükselmiştir. Bu durumda hücre sıcaklığı arttıkça kısa devre akımının arttığı görülmektedir.

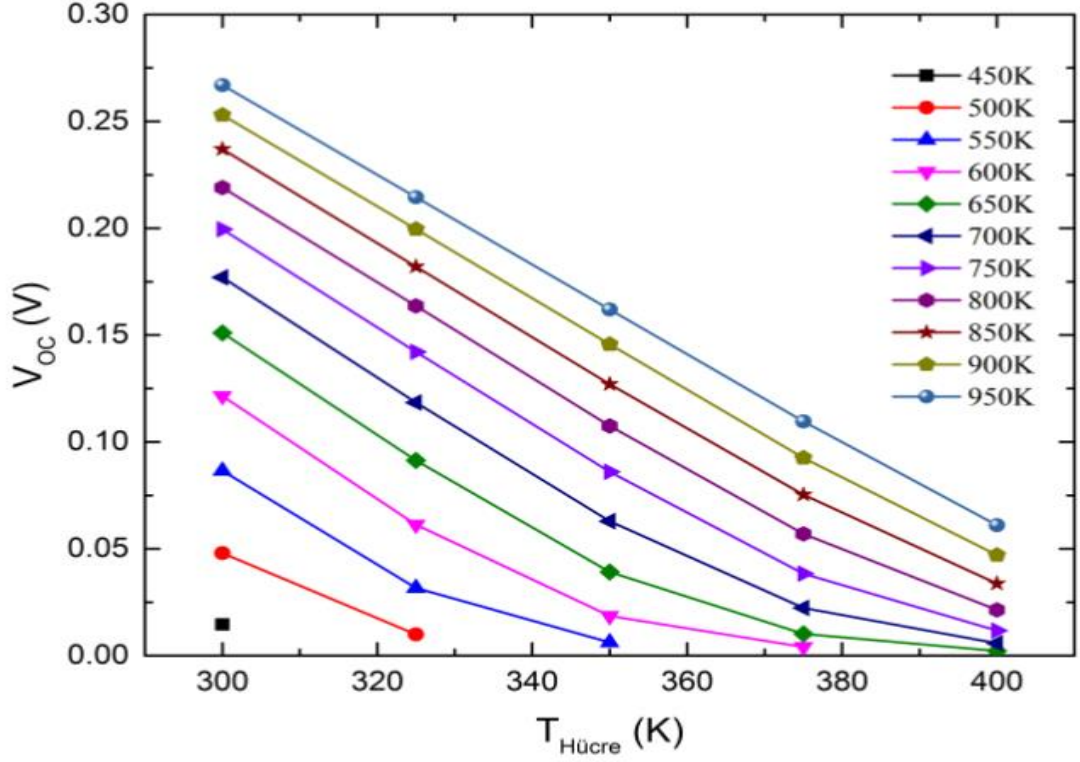
Şekil 7.35'te farklı hücre sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığı değişiminin kısa devre akımına etkisi incelenmiştir.



Şekil 7.35: Radyasyon Sıcaklığı Değişiminin Kısa Devre Akımına Etkisi

Şekil 7.35'te 300-400 K arasındaki farklı hücre sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığının değişimi ile kısa devre akımı incelenmiştir. Örneğin 350 K hücre sıcaklığında radyasyon sıcaklığı 900 K iken kısa devre akımı 0.07 A/m² civarında iken radyasyon sıcaklığı 1000 K olduğunda kısa devre akımı yaklaşık 0.18 A/m² yükselmiştir. Bir başka hücre sıcaklığı olarak 400 K ele alındığında radyasyon sıcaklığı 900 K iken kısa devre akımı yaklaşık 0.9 A/m² iken hücre sıcaklığı 1000 K olduğunda kısa devre akımı 0.25 A/m²'ye yükselmiştir. Bu durumda radyasyon sıcaklığı arttıkça kısa devre akımının arttığı görülmektedir.

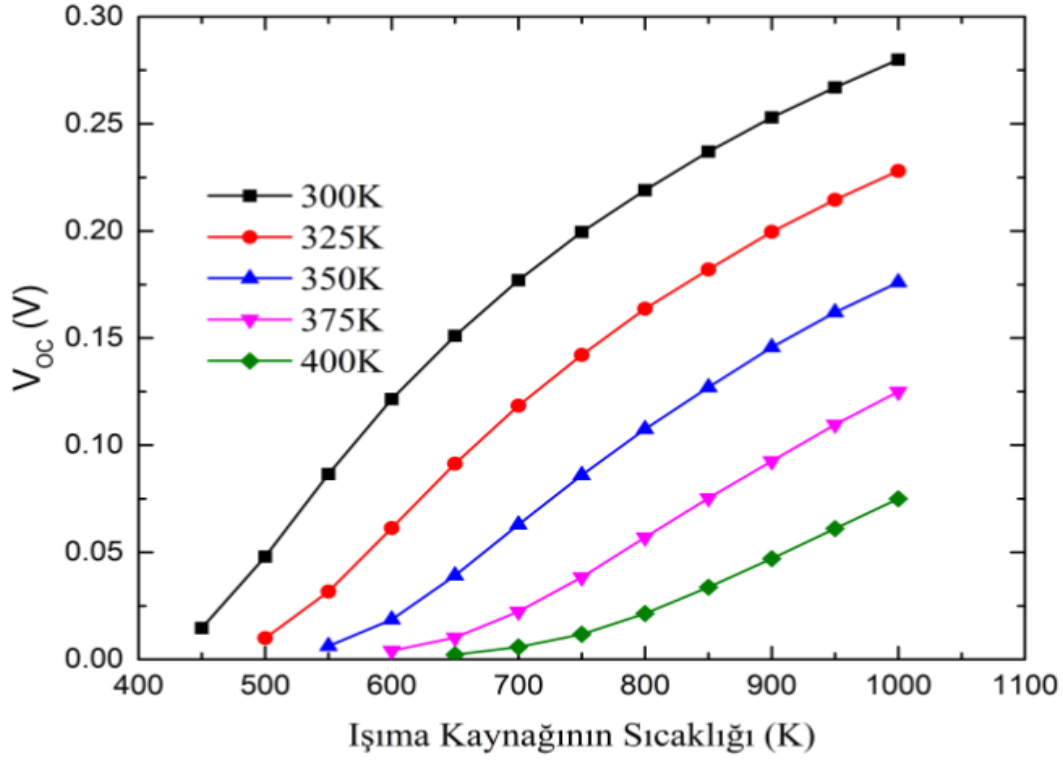
Şekil 7.36'da farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığı değişiminin açık devre gerilimine etkisi incelenmiştir.



Şekil 7.36 : Hücre Sıcaklığı Değişiminin Açık Devre Gerilimine Etkisi

Şekil 7.36’da 450-950 K arasındaki farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığının değişimi ile açık devre gerilimi incelenmiştir. Örneğin 700 K kaynak sıcaklığında hücre sıcaklığı 320 K iken açık devre gerilimi 0.12 V civarında iken hücre sıcaklığı 380 K olduğunda açık devre gerilimi 0.04 V değerine inmiştir. Bir başka kaynak sıcaklığı olarak 900 K ele alındığında hücre sıcaklığı 340 K iken açık devre gerilimi 0.14 V iken hücre sıcaklığı 400 K olduğunda açık devre gerilimi 0.06 V değerine inmiştir. Bu durumda hücre sıcaklığı arttıkça açık devre geriliminin düştüğü görülmektedir.

Şekil 7.37’de farklı hücre sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığı değişiminin açık devre gerilimine etkisi incelenmiştir.



Şekil 7.37 : Radyasyon Sıcaklığı Değişiminin Açık Devre Gerilimine Etkisi

Şekil 7.37’de 300-400 K arasındaki farklı hücre sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığının değişimi ile açık devre gerilimi incelenmiştir. Örneğin 325 K hücre sıcaklığında radyasyon sıcaklığı 800 K iken açık devre gerilimi 0.17 V civarında iken radyasyon sıcaklığı 1000 K olduğunda açık devre gerilimi yaklaşık 0.23 V değerine yükselmiştir. Bir başka hücre sıcaklığı olarak 375 K ele alındığında radyasyon sıcaklığı 800 K iken açık devre gerilimi yaklaşık 0.07 V iken hücre sıcaklığı 950 K olduğunda açık devre gerilimi 0.13 V değerine yükselmiştir. Bu durumda radyasyon sıcaklığı arttıkça açık devre geriliminin arttığı görülmektedir.

8. TERMOFOTOVOLTAİK SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Öncelikli olarak termofotovoltaik sistem üç ayrı bölgeye ayrılarak analizi yapılmıştır. Analizde sistemin her bir parçası ayrı ayrı incelenirken sistemin bütünü ayrıca ele alınmıştır. Sistem öncelikle birinci kanun analizi yapılarak değerlendirilmiştir daha sonra ikinci kanun analizi yapılmıştır. Birinci bölge ısı kaynağının ışıyım ile filtrelele ulaşana kadar meydana gelen enerjinin termodinamik analizidir. İkinci bölge ise fotovoltaik sistem olarak değerlendirilen filtre, seçici-yayıcı ve fotovoltaik hücrelerin yer aldığı bölümdür. Isı kaynağından ışıyım yolu ile geçen ısının seçici yayıcıya, filtrelele ve hücrelele ulaşana kadar izlediğı aşamalar, ısıdan elektrik üretimi ve her bir elemanın verimi termodinamik analiz kapsamında değerlendirilmiştir. Son bölge olarak ifade edilen üçüncü bölge ise elektrik enerjisinin depolandığı kısım olarak değerlendirilmiştir. Her bölgenin termodinamik analizi kapsamında, enerji ve ekserji analizi yapılarak sistem parçadan bütüne doğru incelenmiştir. İlk olarak, birinci bölgeyi incelersek aşağıdaki formüller elde edilir [44].

8.1 Isı Kaynağı

Isı kaynağından sisteme giren güç aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_{in} = \dot{m}_{fuel} \times LHV \quad (8.1)$$

Sisteme giren yakıt gücü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_{fuel} = P'_{GAP} + Q_{th,gas} \quad (8.2)$$

Sistemin yakıt verimliliğı, yakıt gücünün sisteme ısı kaynağı tarafından giren güce oranıdır.

$$\eta_{cc} = \frac{P_{fuel}}{P_{in}} \quad (8.3)$$

Yakıt kaybı, sisteme ısı kaynağı tarafından verilen güç girişi ile yakıt çıkışı arasındaki farktır.

$$P_{fuel,loss} = P_{in} - P_{fuel} \quad (8.4)$$

Yakıt ekserjisi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$EX_{fuel} = [-(\sum_P n_{k,p} \times \Delta g_{fk,R} - \sum_R n_{k,R} \times \Delta g_{fk,R}) + \sum_P n \times EX_{k,p}^{ch} - \sum_R n \times EX_{k,R}^{ch}] \quad (8.5)$$

Isı kaynağından sisteme giren ekserji şu şekilde hesaplanır:

$$EX_{in} = (1 - \frac{T_a}{T_s}) \times I_s \quad (8.6)$$

Yakıt kaybı ekserjisi, giren ekserji ile yakıt ekserjisi arasındaki farka eşittir.

$$EX_{fuel,loss} = EX_{in} - EX_{fuel} \quad (8.7)$$

8.2 Seçici Yayıcı

İkinci bölge olarak tanımladığımız fotovoltaiik sistemin formülleri aşağıdaki gibidir:

Seçici yayıcıdan gelen termal güç çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Q_{th,gas} = \dot{m}_{gas} \times h_{gas} - \dot{m}_{air} \times h_{air} \quad (8.8)$$

8.3 Optik Filtre

Optik filtreye giren radyant güç; emitter yüzeyi ile ışınım gücü yoğunluğunun çarpımına eşittir.

$$P_{rad} = \rho_{rad} \times S_{em} \quad (8.9)$$

Radyant güç yoğunluğu Stefan-Boltzmann kanunuyla ifade edilir.

$$\rho_{rad} = \epsilon \cdot S_{em} \cdot 2\pi \int_0^\infty I(\lambda, T_{em}) \cdot d\lambda = \epsilon \cdot S_{em} \cdot 2\pi \int_0^\infty \frac{hc^2}{\lambda^4} [\exp(\frac{hc}{\lambda k_b T_{em}}) - 1]^{-1} \cdot d\lambda \quad (8.10)$$

$$k_b = 1.380 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \quad (\text{Boltzmann sabiti})$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \quad (\text{Planck sabiti})$$

$$c = 2.99 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \quad (\text{ışık hızı})$$

Optik filtreye giren radyant (ışınımsal) verim, ışınım enerjisinin yakıt gücüne oranıdır.

$$\eta_{RAD} = \frac{P_{RAD}}{P_{fuel}} \quad (8.11)$$

İşınımsal ekserji verimi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_{ex,RAD} = \frac{EX_{RAD}}{EX_{fuel}} \quad (8.12)$$

Filtre verimi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_F = \frac{P_{GAP}}{P'_{GAP}} \quad (8.13)$$

Filtrenin ekserji verimi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_{ex,F} = \frac{EX_{GAP}}{EX'_{GAP}} \quad (8.14)$$

Optik filtreden gelen spektral güç;

$$P'_{GAP} = P_{RAD} - Q_{back} \quad (8.15)$$

$$P'_{GAP} = \epsilon \cdot S_{em} \cdot \int_0^\lambda I(\lambda, T_{em}) \cdot \tau(\lambda) d\lambda = \epsilon \cdot S_{em} \cdot \int_0^\lambda \frac{2\pi hc^2}{\lambda^4} [\exp(\frac{hc}{\lambda k_{bT_{em}}}) - 1]^{-1} \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda \quad (8.16)$$

Spektral verimlilik şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\eta_{GAP} = \frac{P'_{GAP}}{P_{RAD}} \quad (8.17)$$

8.4 Fotovoltaik Hücre

Fotovoltaik hücreye giren güç;

$$P_U = P_{GAP} - P_{loss} = P'_{GAP} - P_{loss} - P_{abs} \quad (8.18)$$

P_{abs} genellikle ihmal edilir. P_{loss} optik filtreden fotovoltaik hücreye giden güç kaybıdır.

Fotovoltaik hücrenin gücü, elektrik gücü olarak tanımlanır.

$$P_{el,dc} = V_{OC} \times I_{SC} \times FF \quad (8.19)$$

$$V_{OC} = \frac{k_{bT_{em}}}{e} \cdot \ln(\frac{I_L}{I_0} + 1) \quad (8.20)$$

$$I_{SC} = e \cdot \int_0^\infty \Phi(\lambda) EQE(\lambda) d\lambda \quad (8.21)$$

Burada EQE (λ), dış kuantum verimliliği ve hücre tarafından absorbe edilen dalga boyunun foton olasılığı değeridir. $\Phi(\lambda)$ foton akısıdır.

Görünürlük faktörü verimliliği, fotovoltaik hücreye giren gücün spektral güce oranıdır.

$$\eta_{VF} = \frac{P_U}{P_{GAP}} \quad (8.22)$$

Fotovoltaik hücre verimliliği, elektrik enerjisinin fotovoltaik hücreye giren güce oranıdır.

$$\eta_{PV} = \frac{P_{el,dc}}{P_U} \quad (8.23)$$

Fotovoltaik hücreden gelen elektrik akımı doğrusal akımdır. Doğrusal akım; alternatif akıma bir akım transformatörü vasıtasıyla dönüştürülür.

Sistemin elektriksel ekserjisi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$EX_{electrical} = V_{oc} \times I_{sc} \quad (8.24)$$

Sistemin alternatif akım verimi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_{dc/ac} = \frac{P_{el,ac}}{P_{el,dc}} \quad (8.25)$$

TPV sisteminin genel elektriksel verimliliği yukarıda belirtilen verimliliklerin çarpımına eşittir.

$$\eta_{EL,TPV} = \eta_{CC} \cdot \eta_{RAD} \cdot \eta_{GAP} \cdot \eta_F \cdot \eta_{VF} \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_{dc/ac} \quad (8.26)$$

8.5 Soğutma Sistemi

Üçüncü bölge olarak tanımladığımız elektrik enerjisinin depolandığı ve soğutma sisteminin bulunduğu yerin formülleri aşağıdaki gibidir:

TPV jeneratörü hem PV hücrelerinin soğutma devresine hem de ısı geri kazanımına dayalıdır.

$$Q_{TH,HX-PV} = (1 - \eta_{PV}) \cdot P_U \quad (8.27)$$

$$Q_{TH,HX-CP} = \varepsilon \cdot \eta_{CC} \cdot (1 - \eta_{RAD} \cdot \eta_{GAP}) \cdot P_{in} \quad (8.28)$$

Sistemin termal ekserjisi aşağıdaki gibidir:

$$EX_{thermal} = \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) \times (h_c \times A_c \times (T_c - T_a)) \quad (8.29)$$

8.6 Termofotovoltaik Sistemin Genel Verimliliği

Isı ve elektrik üretiminin bir arada olduğu (CHP) sistemlerde, TPV verimi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_{CHP,TPV} = \eta_{EL,TPV} + \eta_{TH,TPV} \quad (8.30)$$

$$\eta_{CHP,TPV} = \eta_{CC} \cdot [\eta_{RAD} \cdot \eta_{GAP} \cdot \eta_F \cdot \eta_{VF} \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_{dc/ac} + \varepsilon \cdot (1 - \eta_{RAD} \cdot \eta_{GAP} + (1 - \eta_{PV}) \cdot \eta_{RAD} \cdot \eta_{GAP} \cdot \eta_F \cdot \eta_{VF})] \quad (8.31)$$

Sistemin ekserji verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_{ex,TPV} = \frac{EX_{output}}{EX_{input}} = \frac{Vm.Im - \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) \cdot (h_{ca} \cdot A_c \cdot (T_c - T_a))}{\left[\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) \cdot I_s\right] \cdot A_c} \quad (8.32)$$

Yüksek ve düşük sıcaklıklı atık ısılar kullanılarak termofotovoltaik sistemden elde edilen enerji verimi yapılan analiz doğrultusunda aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Termofotovoltaik sistemin ısı kaynağı olarak yüksek sıcaklıklı atık ısı kullanması sonucunda her bir $T_{Işima}$ ve $T_{Hücre}$ sıcaklıklarına bağlı olarak elde edilen GaSb hücresinin verimlilik değerleri Çizelge 8.1’de verilmiştir. Çizelge 8.1’den de görüleceği üzere optimal $T_{Işima}$ ve $T_{Hücre}$ değerleri sırasıyla 2200 K ve 300 K’dir.

Çizelge 8.1 : Yüksek Sıcaklıklı Termofotovoltaik Sistemlerde $T_{Işima}$ Ve $T_{hücre}$ Sıcaklıklarına Bağlı Olarak Elde Edilen Hücre Verimlilik Değerleri.

Kaynak Sıcaklığı \ Hücre Sıcaklığı	300 K	324 K	340 K	374 K	400 K
	1300 K	31.44	23.81	18.77	13.77
1700 K	31.44	27.78	22.02	17.33	12.80
1900 K	32.72	28.34	23.93	19.44	14.27
2200 K	33.14	29.07	24.97	20.88	17.83
2400 K	33.08	29.28	24.44	21.72	17.81
2800 K	32.74	29.17	24.48	21.98	18.40
3100 K	32.21	28.87	24.48	22.10	18.71
3400 K	31.47	28.41	24.22	22.02	18.82
3700 K	30.87	27.88	24.87	21.83	18.80
4000 K	30.13	27.30	24.44	21.47	18.79

Endüstriyel sistemlerden elde edilen yüksek sıcaklıklı atık ısı kullanılarak modellenmesi yapılan termofotovoltaik sistemde hücre tipi olarak GaSb hücresi kullanılmıştır. Hücre üzerine uygulanan sıcaklık değerleri 1300K ile 4000K arasındadır. Bu analiz doğrultusunda, Çizelge 8.1’den görülebileceği gibi ideal bir GaSb TPV hücre için optimum çalışma değerleri olan $T_{Işima} = 2200K$ ve $T_{Hücre} = 300K$ ’de enerji dönüşüm verimlilik değeri %33.14 olarak hesaplanmıştır. Bu değer tek eklemlili bir hücre için optimum ulaşılabilecek bir değerdir.

Termofotovoltaik sistemin ısı kaynağı olarak düşük sıcaklıklı atık ısı kullanması sonucunda her bir $T_{Işima}$ ve $T_{Hücre}$ sıcaklıklarına bağlı olarak elde edilen GaSb

hücresinin verimlilik değerleri Çizelge 8.2’de verilmiştir. Çizelge 8.2’den de görüleceği üzere optimal $T_{Işıma}$ ve $T_{Hücre}$ değerleri sırasıyla 1000 K ve 300 K’dir.

Çizelge 8.2 : Düşük Sıcaklıklı Termofotovoltaik Sistemlerde $T_{Işıma}$ Ve $T_{Hücre}$ Sıcaklıklarına Bağlı Olarak Elde Edilen Hücre Verimlilik Değerleri.

Hücre Sıcaklığı	300 K	325 K	350 K	375 K	400 K
Kaynak Sıcaklığı					
400 K	0	0	0	0	0
500 K	2.2	0.1	0	0	0
600 K	8	3	1	0	0
700 K	14	7.8	3.8	0.3	0.1
800 K	18	12	7.2	3	1
900 K	21	15	10	5.8	2
1000 K	<u>24</u>	18	13	8	4

Merkezi ısıtma sistemlerinden elde edilen düşük sıcaklıklı atık ısı kullanılarak modellenmesi yapılan termofotovoltaik sistemde hücre tipi olarak GaSb hücresi kullanılmıştır. Hücre üzerine uygulanan sıcaklık değerleri 400K ile 1000K arasındadır. Bu analiz doğrultusunda, Çizelge 8.2’den görülebileceği gibi ideal bir GaSb TPV hücre için optimum çalışma değerleri olan $T_{Işıma} = 1000K$ ve $T_{Hücre} = 300K$ ’de enerji dönüşüm verimlilik değeri % 24 olarak hesaplanmıştır. Bu değer tek eklemli bir hücre için optimum ulaşılabilecek bir değerdir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikli olarak endüstriyel sistemlerde kullanılmak üzere termofotovoltaik sistemin teorik modellemesi yapılmıştır. Uygulamada fotovoltaik hücre olarak GaSb ve InGaAsSb hücresi kullanılmıştır. Hücre parametreleri olarak enerji bant aralığı, hücre alanı, akseptör yoğunluğu ve donör yoğunluğu alınmıştır. Bant aralıklarının sıcaklıkla değişimi hesaplanarak verim değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan çalışma doğrultusunda $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücresi, aynı kaynak sıcaklığında GaSb hücresi ile kıyaslandığında verimliliği daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, ters doyum akımının ve enerji bant aralığının düşük, kısa devre akımının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. TPV enerji dönüşüm sistemlerinde demir-çelik proseslerinden salınan yüksek sıcaklıklı atık ısı kaynaklarının, farklı hücre yapılarının ve diğer hücre parametrelerinin enerji dönüşümü üzerindeki etkileri hesaplanmıştır. TPV sistemlerinin Türkiye demir-çelik sektöründeki atık ısı enerji potansiyeli için uygulanması durumunda GaSb hücreli sistemlerin %2,04 enerji verimliliği ile yıllık 66,192 MJ, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücreli sistemlerin %7,31 enerji verimliliği ile yıllık 189,971 MJ enerjiyi kurtarabileceği hesaplanmıştır.

TPV enerji dönüşüm sistemleri için matematiksel bir model geliştirilmiş ve Matlab kullanılarak endüstriyel sistemlerde ve merkezi ısıtma sistemlerinde GaSb hücreli termofotovoltaik sistemlerin tasarımı ve analizi yapılmıştır. İlk analiz sonuçları endüstriyel termofotovoltaik sistemlerde yüksek sıcaklıklı atık ısı değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Sürüklenme-difüzyon modeli kullanılarak GaSb hücre yapısının tabaka kalınlıkları optimize edilmiş ve nihai örnek tasarımı Matlab programı kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan bu analizde, TPV yüksek sıcaklık grafikleri GaSb hücresi kullanılarak elde edilmiştir. Bu grafiklerle enerji verimliliği, dolun faktörü, açık devre voltajının etkisi ve kısa devre akım değerleri belirlenmiştir.

Yapılan ilk analiz doğrultusunda en yüksek spektral ışınım, 3100 K kaynak sıcaklığında elde edilmiştir. En yüksek başlangıç akım yoğunluğu 400 K kaynak sıcaklığında $2.2 \text{ A} / \text{m}^2$ iken, en düşük başlangıç akım yoğunluğu 300 K kaynak

sıcaklığında 1.6 A / m^2 dir. Akım yoğunlukları, farklı hücre sıcaklıklarında değişen voltaj değerlerine göre 1600 K radyasyon sıcaklığında gözlenmiştir. Gerilim arttıkça, akım yoğunluğu azalmaktadır. En yüksek doldurma faktörü % 80 iken en düşük dolun faktörü 1300 K kaynak sıcaklığında % 43'tür. Hücrenin sıcaklığı arttıkça, kısa devre akımı azalmaktadır. En yüksek enerji verimliliği, 3100 K kaynak sıcaklığında % 33 iken, 1300 K kaynak sıcaklığında en düşük enerji verimliliği % 10'dur. Hücre sıcaklığı arttırıldığında, enerji verimliliği düşmüştür. En düşük enerji verimliliği 400K hücre sıcaklığında % 8 iken, 300K hücre sıcaklığında en yüksek enerji verimliliği % 33'tür. Hücrenin sıcaklığı düştükçe enerji verimliliği artmıştır.

Şekiller incelendiğinde hücre sıcaklığı arttıkça akım değeri artmakta voltaj değeri ise düşmektedir. Sıcaklığın artmasıyla GaSb'un bant aralığı azalır, dolayısıyla yarıiletkendeki asal taşıyıcı yoğunluğu artar. Bant aralığının küçük olması ışınma spektrumunun daha geniş bölgesinin soğurulmasını sağlar.

Bu yüzden hücre sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda daha fazla akım elde edilmektedir. Hücrenin sıcaklığının artmasıyla bant aralığının küçülmesi TPV hücrenin açık devre voltajını azaltmaktadır. Ayrıca artan hücre sıcaklığına bağlı olarak doldurma faktörü ve verim azalmaktadır.

Nihai tasarıma göre, GaSb güneş pil yapısının optimum çalışma değerleri olan $T_{ışınma} = 2200 \text{ K}$ ve $T_{hücre} = 300 \text{ K}$ 'de enerji dönüşüm verimlilik değeri % 33.14 olarak bulunmuştur. Bu değer tek eklemli bir hücre için optimum ulaşılabilecek bir değerdir. GaSb TPV hücre uygulamalarının, elde edilen veriler doğrultusunda endüstriyel sistemlere uygulanabileceği, enerji verimliliği sağlayacağı ve elektrik üretimine alternatif sağlayabileceği saptanmıştır.

İkinci analiz ise termofotovoltaik sistemlerin merkezi ısıtma sistemlerindeki kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla farklı parametrelerdeki değerler girilerek yapılmıştır. Bu analizde merkezi ısıtma sistemlerinde düşük ve orta sıcaklıktaki atık ısı değerleri kullanılmıştır. GaSb hücresi kullanılarak TPV düşük sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Analizde bu değerlerin enerji verimliliğine, doldurma faktörüne, açık devre gerilimine ve kısa devre akımına etkisi tespit edilmiştir.

Yapılan ikinci analiz doğrultusunda farklı kaynak sıcaklıklarında hücre sıcaklığı değişiminin enerji verimliliğine etkisi incelendiğinde hücre sıcaklığı arttıkça enerji verimliliğinin ve doldurma faktörünün düştüğü görülmektedir. Ancak farklı kaynak

sıcaklıklarında radyasyon sıcaklığı değişiminin enerji verimliliğine etkisi incelendiğinde radyasyon sıcaklığı arttıkça enerji verimliliğinin ve doldurma faktörünün arttığı görülmektedir. Hücre sıcaklığı arttıkça kısa devre akımının arttığı ve açık devre geriliminin düştüğü gözlenmiştir. Fakat radyasyon sıcaklığı arttıkça kısa devre akımının ve açık devre geriliminin arttığı görülmektedir. Merkezi ısıtma sistemlerinde ideal bir GaSb TPV hücre için optimum çalışma değerleri olan $T_{\text{ısıtma}} = 1000\text{K}$ ve $T_{\text{hücre}} = 300\text{K}$ 'de enerji dönüşüm verimlilik değeri % 24 olarak hesaplanmıştır. Bu değer tek eklemlili bir hücre için optimum ulaşılabilecek bir değerdir.

Ayrıca termofotovoltaik sistem üç ayrı bölgeye ayrılarak termodinamik analizi yapılmıştır. Analizde sistemin her bir parçası ayrı ayrı değerlendirilirken sistemin bütünü ayrıca ele alınmıştır. Sistem öncelikle birinci kanun analizi yapılarak değerlendirilmiştir daha sonra ikinci kanun analizi yapılmıştır. Her bir bölge için enerji ve ekserji analiz formülleri elde edilmiştir. Bu formüller ve yapılan analizler doğrultusunda yüksek sıcaklıklı atık ısı (endüstriyel sistemler) ve düşük sıcaklıklı atık ısı (merkezi ısıtma sistemleri) sistemlerinden termofotovoltaik enerji dönüşümü ile elde edilen optimum enerji değerleri GaSb hücresi için belirlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda TPV uygulamalarının endüstriyel ve merkezi ısıtma sistemlerine uygulanabileceği, enerji verimliliği sağladığı ve elektrik üretimine alternatif getirdiği belirlenmiştir.



KAYNAKÇA

- [1] **Utlu, Z.** (2014). Investigation of The Potential for Heat Recovery at Low, Medium and High Stages in The Turkish Industrial Sector (TIS): An Application. *Energy*, 81, 394-404.
- [2] **Utlu, Z. and Parali, U.** (2013). Investigation of The Potential of Thermophotovoltaic Heat Recovery for The Turkish Industrial Sector. *Energy Conversion and Management*, 74, 308-322.
- [3] **Coutts, T. J.** (2001). An Overview of Thermophotovoltaic Generation of Electricity. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 66(1), 443-442.
- [4] **Barnett, A. M., Coutts, T. J., Kazmerski, L. L., Ramakumar, R., & Benner, J. P.** (1997). Power Systems and Generation. In *The Electrical Engineering Handbook, Second Edition*. CRC Press.
- [5] **Steinhüser A., Hille G., Kügele R., Roth W., & Schulz W.** (1999). Photovoltaic-Hybrid Power Supply for Radio Network Components. *Proceeding of the Intelec '99*, Copenhagen.
- [6] **Lodhi M., Vijayaraghavan P., Daloglu A.** (2001). An Overview of Advanced Space/ Terrestrial Power Generation Device: Amtec. *J Power Sources* 103(1):24–33.
- [7] **Bauer, T.** (2001). Overview of The Technology in: Thermionics Quo Vadis, An Assessment of The Dtras Advanced Thermionics Researchand Development Program, *Chap. 3. National Academy Press*, pp 14–32, [Online] Available at: <http://books.nap.edu/>.
- [8] **Solar Applications.** (2002). BP Solar International, US [Online] Available at: <http://www.bpsolar.com/>.
- [9] **Yamaguchi, H. and Yamaguchi, M.** (1999). Thermophotovoltaic Potential Applications for Civilian and Industrial Use in Japan. *Proceeding of The 4th NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, Denver, Colorado, 11–14 Oct 1998. American Institute of Physics, Pp 17–29.
- [10] **Tobler, W. J. and Durisch, W.** (2008). High-Performance Selective Er-Doped Yag Emitters for Thermophotovoltaics. *Applied Energy*, 84(6), 483-493.
- [11] **Xu, X., Ye, H., Xu, Y., Shen, M., Zhang, X., & Wu, X.** (2014). Experimental and Theoretical Analysis of Cell Module Output Performance For a Thermophotovoltaic System. *Applied Energy*, 113, 924-931.
- [12] **Shoaei, E.** (2016). Performance Assessment of Thermophotovoltaic Application in Steel Industry. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 147, 44-64.
- [13] **Bitnar B., Durisch W., von Roth F., Palfinger G., Sigg H., Gruetzmacher D. and et al.** (2004). Progress in TPV Converters, in: A. Marti, A. Luque (Eds.), *Next Generation Photovoltaics: High Efficiency Through Full Spectrum Utilization*, Institute of Physics, pp. 223–244, ISBN: 0740309049.
- [14] **Butcher T.A., Hammonds J.S., Horne E., Kamath B., Carpenter J., Woods D.R.** (2011). Heat Transfer and Thermophotovoltaic Power Generation in Oil-fired Heating Systems, *Appl. Energy* 88 1443–1441.

- [15] **Bitnar B., Durisch W., Holzner R.** (2013). Thermophotovoltaics on the Move to Applications, *Appl. Energy* 104 430–438.
- [16] **Utlu, Z. and Hepbasli, A.** (2007). A Review and Assessment of The Energy Utilization Efficiency in The Turkish Industrial Sector Using Energy and Exergy Analysis Method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7), 1438-1449.
- [17] **Johansson, M. T., & Söderström, M.** (2011). Options for the Swedish Steel Industry–Energy Efficiency Measures and Fuel Conversion. *Energy*, 36(1), 191-198
- [18] **Laroche, M., Carminati, R., & Greffet, J. J.** (2006). Near-field Thermophotovoltaic Energy Conversion. *Journal of Applied Physics*, 100(6), 063704.
- [19] **Yıldırım, İ., Öner, D., Çetin, B.** (2014). "GPU-computation of 2-dimensional Laplace Equation using Boundary Element Method", *20th National Conference on Thermal Sciences (ULIBTK'14)*, September 2-4, Balıkesir, Turkey.
- [20] **Önal, B.S and Utlu, Z.** (2017). Evaluation of Radiation in Industrial Waste Heat. *16th International Conference on Sustainable Energy Technologies – SET 2017/ Paper No:211*. July 17-20, Bologna, Italy.
- [21] **Termodinamik.İnfo.** (2009). Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri. Alıntı tarihi:16.10.2017. Adres: <https://www.termodinamik.info/teknik/atik-isi-geri-kazanim-sistemleri/>.
- [22] **Yeşil Enerji.** (t.y). Kombinasyonlar. Alıntı tarihi: 29.11.2017. Adres: <http://www.yesilenerji.com/kombinasyonlar/>.
- [23] **Güngör, A.** (1993). Enerji Geri Kazanım Sistemleri. Makine mühendisleri odası bildiri Alıntı tarihi: 06.10.2017.Adres: <http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/10038.pdf/>.
- [24] **Demir Makine.** (t.y.) Atık Isı Kazanları. Alıntı tarihi:06.10.2017. Adres: <http://www.demirmakina.com/DEMIR%20MAKINA%C2%A0Ekonomizerler.htm/>.
- [25] **BSC, Incorporated.** (2008).Waste Heat Recovery. *Technology and Opportunities in U.S. Industry*, March.
- [26] **Güncel Kaynak.** (t.y.)Termoelektrik. Alıntı tarihi: 07.10.2017. Adres: <https://www.guncelkaynak.com/nedir/termoelektrik/>.
- [27] **Türkçebilgi** (t.y.) Işınım. Alıntı tarihi:19.10.2017. Adres:<https://www.turkcebilgi.com/i%C4%9F%C4%B1n%C4%B1m/>.
- [28] **Eğitinkütüphanesi.** (2011). Işınım nedir? Alıntı tarihi:19.10.2017. Adres: <http://www.egitinkutuphanesi.com/fizik-isinin-nedir-elektromagnetik-isimaisinimlarin-insan-sagligina-zararlari/>.
- [29] **Full Bilgi.** (t.y.) Elektromanyetik Dalga Spektrumu Nedir? Özellikleri ve Çeşitleri. Alıntı tarihi:19.10.2017. Adres: <http://fullbilgi.com/egitim/kimya/elektromanyetik-dalga-spektrumu-nedir-ozellikleri-ve-cesitleri/>.
- [30] **Kamera arkası.** (t.y.) Foton. Alıntı tarihi:20.10.2017. Adres: <http://www.kameraarkasi.org/light/terminoloji/foton.html/>.
- [31] **Fizik.Net.Tr.** (t.y) Kara Cisim Işıması. Alıntı tarihi:20.10.2017. Adres: <http://www.fizik.net.tr/site/kara-cisim-isimaisi/>.
- [32] **Ders Notu.** (t.y). Kara Cisim Işıması Ve Fotoelektrik Olay.Alıntı Tarihi:20.10.2017.Adres: <http://skara.trakya.edu.tr/docs/Fotoelektrik.pdf/>.

- [33] **Kaliteliçelikçiler.Tr** (t.y). Demir-Çelik Üretimi. Alıntı tarihi: 14.09.2017. Adres:https://kalitelicelikciler.tr.gg/DEM%26%23304%3BR_%C7EL%26%23304%3BK--URET%26%23304%3BM%26%23304%3B.html.
- [34] **Energy Efficiency Guide for Industry in Asia**. (t.y). Thermal Energy Equipment: Waste Heat Recovery Pdf. Alıntı Tarihi:13.11.2017. Adres: www.energyefficiencyasia.org
- [35] **Kıncay, O. ve Karakoç, H.** (2008). Duvardan Isıtma-Soğutma Sistemleri ve Tasarım İlkeleri. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, TMMOB, ,Sayı:124. s:24-33.
- [36] **Solfin Energy**. (t.y). Merkezi Isıtma Sistemleri. Alıntı tarihi: 09.08.2017. Adres: <http://www.solfin.com.tr/hizmetler/4/merkezi-isitma-sistemleri.html/>.
- [37] **Fraas, L., Ballantyne, R., Hui, S., Ye, S. Z., Gregory, S., Keyes, J., & Daniels, B.** (1999). Commercial GaSb Cell and Circuit Development for The Midnight Sun® Tpv Stove. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 460, No. 1, pp. 480-487). AIP.
- [38] **Utlu, Z., Kınacı B., Önal, B.S.** (2017). Investigation of The Use of Waste Heat in Central Heating Systems in The Thermophotovoltaic Technology; GaSb Cell Application. *12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES Conference /Pp:774:1-16, ISSN 1847-7186* (book of abstracts) ISSN 1847-7178 (digital proceedings). September 04-08, Dubrovnik.
- [39] **Önal, B. S. ve Utlu, Z.** (2017). Endüstriyel Sistemlerde Yüksek Sıcaklıklı Atık Isı Kazanım Amaçlı Termofotovoltaik Uygulamalarında Teorik Modelleme. *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildirileri/ s.181-191.Nisan 19-22 ,İzmir, Türkiye.*
- [40] **Ferrari, C., Melino, F., Pinelli, M., & Spina, P. R.** (2014). Thermophotovoltaic Energy Conversion: Analytical Aspects, Prototypes and Experiences. *Applied Energy*, 113, 1717-1730.
- [41] **Ultra Enerji**. (t.y.). Kömür Türleri Nelerdir? Alıntı tarihi:23.10.2017. Adres: <https://ultraenerji.com/fosil-yakitlar/komur-turleri-nelerdir.html/>.
- [42] **MIT Energy Initiavite**. (2012). Making Electricity with Photovoltaics. Alıntı tarihi:23.10.2017. Adres: <http://energy.mit.edu/news/making-electricity-with-photovoltaics/>.
- [43] **Ferrari, C., Melino, F., Pinelli, M., Spina, P. R., & Venturini, M.** (2014). Overview and Status of Thermophotovoltaic Systems. *Energy Procedia*, 44, 160-169.
- [44] **Utlu, Z. and Önal, B.S.** (2017). Thermodynamic Analysis of Thermophotovoltaic Systems as A Waste Heat Recovery System, An Application. *16th International Conference on Sustainable Energy Technologies – SET 2017 / Paper No:205. July 17-20, Bologna, Italy.*
- [45] **Utlu, Z. and Önal, B.S.** (2017). Energy Analysis of GaSb Thermophotovoltaic Cell Systems Used for Waste Heat Recovery Systems in Industrial Applications. *12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES Conference/Pp:773:1-16, ISSN 1847-7186* (book of abstracts) ISSN 1847-7178 (digital proceedings). September 04-08, Dubrovnik

- [46] **Bouid, F. and Dehimi, L.** (2012). Performance Evaluation of a GaSb Thermophotovoltaic Converter. *Revue des Energies Renouvelables*, 15: 383-397.
- [47] **Koçali, K.** (2016). *Güneş Enerjisi Panellerinde Bor Bileşiklerinin Etkilerinin İncelenmesi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.



ÖZGEÇMİŞ

13 Şubat 1993 tarihinde Balıkesir’de doğdum. 2012 yılında Rahmi Kula Anadolu Lisesi’nden mezun oldum. 2016 yılında İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü üniversite birincisi olarak bitirdim. 2016 yılında İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans öğrenimime başladım. İstanbul Aydın Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı’nda mekanik işler uzman yardımcısı olarak görev aldım. 2017 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme bölümünden mezun oldum. İstanbul Aydın Üniversitesi’nde TÜBİTAK araştırma ve geliştirme projesinde görev almaktayım. Bu aşamada yurtiçi ve yurtdışında termofotovoltaik sistemler üzerine akademik makaleler yazdım ve sunumunu gerçekleştirdim.