

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA ATIK ISILARDAN YARARLANMA
YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ VE TERMOFOTOVOLTAİK
UYGULAMA YAPILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ünsal AYBEK
Y1213.080003

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU

Eylül 2015



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 Y1213.080003 numaralı öğrencisi **Ünsal AYBEK**'in "ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA ATIK ISILARDAN YARARLANMA YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ VE TERMOFOTOVOLTAİK UYGULAMA YAPILMASI" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 01.09.2015 tarih ve 2015/19 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **aybırly** ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak **kabul** edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

İmzası

Tez Savunma Tarihi :17/09/2015

1)Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU

2) Jüri Üyesi : Prof. Dr. Galip TEMİR

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

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

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans olarak sunduğum **“ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA ATIK ISILARDAN YARARLANMA YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ VE TERMOFOTOVOLTAİK UYGULAMA YAPILMASI”** 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. (17/09/2015)

Ünsal AYBEK

ÖNSÖZ

Enerji verimliliğinin esası, enerjiyi kırsarak tasarruf etmek değil, enerjiden maksimum faydalanarak aynı enerjiyle daha çok iş ihtiyacını karşılamaktır. Özellikle enerji ihtiyacının teknoloji ile paralel olarak arttığı dünyada enerji verimliliği ve enerji geri dönüşümüne yönelme kaçınılmaz bir hal almıştır.

Enerji kayıplarının büyük bir bölümünü ısı kayıpları oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı, kayıp ısıların geri dönüşüm yöntemlerini tanıtmak, Termofotovoltaik Teknolojisinin enerji geri dönüşümündeki avantajları, sınırlılıkları ve geliştirilmesi üzerinedir.

Çalışmamın başlangıcından sonuna kadar engin bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Zafer UTLU hocama ve Yrd. Doç. Dr. Ufuk PARALI hocama, ayrıca destekleri ile her zaman yanımda olan kadim dostlarıma, bugüne kadar dualarını üzerimden eksik etmeyen başta annem olmak üzere tüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Eylül 2015

Ünsal AYBEK
Öğretim Görevlisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Yapılmış Çalışmalar.....	2
2. DEMİR-ÇELİK SANAYİ SEKTÖRÜ MEVCUT DURUM DEĞERLENDİRMESİ ...	5
2.1 Sektör Tanımı.....	5
2.2 Demir-Çelik İmalat Yöntemleri.....	5
2.3 Demir-Çelik Sanayi'nde Ana Girdiler ve Sanayi Ürünleri.....	6
2.4 Entegre Tesislerin Kurulumu.....	7
2.5 Sektörün Dünyadaki Durumu.....	7
2.6 Sektörün Türkiye'deki Genel Durumu.....	9
2.7 Sektörün Alt Sektörleri ve Etkileşim Halinde Olduğu Diğer Sektörler.....	10
2.8 Türk Demir Çelik Sektöründe Faaliyet Gösteren Firmalar.....	12
2.9 Türk Demir Çelik Sektöründe Enerji Tüketimi.....	13
2.10 Demir Çelik Tesislerinde Enerji Tasarrufuna Yönelik Alınması Gereken Önlemler.....	15
2.10.1 Atık ısı ve enerjinin geri kazanımının artırılması.....	15
3. ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMLERİ.....	17
3.1 Isı Kaybı ve Kalite.....	17
3.2 Sıcaklık Değerlerine Göre Isı Geri Kazanımı.....	18
3.2.1 Yüksek sıcaklık aralıklarında ısı geri kazanımı.....	18
3.2.2 Orta sıcaklık aralıklarında ısı geri kazanımı.....	19
3.2.3 Düşük sıcaklık aralıklarında ısı geri kazanımı.....	19
3.3 Atık Isı Kazanım Yöntemleri ve Teknolojileri.....	20
3.3.1 Isı eşanjörleri.....	20
3.3.1.1 Reküperatörler.....	20
3.3.1.2 Rejeneratörler.....	22
Fırın rejeneratörleri.....	22
Döner rejeneratörler (Isı tekerleği).....	22
3.3.1.3 Pasif hava ısıtıcılar.....	23
3.3.1.4 Isı borulu ısı eşanjörü.....	24
3.3.1.5 Rejeneratif / Reküperatif brülörler.....	25
3.3.1.6 Ekonomizerler.....	25
3.3.1.7 Atık ısı kazanları.....	25
3.3.2 Termoelektrik teknolojisi.....	26
3.3.2.1 Termoelektrik etkiler.....	27
Seebeck etkisi.....	27
Peltier etkisi.....	27
Thomson etkisi.....	27

3.3.2.2 Termoelektrik modüller	27
Termoelektrik jeneratörler	28
Termoelektrik soğutucular	28
3.3.3 Termofotovoltaik teknolojisi	29
4. IŞINIM	31
4.1 Elektromanyetik Spektrum	32
4.2 Fotonun Yapısı ve Özellikleri.....	33
4.3 Siyah Cisim Işıması	34
5. YARI İLETKENLER	37
5.1 Katılarda Bant Oluşumu ve Yarıiletkenlerin Bant Yapısı.....	37
5.2 Yarıiletken Malzemeler.....	41
5.2.1 Tek atomlu yarıiletkenler	41
5.2.2 Bileşik yarıiletkenler	42
5.2.3 Katkılı yarıiletkenler.....	43
5.2.3.1 n-tipi Yarıiletkenler.....	43
5.3.3.2 p-tipi yarıiletkenler	44
5.3.3.3 p-n eklemi	45
6. TERMOFOTOVOLTAİK ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ	47
6.1 Termofotovoltaik Sistem.....	48
6.1.1 Isı kaynağı.....	48
6.1.2 Seçici yayıcı	48
6.1.3 Filtre.....	49
6.1.4 TPV'deki fotovoltaik hücreler	50
7. MATERYAL METOD	53
7.1 Termofotovoltaik Model.....	53
7.2 Atık Isı Kaynakları	54
7.3 Hücre Özellikleri.....	55
8. BULGULAR	57
8.1 Hücre Tipinin Etkisi	57
8.2 Radyatör Sıcaklığının Etkisi	58
8.4 Paralel Direncin Etkisi	61
8.5 Seri Direncin Etkisi.....	63
8.6 Türkiye Demir-Çelik Sektörü Atık Isı Enerji Potansiyeli ve TPV Sisteminin Uygulanması	64
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKÇA	69
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

c	Işık hızı (m/s)
E_g	Enerji Bant Aralığı (eV)
FF	Doluluk oranı (=V _m xI _m /I _{sc} xV _{oc})
F(λ)	Foton akısı (m ⁻³ s ⁻¹)
h	Planck sabiti (J.s)
I_m	Optimum akım (A)
I_o	Ters doyum akımı (A)
I_{ph}	Işıma ile orantılı akım (A)
I_{sc}	Kısa devre akımı (A)
k	Boltzmann sabiti (J/K)
N_a	Akseptör yoğunluğu (cm ⁻³)
N_d	Donör yoğunluğu (cm ⁻³)
q	Elektron yükü (C)
P_{inc}	Hücreye gelen güç (W/m ²)
P_{ret}	Yansıyan güç (W/m ²)
R_s	Seri direnç (mΩ)
R_{sh}	Paralel direnç(Ω)
S	Hücre alanı (m ²)
SR (λ)	Spektral etki (A/W)
T_{rad}	Radyatör Sıcaklığı (K)
T_{cell}	Hücre Sıcaklığı (K)
TPV	Termofotovoltaik
V_m	Optimum gerilim (V)
V_{oc}	Açık devre gerilimi (V)
λ	Dalga boyu (nm)
X	Etkin yayılım katsayısı
η	TPV sistem verimliliği
η_e	Enerji veriml

ÇİZELGE LİSTESİ

SAYFA

Çizelge 2.1 : Dünya Ham Çelik Üretimi	7
Çizelge 2.2 : Türkiye Demir Çelik firmaları,Kapasite ve Üretim Değerleri	13
Çizelge 2.3 : 2006-2012 Dönemi Türkiye Nihai, Sanayi ve Demir Çelik Enerji Tüketim Değerleri (BİN TEP)	14
Çizelge 2.4 : 2010-2012 Dönemi Çelik Enerji Tüketiminde Kullanılan Enerji Kaynakları ve Kullanım Değerleri (BİN TEP).....	15
Çizelge 3.1 : Isı kaynağı ve kalite.....	18
Çizelge 3.2 : Yüksek Sıcaklık Aralıklarında Çeşitli Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri	19
Çizelge 3.3 : Orta Sıcaklık Aralıklarında Çeşitli Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri	19
Çizelge 3.4 : Düşük Sıcaklık Aralıklarında Çeşitli Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri	20
Çizelge 5.1 : Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı	40
Çizelge 5.2 : Periyodik cetvelde yarıiletken malzemeler	41
Çizelge 5.3 : Tek atomlu ve bileşimli yarıiletkenler	43
Çizelge 7.1 : Atık Isı Kaynakları	54
Çizelge 7.2 : Sabit Hücre Parametreleri	55
Çizelge 7.3 : Radyatör Sıcaklıklarına Bağlı Hücelere Gelen ve Yansıtılan Güç.....	55
Çizelge 8.1 : Hücre Tipinin Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi.....	58
Çizelge 8.2 : Radyatör Sıcaklığının Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi.....	59
Çizelge 8.3 : Hücre Sıcaklığının Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi.....	61
Çizelge 8.4 : Paralel Direncin Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi.....	63
Çizelge 8.5 : Seri Direncin Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi	64
Çizelge 8.6 : 2011 Yılı Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Düşük, Orta ve Yüksek Sıcaklık Kademelerindeki Atık Isı Enerjisinin Geri Dönüşüm Potansiyelleri	65
Çizelge 8.7 : Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Atık Isı Enerjilerinin TPV Sistemleri ile Geri Kazanımı ve Verimliliği	65

ŞEKİL LİSTESİ

SAYFA

Şekil 2.1 : Ham çelik üretim metodları	6
Şekil 2.2 : 2013 yılı Dünya Ham Çelik Üretiminde Bölgelerin Payı	8
Şekil 2.3 : 2013 yılı Dünya Çelik Tüketiminde Bölgelerin Payı.....	9
Şekil 2.4 : Türkiye Çelik Sektörü Ham Çelik Üretimi	10
Şekil 2.5 : Dünya Demir-Çelik Alt Sektörleri Çelik Talebi	11
Şekil 2.6 : Dünya Demir-Çelik Alt Sektörleri Çelik Talep Oranları	11
Şekil 2.7 : Türkiye Çelik Haritası	12
Şekil 2.8 : Türkiye Demir Çelik Sektörü Enerji Tüketimi.....	14
Şekil 3.1 : Kombine Radyasyon ve Konvektif Reküperatör	21
Şekil 3.2 : Rejeneratif Fırın Diyagramı.....	22
Şekil 3.3 : Isı tekerleği	23
Şekil 3.4 : Pasif hava ısıtıcı	24
Şekil 3.5 : Isı Borulu Isı Eşanjörü	24
Şekil 3.6 : Ekonomizer	25
Şekil 3.7 : Atık Isı Kazanı	26
Şekil 3.8 : Seebeck Etkisi Şematik Gösterimi	27
Şekil 3.9 : Peltier Etkisi Şematik Gösterimi.....	27
Şekil 3.10 : Termoelektrik jeneratörün bileşenleri	28
Şekil 3.11 : Termoelektrik Soğutma Sistemi	29
Şekil 3.12 : Temel TPV Sistem Şeması.....	29
Şekil 4.1 : Işık dalgasının hareketi.....	31
Şekil 4.2 : Işık dalgasındaki elektrik ve manyetik alanların hareketi.....	32
Şekil 4.3 : Elektromanyetik spektrum	33
Şekil 5.1 : Altı Atomdan Oluşan bir Katıda 2s Düzeyindeki Yarılımlar.....	37
Şekil 5.2 : Katılarda izinli ve yasak enerji bantları.....	38
Şekil 5.3 : İletkenlik özelliklerine göre katıların bant yapısı	39
Şekil 5.4 : $T=0K$ 'de bir yarıiletkenin basit bant yapısı	39
Şekil 5.5 : Işık yoluyla uyarılmış bir yarıiletkende hol oluşumu	40
Şekil 5.6.a : Silisyum ve Germanyum atomları	41
Şekil 5.6.b : Saf silisyum kristalin kovalent bağları	42
Şekil 5.7 : Saf filikon atomu bağ oluşumu ve fermi Seviyesi	44
Şekil 5.8 : Fosfor atomu ile katkılama sonrası n-tipi silikonun fermi enerjisi.....	44
Şekil 5.9 : Basit bir PN yapısının oluşumu.....	45
Şekil 5.10 : PN birleşiminin denge iletimi.....	46
Şekil 6.1 : TPV sisteminin şeması ve geliştirilen bir TPV prototipi	47
Şekil 6.2 : Termofotovoltaik Enerji Dönüşümünün Temel Unsurları	48
Şekil 6.3 : Rezonans Filtre Yapısı	49
Şekil 7.1 : Fotodiyot eşdeğer devresi	53
Şekil 8.1 : Hücre Tipine Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri.....	57
Şekil 8.2.a : GaSb Hücresinde Radyatör Sıcaklığına Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri	58
Şekil 8.2.b : $In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82}$ Hücresinde Radyatör Sıcaklığına Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri.....	59

Şekil 8.3.a : GaSb Hücresinde Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri	60
Şekil 8.3.b : $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ Hücresinde Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri	61
Şekil 8.4.a : GaSb Hücresinde Paralel Dirence Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri	62
Şekil 8.4.b : $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ Hücresinde Paralel Dirence Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri	62
Şekil 8.5.a : GaSb Hücresinde Seri Dirence Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri....	63
Şekil 8.5.b : $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ Hücresinde Seri Dirence Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri	64

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA ATIK ISILARDAN YARARLANMA YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ VE TERMOFOTOVOLTAİK UYGULAMA YAPILMASI

ÖZET

Enerji tüketiminin her geçen gün artması, fosil kökenli enerji kaynaklarının ömrünün kısılması ve bu kaynakların çevreye saldığı kirletici emisyonlar, dünyada yeni enerji kaynakları arayışına ve kullanılan enerji kaynaklarından maksimum verim elde etme yönündeki araştırmalara hız kazandırmıştır.

Bu çalışmada enerji kayıplarının minimize edilmesine katkıda bulunacak yöntemlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürden, endüstriyel uygulamalarda atık ısılardan faydalanma yöntemleri araştırılmış ve yüksek sıcaklıklardaki ısı kaynaklarından atmosfere salınan atık ısı enerjisini termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemleri ile elektrik enerjisine dönüştüren teorik bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde, demir-çelik endüstrisindeki yüksek sıcaklıklı atık ısılardan ışıyım yolu ile elektrik üretim amaçlı termofotovoltaik dönüşüm sistemi incelenmiştir. Termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemi, ısı kaynağı, seçici yayıcı, filtre ve bir fotovoltaik hücre modülünden oluşmaktadır. Düzenekte bulunan ısı kaynağının, enerjiyi fotovoltaik hücre modülüne yayan seçici yayıcıya termal enerji sağlaması, fotovoltaik hücre modülünün de termal enerjiyi elektrik enerjisine çevirmesiyle kayıp enerji geri kazanılmıştır.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinin uygulanabilirliği, verimliliği ve geliştirilmesine yönelik görüşler belirtilmiş ve öneriler sunulmuştur. Bu çalışmanın daha sonra yapılacak çalışmalara bir kaynak oluşturması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termofotovoltaik, Atık ısı, Yarıiletken.

DETERMINING METHODS OF UTILIZATIONS OF WASTE HEAT IN INDUSTRIAL APPLICATIONS AND MARKING A TERMOPHOTOVOLTAIC APPLICATION

ABSTRACT

Increasing energy demand, decreasing sources of fossil fuels and their polluting emissions quicken the research to find new energy sources and to get more efficient ways to use the existing ones.

In this study the main aim is developing methods to minimize energy losses. First, methods for making use of waste heat in industrial applications in literature is studied. Then a theoretical model is developed to transform the waste heat energy to electrical energy by using thermophotovoltaic energy conversion systems. A thermophotovoltaic conversion system that generates electrical energy by using the radiation propagating from the waste heat of iron and steel industries is investigated. The thermophotovoltaic energy conversion system consists of heat source, selective emitter, filter and a photovoltaic energy module. Part of the energy loss is recovered by providing thermal energy to photovoltaic cell module and then converting this thermal energy into electrical energy.

Suggestions for feasibility and efficiency of thermophotovoltaic conversion systems is presented after getting the results of this study. It is aimed to provide a source for future works.

Keywords: Thermophotovoltaic, Waste heat, Semiconductors

1. GİRİŞ

Enerji tüketimi ihtiyacının günden güne artması, enerji kaynaklarının azalması enerji verimliliğine yönelişi kaçınılmaz hale getirmiştir. Yeni enerji kaynakları ihtiyacı karşılayacak pozisyona gelene kadar mevcut enerji kaynaklarının kullanımı hususunda iki durum çok büyük önem arz etmektedir. Birincisi enerjiden maksimum verim elde edebilmek için alıcıların aynı işi daha az enerjiyle yapabilecek şekilde üretilmesi, ikincisi kayıp enerjinin bir kısmını tekrar kazanabilmek için gerekli yöntemlerin belirlenmesi ve sistemlerin geliştirilmesidir.

Bu çalışmada endüstride atık ısı enerjilerinin geri kazanımına ilişkin sistemler araştırılmış, en çok atık ısı salınımı yapan sektörlerden biri olan demir-çelik sektörü baz alınarak atık ısıların radyant enerjisini elektrik enerjisine çeviren TPV sistemlerinin teorik modeli oluşturulmuştur.

Bölüm II'de Termofotovoltaik sistemlerin iyileştirilmesine yönelik literatürdeki çalışmalar özet halinde sunulmuştur.

Bölüm III'de demir-çeliğin, dünyadaki ve Türkiye'deki üretim ve tüketim durumları, gelecek yıllardaki beklenen üretim ve ihtiyaç durumları, sektörlerin ilişkileri, demir-çelik üretim yöntemleri ve Türkiye'de demir-çelik sektörünün enerji tüketimi hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm IV'de atık ısı kaynakları, atık ısılarının sıcaklık atık ısı enerjisini tekrardan ısı enerjisine ve elektrik enerjisine dönüştüren atık ısı geri kazanım sistemlerinin çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir.

Bölüm V'de Termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinin temelini oluşturan ışınım, foton yapısı, siyah cisim ışınması, elektromanyetik spektrum kavramları anlatılmıştır.

Bölüm VI'da Termofotovoltaik hücrelerin yapısını oluşturan yarıiletkenlerin, bant yapıları, katkılanmaları ve p-n eklemi ve bileşik yarıiletkenlere değinilmiştir.

Bölüm VII'de Termofotovoltaik sistemlerin temel unsurları anlatılmıştır. Isı kaynağı, seçici yayıcı, filtre ve termofotovoltaik hücrelerin sistemdeki görevleri ve çalışma prensipleri ayrıntılı olarak işlenmiştir.

Bölüm VIII'de TPV teorik modeli tanıtılmış, kullanılan hücrelerin özellikleri ve hesaplamalarda kullanılan formüller verilmiştir.

Bölüm IX'da farklı hücre yapılarının, radyatör sıcaklıklarının, hücre sıcaklıklarının, seri ve şönt (paralel) dirençlerinin akım-gerilim karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiş, hücre verimlilikleri hesaplanmış ve farklı durumlardaki değişiklikler kıyaslanmıştır.

Bölüm X'da sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmada enerji geri dönüşüm sistemlerinden biri olan TPV sistemlerinin endüstrimizde kullanılabilirliğinin tespit edilmesi, yaygınlaştırılması ve diğer araştırmacılara kaynak oluşturması amaçlanmıştır.

1.1 Yapılmış Çalışmalar

Nagpal ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda metalik fotonik kristallerin TPV yayıcı olarak kullanımını incelemiştir. Tungsten veya Molibden kullanarak direk lazer yazma yöntemiyle silikon yapıyı kaplamışlardır. 650°C sıcaklıktaki optik yansıma ve termal yayım ölçümleri göreceli olarak düşük sıcaklıklarda bu yapıların etkili bir yayım yaptığını göstermiştir. Bu kadar düşük sıcaklıklarda, bu yayıcılar sadece güneş enerjisi değil ayrıca jeotermal ve endüstriyel atık ısının kullanımında gelecek vaat etmektedir [1].

Wu ve arkadaşları SiC radyatörü kullanarak bir TPV sistem içindeki bir silikon hücre modülünün deneysel I-V karakteristiğini incelemiştir. Deney sonuçlarında, açık devre gerilimi özellikle de doldurma faktörü (fill faktör) azalma gösterirken kısa devre akımının artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada hücre modülünün maksimum çıkış güç yoğunluğunu 0,05 W/cm² olarak bulmuşlardır. Teorik analizde elde ettikleri açık devre gerilimi ve maksimum çıkış gücü değerlerinin deneysel olan değerlerle örtüşüğünü belirtmişlerdir. Fakat kısa devre akımının, hücre modülünün içindeki kontak direncinin varlığından dolayı daha yüksek çıktığını tespit etmişlerdir. Ayrıca analiz ettikleri endüstriyel yüksek sıcaklıklı atık ısı çalışmasında iterbiyum oksit radyatör sıcaklığının 1573 K olduğu zaman sistemin elektriksel etkinliğinin %8,6 olduğunu belirtmişlerdir [2].

Bermel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada mikro-TPV jeneratörleri ve solar termal TPV sistemlerini seçerek optimize etmişlerdir. Bu çalışmada soğurma spektrumunu ölçmek için iki farklı araç kullanmışlardır. Katmanlı bir ve iki boyutlu yapılar için Ghent Üniversitesi tarafından geliştirilen CAMFR adı verilen ücretsiz bir yazılım paketi ile transfer matris metodu uygulamışlardır. Normal oranlarda düzlem dalga radyasyonunu hava yoluyla uygulamış ve alan her katmanda yansıma, geçirgenlik ve soğurma sağladığını göstermişlerdir. Daha karmaşık üç boyutlu yapılar için MIT

tarafından geliştirilen Meep adı verilen ücretsiz bir yazılım paketi ile sonlu fark zaman domeni simülasyonu kullanmışlardır. Simülasyonun sonunda, her frekans değeri için Poyting vektörünü hesaplamışlar ve her frekans değeri için yayılan ve yansıyan güç sağlayan her düzlemin üstüne entegre etmişlerdir. İki metodunda bir ve iki boyutlu problemlere uygulandığında dağılım olması durumunda iken bile iyi sonuçlar almışlardır [3].

Mattorolo doktora çalışmasında küçük bir gaz yakıtlı GaSb hücre tabanlı TPV prototipi modelleyerek geliştirmiştir. Yaptığı çalışmada SiC, Kantha, Garnet ve MGC materyalleri ile çeşitli güç ve sıcaklık değerlerinde simülasyon yapmıştır. Bu simülasyonlar sonucunda en yüksek verimi SiC materyali ile elde etmiştir [4].

Baxter ve arkadaşları yaptıkları çalışmada düşük maliyetli ve yüksek verimli yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesinde nano mühendisliğinin önemine dikkat çekmişlerdir [5].

Whale ve Cravalho, TPV sistemlerini geliştirmek için alt dalga boyu vakum boşluğu kullanarak hücreler ve radyatörü ayırmayı önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada 300 K sıcaklığında tutulan TPV hücrelerini bir vakum boşluğu ile ayırmışlardır. Drude modeliyle tanımlanan bir dielektrik fonksiyonu ile radyatör için farazi düşük iletkenliğe sahip materyal kullanmışlardır. Hücreler için 0,36 ile 1,4 eV arasında değişen bant genişliğine sahip indiyum galyum arsenit ($In_{1-x}Ga_xAs$) kullanmayı önermişlerdir [6].

Narayanaswamy ve Chen, yaptıkları çalışmada TPV cihazlarının dönüşüm verimini ve çıkış gücünü arttırmak için foton kutuplu bir radyatör destek yüzeyi kullanmayı önermişlerdir [7].

Laroche ve arkadaşları, bir vakum boşluğuyla ayrılmış iki yığından oluşan nano TPV sistemleriyle çalışma yapmışlardır. 300 K sıcaklığında tutulan TPV hücrelerini bant genişliği 0,7 eV olan GaSb materyalinden yapmışlardır. 2000 K sıcaklığında tutulan iki çeşit radyatörü simülasyonlarda kullanmışlardır. Tungsten radyatörü için vakum boşluğunun 10 μm 'den 5nm'ye düştüğünde dönüşüm veriminin %21'den %27'ye çıktığını hesaplamışlardır. Farazi bir Drude radyatörü için ise verimin %10'dan %35'e çıktığını hesaplamışlardır [8].

Bermel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada PhCs üç benzersiz özelliğini belirli problemlere uygulamışlardır. Bu özellikleri, kritik yakın kızılötesi dalga boylarındaki yayımları bastırmak için bir fotonik bant genişliği sunabilmesi, TPV elektronik bant genişliğinin üstündeki soğurmalarını iyileştirebilmesi ve düşük enerjili fotonları tekrar kaynağa yansıtabilmesi olarak tarif etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada 1,1 eV bant

genişliğinde 2120 K sıcaklıkta bir tek jonksiyonlu TPV sisteminin prensipte %44,8'e kadar yüksek bir verim gösterdiğini tespit etmişlerdir [9].

Andreev ve arkadaşları GaSb hücrelerinin performansını dağınık yayıcı kullanarak AM0 spektrumunun altında %11'lik fotoakımı $2-7 \text{ A/cm}^2$ olan $\lambda > 900 \text{ nm}$ 'deki kısmında %19'luk verim artışı sağladıklarını göstermişlerdir [10]

2. DEMİR-ÇELİK SANAYİ SEKTÖRÜ MEVCUT DURUM DEĞERLENDİRMESİ

2.1 Sektör Tanımı

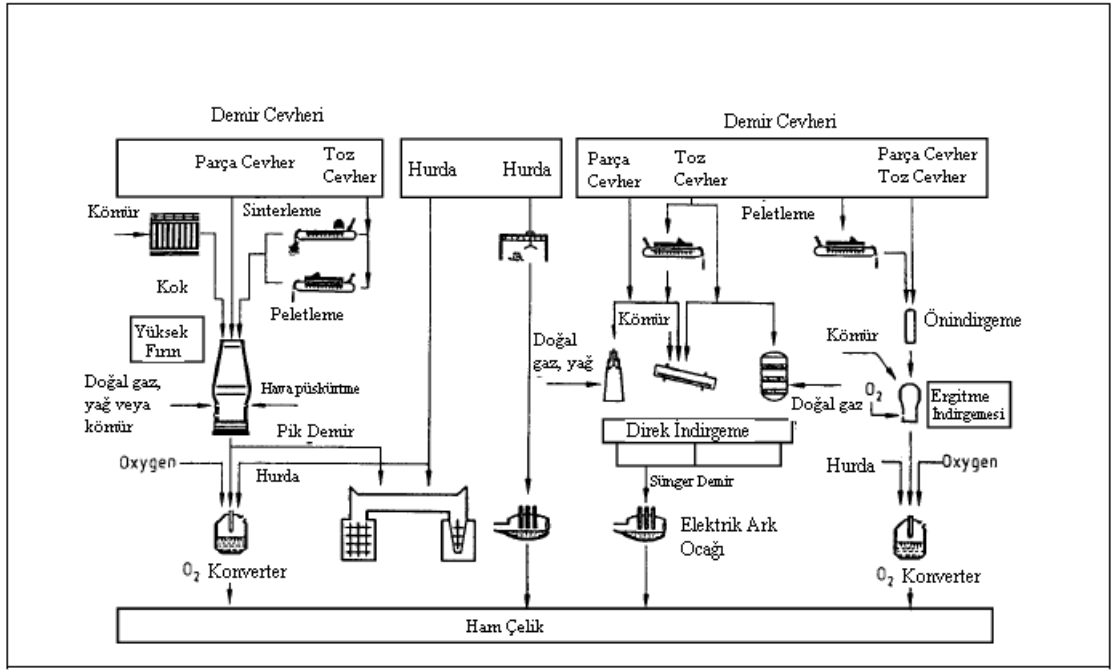
Demir çelik sektörü, demir cevherinin yüksek fırınlarda veya hurdaların ark ocaklarında eritilmesiyle üretilen slab ve kütüğün çeşitli işlemlerden geçirilerek istenilen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip ürünler üreten bir sektördür. Demir çelik sektörü inşaat, otomotiv, beyaz eşya ve demiryolu gibi sektörlerin tüm mamul eşya üretimine doğrudan katkısı bulunmaktadır [11].

2.2 Demir-Çelik İmalat Yöntemleri

Çelik ürünleri üretimi için iki durum söz konusudur. Bunlar, demir cevherinden ham demir ve ham demirden çelik üretimi ve çelik hurdasından çelik üretimi yöntemidir. Demir-çelik üretim süreci, entegre tesislerde demir cevherinin kırma, eleme, sinterleme işlemlerine tabi tutularak veya demir cevherinin parçalar halinde doğrudan yüksek fırına şarjı ile başlar. Yüksek fırınlarda kok kömürünün yardımı ile cevher demir oksit haline gelir, daha sonra cevher oksijeni alınarak indirgenmekte ve sonuç olarak sıvı ham demir elde edilmektedir [11].

Sıvı ham demir içinde yüksek oranda bulunan; karbon, silisyum, fosfor, kükürt gibi elementler istenilen ölçüde arıtılarak ve gerekli alaşım maddeleri katılarak istenilen yapıdaki çelik üretimi gerçekleştirilmektedir. Bunun için çeşitli çelik üretim metotları bulunmaktadır. En çok kullanılan çelik üretim metotları;

- Siemens-Martin Ocakları
- Bazik Oksijen Fırınları
- Elektrik Ark Ocakları [11].



Şekil 2.1 : Ham çelik üretim metodları [12].

2.3 Demir-Çelik Sanayi'nde Ana Girdiler ve Sanayi Ürünleri

Demir çelik sektöründe ana girdiler; Demir cevheri, hurda ve enerjidir. Demir Çelik Sektörü kapsamında yer alan ürünler aşağıda sınıflandırılmıştır:

I- Hammadde ve Yarı Mamul

- Pik Demir, Kütük Demir

II- Uzun Hadde Mamulleri

- Demir Çelik Çubuk, Demir Çelik Profil
- Filmaşın, Tel, Çivi

III- Yassı Hadde Mamulleri

- Sıcak Haddelenmiş Yassı Ürünler, Soğuk Haddelenmiş Yassı Ürünler
- Kaplanmış Yassı Ürünler

IV- Demir Çelikten Mamul Eşya

- Boru, Boru Bağlantı Parçaları
- İnşaat Aksamı, Dövme Taslak, Döküm Mamul
- Demet, Tel ve Halat, Zincir, Radyatör, Hurda [11].

2.4 Entegre Tesislerin Kurulumu

Entegre Demir-Çelik Tesislerinin kurulması aşağıdaki temel etkenlere bağlıdır;

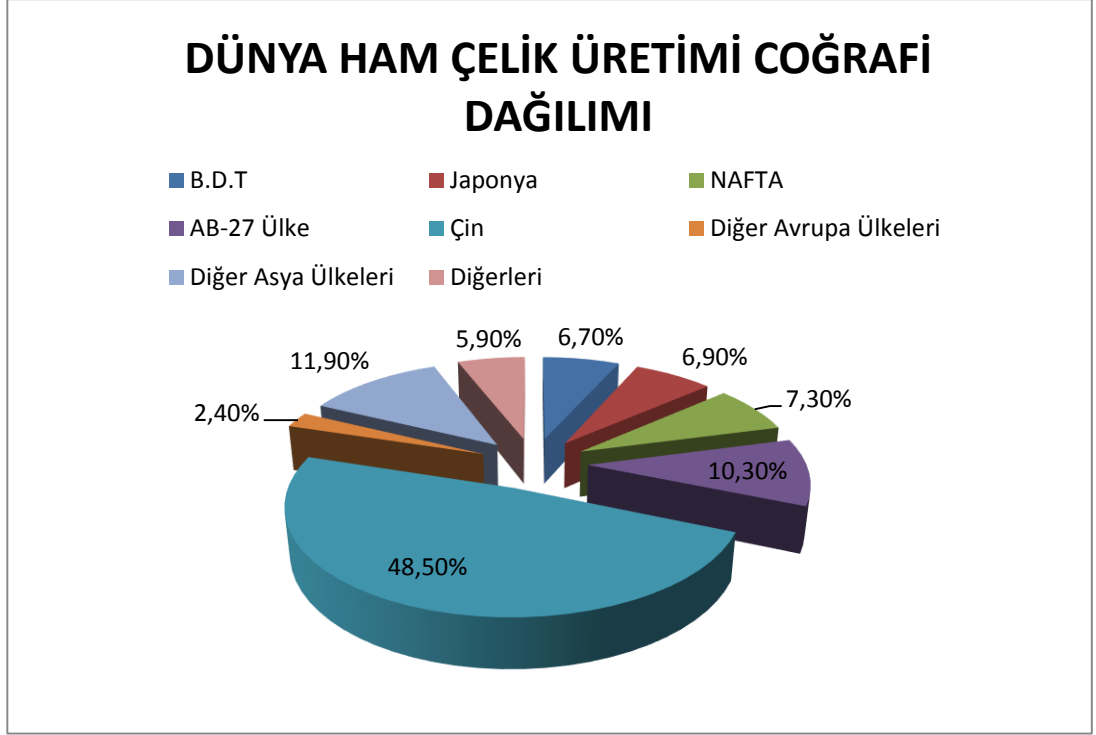
- Demir cevherine yakınlık
- Enerji kaynaklarına yakınlık (kömür(kok), doğalgaz, vb.)
- Demiryollarının, limanların varlığı
- Pazar kaynaklarına yakınlık
- Jeopolitik etkenler [11].

2.5 Sektörün Dünyadaki Durumu

Dünya Çelik Birliği verilerine göre 2013 yılında dünyada 62 üretici ülke, toplam 1,606 milyar ton ham çelik üretimi gerçekleştirmiş ve bir önceki yıla göre yaklaşık %3,01 büyüme göstermiştir [13].

Çizelge 2.1 : Dünya Ham Çelik Üretimi [13].

		2013	2012			2013	2012
	Ülke	Milyon Ton			Ülke	Milyon Ton	
1	Çin	779	731	27	Suudi Arabistan	5,5	5,2
2	Japonya	110,6	107,2	28	Arjantin	5,2	5
3	A.B.D.	86,9	88,7	29	Çek Cumhuriyeti	5,2	5,1
4	Hindistan	81,2	77,3	30	Avustralya	4,7	4,9
5	Rusya	68,7	70,4	31	Slovak Cumhuriyeti	4,5	4,4
6	Güney Kore	66,1	69,1	32	İsveç	4,4	4,3
7	Almanya	42,6	42,7	33	Finlandiya	3,5	3,8
8	Türkiye	34,7	35,9	34	Tayland	3,5	3,3
9	Brezilya	34,2	34,5	35	Kazakistan	3,3	3,7
10	Ukrayna	32,8	33	36	Romanya	3	3,3
11	İtalya	24,1	27,3	37	Birleşik Arap Emirlikleri	2,9	2,4
12	Tayvan	22,3	20,7	38	Endonezya	2,4	2,3
13	Meksika	18,2	18,1	39	Beyaz Rusya	2,2	2,7
14	Fransa	15,7	15,6	40	Katar	2,2	2,1
15	İran	15,4	14,5	41	Venezuela	2,1	2,4
16	İspanya	13,8	13,6	42	Lüksemburg	2,1	2,2
17	Kanada	12,4	13,5	43	Portekiz	2,1	2
18	Birleşik Krallık	11,9	9,6	44	İsviçre	1,5	1,5
19	Avusturya	8	7,4	45	Şili	1,3	1,7
20	Polonya	8	8,4	46	Filipinler	1,3	1,3
21	Güney Afrika	7,2	6,9	47	Kuzey Kore	1,3	1,3
22	Belçika	7,1	7,3	48	Kolombiya	1,2	1,3
23	Mısır	6,8	6,6	49	Peru	1,1	1
24	Hollanda	6,7	6,9	50	Yunanistan	1	1,2
25	Malezya	5,9	5,6		Diğer	13	14
26	Vietnam	5,6	5,3		Dünya Toplam	1.606	1.559,2

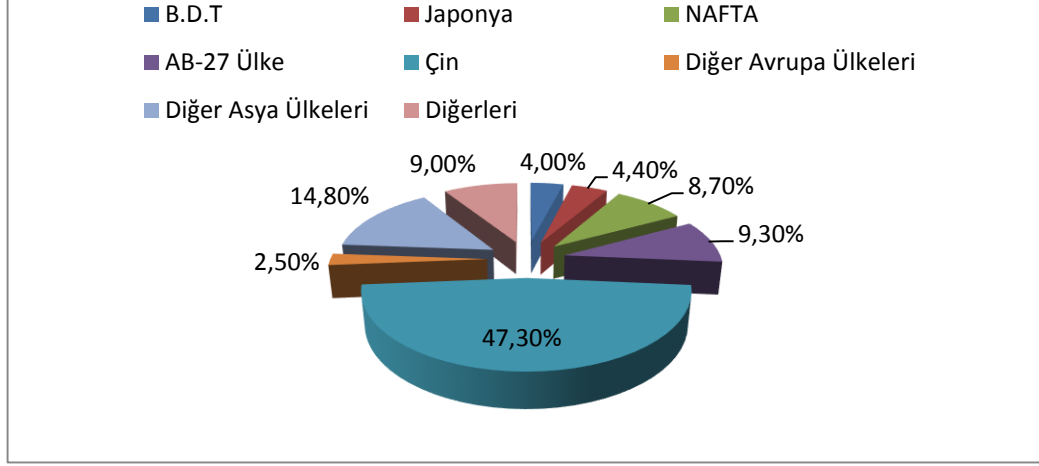


Şekil 2.2 : 2013 yılı Dünya Ham Çelik Üretiminde Bölgelerin Payı [13].

Ham çelik üretimi bölgesel olarak bakıldığında, dünyada en fazla üretimin Asya Bölgesi'nde ve sonrasında AB'de olduğu görülmektedir. Ülkeler bazında %48,5 gibi bir payla Çin en fazla ham çelik üretimini gerçekleştirmiştir. 2003 yılında 972 milyon ton ham çelik üretimi gerçekleşen dünyada, ihtiyaca bağlı üretim 10 senede %65,2 artış göstermiştir. Çelik üretiminde en büyük paya sahip ilk 10 ülkeye bakıldığında, Türkiye, Brezilya ve Ukrayna 2012 yılına göre küçük çaplı düşmeler göstermiştir [13].

Dünya Çelik Birliği verilerine göre dünyada çelik tüketimi 2013 yılında yaklaşık 1,481 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. Dünyanın bir önceki yıla göre çelik ihtiyacı %3,6 oranında yükselmiştir. 2003 yılında 880 milyon çelik tüketimi gerçekleştirilen dünyada 10 senede çelik ihtiyacı %68,3 artış göstermiştir. Çelik tüketiminde bölgelerin payı Şekil 2.3'te gösterilmiştir [13].

DÜNYA ÇELİK KULLANIMI COĞRAFİ DAĞILIMI

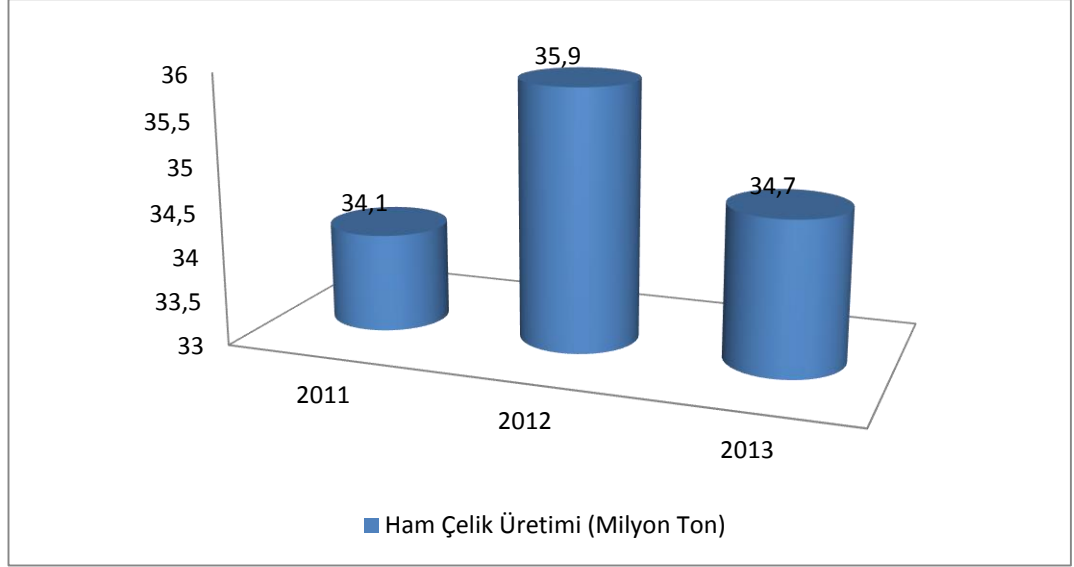


Şekil 2.3 : 2013 yılı Dünya Çelik Tüketiminde Bölgelerin Payı [13].

2.6 Sektörün Türkiye'deki Genel Durumu

Türkiye Çelik Sektörü 2013 yılında 34,7 milyon ham çelik üretimi gerçekleştirmiş, çelik üretiminde bir önceki yıla göre %3,34 azalma göstermiştir. Üretimde düşüş olmasına rağmen Türkiye, dünya ham çelik üretim sıralamasında, ilk 10 ülke arasında 8. sıradaki yerini korumuştur [14].

Üretimde düşüş olmasına rağmen, önceki yıllarda göstermiş olduğu yüksek performans sayesinde, 2007 yılındaki üretimle kıyaslandığında, Türkiye ham çelik üretimini %35 oranında yükseltmiştir. Bu üretim artışı, üretimini %61 oranında yükselten Çin Halk Cumhuriyeti ve %49 oranında yükselten Hindistan'dan sonra en yüksek üçüncü oranı ifade etmektedir [14].



Şekil 2.4 : Türkiye Çelik Sektörü Ham Çelik Üretimi [13].

2000-2013 döneminde, Türkiye'nin toplam ham çelik üretiminde %142, kütük üretiminde %120 ve slab üretiminde %250 oranında artış gerçekleşmiştir. 2000-2013 döneminde meydana gelen 20,3 milyon tonluk üretim artışının 14,4 milyon tonluk kısmı kütükte, 6 milyon tonluk kısmı slab üretiminde olmuştur [14].

2000-2013 yılları arasındaki dönemde Türkiye'nin nihai mamül üretimi, %155 oranında artışla, 14,27 milyon tondan, 36,4 milyon tona çıkmıştır. Uzun ürünler %139 oranında artışla, 11,12 milyon tondan, 26,5 milyon tona, yassı ürünler ise %214 oranında artışla, 3,15 milyon tondan, 9,9 milyon tona çıkmıştır [14].

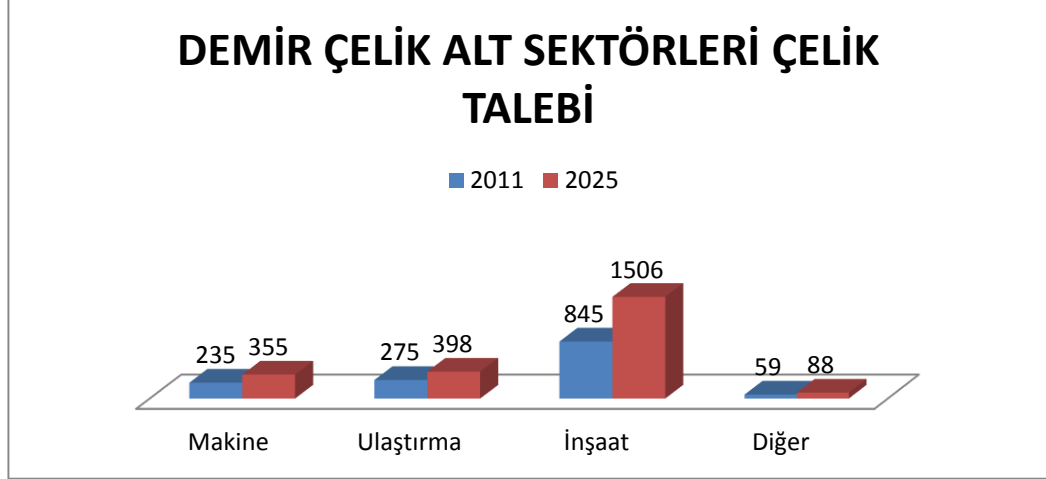
2000-2013 yılları arasındaki dönemde, Türkiye'nin nihai mamül tüketimi, %139 oranında artışla, 13,1 milyon tondan, 31,3 milyon tona, aynı dönemde, uzun ürünlerin tüketimi %146 oranında artışla, 6,8 milyon tondan, 16,7 milyon tona, yassı ürünlerin tüketimi, %133 oranında artışla, 6,3 milyon tondan, 14,6 milyon tona çıkmıştır [14].

2.7 Sektörün Alt Sektörleri ve Etkileşim Halinde Olduğu Diğer Sektörler

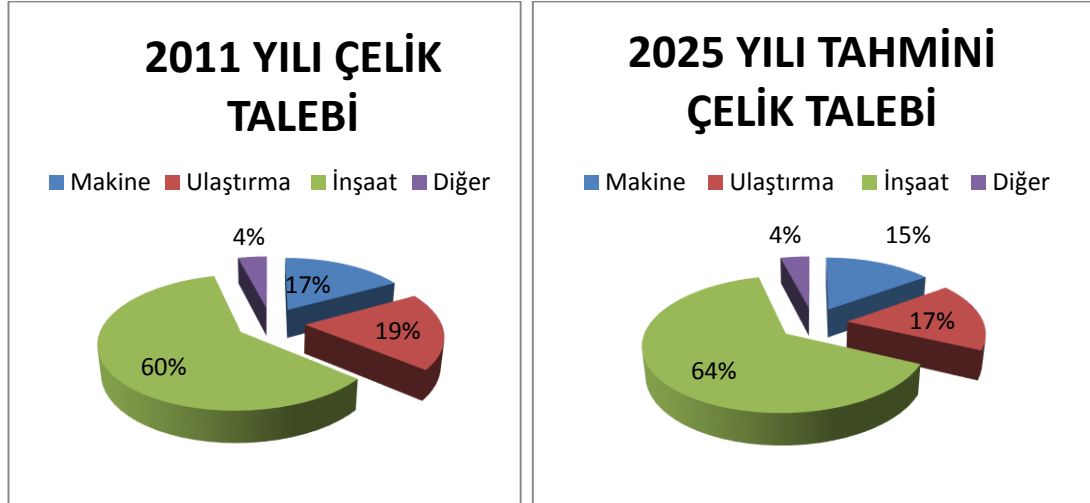
Demir çelik sektöründe, başta inşaat ve otomotiv sektörleri olmak üzere, boru, profil, dayanıklı tüketim eşyası, yakıt araç ve gereçleri imalatı, tarım araçları imalatı, teneke tüketicileri ile gemi inşa sektör gibi sektörlerle yönelik üretim yapılmaktadır. Bu sektörlerdeki gelişmeler demir çelik sektörünü doğrudan etkilemekte, demir çelik sektöründe gerçekleşecek ilerlemeler de bu sektörleri etkilemektedir [15].

Demir çelik sektörünün aşağıda belirtilen sektörlerle ilişkilerine göre, dünya çelik talebinin 2025 yılında 2,3 milyar ton olması tahmin edilmektedir [15].

Dünyada çelik kullanımında en büyük pay %60 ile inşaat sektöründe ve takibinde ulaştırma ve makine sektörlerinde gerçekleşmektedir. İhtiyacın artması ve sanayinin gelişmesine paralel olarak bu sektörlerdeki çelik ihtiyacında da ciddi artışlar beklenmektedir. Şekil 2.5'te 2011-2025 yılları arasında çelik talebinin sektörlere ait artış miktarları, Şekil 2.6'da sektörlerin ihtiyaca göre yüzde oranları verilmiştir [15].



Şekil 2.5 : Dünya Demir-Çelik Alt Sektörleri Çelik Talebi (Milyon Ton) [15].



Şekil 2.6 : Dünya Demir-Çelik Alt Sektörleri Çelik Talep Oranları [15].

Çelik, ekonomik büyüme ve çevresel sorumluluğun iç içe girdiği yeşil ekonomide, merkezde yer alan malzemelerden biridir. Çelik, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerjide en çok kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. Üretilen çelik ürünleri 150 yıl boyunca yeniden kullanılabilir. Dünya genelinde sektörel yönden incelendiğinde, tahmin edilen çelik ürünleri geri dönüşüm oranları; inşaat sektöründe %85, otomotiv sektöründe %85, makine sektöründe %90, elektrikli ürünlerde %50 olarak belirlenmiştir [15].

2.8 Türk Demir Çelik Sektöründe Faaliyet Gösteren Firmalar

2013 yılı itibariyle, Türkiye genelinde 3 tanesi Bazık Oksijen Fırını, 24 tanesi Elektrik Ark Ocaklı ve 3 tanesi İndüksiyon Ocaklı olmak üzere, toplam kurulu 30 tesis bulunmaktadır. 2013 yılı itibariyle sektörde faaliyette bulunan 30 tesisin, 10 tanesi Akdeniz bölgesinde, 8 tanesi Marmara bölgesinde, 7 tanesi Ege bölgesinde, 3 tanesi Karadeniz bölgesinde, 2 tanesi de İç Anadolu bölgesinde bulunmaktadır. 2013 yılı itibariyle, bu tesislerden 10 tanesinin ham çelik kapasitesi 2 milyon ton ve üzerinde, 8 tanesinin kapasitesi 1 - 2 milyon ton arasında, 6 tanesinin kapasitesi 500 bin - 1 milyon ton arasında ve 6 tanesinin kapasitesi de 50 bin – 500 bin ton arasında olduğu belirlenmiştir [14].



Şekil 2.7 : Türkiye Çelik Haritası [15].

2013 yılı itibarıyla, 49,6 milyon tonluk ham çelik kapasitesinin %75,9 oranındaki, 37,7 milyon tonu elektrik ocaklı tesisleri, %24,1 oranındaki, 12 milyon tonu ise BOF entegre tesislere aittir. Entegre tesis yatırımlarının maliyetinin yüksek olması nedeniyle, çelik sektörü elektrik ark ocağı ağırlıklı olarak büyümeye göstermektedir. Ham çelik kapasitesinin, geçmiş yıllara kıyasla yavaşlayama göstermesine rağmen ilgili olduğu diğer sektörlerin ihtiyaç analizine bakıldığında gelecek yıllarda artış eğilimini göstermesi beklenmektedir [14].

Çizelge 2.2 : Türkiye Demir Çelik firmaları,Kapasite ve Üretim Değerleri [14].

	2012			2013		
	Kapasite	Üretim	KKO-%	Kapasite	Üretim	KKO-%
Asil Çelik	485	322	66	555	350	63
Çebitaş	750	296	39	750	279	37
Çemtaş	172	114	66	172	136	79
Çolakoğlu	3000	2605	87	3000	2334	78
Çukurova	-	-	-	-	-	-
Diler	1500	1394	93	1500	1345	90
Ede	780	260	33	780	165	21
Ege Çelik	2000	995	50	2000	811	41
Ege Metal	-	-	-	-	-	-
Ekinciler	1150	941	82	1150	963	84
Habaş	-	-	-	-	-	-
İçdaş	5268	4083	78	5527	4175	76
İzmir	1500	1432	95	1500	1424	95
Kaptan	1350	1274	94	1350	1066	79
Koç Çelik	-	-	-	-	-	-
Kroman	2500	1376	55	2500	1298	52
MMK *	2400	789	33	2400	0	
Nursan	1200	1103	92	1200	882	74
Özkan	700	527	75	700	524	75
Platinum	200	122	61	96	90	94
Sider	720	538	75	720	374	52
Sivas D.Ç.	550	335	61	550	374	68
Tosçelik	2000	1563	78	2000	1561	78
Yazıcı	1100	1062	97	1100	1023	93
Yeşilyurt	1000	625	63	1000	614	61
Yolbulan-B.	2000	1514	76	1569	1443	92
Diğer EO*	6060	3290	54	5570	3492	63
EO **	38385	26560	71	37689	24723	66
Erdemir	3850	3236	84	3850	3762	98
İsdemir	5300	4631	87	5300	4506	85
Kardemir	1500	1458	97	2800	1663	59
BOF	10650	9325	88	11950	9931	83
Toplam	49035	35885	75	49639	34654	70

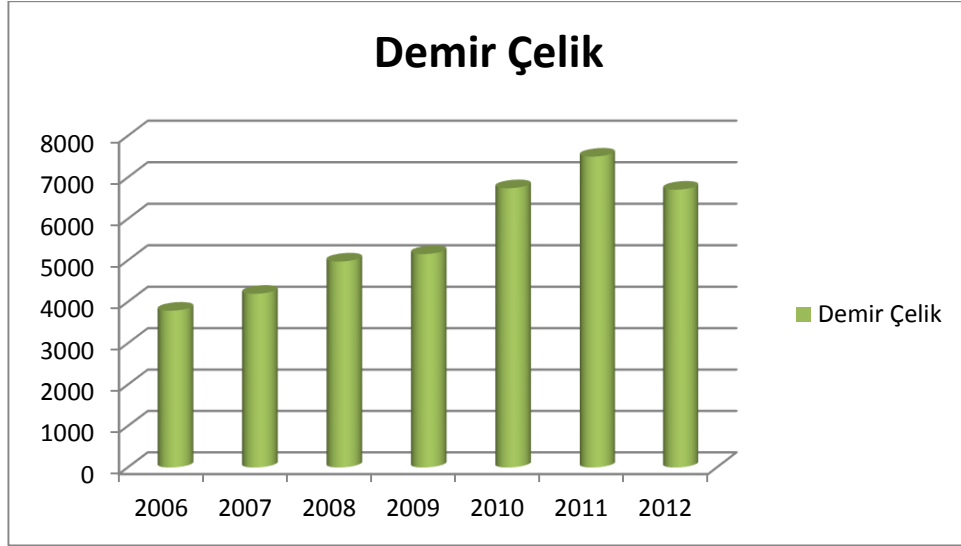
2.9 Türk Demir Çelik Sektöründe Enerji Tüketimi

Sanayi kollarının can damarlarından biri olan demir-çelik sektöründe üretime bağlı olarak enerji kullanımı da her geçen yıl artış göstermektedir. 2006-2012 döneminde Türkiye nihai enerji tüketiminde yaklaşık %15 artış gerçekleşmiştir. Enerji Bakanlığı verilerine göre demir-çelik sektörü enerji kullanımı 2012 yılında nihai enerji tüketiminin %7,53'ünü, sanayi enerji tüketiminin %22,08'i gibi önemli bir kısmını oluşturmuştur. Çizelge 2.3'te 2006-2012 döneminde Türkiye nihai, sanayi ve demir-çelik enerji

tüketim değerleri, Şekil 2.8'de demir-çelik enerji kullanımı değişim grafiği gösterilmektedir [16].

Çizelge 2.3 : 2006-2012 Dönemi Türkiye Nihai, Sanayi ve Demir Çelik Enerji Tüketim Değerleri (BİN TEP) [16].

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Nihai Enerji Tüketimi	77441	82747	79559	80574	83372	86952,2	89007
Sanayi Tüketimi	30996	32466	25677	25966	30628	30830,2	30368
Demir Çelik	3790	4198	4975	5155	6740	7501,4	6705



Şekil 2.8 : Türkiye Demir Çelik Sektörü Enerji Tüketimi (BİN TEP)

Demir-çelik sektöründe üretim aşamalarında kömür, petrol, elektrik gibi bir çok enerji kaynağı kullanılmaktadır. 2012 yılında demir-çelik sektörü enerji tüketiminin %43,8'i kok kömüründen, %26,3'ü elektrikten, %29,9'u diğer enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Çizelge 2.4'te 2010-2012 yıllarında demir-çelik sektöründe kaynaklara göre enerji dağılımları verilmiştir.

Çizelge 2.4 : 2010-2012 Dönemi Çelik Enerji Tüketiminde Kullanılan Enerji Kaynakları ve Kullanım Değerleri (BİN TEP) [16].

	T.Köm	Linyit	Kok	P.kok	Toplam K.Yak.	Petrol	D. Gaz	Elektrik	Geo. Isı Diğer Isı	Top.
2010	1016	58	2904	0	3977	356	678	1562	166	6740
2011	932,4	30,9	2920,2	2	3885,5	27	1854,7	1734,3	0	7501,4
2012	833	28	2940	136	3938	48	832	1761	126	6705

2.10 Demir Çelik Tesislerinde Enerji Tasarrufuna Yönelik Alınması Gereken Önlemler

Enerji tasarrufunu sağlayacak önlemler 4 ana grupta incelenebilir;

- 1) Satın alınan enerji miktarı ve maliyetinin azaltılması
- 2) İşletmecilik tekniklerinin geliştirilmesi ve ekipman verimliliğinin artırılması
- 3) Minimum enerjinin ekonomik olarak kullanılması
- 4) Atık ısı ve enerjinin geri kazanımı [17].

2.10.1 Atık ısı ve enerjinin geri kazanımının artırılması

- a) Geri Kazanım Ekipmanlarının Montajı
- b) Geri Kazanılan Enerjinin Verimli Kullanımı
- c) Geri kazanım ekipmanlarının bakımı ve performanslarının artırılması [17].

3. ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMLERİ

Atık ısı, makinelerde ve ihtiyaç duyulan tüm proseslerde sisteme verilen enerjinin sistemde iş yapması sonucu çalışma ortamından çevreye salınan ve kurtarılabilir enerji potansiyeline sahip ısı olarak tarif edilebilir. Makineler, fırınlar, sobalar ve klima gibi sistemlerden ısı yayılır. Işık, kimyasal enerji, elektrik enerjisi, mekanik enerji gibi enerjiler kullanıldığında bu enerjilerin bir kısmı ısıya dönüşür. Üretilen ısının çoğu kaybedilir. Isı önce atmosfere, oradan da uzaya yayılır [18]. Endüstriyel enerji tüketiminin yaklaşık dörtte biri sıcak gazlar ve sıvılar şeklinde atık ısı olarak kaybedilmektedir. Bu atık enerjinin, ısı geri kazanım sistemleri ile bir kısmının kurtarılması mümkündür [19].

Atık ısıdan yararlanmanın doğrudan ve dolaylı birçok faydası vardır. Doğrudan katkısı, enerji maliyetlerinin önemli ölçüde azalma göstermesidir. Bu sayede atık ısı geri kazanım sistemleri, yeni bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Diğer bir katkısı da sağladığı enerji tasarrufu sayesinde, daha az yakıt kullanımı, dolayısıyla çevreye salınan kirletici emisyonların azalmasıdır [20].

3.1 Isı Kaybı ve Kalite

İşlemin türüne bağlı olarak atık ısı, endüstriyel fırınlarda soğutma suyundan, yüksek sıcaklıktaki atık gazlara kadar her işlemde gerçekleşmektedir. Isı geri kazanım süreci genellikle yüksek sıcaklıktaki işlemlerde daha etkin kalite ve daha yüksek mali kazanım sağlamaktadır. Isı geri kazanım potansiyeli düşünüldüğünde bütün olasılıklar kullanılmaktadır. Isı kaynağına bağlı kalite, Çizelge 3.1'de verilmiştir [21].

Çizelge 3.1 : Isı kaynağı ve kalite [21].

ISI KAYNAĞI	KALİTE
Baca gazındaki ısı	Sıcaklık ne kadar yüksek olursa ısı kazanım potansiyeli o kadar büyük olur
Buhar akımlarındaki ısı	Buhar akımlarındaki ısı yoğunlaştırıldığı zaman gizli ısı geri kazanılabilir
Ön ısıtma ekipmanlarının dışında konvektif ve radyant ısı kayıpları	Düşük derecedeki ısı eğer toplanabilirse, yerden veya havadan ısıtmada kullanılabilir
Soğutma suyu ısı kayıpları	Düşük derecedeki ısı taze havaya transfer edilirse kazanç sağlanır
Soğutma suyu atımı	a) Yüksek derecedeki ısıdan faydalanmak için soğutmatalebinin azaltılması gerekir
	b) Düşük derecedeki ısıdan faydalanmak için, ısı pompası kullanılır
Üretim süreçlerinden ayrılan ısının depolanması	Buradaki kalite sıcaklığa bağlıdır
Gazlaştırma ve sıvılaştırma süreçlerinden ayrılan ısı	Eğer atılan ısı bir kirleticiden kaynaklanıyorsa eşanjör gerekir

3.2 Sıcaklık Değerlerine Göre Isı Geri Kazanımı

Atık ısılar sıcaklık değerlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- 650°C ve üzeri yüksek sıcaklıklı atık ısı
- 230°C ve 650°C arası orta sıcaklıklı atık ısı
- 230°C ve altı düşük sıcaklıklı atık ısı [22].

3.2.1 Yüksek sıcaklık aralıklarında ısı geri kazanımı

Endüstriyel proses ekipmanlarının yüksek sıcaklık aralıklarındaki atık gaz sıcaklık değerleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Bütün bu sonuçlar direkt olarak yanma süreçlerinden elde edilmiştir [21].

Çizelge 3.2 : Yüksek Sıcaklık Aralıklarında Çeşitli Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri [21].

Cihazın Türü	Sıcaklık (°C)
Nikel Rafine Fırınları	1370-1650
Alüminyum Rafine Fırınları	650-760
Çinko Rafine Fırınları	760-1100
Bakır Rafine Fırınları	760- 815
Çelik Isıtma Fırınları	925-1050
Bakır Reverber Fırını	900-1100
Açık Ocak Fırınları	650-700
Çimento Fırınları (Kurutma Süreci)	620- 730
Cam Eritme Fırınları	1000-1550
Hidrojen Tesisleri	650-1000
Katı Atık Yakma Tesisleri	650-1000
Çöp Yakma Fırını	650-1450

3.2.2 Orta sıcaklık aralıklarında ısı geri kazanımı

Endüstriyel proses ekipmanlarının orta sıcaklık aralıklarındaki atık gaz sıcaklık değerleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Bu orta sıcaklıktaki değerlerin çoğu direkt olarak yanma süreçlerinden elde edilmiştir [21].

Çizelge 3.3 : Orta Sıcaklık Aralıklarında Çeşitli Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri [21].

Cihazın Türü	Sıcaklık (°C)
Buhar Kazanı Egzozları	230-480
Gaz Türbini Egzozları	370-540
Pistonlu Motor Egzozları	315-600
Pistonlu Motor Egzozları (Turbo Şarjlı)	230-370
Isıl İşlem Fırınları	425-650
Kurutma ve Pişirme Fırınları	230-600
Katalitik Krakerler	425-650
Tavlama Fırını Soğutma Sistemleri	425-650

3.2.3 Düşük sıcaklık aralıklarında ısı geri kazanımı

Çizelge 3.4'de düşük sıcaklık aralığındaki bazı ısı kaynakları listelenmiştir. Düşük sıcaklık atık ısı düşük buhar basıncı ihtiyacı ve ön ısıtma amacı için tamamlayıcı bir yol olarak yararlı olabilir [21].

Çizelge 3.4 : Düşük Sıcaklık Aralıklarında Çeşitli Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Sıcaklık Değerleri [21].

Kaynak	Sıcaklık (°C)
Buhar Yoğuşturma Prosesleri	55-88
Soğutma Suyu	
Kaynak Makineleri	32-88
Enjeksiyon Makineleri	32-88
Tavlama Fırınları	66-230
İçten Yanmalı Motorlar	66-120
Kalıp Şekillendirme	27-88
Klima ve Soğutma Kondansatörleri	32-43
Kurutma, Pişirme ve Kürleme Fırınları	93-232

3.3 Atık Isı Kazanım Yöntemleri ve Teknolojileri

Atık ısı dönüştürme metotları, gazlar ve sıvılar arasındaki ısı transferlerini, yük giren fırınlarındaki ısı transferlerini, mekanik ya da elektriksel güç üretimini, ısıtma ve soğutma için kullanılan ısı pompalarını v.b. içerir [22].

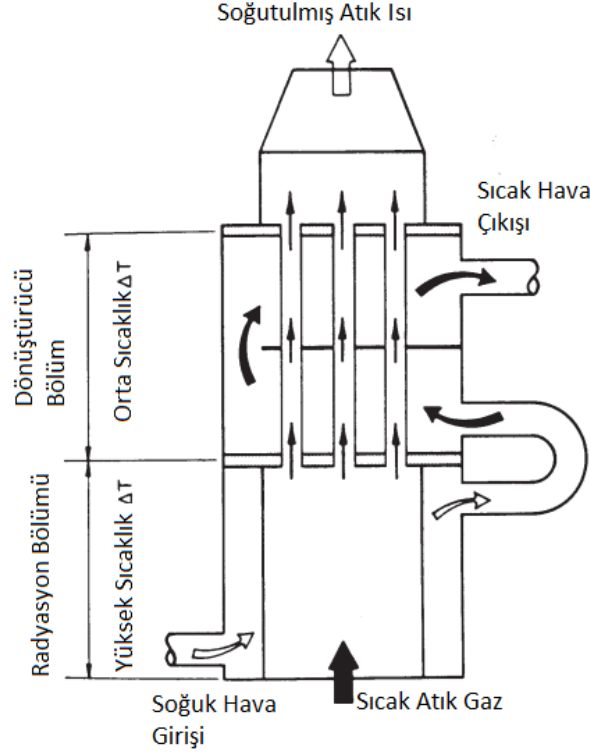
Atık ısı kazanım teknolojileri için terminoloji farklı endüstrilerde değişiklik gösterebilir [22].

3.3.1 Isı eşanjörleri

Isı eşanjörleri genellikle egzoz gazlarını fırına giren yanma havasına transfer etmek için kullanılır. Önceden ısıtılmış yanma havası fırına yüksek sıcaklıklarda girdiği için yakıt tarafından ihtiyaç duyulan enerji daha az olacaktır. Hava ön ısıtması için kullanılan teknolojiler reküperatörleri, fırın rejeneratörlerini, brülör rejeneratörleri, döner rejeneratörleri ve pasif hava ön ısıtıcılarını içerir [22].

3.3.1.1 Reküperatörler

Reküperatörler ortamdaki atık egzoz gazlarının atık ısı enerjilerini, ısıtma ve tavlama fırınları, eritme fırınları, gaz yakma tesisleri, yeniden ısıtma fırınları gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için geri kazanır. Reküperatörler, radyasyon reküperatör, konveksiyon reküperatör veya bunların kombinasyonları şeklinde olabilir [22].



Şekil 3.1 : Kombine Radyasyon ve Konvektif Reküperatör [23].

Rekuperatörler baca gazındaki atık ısının yakma havasına aktarıldığı ısı değiştiricilerdir. Rekuperatörlerde yakma havası borular içinden geçerken, baca gazı bu borular arasından; aynı doğrultuda, karşı doğrultuda veya çapraz doğrultuda geçmektedirler [24]. Atık gazları iç kanaldan geçerken ısı transferi öncelikle duvara ve dış kabuktaki gelen soğuk havaya iletilir. Önceden ısıtılmış hava daha sonra fırın brülörlerine hareket eder. Sıcak gaz geniş bir kabuk içersinde nispeten küçük çaplı tüpler içersinden geçirilir. Gelen yanma havası kabuğa girer ve tüpler etrafında döndürölür, böylelikle atık gazdan ısı çeker [22].

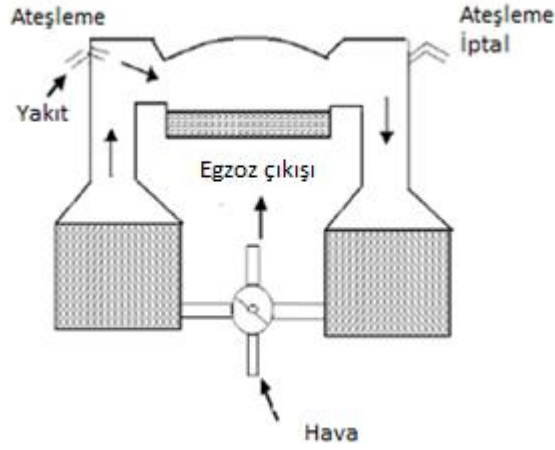
Diğer alternatif kombine rekuperatördür. Bu kombine rekuperatörler ısı transfer verimliliğini maksimize etmek için radyasyon kısmını izleyen bir konveksiyon kısmı içeri [22].

Rekuperatörler ya metalik yada seramik malzemelerin üzerine imal edilir. Metalik rekuperatörler yaklaşık 1093°C altındaki sıcaklık uygulamalarında kullanılırken yüksek sıcaklıklardaki ısı kazanımı için seramik tüplü rekuperatörler daha uygundur. Seramik rekuperatörler yaklaşık 1538 °C sıcaklıklarda çalışabilirler [22].

3.3.1.2 Rejeneratörler

Fırın rejeneratörleri

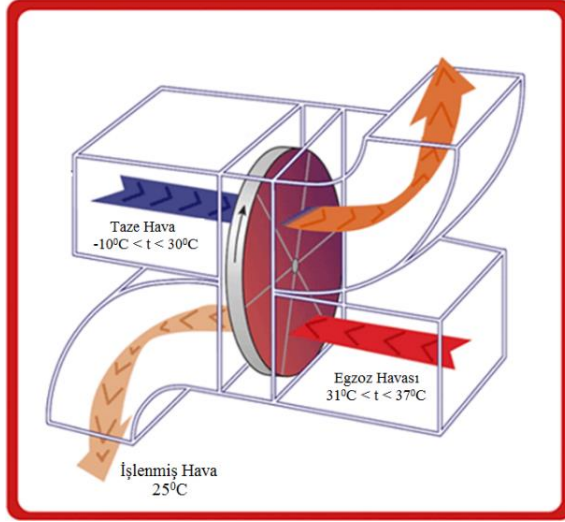
Rejeneratif fırınlar, içerisinde sıcak ve soğuk hava akan iki bölmeli ısı dönüştürücü tuğladan meydana gelir. Yanma gazı bir bölmeden geçerken tuğlalar yanma gazından ısı soğururlar ve sıcaklıkları artar. Gelen yanma havası, sıcak ısı dönüştürücü içerisinde geçmesi için hava akışı ayarlanır. İki odacıktan bir tanesi egzoz gazından ısı soğurmak için kullanılırken diğeri ısıyı yanma gazına transfer etmek için kullanılır [22].



Şekil 3.2 : Rejeneratif Fırın Diyagramı

Döner rejeneratörler (Isı tekerleği)

Döner rejeneratörler sabit rejeneratörlerle benzer yapıda çalışır. İki paralel kanallar arasında yerleştirilen döner gözenekli bir disk kullanılır. Bu disk yüksek ısı sığasına sahip malzemelerden imal edilir. Bu kanallardan biri sıcak atık gaz diğeri soğuk gaz içerir [22]. Belirli bir hızla dönen tekerleğin bir yarısından taze hava, diğeri egzoz havası geçmektedir. Egzoz havasından aldığı ısıyı soğuk olan taze havaya aktarmakta ve soğuyarak tekrar egzoz bölümüne geçmektedir. Bu sayede egzoz havasındaki ısıyı taze havaya taşımaktadır [25].

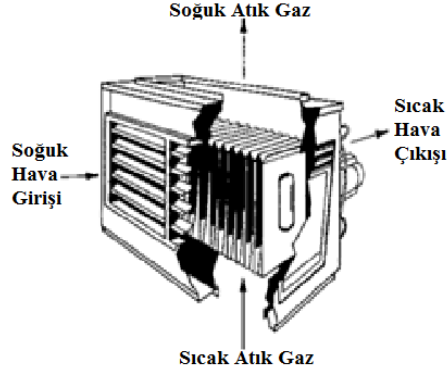


Şekil 3.3 : Isı tekerleği [26].

Isı tekerlekleri yüksek sıcaklıklarda oluşan termal gerilmelerden dolayı düşük ve orta sıcaklık uygulamaları ile sınırlandırılır. İki kanal arasındaki büyük sıcaklık farkları diferansiyel genleşmelere ve büyük deformasyonlara neden olur. Bu da bazı durumlarda seramik tekerlekler yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılabilir. Isı tekerlekleriyle ilgili diğer bir zorluk ise kirleticiler, tekerleğin gözenekli malzemesine nakledileceği için iki gaz akışı arasındaki çapraz kontaminasyon önlenir. Isı tekerleklerinin bir avantajı temiz gaz akışından ısı kazanımının yanı sıra nem kazanımı sağlayacak şekilde imal edilebilirler. Higroskopik (nem kapan) malzemeler ile dizayn edildiğinde nem bir kanaldan diğerine transfer edilebilir. Buda ısı tekerleğini iklimlendirme uygulamaları için uygun kılar. Bunlar ayrıca bazen kazan egzozlarından kazanım elde etmek için kullanılırlar. Fakat genellikle reküperatörler ve ekonomizerler tercih edilir [22].

3.3.1.3 Pasif hava ısıtıcılar

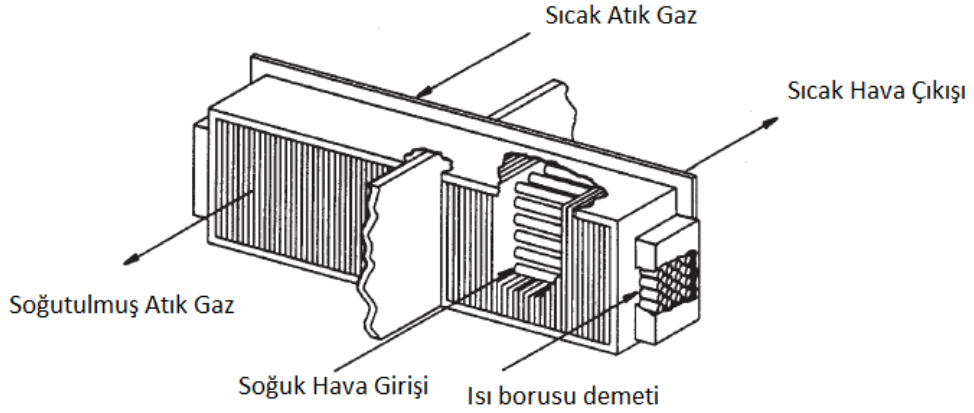
Pasif hava ısıtıcılar, düşük ve orta sıcaklık uygulamaları için gazdan gaza ısı kazanımı yapan cihazlardır. Uygulamaları; fırınları, buhar kazanlarını, gaz türbin egzozlarını v.b. içerir. Ön ısıtıcılar, plaka tipi ve ısı borusu olmak üzere iki türde olabilir. Şekil 3.4'te gösterilen plaka tipi eşanjör, sıcak ve soğuk gaz akışı için kullanılan kanallar ile ayrılmış birbirine paralel tabakalardan oluşur [22].



Şekil 3.4 : Pasif hava ısıtıcı [23].

3.3.1.4 Isı borulu ısı eşanjörü

Isı borulu ısı eşanjörü, kapalı uçlu çok sayıda borulardan meydana gelir. Her bir borunun sıcak ve soğuk uçları arasındaki akış hareketini kolaylaştıran kılcal fitil yapısı bulunur. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi sıcak gazlar ısı borusunun bir ucuna geçer, burada borunun içindeki akışkanı buharlaştırır. Boru boyunca basınç farkları sıcak buharın borunun diğer ucuna hareket etmesine neden olur. Burada buhar yoğunlaşır ve ısıyı soğuk gaza transfer eder. Daha sonra yoğunlaşma kılcal hareket yoluyla borunun sıcak tarafına döngü yapar [22].



Şekil 3.5 : Isı Borulu Isı Eşanjörü [23].

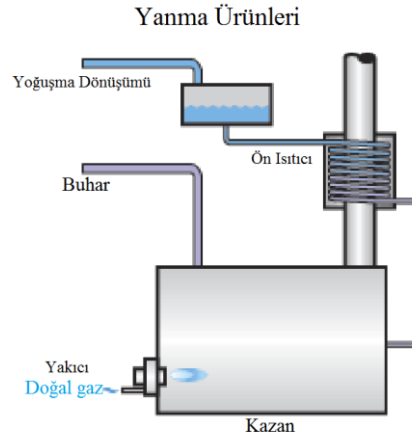
Günümüzde ısı boruları çok çeşitli alanlarda ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik devrelerde bellek üzerindeki çiplerin soğutulmasında, bilgisayarlarda işlemci ve ekran kartlarının soğutulmasında, uzay araçlarında ısı iletim mekanizmalarında, vakum tüplü güneş enerjisi sistemlerinde kullanılmaktadır. Hareketli parçası olmaması, sessiz çalışması, reaksiyon zamanının kısa olması ve çok farklı ortamlarda kullanılabilmesi ısı borularının önemli avantajları olup, yaygın olarak kullanım alanı bulmasında etkili olmaktadır [20].

3.3.1.5 Rejeneratif / Reküperatif brülörler

Bu sistemler ortam havasıyla çalışan brülörlere kıyasla yüksek enerji verimliliği sağlarlar. Tek reküperatif brülör, gövdeden geri geçen baca gazından enerji yakalamak için brülör gövdesinin bir parçası olan ısı alışveriş yüzeyleri içerirler. Tek rejeneratif brülörler, egzoz gazlarını brülör gövde içerisinde ısıya dayanıklı ortama geçirirler ve rejeneratif fırına benzer yapıda çalışırlar. Tipik olarak rejeneratif brülör sistemler daha az ısı değişim alanına sahiptirler. Bu yüzden enerji dönüşümleri daha düşüktür. Fakat düşük maliyetli olmaları ve sonradan güçlendirme kolaylıkları, onları enerji dönüşümü için cazip bir seçenek haline getirmiştir [22].

3.3.1.6 Ekonomizerler

Kanatçıklı borulu ısı eşanjörleri düşük ve orta sıcaklıktaki sıvıları ısıtmak için kullanılan egzoz gazlarından ısıyı geri kazanmak için kullanılırlar. Kazan besleme suyu ön ısıtma, sıcak işlem sıvıları, mekan ısıtma veya evsel sıcak su uygulamalarında kullanılırlar. Kanatçıklı borular ısı transfer oranına ve yüzeyi maksimize eden kanatçık eklenmiş yuvarlak borulardan meydana gelir. Sıvı boru boyunca akar ve ısıyı borular içerisinde akan sıcak gazdan çeker. Şekil 3.6'da besleme suyu ön ısıtması için kullanılan kazan egzoz gazlarının olduğu kanatçıklı boru eşanjör gösterilmiştir [22].



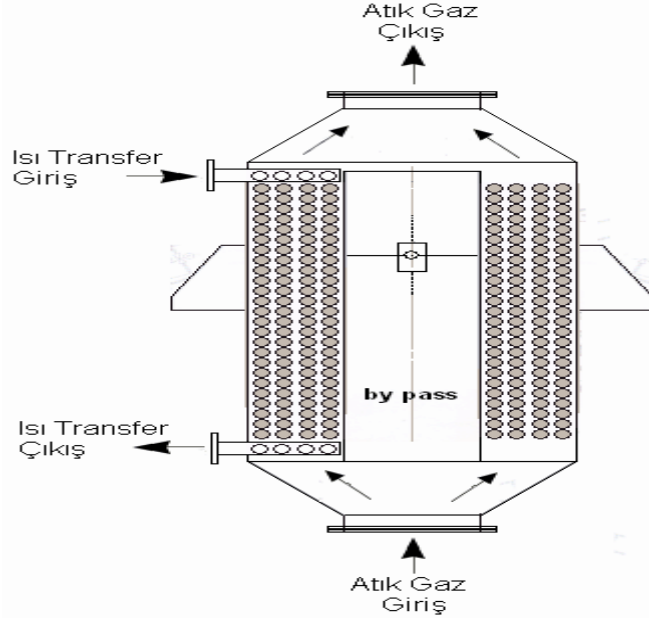
Şekil 3.6 : Ekonomizer [27].

3.3.1.7 Atık ısı kazanları

Atık ısı kazanları sanayide baca gazıyla atılan enerjiden yararlanmada kullanılan yollardan birisidir. Atık sıcak gazın önüne atık ısı kazanı yerleştirilerek atık sıcak gazın enerjisinden yararlanılıp suyun ısıtılması sağlanmaktadır. Bu yolla sıcak su ya da buhar üretilerek çeşitli amaçlarla değerlendirilebilmektedir. Elde edilen sıcak su, ısıtma sisteminde ya da sıcak su kullanım amacıyla değerlendirilebilmektedir. Atık ısı

kazanları içten yanmalı motorlarda ve gaz türbinlerinde de kullanılmaktadır. Türbin çıkışındaki sıcak gaz atık ısı kazanından geçirilerek enerjisi suya aktarılmaktadır [20].

İstenilen seviyelerde buhar üretimi için atık ısı kazanlarının yetersiz kaldığı durumlarda yardımcı brülörler ve art yakıcılar yüksek buhar çıkışı eklemek için sisteme ilave edilebilir [22].



Şekil 3.7 : Atık Isı Kazanı [28].

3.3.2 Termoelektrik teknoloji

Farklı iki metal iletkenlerden meydana gelen kapalı devrede metallerin birleşme noktalarına farklı sıcaklıklar uygulandığında, yüzeyler arasında Jeul, Feuer, Peltier ve Seebeck etkisi oluşur [29].

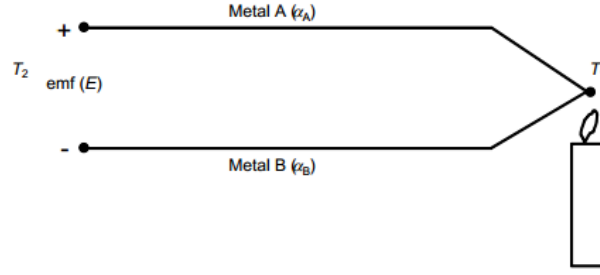
Termoelektrik teknoloji, Seebeck etkisi ile elektrik enerjisi üretimi ve Peltier etkisi ile soğutma gerçekleştiren termoelektrik modülleri inceler. Termoelektrik jeneratörler ve soğutucular termodinamik kanunlara göre çalışan, ısı enerjini elektrik enerjisine, elektrik enerjisini ısı enerjine dönüştüren modüllerden oluşmaktadır. Termoelektrik jeneratörler yarı iletken elemanlarla oluşan modüllerden ısı enerjisini direkt elektrik enerjisine dönüştürür. Termoelektrik soğutucular, ısının soğuk yüzeyden sıcak yüzeye elektrik enerjisini kullanarak taşınmasını sağlayan ısı pompalarıdır. Termoelektrik jeneratör ve soğutucularda p ve n tipi yarı iletken elemanlar kullanılmaktadır. Bu yarı iletkenlerin ısı transferinde farklı tepkiler verdiği bilinmektedir. Isı n tipi yarı iletkenlerde serbest elektronlar ile p tipi yarı iletkenlerde ise boşluklar ile taşınır. Bu farklı yapıdaki yarı iletken elemanlar bir iletken vasıtasıyla

birbirlerine bağlanarak termoelektrik hücreler oluşturulur. Termoelektrik hücrelerin birleştirilmesiyle de termoelektrik modüller oluşturulur [30].

3.3.2.1 Termoelektrik etkiler

Seebeck etkisi

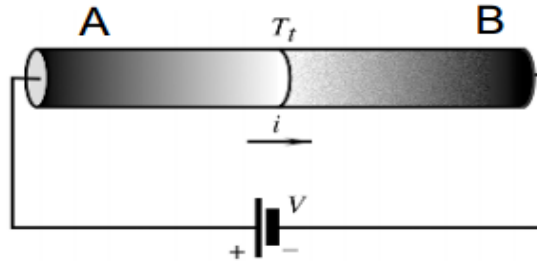
İki farklı metal iletken her iki uçlarından birleştirilirse ve bağlantı noktalarının bir tarafı ısıtılırsa bu termoelektrik devreden ısıtma işlemi devam ettiği sürece elektrik akımı dolaşır [31].



Şekil 3.8 : Seebeck Etkisi Şematik Gösterimi [32].

Peltier etkisi

İki farklı metal iletkenin her iki uçlarından birleştirilmesiyle oluşturulan bir kapalı devreden akım geçirildiğinde, termoelektrik bir modülde yüzeylerden çıkan ısı ile devreden geçirilen akım doğru orantılıdır [33].



Şekil 3.9 : Peltier Etkisi Şematik Gösterimi [34].

Thomson etkisi

Akım taşıyan iletkenin uçları arasında sıcaklık farkı varsa akımın yönüne göre Joule ısı ile birlikte Thomson ısı açığa çıkar. Thomson ısı, akım şiddeti, sıcaklık farkı ve zaman ile doğru orantılıdır [35].

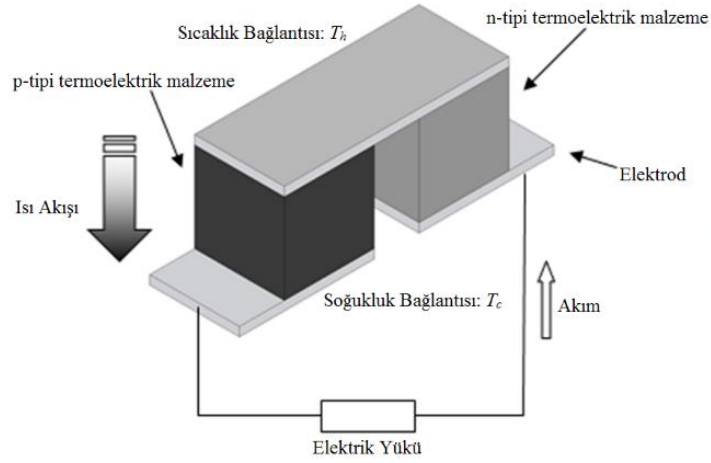
3.3.2.2 Termoelektrik modüller

Termoelektrik modüller, termoelementlerin elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel bağlanmasıyla elde edilebilir. Termoelektrik modüller elektrik üretiminde, soğutma ve ısıtmada kullanılabilir. Termoelektrik soğutucular DC gerilimle çalışırlar.

Termoelektrik soğutucularda akım yönü değiştirilirse soğutma ve ısıtma rejimine geçirilebilir [35].

Termoelektrik jeneratörler

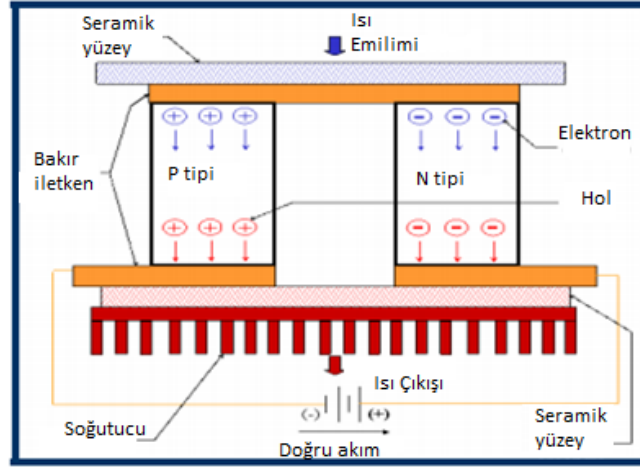
Termoelektrik jeneratörlerin çalışma prensibi seebeck etkisine dayanmaktadır. Termoelektrik jeneratörler termoelektrik modüllerden oluşmaktadır. Termoelektrik jeneratörlerin uçlarına elektrik yükü bağlanması ve yüzeyleri arasında sıcaklık farkının oluşturulmasıyla elektrik gerilimi üretilir ve yükten akım geçişi olur. Termoelektrik jeneratörlerden alınan elektrik gücü yüzeylerdeki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır. Şekil 3.10'da termoelektrik jeneratörlerin temel yapısı gösterilmektedir [36].



Şekil 3.10 : Termoelektrik jeneratörün bileşenleri [37].

Termoelektrik soğutucular

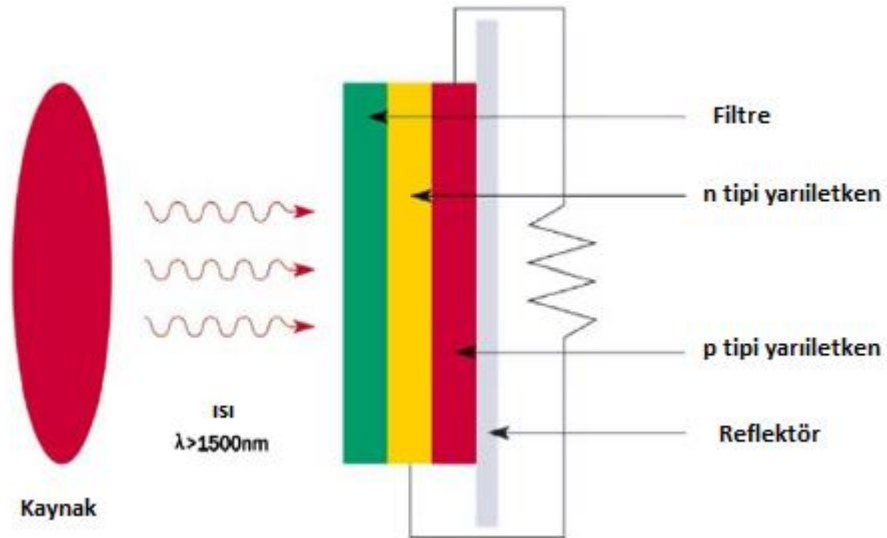
Termoelektrik soğutucuların çalışma prensibi Peltier etkisine dayanmaktadır. Termoelektrik soğutucular da termoelektrik jeneratörler gibi termoelektrik modüllerden oluşmaktadır. İki farklı metalden oluşan devreye doğru akım verildiğinde akımın yönüne göre ters uçlarda sıcaklığın artması veya azalması meydana gelmektedir. Soğutma durumunda akım n tipi yarı iletkeninden p tipi yarıiletkenine doğru gerçekleşmektedir. Akım, düşük enerji seviyesindeki p tipi yarıiletken malzemeden yüksek enerji seviyesine geçmesi durumunda soğutulması istenen ortamdaki ısı çekilerek, yüksek sıcaklıktaki ortama elektronlar vasıtasıyla transfer edilir. Bu sayede ısı bir ortamdaki çekilip başka bir ortama verilmiş olur. Böylece termoelektrik modül ısı pompası görevi yapmış olur. Şekil 3.11'de termoelektrik soğutucuların temel yapısı gösterilmektedir [38].



Şekil 3.11 : Termoelektrik Soğutma Sistemi [39].

3.3.3 Termofotovoltaik teknoloji

TPV sistemleri statik enerji dönüştürücüleridirler. Kızılötesi siyah cisim ışınımını (termal enerji) elektriğe dönüştürürler. Fotovoltaik (PV) cihazlarının gözle görülebilir ışığı (güneş enerjisi) elektriğe dönüştürmesiyle aynı şekilde çalışırlar. Güneş PV'lerinin 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. Tipik bir TPV cihazı dört ana bileşenden oluşur. Bunlar, Şekil 3.12'de görülebileceği üzere, bir termal enerji kaynağı ile ısıtılan bir yayıcı, spektral kontrol için radyatör veya filtre, toplayıcı (PV diyotu) ve reflektördür [40].



Şekil 3.12 : Temel TPV Sistem Şeması [40].

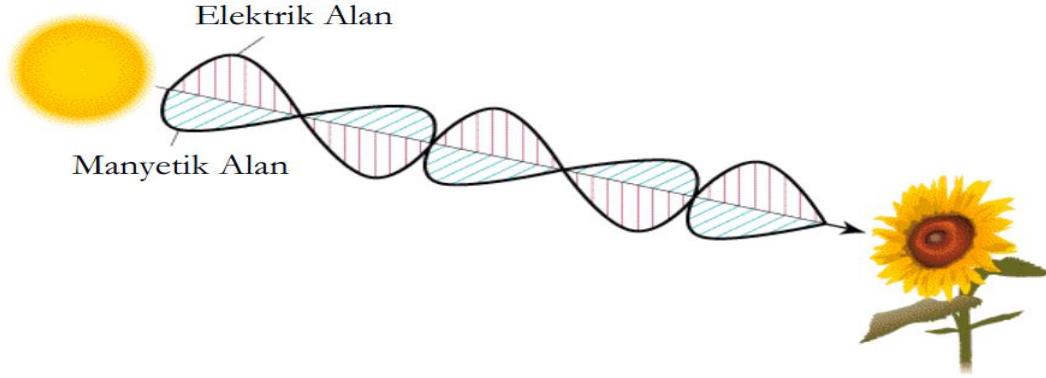
Termofotovoltaik Teknoloji diğer ünitelerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Sistemin çalışma yapısının anlaşılması için ışık, ışınım, foton ve elektromanyetik spektrum

kavramları, siyah cisim ışması ve yarıiletken teknolojisi hakkında ön bilgi edinilmesi gerekmektedir.

4. IŞINIM

Işık, insan gözünün duyarlılığına dayanan ve elektromanyetik spektrum içerisinde, yaklaşık 380-720 nm dalga boyları arasındaki görünür ışınım enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Işınım ise, bir ortam veya maddeden elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar yayılması veya dağılması olayı olarak ifade edilir. Işınım, belirli sıcaklıktaki bütün cisimlerin yüzeylerinden sürekli olarak enerji yayılması durumudur [41].

Herhangi bir cisim tarafından yayılan ışınım, elektromanyetik özellik taşır. Elektromanyetik ışınım uzayda ışık hızı ve dalgalar şeklinde yol alır [41].

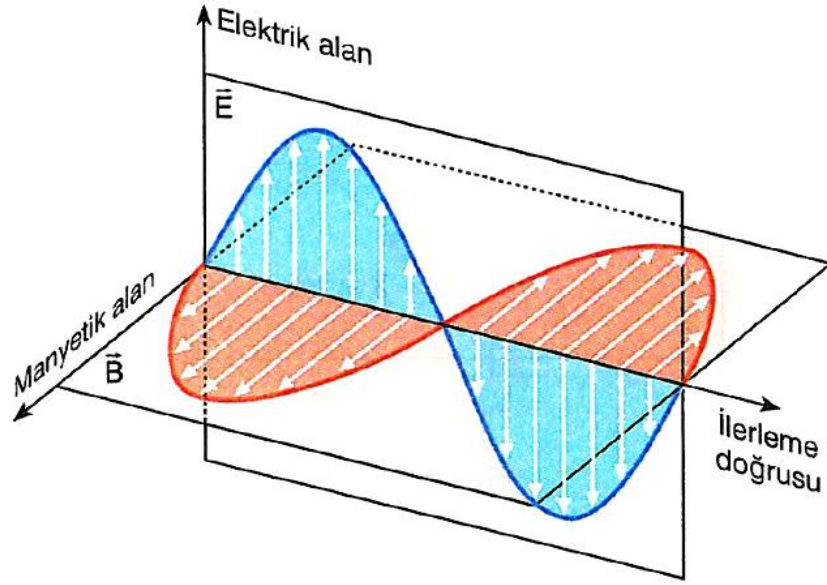


Şekil 4.1 : Işık dalgasının hareketi [42].

Elektromanyetik dalgalar, frekansı ve dalgaboyu ile ifade edilir. Her ışınımın kendine özgü bir dalgaboyu vardır. Işınım dalga boyu ile frekansı arasındaki ilişki denklem 4.1'de gösterilmiştir [41].

$$\text{Frekans (s}^{-1} \text{ veya Hz)} \times \text{Dalga boyu (m)} = \text{Işık hızı (2.99792458x10}^8 \text{ m/s)} \quad (4.1)$$

Elektromanyetik dalgalar, birlikte değişen ve birbirine dik düzlemlerdeki elektrik ve manyetik alanlardan oluşur. Frekans, dalga hareketinin miktarsal bir özelliğidir. Frekans, bir olayın birim sürede hangi sıklıkla kaç defa tekrarlandığını belirtir. Işık dalgalarının hareketinde frekans, belirli bir zaman aralığı süresince, belirli bir noktadan geçen çevrim sayısıdır. Işınımın dalga boyu arttıkça frekansı azalır [41].

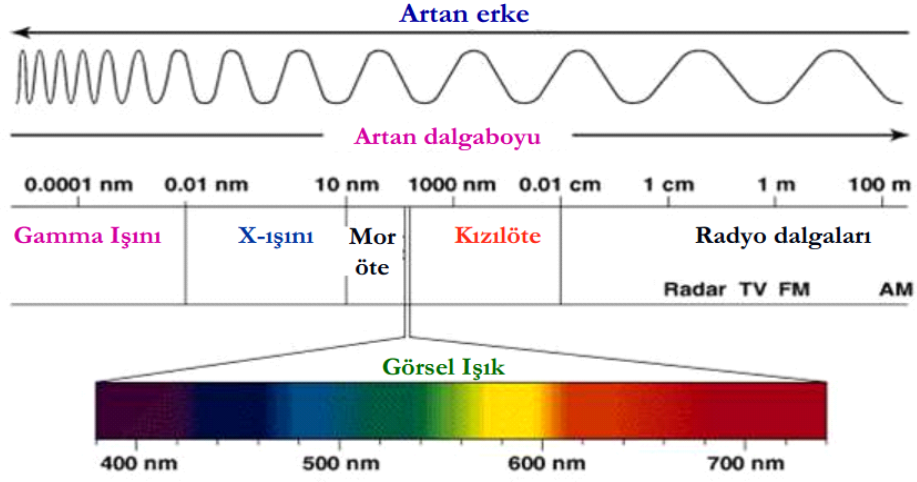


Şekil 4.2 : Işık dalgasındaki elektrik ve manyetik alanların hareketi [43].

4.1 Elektromanyetik Spektrum

Bir elektromanyetik dalganın frekansı ve dalga boyu, bu dalganın kaynağına bağlıdır. Fiziksel dünyamızda, güç iletim hatları tarafından üretilen elektrik dalgalarının çok düşük frekansından, atom çekirdeğinden açığa çıkan gama ışınlarının çok yüksek frekansına kadar değişen değerlerde, çok geniş bir frekans aralığı ile karşılaşırız. Elektromanyetik spektrumu, elektromanyetik dalgaların geniş frekans aralığı oluşturur [41].

Elektromanyetik spektrum bazı dalga boylarında ayrılabilir. İnsan gözü tarafından bu dalga boyu aralıklarından yalnızca, 400 ile 700 nm dalga boyları yer alan dar bir bölge algılanabilir. Dalga boyu aralıkları arasında kesin bir sınır yoktur. İki bitişik bölge arasında bazı çakışmalar olabilmektedir. Dünya yüzeyinden yansıtılan güneş ışınımının başlıca IR bileşenleri, NIR ve SWIR ışınımdır. Bu nedenle, yansıtılan kızılötesi ışınım olarak adlandırılır. MWIR ve LWIR ışınım, ısı kızılotesi ışınımdır. Yeryüzündeki güneş enerjisi ölçümlerinin çoğu, yaklaşık olarak eşit oranlarda enerji içeren görünür ve yakın kızılötesi dalga boylarıyla sınırlıdır [41].



Şekil 4.3 : Elektromanyetik spektrum [42].

İnsan gözünün duyarlı olduğu ışınım dalga boyu; mavi (400 nm), yeşil (550 nm) ve kırmızı (700 nm) aralığındadır. Belirtilen dalga boyu 400-700 nm aralığındaki ışınım bitkiler tarafından fotosentez işleminde etkin olarak kullanıldığında fotosentez için etkin ışınım olarak adlandırılır. Günümüzde etkin ışınım için kuantum akım şiddeti birimi mol/m²s kullanılmaktadır. Fotosentez hızı ışık kalitesine bağlı olarak değişir [41].

Fotosentez ışınımının enerji içeriğinden çok kuantum içeriğine bağlıdır. Etkin ışınımın karasal güneş spektrumundaki toplam enerjiye oranı 0,45'tir. Yeşil bitkilerde gerçekleşen büyüme işlemlerinin bir çoğu 660-730 nm dalga boylarında ışınım soğuran pigment olan pitokromun durumuna bağlıdır. Kırmızı/kırmızı ötesi oranı olarak bilinen spektral ışınım oranı bitki fizyolojisi için önemlidir [41].

4.2 Fotonun Yapısı ve Özellikleri

Foton, ışık enerji paketi veya yumağı olarak tanımlanır. Başka bir deyişle foton, elektromanyetik dalga paketi anlamına gelir. Bir elektromanyetik dalga için, temel enerji birimi foton olarak adlandırılır. Bir fotonun enerjisi (E), ışık hızı (c) ve dalga boyuna (λ) bağlı olarak aşağıdaki gibi belirlenir:

$$E=(hxc)/ \lambda \quad (4.2)$$

Fotonların en belirgin özellikleri şunlardır:

- Durgun kütlesi sıfırdır
- Işık hızıyla giderler
- Etkileşimlere parçacık olarak girebilir
- Sadece dalga olarak yayılır

- Kütlesi sıfır olduğu halde diğer parçacıklar gibi kütle çekiminden bile etkilenir

Fotonlar elektromanyetik kuvveti iletirler. Böylece, iki elektrik yükü fotonları takas ederek etkileşir. Diğer bir deyişle, fotonlar bir yükten yayınlanır, öteki yük tarafından soğurulur. Fiziksel hiçbir büyüklükleri yoktur ve parçalardan oluşan içyapıları olmadığından parçalarına ayrılamazlar [41].

4.3 Siyah Cisim Işınması

0 K sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa sahip bütün cisimler enerji yayar. Yayılan enerjinin büyüklüğünü belirlemek için siyah cisim kavramını tanımak yeterlidir. Bir siyah cisim üç ana özelliklerle karakterize edilir;

1. Gelen radyasyonun %100'ü soğurulur,
2. Herhangi bir sıcaklık ve dalga boyunda olası emisyon maksimumdur,
3. Yayılan enerji bütün doğrultularda aynıdır [44].

İdeal yayıcı olan siyah cisim, sıcaklığın ve dalga boyunun fonksiyonu olarak bütün elektromanyetik spektrumu içerisinde enerji yayar. Siyah cismin dalga boyu başına yaydığı enerji Planck yasası ile aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi verilir:

$$L(T) \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m} \right] = \frac{2hc^2}{\lambda \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (4.3)$$

Burada h Planck sabiti, c ışığın boşluktaki hızı, k Boltzmann sabiti, T ve λ sırasıyla Kelvin derecesinde siyah cisim sıcaklığını ve metre biriminde yayılan enerjinin dalga boyunu ifade eden iki deyişkendir [44].

Bağıntıdan görüldüğü gibi verilen bir sıcaklıkta ışınımın büyüklüğü dalga boyunun fonksiyonu olarak deyişir. Önemli bir özellik de herhangi bir dalga boyunda, yayılan enerjinin büyüklüğü sıcaklıkla orantılı olarak artmasıdır. Bu da sıcak siyah cismin soğuk olandan daha fazla enerji yaydığı anlamına gelir [44].

Planck yasasının diğer bir önemli özelliği ise radyant enerjinin dağılımıdır. Sıcak siyah cisim için kısa dalga boyunda daha fazla radyant enerji yayılır. Bu olay Wien Kayma Yasası ile açıklanabilir:

$$\lambda_{max} [\mu m] = \frac{2897.8}{T[K]} \quad (4.4)$$

Bu eşitlik verilen λ bir sıcaklıkta siyah cisimden yayılan maksimum ışınımın dalga boyunu verir. Buradan görüldüğü gibi siyah cismin sıcaklığı ile dalga boyunun maksimum piki ters orantılıdır [44].

Siyah cisim tarafından yayılan toplam gücü bulmak için Planck yasasının bütün dalga boyları üzerinden integralinin alınması gerekir. Bu hesaplama Stefan-Boltzmann Yasasını verir:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (4.5)$$

Buradan görüldüğü gibi toplam ışınım gücü sadece sıcaklığa bağlıdır [44].

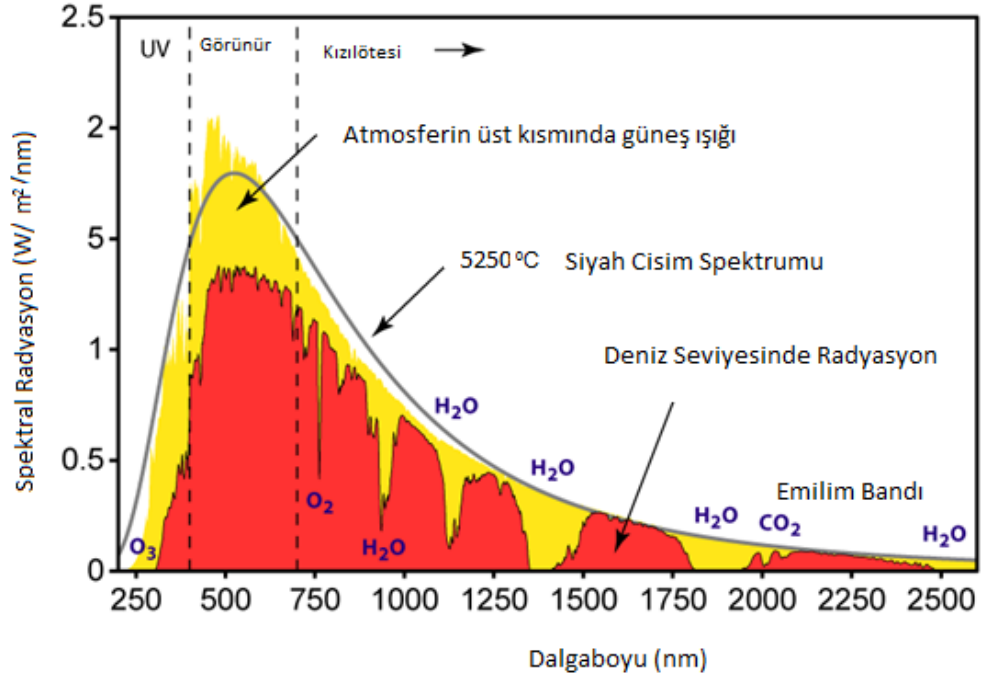
Güneş hücresiyle çalışırken, ilgili spektrum AM0'dır. Bu spektrum 5800 K sıcaklığında siyah cisim ışınımına karşılık gelir. Enerji siyah cisim yüzeyine ortalama dik bir açı ile yüzeyden ayrıldığı için verilen bir doğrultuda ışınımın büyüklüğü toplam ışınımın $\frac{1}{4}$ 'ine eşittir. Düz bir yüzeyden herhangi bir doğrultudaki spektral ışınımın akısı için aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$M(T) \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] = \pi L(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)} - 1 \right)} \quad (4.6)$$

AM0 spektrumunu bulmak için bir faktör daha göz önüne alınmalıdır. Kaynaktan yayılan ışınımın büyüklüğü kaynağa olan uzaklığın karesi ile ters orantılıdır. AM0'ı hesaplamak için kullanılan bu faktör güneşin yarıçapının, güneşle dünya arasındaki ortalama uzaklığa olan oranının karesi ile bulunur. Bu faktör seyreltme faktörü olarak isimlendirilir ve 2.165×10^{-5} değerindedir. AM0 son eşitlik aşağıda verilmiştir:

$$AM0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] = f M(T) = \frac{f(2\pi hc^2)}{\lambda^5 \left(e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)} - 1 \right)} \quad (4.7)$$

Buradaki f seyreltme faktörüdür. Bu eşitliği kullanarak 5800 K'deki siyah cisim spektrumuna seyreltme faktörü eklendiğinde Şekil 4.4'deki gibi bir spektrum elde edilir. Grafikte görüldüğü gibi iki spektrumda şekil, büyüklük ve alan açısından birbirine çok yakındır [44].



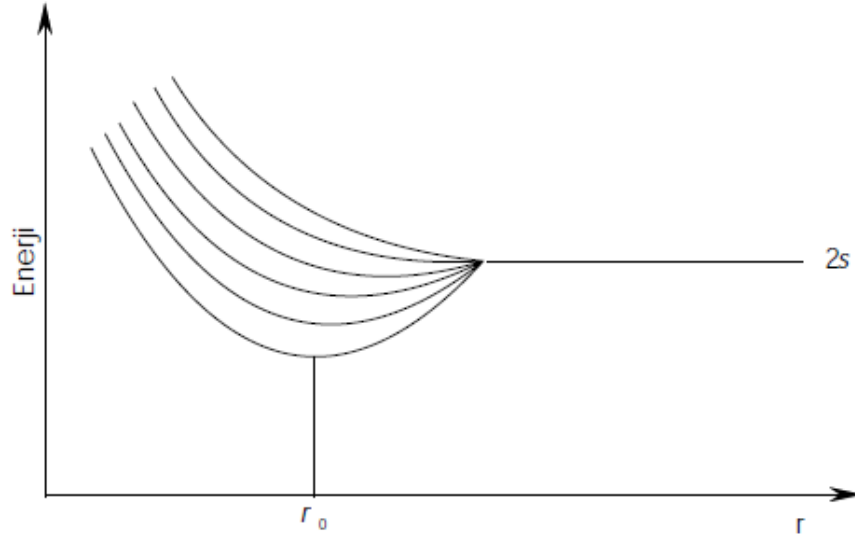
Şekil 4.4 : Solar Radyasyon Spektrumu [45].

Planck dağılım yasasından verilen bir dalga boyunda ışımanın büyüklüğünün sıcaklıkla arttığı göz önüne alındığında, güneşten gelen ışımanın büyüklüğü daha düşük ısı kaynağından gelen ışımanın büyüklüğünden daha büyük olacaktır. Fotovoltaiklerin aksine ışınım kaynağı güneş milyonlarca metre uzaktadır. Fakat termofotovoltaik uygulamalar için kullanılan ısı kaynağı fotovoltaik hücreye çok yakın yerleştirilebilir. Güneş ısı kaynağından daha fazla enerji yaymasına rağmen, kaynak ve fotovoltaik hücre arasındaki uzaklıktan dolayı fotovoltaik hücredeki ışınım yoğunluğu daha fazla olacaktır [44].

5. YARI İLETKENLER

5.1 Katılarda Bant Oluşumu ve Yarıiletkenlerin Bant Yapısı

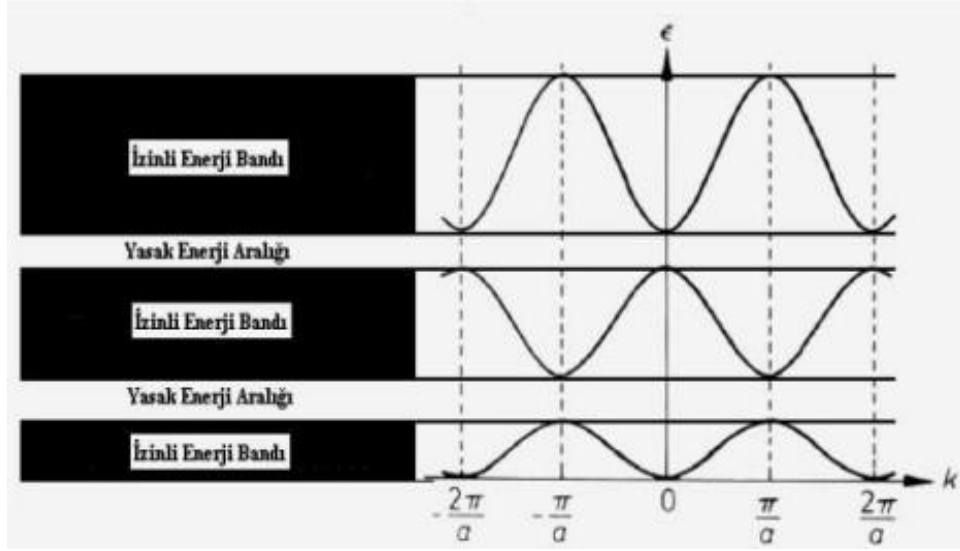
Eş atomlar birbirlerini etkilemeyecek kadar uzak mesafelerde ise, elektronik enerji düzeyleri de birbirinin aynısıdır. Bu atomlar birbirlerine yaklaştırılırsa, atomlardaki elektronların yerleşmeleri için Pauli dışarlama ilkesine göre atomlar etkileşme gösterir. Pauli dışarlama ilkesi, bir atomda aynı kuantum sayılarına sahip iki elektron bulunmadığı gibi, katı içindeki elektronlardan da aynı kuantum sayılarına sahip iki elektron bulunamayacağını ifade eder. Katının büyüklüğünün çok büyük veya çok küçük olması bu ilkeyi etkilemez [46]. Atomlar birbirlerine yeteri kadar yaklaştıklarında atomik enerji düzeylerinde farklılık gösterecek, diğer bir deyişle yarılmalar meydana gelecektir. Bu durum 2s seviyesi için Şekil 5.1’de gösterilmiştir [47].



Şekil 5.1 : Altı Atomdan Oluşan bir Katıda 2s Düzeyindeki Yarılmalar [47].

Atomlar arası mesafe $r = r_0$ iken, 2s enerji düzeylerinin alt ve üst sınırları sabit olarak kabul edilirse ve bu sınırlar arasına maddeye ilave edilecek olan her bir atom için bir enerji çizgisi çizilirse, eşit aralıklı olarak çizilen bu çizgiler birbirlerine çok yaklaşır ve bu çizgiler göz ile ayırt edilemez bir hal alır. Alt alta iki enerji düzeyi arasındaki fark 1×10^{-19} eV'a eşittir ($1 \text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ joule). Birbirlerine bu kadar yakın enerji düzeylerinin bir aradaki haline enerji bandı denir [47].

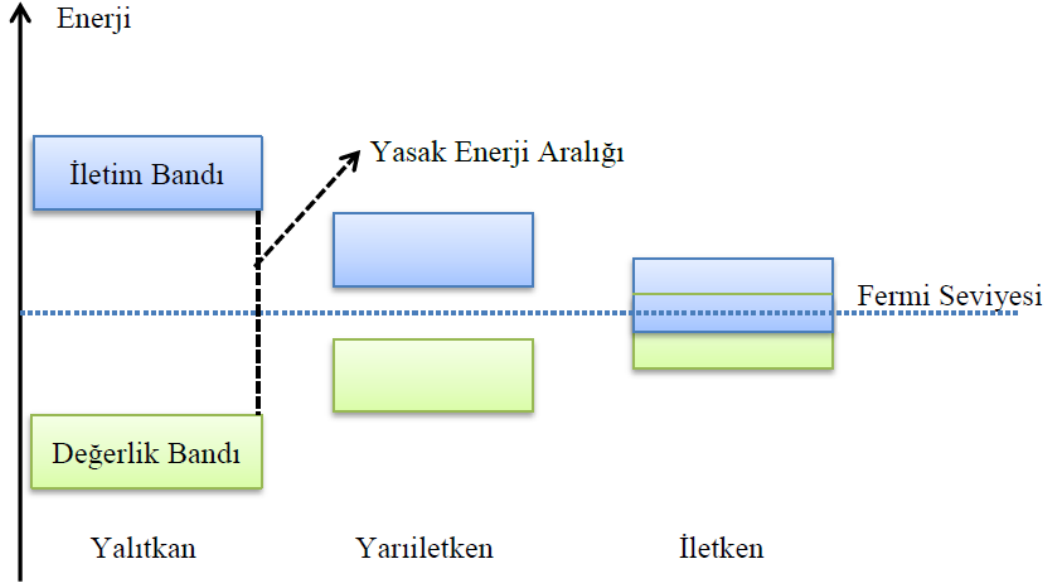
Atomlarda enerji düzeyleri arasında elektron bulunmadığı gibi, katılarda da elektronların buldukları bantlar arasındaki enerji değerlerinde elektronlar bulunamaz. Bir enerji ekseninde elektronların bulunabileceği enerji bölgeleri ve elektronların bulunamayacağı enerji bölgeleri olmak üzere iki farklı yapıda bant bulunmaktadır. Elektronların bulunabileceği enerji bölgelerine izinli enerji bantları, izinli enerji bantları arasında kalan, elektronların bulunamayacağı bölgeye ise izinsiz enerji bantları veya yasak enerji bantları denir [46]. Katılarda atom yapıları genellikle sıkı paketli yapıya sahip olup düzenli örgü biçiminde dizilim sergilerler. Bu durumlar Şekil 5.2'de gösterilmiştir [48].



Şekil 5.2 : Katılarda izinli ve yasak enerji bantları [48].

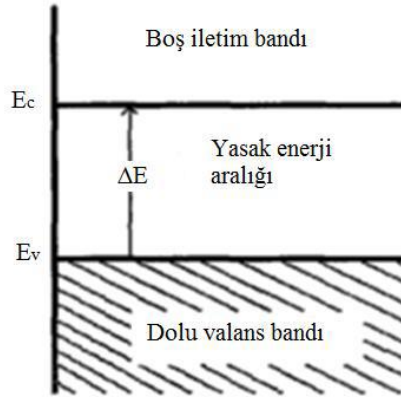
Katılarda, iletim ve valans bandı olmak üzere iki tane bant bulunmaktadır. Atomların dış kabuk elektronlarının bulunduğu banda valans bandı denir. Atomların valans elektronları, kimyasal olaylarda önemli bir rol oynadığı gibi, katıların valans bandı da fiziksel olaylarda büyük öneme sahiptir. Elektronlar geldiklerinde yerleşebilecekleri enerji düzeyleri olan boş banda iletim bandı denir. İletim bandı elektriksel iletimde büyük öneme sahiptir. Bu bant katıya bağlı olarak kısmen dolu veya tamamen dolu olabilmektedir [49].

Katı maddeler elektriksel ve optik özelliklerine göre, iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere üç grupta incelenmektedir. Valans ve iletim bandı üst üste binen katı maddelere iletken, valans bandı tamamen dolu ve iletim bandı tamamen boş olan katı maddelere yalıtkan, valans ve iletim bantları arasındaki yasak enerji aralığı yalıtkanlar kadar geniş olmayan katı maddelere de yarıiletken denir. Şekil 5.3'te katıların bant yapıları gösterilmiştir [50].



Şekil 5.3 : İletkenlik özelliklerine göre katıların bant yapısı [50].

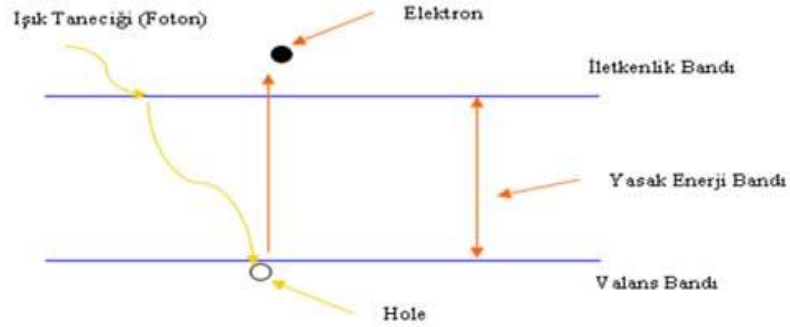
Şekil 5.4'teki Bağlı elektronların bulunduğu valans bandının sahip olabileceği en yüksek enerji seviyesi E_v , iletme katkıda bulunan serbest elektronların sahip olabileceği en düşük enerji seviyesini E_c ile gösterilir. E_c ve E_v enerjileri arasında bulunan $\Delta E = E_c - E_v$ bandı yasak enerji aralığını gösterir. Yasak enerji aralığında elektron bulunmaz. 0K'de yarıiletkenin bütün elektronları valans bandında bulunur. 0K sıcaklığında yarıiletkenlerde elektriksel iletim gözlenmez, malzeme yalıtkan özelliği gösterir. Yani valans bandında bulunan elektronların iletim bandına geçişi gibi bir durum söz konusu değildir [51].



Şekil 5.4 : $T=0K$ 'de bir yarıiletkenin basit bant yapısı [51].

Yarıiletkenlerde valans bandında elektronlar çekirdeğin çekim kuvvetinden dolayı iletim bandına geçemezler. Yarıiletkenlerde yasak enerji bandı ısı, ışık, manyetik etki gibi bir enerjiyle eşit ya da daha büyük bir enerji ile uyarılması durumunda valans bandında bulunan elektronlar iletim bandına geçiş yapar. Elektronların iletim bandına

geçiş i ile valans bantlarında hol denilen boşluklar oluşur. Bir holü valans bandında bulunan bir başka elektron doldurulabilir. Holün başka bir elektron tarafından doldurulması sonucu yeni bir hol oluşur. Bu sayede pozitif yüklü olarak kabul edilen holün valans bandı içerisinde yer değiştirmesi meydana gelir. İletim bandındaki elektronlar ile valans bandındaki hollerin bu hareketleri elektriksel iletimin gerçekteşmesini sağlar. Etki eden enerji miktarının artması elektronlar ve hollerin sayısının artırır [51]. Işık yoluyla uyarılmış bir yarıiletkende hol oluşumu Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5 : Işık yoluyla uyarılmış bir yarıiletkende hol oluşumu [52].

Yarıiletkenlerin valans bandı ile iletim bandı arasında 1eV yakın yasak enerji aralığı bulunmaktadır. Çizelge 5.1'de bazı yarıiletkenlerin 0K ve 300K sıcaklıklarındaki yasak enerji aralıkları gösterilmiştir [53]. Bu değerler malzeme kalitesine göre değişiklik gösterebilir.

Çizelge 5.1 : Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı [53].

Kristal	Yasak Enerji Aralığı	
	0K	300K
Ge	0.74	0.66
Si	1.17	1.11
GaAs	1.52	1.43
GaP	2.32	2.25
AlSb	1.65	1.60
InP	1.42	1.27
GaSb	0.81	0.68

5.2 Yarıiletken Malzemeler

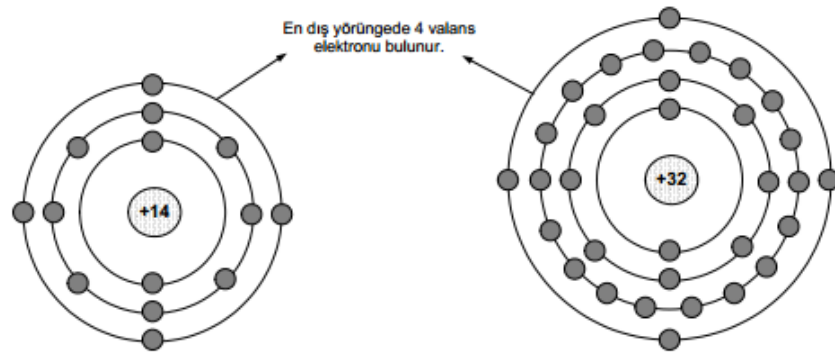
Yarıiletkenler, iletkenlerle yalıtkanlar arasında yer alır. Atomlarının son yörüngelerinde dört elektron bulundurlar. Normal koşullarda yalıtkan gibi davranan yarıiletkenler, ısı, ışık, manyetik etki gibi bir enerji uygulandığında iletken özelliği gösterirler. Doğada element halinde bulunabildiği gibi, elementlerin bileşimi ve yapay büyütme teknikleriyle laboratuvar ortamında da üretilmeleri mümkündür [54]. Periyodik cetvelin yarıiletkenlerle ilgili kısmı Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 : Periyodik cetvelde yarıiletken malzemeler [53].

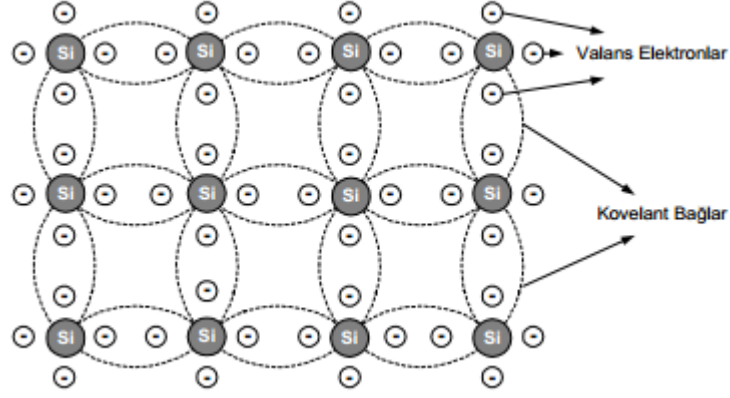
Periyot	II.Sütun	III.Sütun	IV.Sütun	V. Sütun	VI. Sütun
2		B	C	N	O
3	Mg	Al	Si	P	S
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
6	Hg		Pb		

5.2.1 Tek atomlu yarıiletkenler

Elementsel yarıiletkenler aynı tür atomlardan oluşur ve atomları birbirlerine kovalent bağ ile bağlıdır. Kararlı bir atomun son yörüngesinde 8 elektron bulunur. Son yörüngesinde 4 elektron bulunan bir yarıiletken malzemede (silisyum veya germanyum), kendilerine komşu olan atomlar elektron paylaşarak kovalent bağ oluşturur. Kovalent bağ ile bağlanan atomların son yörüngelerinde elektron sayısını 8'e tamamlayarak bir kristal yapı oluşturur [55]. Şekil 5.6.a.ve 5.6.b.'de Si ve Ge atomları ve Si atomlarının oluşturduğu kovalent bağ gösterilmiştir.



Şekil 5.6.a : Silisyum ve Germanyum atomları [56].



Şekil 5.6.b : Saf silisyum kristalin kovalent bağları [56].

5.2.2 Bileşik yarıiletkenler

İki elementten meydana gelen yarıiletkenlere bileşik yarıiletkenler denir. Bileşik yarıiletkenler, elektronegatiflikteki farklılıktan dolayı kristal bağlanma, iyonik ve kovalent bağlanmanın bir kombinasyonudur. Bileşimli yarıiletkenler, ikili, üçlü, dördü bileşimlerden oluşabilir. İki elementin birleşimi olan yarıiletkenler “alaşım yarıiletken” olarak adlandırılır. İkili bileşik yarıiletkenlere “III-V grubu yarıiletkenler” denir. GaAs, InP ve GaP gibi yarıiletkenler buna örnek verilebilir. $Al_xGa_{1-x}As$ yarıiletkeni gibi ikili bileşiğe az miktarda üçüncü bir elementin eklenmesiyle üç bileşimli alaşım yarıiletkenler oluşur. Birçok ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlerin bileşiminden elde edilen yarıiletkenlere dördü bileşimli yarıiletken denir. Bu yarıiletkenlere $In_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$ örnek olarak verilebilir [53].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte yarıiletken bileşimlerin elektronik ve optoelektronik uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Çizelge 5.3’te tek atomlu ve bileşimli yarıiletkenlere örnekler verilmiştir [53].

Çizelge 5.3 : Tek atomlu ve bileşimli yarıiletkenler [53].

Genel Sınıflandırma	Yarıiletkenler	
	Sembol	İsim
Element	Si	Silisyum
	Ge	Germanyum
İkili Bileşikler		
IV-VI	SiC	Silisyum karbit
III-V	AlAs	Alüminyum arsenit
	GaN	Galyum nitrat
	GaP	Galyum fosfat
II-VI	ZnO	Çinko oksit
	ZnS	Çinko sülfür
	CdSe	Kadmiyum selenit
IV-VI	PbS	Kurşun sülfür
	PbTe	Kurşun tellür
Üçlü Bileşim	$Al_xGa_{1-x}As$	Alüminyum galyum arsenit
	$GaAs_{1-x}P_x$	Galyum arsenit fosfat
Dörtlü Bileşim	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	Galyum indiyum arsenik fosfat
	$In_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	İndiyum galyum arsenik nitrat

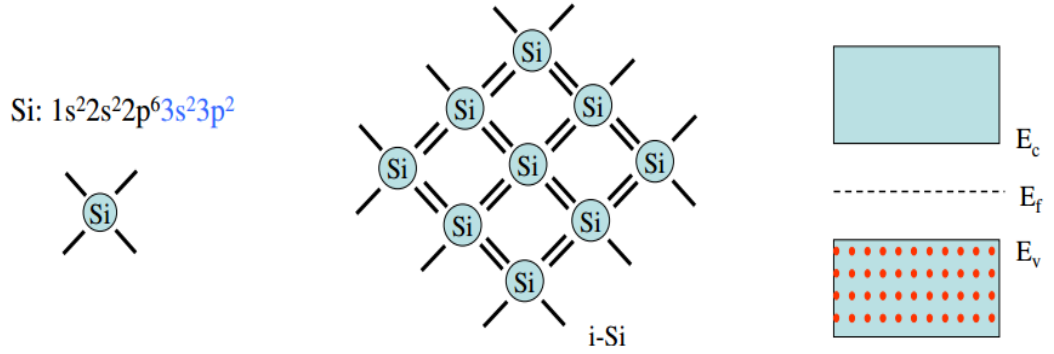
5.2.3 Katkılı yarıiletkenler

5.2.3.1 n-tipi Yarıiletkenler

Serbest elektron konsantrasyonu hol konsantrasyonundan daha fazla olan yarıiletkenlere n-tipi yarıiletkenler denir [51]. n-tipi yarıiletkenler valans elektron sayısı beş olan antimon, arsenik, bizmut ve fosfor gibi bir katkı maddesi, germanyum veya silisyum tabana eklenmesiyle elde edilir [55]. Örneğin, periyodik cetvelde V. Grup elementlerinden olan fosfor (P), dört değerlik elektronuna sahip Silikon atomları ile

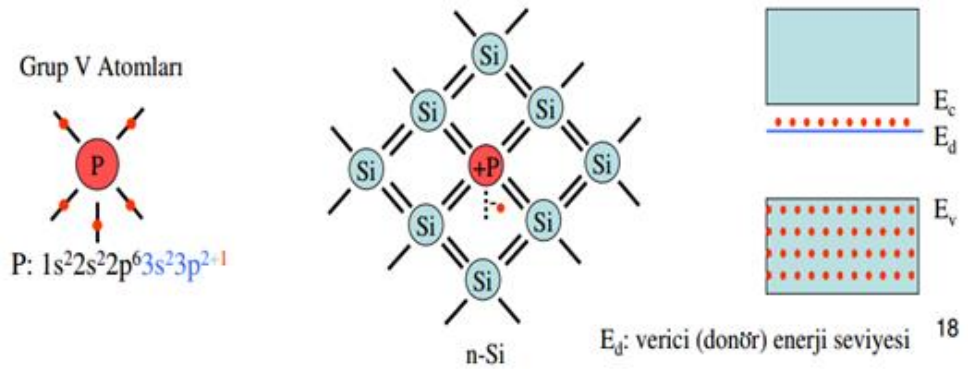
kovalent bağ yaparak, bir elektronunu silikon kristale verir. Her verici atom kristale bir fazlalık elektron kattığı için de kristalde (-) yüklü taşıyıcı yoğunluğu artmış olur [54].

Katkı olarak kullanılan V. Grup elementi donör (verici) olarak adlandırılır. n-tipi yarıiletkenlerde katkı yoğunluğuna bağlı olarak iletkenlik değişiklik göstermektedir. Benzer iki yarıiletken için donör katkı yoğunluğu fazla olanın iletkenliği de daha fazla olur [46].



Şekil 5.7 : Saf filikon atomu bağ oluşumu ve fermi Seviyesi [57].

Fermi enerji seviyesi, bir katıda 0 K sıcaklığında elektronların bulunabileceği en yüksek enerji düzeyini göstermektedir. Şekil 5.7'de silikon atomunun fermi enerji seviyesi mutlak sıcaklıkta valans bandı ile iletim bandının ortasında olduğu görülmektedir. Katkılama miktarına bağlı olarak fermi enerji seviyesi iletim bandına yaklaşır. Silisyum atomunun fosfor atomu ile katkılanması sonucu fermi enerji seviyesi Şekil 5.8'de gösterilmektedir [54].



Şekil 5.8 : Fosfor atomu ile katkılama sonrası n-tipi silikonun fermi enerjisi [57].

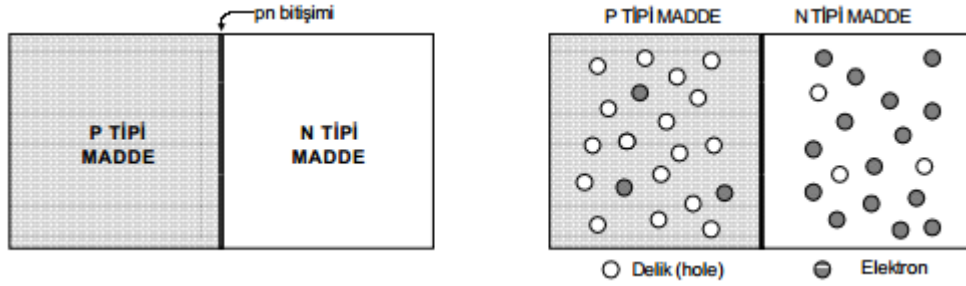
5.3.3.2 p-tipi yarıiletkenler

Saf bir yarıiletkene, kristal yapısını bozmayacak şekilde periyodik tablonun III. sütununda bulunan bir element katkılanması zaman p-tipi yarıiletken oluşur [53]. Örneğin III atomlarından bor, kristali oluşturan dört değerlik elektronuna sahip silikon

atomları ile kovalent bağ yapmak için kristalden bir elektron alır. Kristalden elektron aldığı için bor atomuna alıcı atom denir. Her alıcı atom kristalden bir elektron aldığı için kristalde (+) yüklü deşiklerin yoğunluğu artar. Bu yarıiletkenlerde iletim deşikler aracılığıyla olur [54].

5.3.3.3 p-n eklemi

Şekil 5.9'da yarısı P-tipi, diğer yarısı N-tipi malzemeden oluşan iki bölümlü bir silisyum parçasını gösterilmektedir. Bu temel yapı biçimine "yarı iletken diyot" denir. N bölgesinde daha çok serbest elektron bulunur. Bunlar akım taşıyıcısı olarak görev yaparlar ve "çoğunluk akım taşıyıcısı" olarak ifade edilir. Bu bölgede ayrıca ısı etkisi ile oluşturulan birkaç boşluk (hole) bulunur. Bunlarda "azınlık akım taşıyıcıları" olarak tanımlanır. PN birleşimi elektronik endüstrisinde kullanılan diyotların, transistörlerin ve diğer katkı hal devrelerinin temelini oluşturur [56].

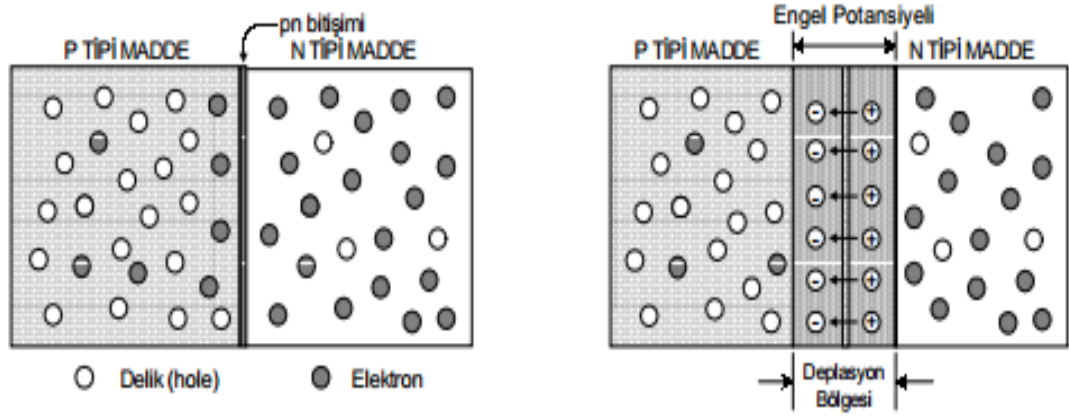


Şekil 5.9 : Basit bir PN yapısının oluşumu [56].

P maddesinde elektron noksanlığı (boşluk), N maddesinde ise elektron fazlalığı meydana gelir. Elektron ve oyukların hareket yönleri birbirine zıttır. Aslında bu iki madde başlangıçta elektriksel olarak nötr haldedir [56].

Şekil 5.10'da PN bileşiminin denge iletimi gösterilmiştir. Birleşim olduğu anda N maddesindeki serbest elektronlar, P maddesinde fazla olan oyuklarla (hol) birleşirler. P maddesindeki fazla hollerin bir kısmı ise, N maddesine gelip elektronlarla birleşirler. Bu durumda P maddesi net bir (-) yük, N maddesi ise (+) yük kazanmış olur. Bu olay gerçekleşirken P maddesi (-) yüke sahip olduğundan N maddesindeki elektronları iter. Aynı şekilde, N maddesi de (+) yüke sahip olduğundan P maddesindeki oyukları iter. Böylece P ve N maddesi arasında daha fazla elektron ve oyuk akmasını engellerler. Yük dağılımının belirtildiği şekilde oluşması sonucunda PN birleşiminin arasında "gerilim seddi" denilen bir bölge oluşur. Bu gerilim seddi 250 °C'de silisyum için engel 0,7 volt, germanyum için 0,3 volt civarındadır. Bu gerilim "diyot öngerilimi" olarak tarif

edilir. Diyot öngerilimi ısıdan etkilenir. Örneğin sıcaklık miktarındaki her 10 °C'lik artış, diyot öngeriliminin yaklaşık 2,3 mV azalmasına neden olur [56].



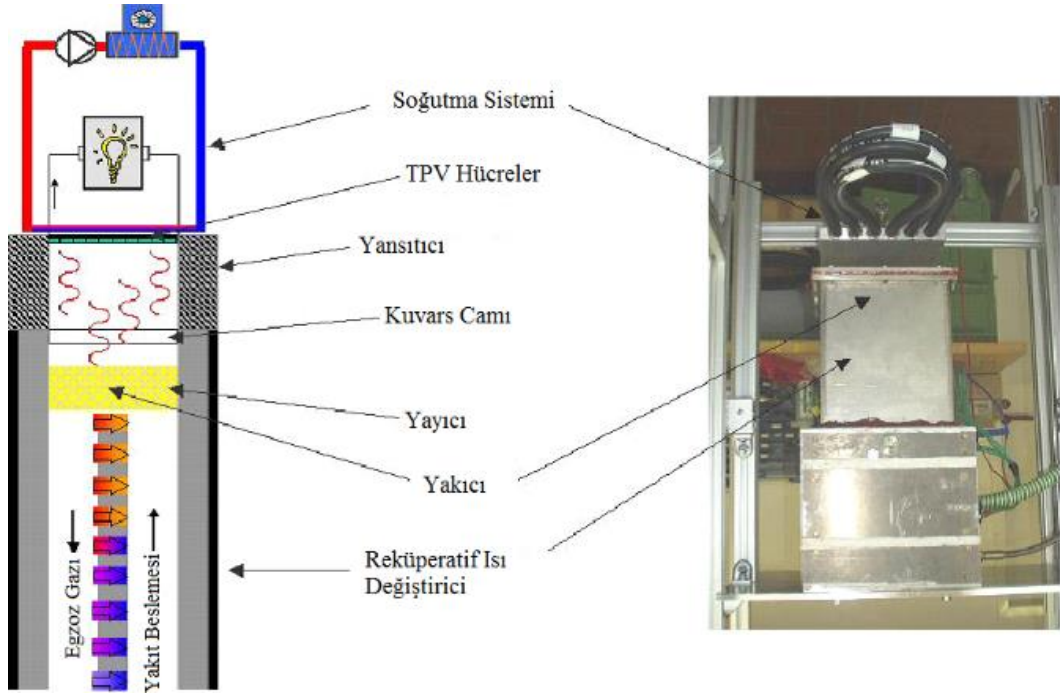
Şekil 5.10 : PN birleşiminin denge iletimi [56].

6. TERMOFOTOVOLTAİK ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinde elektrik enerjisi doğrudan fotovoltaik hücreye yüklenmiş olan fotonlardan sağlanır. Klasik fotovoltaik sistemlerde bu fotonlar güneşten sağlanır, fakat başka foton kaynakları da kullanılabilir. Örnek olarak endüstri ya da konut ısıtma sistemlerindeki yanma ile yayılan fotonları verebiliriz. Fotonlar bir ısı kaynağından sağlanıyorsa bu fotovoltaik enerji dönüşümü Termofotovoltaik Enerji Dönüşümü adını alır, kısaca TPV ile gösterilir [58].

Termofotovoltaik sistem yüksek sıcaklıklardaki cisimlerin radyant enerjisini bir fotovoltaik hücre kullanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Termofotovoltaik (TPV) enerji dönüşümü, çok çeşitli yakıt kullanımının yanı sıra (nükleer, fosil, güneş ışığı, vb.) hiçbir hareketli parçasının olmayışı, sessiz çalışması, bakım maliyetlerinin düşük olması, hafif ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olması gibi birçok ilgi çekici özelliğe sahiptir [58].

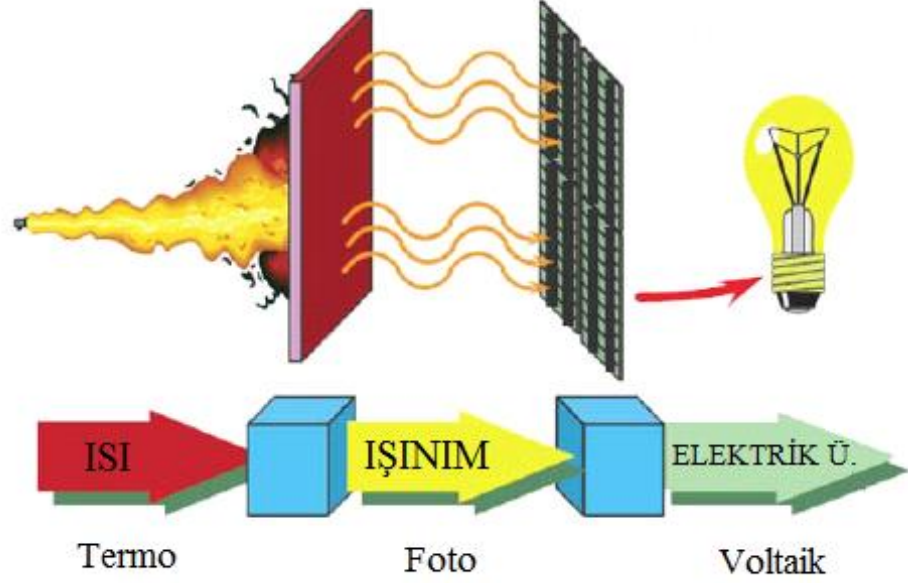
Şekil 6.1'de TPV sisteminin genel şeması ve bir TPV prototipi gösterilmektedir.



Şekil 6.1 : TPV sisteminin şeması ve geliştirilen bir TPV prototipi [59].

6.1 Termofotovoltaik Sistem

Termofotovoltaik sistem genel olarak 3 kısım içerir. Şekilde 6.2'de görüldüğü gibi soldan sağa doğru ısı kaynağı, seçici yayıcı ve termofotovoltaik hücreden oluşur [58].



Şekil 6.2 : Termofotovoltaik Enerji Dönüşümünün Temel Unsurları [58].

6.1.1 Isı kaynağı

Isı kaynağı, TPV sistemlerinde foton elde etmek için kullanılan kaynaklardır. Çalışma sıcaklığı 1000°C ve 1500°C arasında olan ısı kaynakları TPV sistemlerde kullanılabilir. Alevli yanma, radyatif izotop (β -fotonları) ve yoğunlaştırılmış güneş ışığı gibi çeşitli bir çok ısı kaynakları TPV sistemlerde kullanılabilir. Planck yasasına göre ışımının güç yoğunluğu sıcaklığın 4. kuvvetiyle değiştiği için yeterli sıcaklığa ulaşmak oldukça önemlidir. Bu nedenle TPV sistemlerinde kullanılan ısı kaynakları genellikle yanmalı sistemler içerir [58].

6.1.2 Seçici yayıcı

TPV sistemlerinde kullanılan tipik bir ısı kaynağı genellikle Planck yasasıyla tanımlanabilecek bir ışım spektrumu üretir. Alıcı hücreler sadece bant aralıklarının üstünde bir enerjiyi absorbe edebildiği için gelen enerjinin yalnızca küçük bir kısmı elektrik enerjisine dönüşür. Sistem verimini arttırmak için seçici yayıcı kullanımı oldukça önemlidir. Bu seçici yayıcının rolü gelen ısıyı alıcı hassaslığına adapte olabilen bir yayılım spektrumuna çevirmektir [60].

Seçici yayıcı elde etmek için bir metot; kırılma indisi bir, iki ya da üç boyutta ayarlanabilen yapısal malzemelerden olan fotonik kristallerin kullanılmasıdır. Yüksek

erime sıcaklığı, optik ve yapısal özellikleri sebebiyle taban olarak genellikle Tungsten (W) seçilir [58].

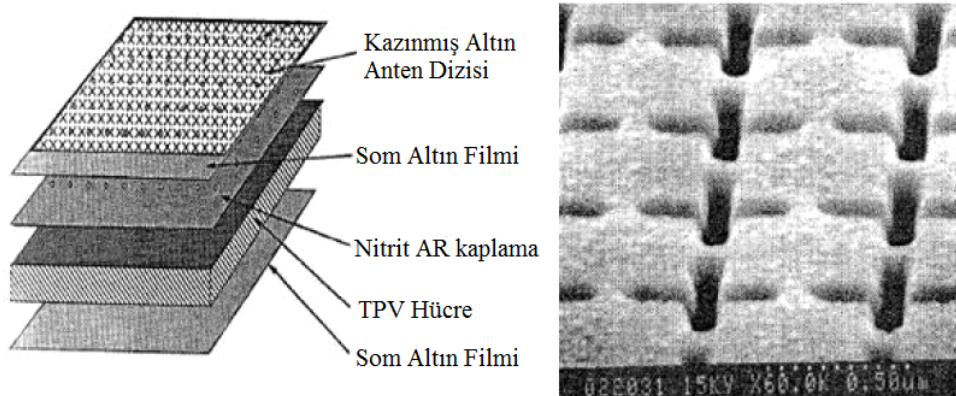
İkinci bir yöntem de Yb_2O_3 ve Er_2O_3 gibi nadir oksitlerden yapılan yayıcıların kullanımınıdır. Yb_2O_3 'ün yayılım bandı 1,1 eV'ta ($\lambda \approx 1000$ nm) iken en yüksek değere sahiptir ve bu da silikon bant aralığıyla uyumaktadır. Er_2O_3 ise 0,8 eV'ta ($\lambda \approx 1500$ nm) iken maksimum değere sahiptir ve bu nedenle Ge veya GaSb alıcı hücreler için oldukça uygun bir malzemedir [58].

İlk pratik seçici yayıcı Nelson ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Bu seçici yayıcıda, Yb_2O_3 fiberleri seramik bir tabakaya kalın bir örtü şeklinde dizilerek bir ısı kaynağının üzerine konulmuştur ve bunun neticesinde Yb_2O_3 fiberlerinin ısınarak seçici spektrumlarını yaymaya başladığı gözlemlenmiştir. Başka bir seçici yayıcı da Holmquist tarafından geliştirilmiştir. Bu seçici yayıcıda ise ipek bir keçe şeklindeki fiberler öncelikle iteryum nitrat ile kaplanmış, reaksiyondan sonra hidroksit oluşturmak amacıyla amonyakla kaplanmış son olarak oksit oluşturmak amacıyla oksijenle ısı tepkimeye sokulmuştur. Bu sistemde oluşan büzülmenin neticesinde meydana gelebilecek çatlama önlemek için ısıtma şekli çok önemlidir [58].

6.1.3 Filtre

Filtre seçici yayıcıyla benzer fonksiyona sahiptir. TPV hücrede elektron hol çifti oluşturmak için yeterli enerjiye sahip olmayan ışınları yansıtmak için kullanılır. Bu ışınım yayıcıya geri yansıtılır. Bu da sistemin verimliliğini mümkün olduğunca yüksek tutmak için yayıcının sıcaklığını korumasına yardımcı olur [44].

Şekil 6.3'te deneysel rezonans altın film filtre gözükmektedir. Filtre amaçlanan spektruma bağlı istenilen frekansta rezonans için ayarlanabilir. Bu filtre için yapılan testler istenilen enerji aralığı için yüksek geçirgenlik ve bunların dışındaki enerjiye sahip ışınlar içinse %98'in üzerinde yansıtma özelliği göstermiştir [44].



Şekil 6.3 : Rezonans Filtre Yapısı [44].

Ayrıca literatürde birçok farklı filtre tipi sunulmuştur. Rahmlow ve arkadaşları Sb_2Se_3/YF_3 ön yüzey sıralı filtresini incelemiştir. Bu filtre yüksek optik özellik sergilemesi için fotovoltaiik hücreye yapıştırılmıştır. Bu filtreler oldukça iyi spektrum kontrolü sağlamasına rağmen tek TPV modülünde dönüşüm verimliliğini %20 oranında arttırmıştır. Bunun nedeninin Sb_2Se_3 malzemesinin $90^\circ C$ sıcaklıkta faz değiştirdiğini (yapısının bozulduğunu) ve bu nedenle yakın kızılötesi bölgesinde yüksek soğurmaya neden olduğu ifade edilmiştir. Bunun sonucunda Rahmlow ve arkadaşları termal kararlılık sağlayan malzemeler kullanmayı önermişlerdir. Sb_2S_3 ve GaTe olan bu malzemeler YF_3 ile birlikte kullanıldığında gelecek vaad eden malzemeler olarak düşünülmüştür. Ayrıca hem yüzey pasifleştirme hemde yansıtmayı önleyici kaplama görevi gören SiO_2/SiN_x çift katmanlı filtreler örnek olarak verilebilir. Camda dalgaboyu $4\mu m$ 'den daha uzun olan fotonları durdurduğu için basit bir seçici filtre olarak kullanılabilir [58].

6.1.4 TPV'deki fotovoltaiik hücreler

Fotovoltaiik hücre yayıcıdan çıkan foton enerjisini absorbe ederek elektrik enerjisi elde etmek için kullanılır. Bu hücrelerde malzemenin yasak enerji aralığı önemli bir rol oynamaktadır. Isı kaynağından elde edilen bu fotonların enerjisi düşük olduğu için bu fotonların fotovoltaiik hücre tarafından soğurulabilmesi için malzemenin yasak enerji aralığı oldukça küçük olmalıdır. Daha kısa dalga boylu fotonların enerjisi malzemenin bant aralığından daha büyük olduğu durumda bu enerjinin bir kısmı elektron hol çifti oluşturur. Geri kalan enerji ise ısı olarak kaybedilir. Bu da filtre kullanımının önemini göz önüne serer [61].

TPV sistemlerinde kullanılacak hücrelerin seçimi büyük önem taşımaktadır. Farklı türdeki foton kaynaklarının (ısı kaynaklarının) kullanılması, yarıiletken malzeme ve fotovoltaiik hücre dizaynında değişiklik yapılmasını gerektirir. Mümkün olduğunca çok fotonun soğurulması gereksinimi düşük bant aralığına sahip malzemelerin kullanımını zorunlu kılar [58].

TPV fotovoltaiik hücreler üzerinde ilk çalışmalar Silikon (Silisyum) ve Germanyum dönüştürücüler üzerinde yoğunlaşmıştır. Fakat bu yarıiletken malzemelerin kalitesi oldukça düşüktür. Bunun sonucunda modern TPV sistemlerin yüksek performans gösteren III-V grubu yarıiletken malzemelerde etkileyici bir ilerleme yaşanmıştır. İnce film dönüştürücülerin gelişimi ile birlikte maliyette potansiyel bir azalma gerçekleştirilebilir [62].

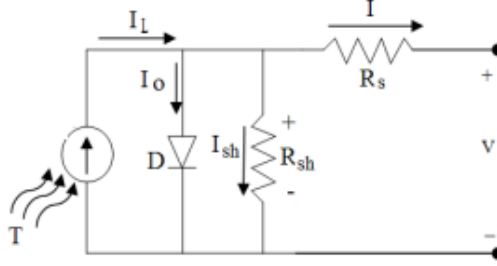
Son zamanlarda yapılan çalışmalar ise GaInAs ve GaInAsSb yarıiletken malzemeler üzerinde yoğunlaşmaktadır. GaInAs bant aralığı $0,7eV$ 'a karşılık gelmektedir ve bu

optimum enerji için oldukça geniştir. Bu nedenle 0,5 eV gibi oldukça dar bant aralığına sahip InGaAs malzemelerin oluşturulması üzerine oldukça büyük çaba sarf edilmektedir. Bunun yanı sıra InGaAsSb gibi dörtlü alaşımlar oluşturularak bu elementlerin oranına bağlı olarak optimum bant aralığı 0,38 eV- 0,7 eV arasında ayarlanabilir. JX Crystal In. Şirketi tarafından ticari olarak üretilen TPV sisteminde yaklaşık 0,7 eV bant aralığına sahip GaSb ikili bileşiği kullanılmıştır. GaSb ideal bir malzeme olmamasına rağmen geniş hacimde ve kolaylıkla oluşturulabilir [62].

7. MATERYAL - METOD

7.1 Termofotovoltaik Model

Bir fotofoltaik sistemin eş değer devresi Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1 : Fotodiyot eşdeğer devresi

Işınım ile orantılı hücre ışık akımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_{Ph} = \int_0^{\lambda_{max}} q \cdot S \cdot F(\lambda) \cdot SR(\lambda) d\lambda \quad (7.1)$$

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 [63]:

$$F(\lambda) = \chi \cdot \frac{2\pi \cdot c}{\lambda^4 \left[e^{\frac{hc}{\lambda kT_{Rad}}} - 1 \right]} \quad (7.2)$$

Burada T_{Rad} TPV radyatör sıcaklığı, h planck sabiti, c ışık hızı, k boltzman 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 [63].

Bir TPV sistemin I-V karakteristiği denklem 7.3'te verilmiştir :

$$I = I_L - I_o \left[e^{\frac{q}{nKT}(V+IR_S)} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (7.3)$$

Burada I_L ışınım ile orantılı akım, R_s seri direnci, R_{sh} paralel direnci temsil eder [41].

Açık devre gerilimi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V_{oc} = \frac{nkT_{cell}}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (7.4)$$

Burada n ideallik faktörü, T_{cell} hücre sıcaklığı, I_0 ters doyum akımını ifade eder.

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{V_{mp}}{kT/q} + 1 \right] \quad (7.5)$$

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

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (7.6)$$

Bir TPV sisteminin verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{inc} - P_{ret}} \quad (7.7)$$

Burada P_{inc} fotovoltaik hücreye gelen ışınım gücünü, P_{ret} hücre tarafından yansıtılan gücü ifade eder [64].

Sistemin enerji verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_e = \frac{P_{cell}}{P_{inc}} \quad (7.8)$$

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

7.2 Atık Isı Kaynakları

Bu çalışmada TPV sistem modellemesi GaSb ve $In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82}$ hücreleri baz alınarak, demir-çelik proseslerinde yüksek sıcaklıklı atık ısı organları ısı kaynağı olarak kabul edilmiş, matematiksel modeli Matlab programında grafiklere dönüştürülmüştür.

Çizelge 7.1 : Atık Isı Kaynakları [22,65]

Isı Kaynağı (K)	
Bazik Oksijen Fırını	1973
Elektrik Ark Fırını	1473
Kok Fırını Gazı	1256

7.3 Hücre Özellikleri

Hesaplamalarda kullanılan 300 K hücre sıcaklığında bazı sabit parametreler Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2 : Sabit Hücre Parametreleri [63,64].

	E_g (eV)	S (cm^2)	χ	N_a (cm^{-3})	N_d (cm^{-3})
GaSb	0.72	1	0.78	5×10^{19}	2×10^{18}
$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$	0.555			2×10^{19}	

Burada E_g enerji bant aralığını, S hücre alanını, X etkin yayılımı, N_a akseptör yoğunluğunu ve N_d donör yoğunluğunu ifade eder [63,64].

TPV sistemlerinde düşük enerjili ısılardan dönüşüm verimi elde etmek zor olduğu için düşük sıcaklıklarda enerji bant aralığı daha düşük hücrenin kullanılması gerekir. Kullanılan hücreler ve kaynak sıcaklıkları Çizelge 7.3'te verilmiştir.

GaSb ve $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücrelerinin bant aralıklarının sıcaklıkla değişimi denklem 7.8 ve 7.9'da verildiği gibi hesaplanır [66].

$$E_g(\text{GaSb}) = 0.7276 - (3.990 \times 10^{-4})(T - 300) \quad (7.8)$$

$$E_g(\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}) = 0.5548 - (1.952 \times 10^{-4})(T - 300) \quad (7.9)$$

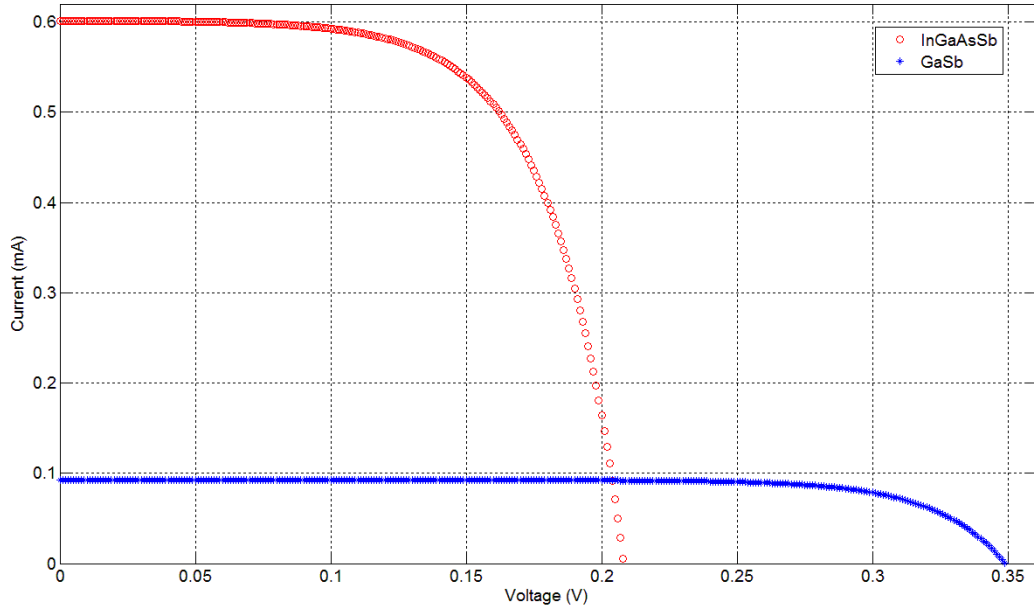
Çizelge 7.3 : Radyatör Sıcaklıklarına Bağlı Hücelere Gelen ve Yansıtılan Güç

	T_{rad} (K)	1256	1473	1973		T_{rad} (K)	1256	1473	1973
	GaSb	P_{ret} (W/m^2)	9.96	17.27		42.90	InGaAsSb	P_{ret} (W/m^2)	8.1
	P_{inc} (W/m^2)	10.97	20.75	66.80		P_{inc} (W/m^2)	10.97	20.75	66.80

8. BULGULAR

8.1 Hücre Tipinin Etkisi

1256 K radyatör sıcaklığında $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ ve GaSb hücrelerinin akım-gerilim karakteristikleri Şekil 8.1'de gösterilmiştir. $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ TPV hücresinin, GaSb TPV hücresine göre enerji bant aralığı düşüktür. Bu sayede diyot akımı aynı radyasyon sıcaklığında daha büyük sonuç vermiştir. Ancak ters doyum akımı GaSb hücresine göre daha büyük olduğu için çıkış geriliminin daha düşük olmasına neden olmuştur. GaSb hücresinin doldurma faktörü büyük olmasına karşın, maksimum gücü düşük olduğundan dolayı $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücresinin verimlilik açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu hücreler laboratuvar ortamında yapıldığı için $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücresinin imalat maliyeti yüksek olması sebebiyle, ekonomiklik açısından GaSb hücresine yönelim daha fazladır.



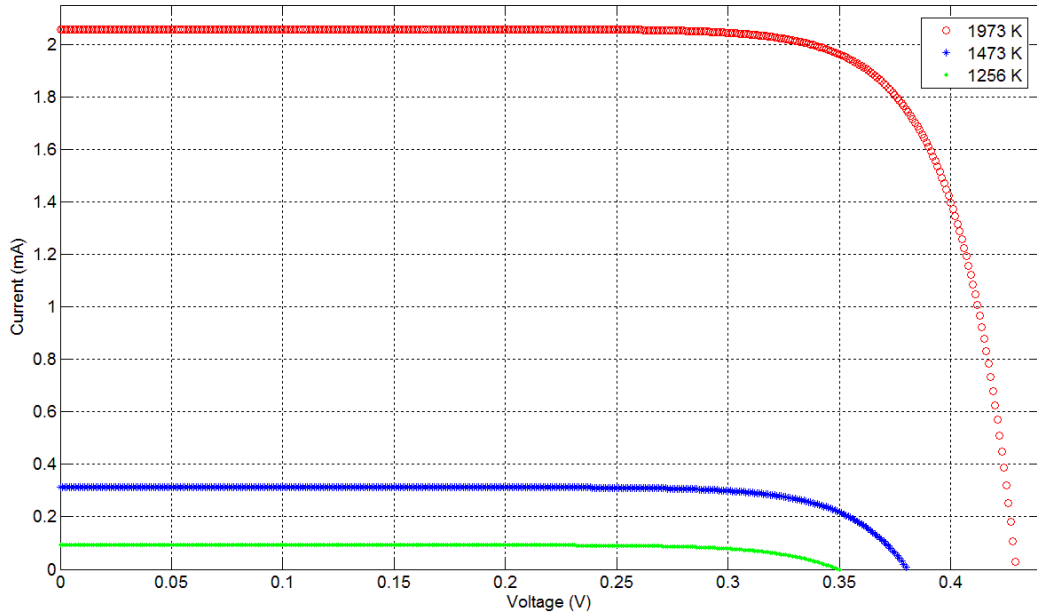
Şekil 8.1 : Hücre Tipine Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri

Çizelge 8.1 : Hücree Tipinin Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi

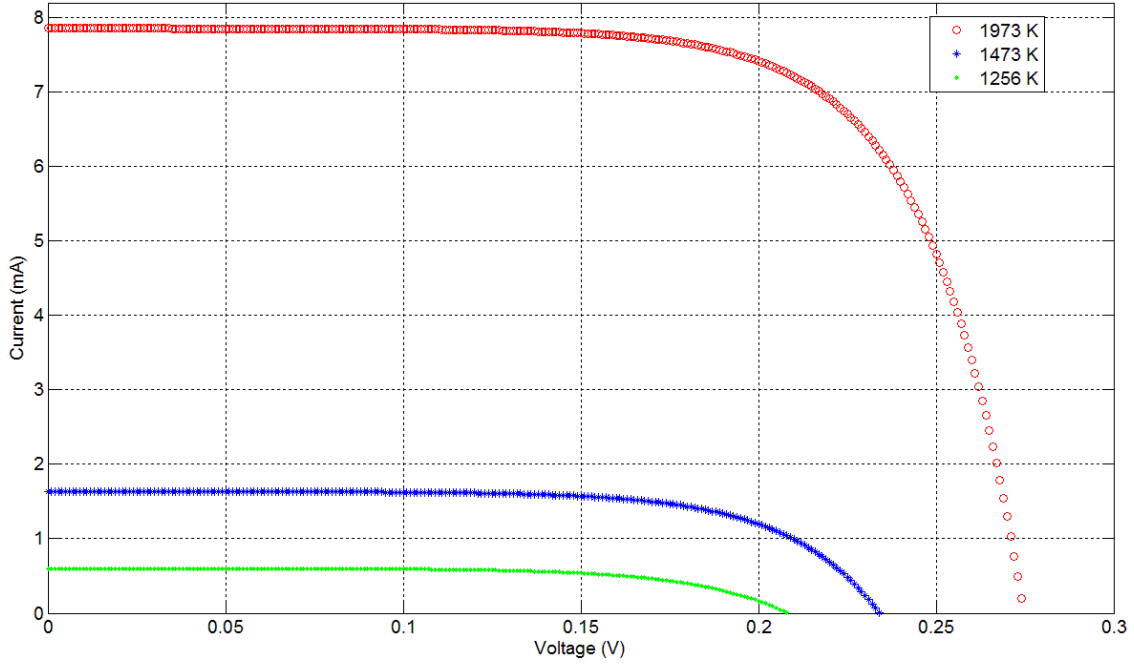
Hücree Tipi	T _{cell} (K)	E _g (eV)	T _{rad} (K)	I _o (A)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (V)	I _m (mA)	V _m (V)	FF (%)	η (%)
InGaAsSb	300	0.555	1256	1.91x10 ⁻⁷	0.602	0.21	0.535	0.15	63.47	27.96
GaSb		0.72		1.26x10 ⁻¹⁰	0.092	0.35	0.086	0.28	74.78	22.17

8.2 Radyatör Sıcaklığının Etkisi

300 K hücre sıcaklığı için demir-çelik prosesleri yüksek sıcaklıklı atık ısı değeri baz alınarak farklı radyatör sıcaklıklarında modellenmiş akım gerilim karakteristikleri Şekil 8.2.a. ve Şekil 8.2.b.'de gösterilmiştir. GaSb hücresinde, radyatör sıcaklığının 1256 K'den 1973 K'e arttığında, verimin %22,2 den %28,6'ya arttığı görülmektedir. Benzer şekilde, In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82} hücresinde radyatör sıcaklığı 1256 K'den 1973 K'e arttığında verim %27,9 dan %44,9'a çıkmıştır. Bu artış fotoakımın ışık akısıyla orantılı olduğundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 8.2.a : GaSb Hücresinde Radyatör Sıcaklığına Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri



Şekil 8.2.b : $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ Hücresinde Radyatör Sıcaklığına Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri

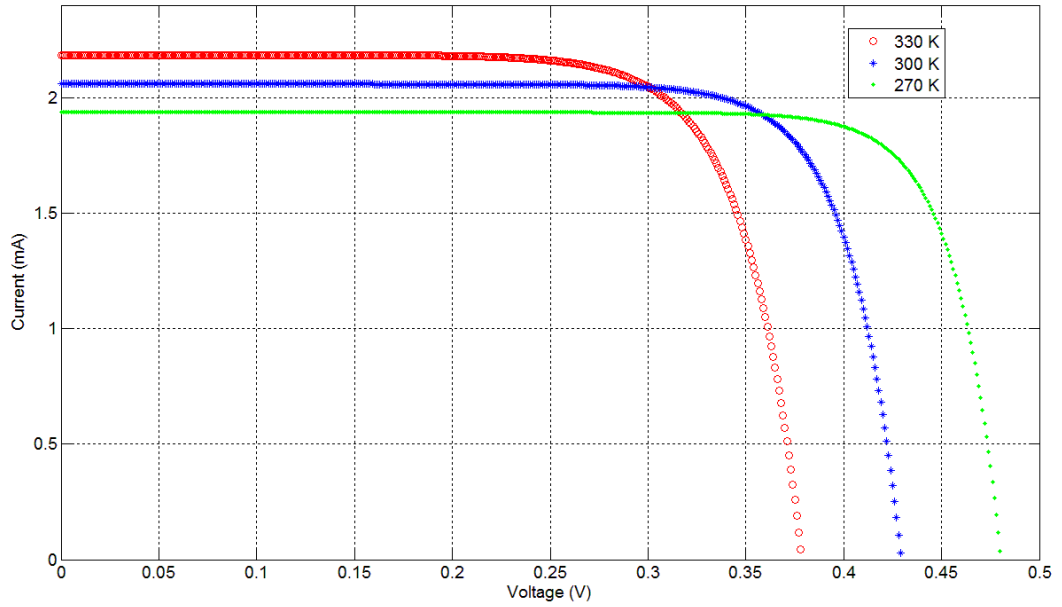
Çizelge 8.2 : Radyatör Sıcaklığının Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi

Hücre Tipi	T_{rad} (K)	E_g (eV)	T_{cell} (K)	I_0 (A)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	I_m (mA)	V_m (V)	FF (%)	η (%)
GaSb	1973	0.72	300	1.26×10^{-10}	2.058	0.43	1.9	0.36	77.29	28.6
	1473				0.313	0.38	0.293	0.31	76.36	26.1
	1256				0.092	0.35	0.086	0.28	74.78	22.2
InGaAsSb	1973	0.555		1.91×10^{-7}	7.855	0.275	7.2	0.211	70.33	44.9
	1473				1.634	0.234	1.5	0.175	68.65	34.9
	1256				0.602	0.21	0.535	0.15	63.47	27.9

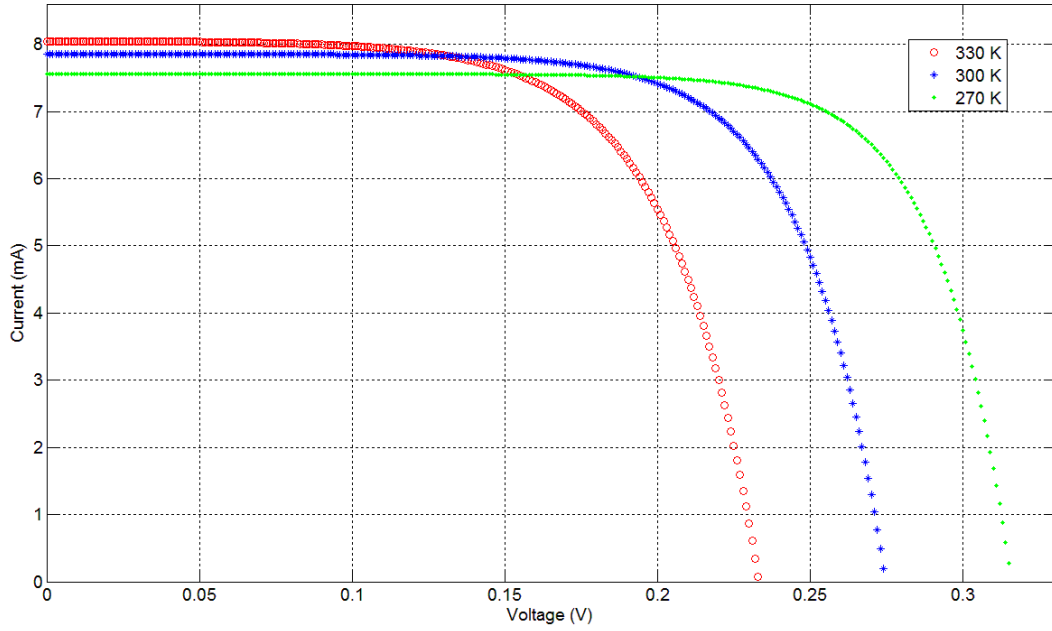
8.3 Hücre Sıcaklığının Etkisi

300 K'de bir TPV hücresini çalıştırmak gerçekçi olmadığı için artırılmış çalışma sıcaklığındaki dönüştürücü performansı ve hücrenin soğutulması durumundaki performansları kontrol edilmiş, sonuçlar Şekil 8.3.a ve 8.3.b'de verilmiştir. Hesaplamalarda 1973 K radyatör sıcaklığı GaSb ve $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücreleri kullanılmıştır. Hücre sıcaklığındaki artış bant aralığı genişliğinde azalmaya neden

olmuştur. Dolayısıyla ters doyum akımı artmıştır. Bu da açık devre geriliminde bir düşüşe neden olmaktadır. Hücre sıcaklığının düşürülmesi, bant aralığı genişliğinin artmasına ve ters doyum akımının düşmesine neden olmuştur. Bu da açık devre gerilimin artmasını sağlamaktadır. Düşük radyatör sıcaklığında kısa devre akımındaki zayıf artışa ve yüksek radyatör sıcaklığındaki kısa devre akımındaki yüksek artışa işaret eden taşıyıcı üretim mekanizması çok önem arz etmektedir. Hücre sıcaklığı arttıkça ters doyum akımındaki artışa takiben doluluk faktörü düşmüştür. GaSb hücresinde 330 K hücre sıcaklığından 270 K hücre sıcaklığına inildikçe verimin %25,1'den %30,9'a, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücresinde %36,3'ten %52,7'ye çıktığı görülmüştür. Hesaplamalarda kullandığımız 270 K sıcaklığı ancak ortamın soğutulması ile yakalayabiliriz. Verim artışının soğutma için harcanan enerjiyi karşılamaması durumunda enerji yönü negatif olacaktır.



Şekil 8.3.a :GaSb Hücresinde Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri



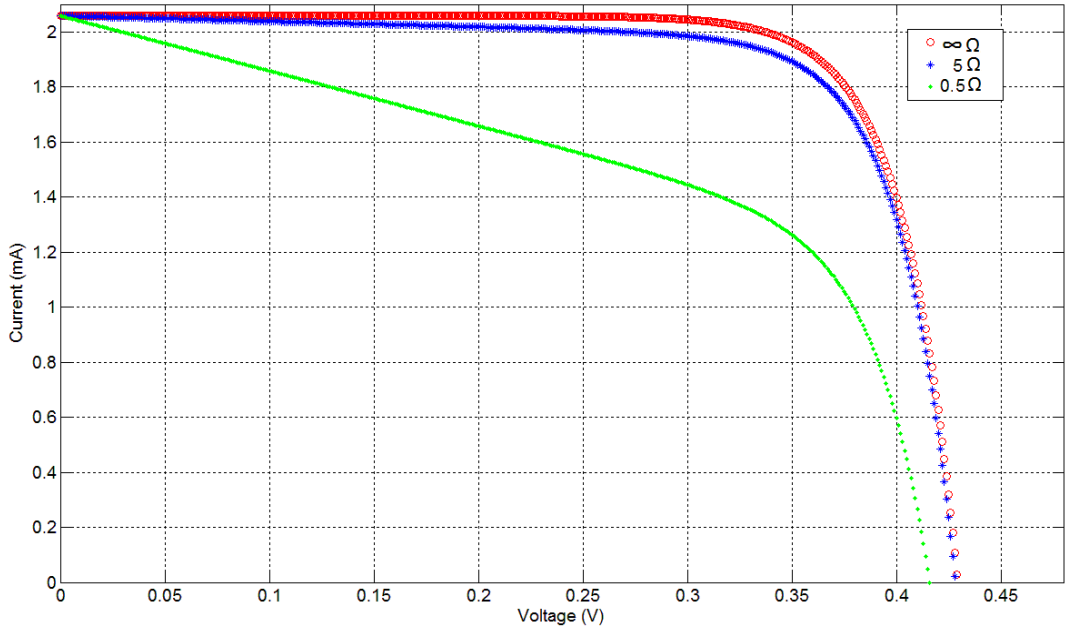
Şekil 8.3.b : $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ Hücresinde Hücre Sıcaklığına Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri

Çizelge 8.3 : Hücre Sıcaklığının Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi

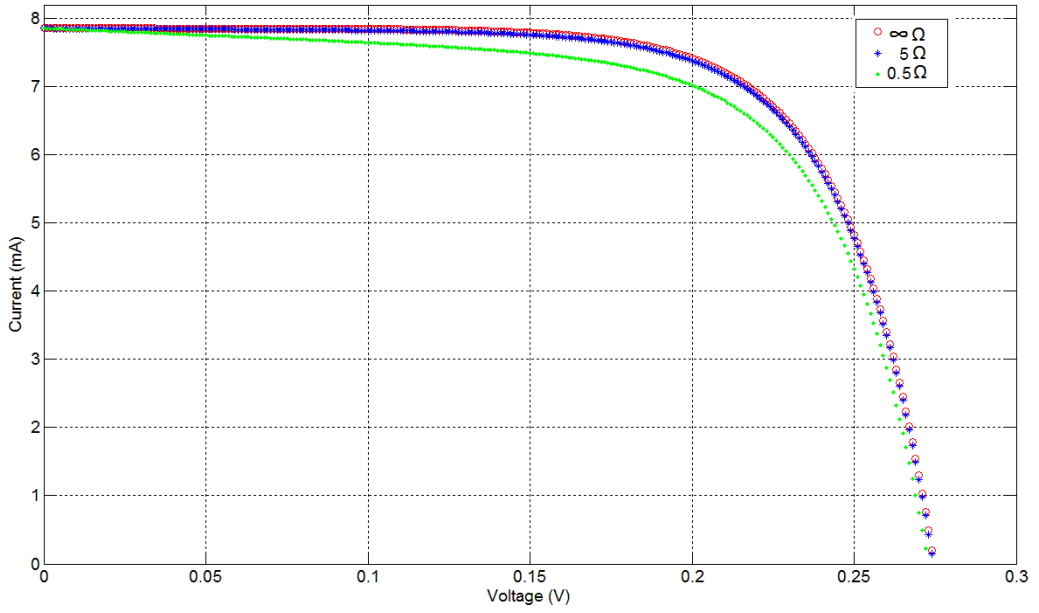
Hücre Tipi	T_{rad} (K)	E_g (eV)	T_{cell} (K)	I_o (A)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	I_m (mA)	V_m (V)	FF (%)	η (%)
GaSb	1973	0.71	330	3.61×10^{-9}	2.185	0.38	2.0	0.30	72.26	25.1
		0.72	300	1.26×10^{-10}	2.058	0.43	1.9	0.36	77.29	28.6
		0.74	270	2.08×10^{-12}	1.936	0.48	1.8	0.41	79.42	30.9
InGaAsSb		0.549	330	2.21×10^{-6}	8.046	0.234	7.2	0.170	65.01	36.3
		0.555	300	1.91×10^{-7}	7.855	0.275	7.2	0.211	70.33	44.9
		0.560	270	9.60×10^{-9}	7.557	0.316	7.0	0.254	74.46	52.7

8.4 Paralel Direncin Etkisi

300 K hücre sıcaklığında, 1973 K radyatör sıcaklığında paralel direnç değişimlerinin akım-gerilim karakteristikleri üzerindeki etkisi hesaplanmış, sonuçlar Şekil 8.4.a ve Şekil 8.4.b'de gösterilmiştir. Paralel direncinin azalması, I-V eğrisi altında kalan alanın azalmasına, dolayısıyla hücreden elde edilen çıkış gücünün azalmasına neden olmuştur. Paralel direncin değişimi kısa devre akımında ciddi bir değişime neden olmazken, azalması durumunda açık devre geriliminin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. GaSb hücresinde paralel direncin $\infty \Omega$ dan 0.5Ω düşüşünde verimin %28,6'dan %18,7'ye, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücresinde %44,9'dan %42,3'e düştüğü gözlenmektedir. Ayrıca sonuçlardan görüyoruz ki $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ hücresi GaSb hücresine kıyasla paralel direnç değişiminden oransal olarak daha az etkilenmektedir.



Şekil 8.4.a : GaSb Hücresinde Paralel Dirence Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri



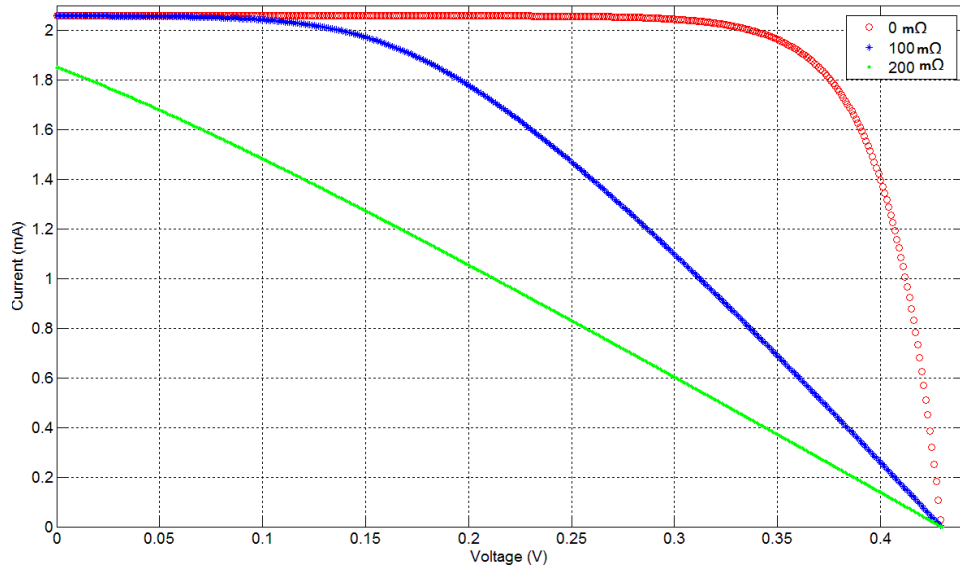
Şekil 8.4.b : $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ Hücresinde Paralel Dirence Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri

Çizelge 8.4 : Paralel Direncin Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi

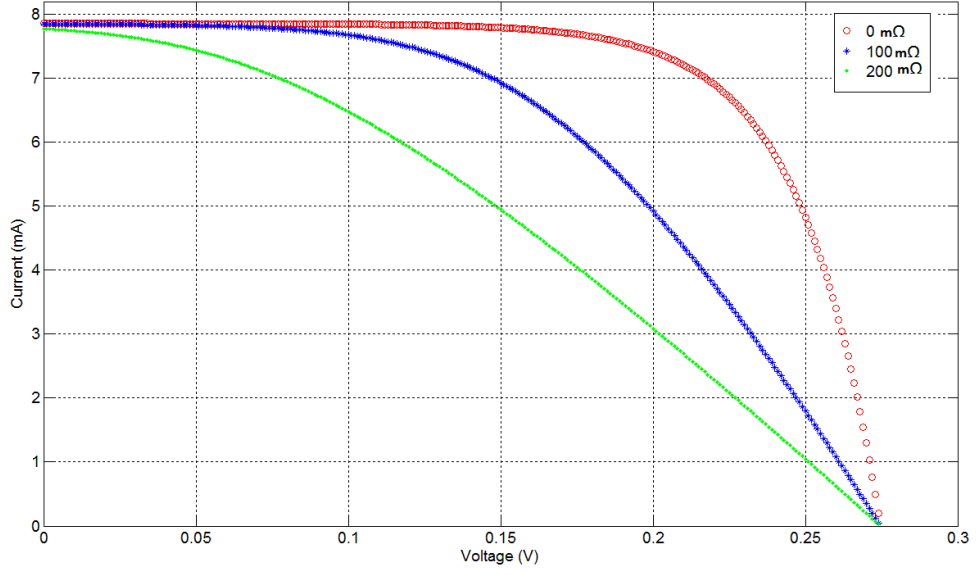
Hücre Tipi	T _{cell} (K)	E _g (eV)	T _{rad} (K)	I _o (A)	R _{sh} (Ω)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (V)	I _m (mA)	V _m (V)	FF (%)	η (%)		
GaSb	300	0.72	1973	1.26x10 ⁻¹⁰	∞	2.058	0.430	1.90	0.360	77.29	28.6		
					5		0.428	1.86	0.358	75.60	27.9		
					0.5		0.415	1.34	0.334	52.40	18.7		
InGaAsSb		300		0.555	1973	1.91x10 ⁻⁷	∞	7.855	0.275	7.2	0.211	70.33	44.9
							5		0.274	6.70	0.224	69.73	44.4
							0.5		0.273	6.64	0.215	66.57	42.3

8.5 Seri Direncin Etkisi

300 K hücre sıcaklığında, 1973 K radyatör sıcaklığında seri direnç değişimlerinin akım-gerilim karakteristikleri üzerindeki etkisi hesaplanmış, sonuçlar Şekil 8.5.a. ve Şekil 8.5.b. 'de gösterilmiştir. Fotovoltaik hücrenin seri direnci artması neticesinde I-V eğrisi altında kalan alanın azalmasına, dolayısıyla hücreden elde edilen çıkış gücünün azalmasına neden olmuştur. GaSb hücrelerinde paralel direncin 0 mΩ dan 200 mΩ'a attığında verimin %28,6'dan %8,8'e, In_{0,2}Ga_{0,8}As_{0,18}Sb_{0,82} hücrelerinde %44,9'dan %22,0'a düştüğü gözlenmektedir. Ayrıca sonuçlardan görüyoruz ki In_{0,2}Ga_{0,8}As_{0,18}Sb_{0,82} hücreleri GaSb hücrelerine kıyasla seri direnç değişiminden verim kaybı açısından oransal olarak daha az etkilenmektedir.



Şekil 8.5.a : GaSb Hücrelerinde Seri Dirence Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri



Şekil 8.5.b : $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ Hücresinde Seri Dirence Bağlı Akım Gerilim Karakteristikleri

Çizelge 8.5 : Seri Direncin Fotovoltaik Parametreler Üzerindeki Etkisi

Hücre Tipi	T_{cell} (K)	E_g (eV)	T_{rad} (K)	I_0 (A)	R_s (mΩ)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	I_m (mA)	V_m (V)	FF (%)	η (%)
GaSb	300	0.72	1973	1.26×10^{-10}	0	2.058	0.43	1.9	0.36	77.29	28.6
					100	2.058		1.56	0.28	49.36	18.3
					200	1.850		0.96	0.22	26.55	8.8
InGaAsSb	300	0.555	1973	1.91×10^{-7}	0	7.855	0.275	7.20	0.211	70.33	44.9
					100	7.851		6.22	0.172	49.55	31.7
					200	7.776		5.02	0.148	34.74	22.0

8.6 Türkiye Demir-Çelik Sektörü Atık Isı Enerji Potansiyeli ve TPV Sisteminin Uygulanması

2011 yılı Türkiye demir-çelik sektörüne ait düşük, orta ve yüksek sıcaklık değerlerinde atık ısı salınımı yapan enerji kaynakları, bu kaynakların enerji tüketimindeki payları ve kurtarılabilir atık ısı enerjisi potansiyeli Çizelge 8.6'da verilmiştir.

Çizelge 8.6 : 2011 Yılı Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Düşük, Orta ve Yüksek Sıcaklık Kademelerindeki Atık Isı Enerjisinin Geri Dönüşüm Potansiyelleri [67].

Demir-çelik sektörü	T _p Sıcaklık Sınıfı	T _p	Elektrik	Petrol	Elektrik Tüketim	Petrol Tüketimi	Atık Enerji (Elektrik)	Atık Enerji (Petrol)	Toplam Düşük Sıcaklıklı Atık Isı	Toplam Orta Sıcaklıklı Atık Isı	Toplam Yüksek Sıcaklıklı Atık Isı	Toplam Atık Enerji
		°C	(%)	(%)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)
	Düşük	45	4.2	0	3.05		0.00	0.00	0.00			147.29
	Orta	0	0	0			0.00	0.00		0.00		
	Yüksek	983	95.8	100	69.73	252.75	20.92	126.38			147.29	

TPV sistemlerin bu atık enerji potansiyeline uygulanması durumunda yıllık bazda üretebileceği enerji değerleri, enerji verimleri ve toplam sistem kurulum alanı hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 8.7’de verilmiştir.

Çizelge 8.7 : Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Atık Isı Enerjilerinin TPV Sistemleri ile Geri Kazanımı ve Verimliliği

Hücre Tipi	Hücre Sıcaklığı	Kurtarılabılır Enerji Potansiyeli	Sistem Alanı	TPV Enerji Üretimi	Enerji Verimi
	(K)	(TJ)	(m ²)	(GJ)	η _e (%)
GaSb	300	11.44	33540	233.4	2.04
InGaAsSb				836.3	7.31

1256 K radyatör sıcaklığında, 300 K hücre sıcaklığında ve ideal koşullarda TPV sistem verimlerinin, GaSb hücrede %22,17 ve In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82} hücrede %27,96 olduğunu hesaplamıştık. 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. Demir-çelik sektörden yıllık TPV sistemleri ile kurtarılabılır enerji potansiyeli 11,44 TJ, enerji verimliliği GaSb hücreli TPV sistemlerinde %2,04 ve In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82} hücreli TPV sistemlerinde %7,31 olarak hesaplanmıştır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada TPV enerji dönüşüm sistemi matematiksel modeli üzerinden Matlab kullanılarak bir çalışma yapılmış, sonuçlar grafikler ve tablolar halinde gösterilmiştir. TPV enerji dönüşüm sistemlerinde demir-çelik proseslerinden salınan yüksek sıcaklıklı atık ısı kaynaklarının, farklı hücre yapılarının, farklı hücre sıcaklıklarının ve diğer hücre parametrelerinin enerji dönüşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

$In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82}$ hücresi aynı kaynak sıcaklığında GaSb hücresi ile kıyaslandığında verimliliği daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun, ters doyum akımının ve enerji bant aralığının düşük, kısa devre akımının yüksek olmasından kaynaklandığı görülmüştür.

Farklı radyatör sıcaklığının akım-gerilim karakteristikleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, her iki hücre tipinde de maksimum güç ve hücre verimlerinde önemli derecede artış gözlemlenmiştir. Verimdeki artış, ışınım enerjisi ile akımın orantılı olarak artmasına bağlı olarak açık devre gerilimin yükselmesi ve doluluk oranlarının artması ile gerçekleşmiştir.

Işımada seçici yayıcı ve filtreden geçen dalga boyu büyük ışımaların veya çalışma ortamının sıcaklığının oda sıcaklığından yüksek olması durumunda hücrelerde ısınma olabilmeye ihtimaline karşın, normal koşullarda, hücrenin ısınması ve soğutulması durumlarında verimlerin değişikliklerinin gözlemlenmesine ilişkin yapılan çalışmada, hücre sıcaklığının artması durumunda verimin düştüğü görülmüştür. Hücre sıcaklığının artması enerji bant aralığı ve ters doyum akımlarına doğrudan etkilediğinden diğer parametrelerinde bu durumdan etkilendiği gözlemlenmiştir. Hücrenin soğutulması durumunda da tersi bir durum olarak verim artmıştır.

Fotovoltaik hücrenin paralel direnci R_{sh} , fotovoltaik hücrenin kutupları arasındaki sızıntı akımları sonucu oluşur. Paralel direnç bir fotovoltaik hücrenin I-V eğrisi üzerinde, kısa devre akımı ile maksimum güç noktası arasındaki bölgenin karakteristiğini etkileyen bir hücre parametresidir. İdeal bir fotovoltaik hücrede ∞ kabul edilebilir. Hücreler eskidikçe paralel direnç azalır [68]. Paralel direncin azalması ile kısa devre akımlarında düşme ve I-V eğrisi altında kalan bölgenin azalma olduğu saptanmış, bu da çıkış gücünün ve verimin azalmasına sebep olmuştur.

Fotovoltaik hücredeki seri direnç R_s , fotovoltaik hücre içerisindeki omik kayıplardan oluşur. Seri direnç bir fotovoltaik hücrenin I-V eğrisi üzerinde, açık devre gerilimi ile maksimum güç noktası arasındaki bölgenin karakteristiğini etkileyen bir hücre parametresidir. Değeri çok düşüktür. İdeal bir fotovoltaik hücrede seri direnç 0 kabul edilir. Hücreler eskidikçe seri direnç artar [68]. Seri direncin artması ile açık devre gerilimlerinde akımlarında düşme ve I-V eğrisi altında kalan bölgenin azalma olduğu saptanmış, bu da çıkış gücünün ve verimin azalmasına neden olmuştur.

TPV sistemlerinin Türkiye demir-çelik sektörü atık ısı enerji potansiyeline uygulanması durumunda GaSb hücreli sistemlerin %2,04 enerji verimliliği ile yıllık 233,4 GJ, $In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82}$ hücreli sistemlerin %7,31 enerji verimliliği ile yıllık 836,3 GJ enerjiyi kurtarabileceği hesaplanmıştır.

TPV sistemlerin yüksek sıcaklıklı atık ısı değerlerinde kullanılması durumunda umut verici sonuçlar gözlemledik. Ancak TPV sistemleri geliştirmekte olan sistemler olduğu ve endüstride şimdilik çok kullanımı olmaması sebebiyle başlangıçta kurulum maliyetlerinin çok yüksek olması beklenmektedir. Bu durumda kurulum öncesi maliyetlerinin ve malzeme ömürlerinin çalışma ortamına göre hesaplanması ve bu ömür dahilinde üretilen enerjinin maliyeti karşılaması ekonomiklik açısından büyük önem arz etmektedir. Teorik olarak yapılan hesaplamalarda çevre koşulları ihmal edilmiştir. Yüksek sıcaklıklı proseslerde TPV sistemlerin kurulumu yapılarak çevresel koşulların etkisiyle daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Nagpal, P. and et al. (2008). Efficient Low-Temperature Thermophotovoltaic Emitters from Metallic Photonic Crystals. *Nano Letter*, 8 (10), p. 3238–3243.
- [2] Xi, W. and et al. (2012). Experimental Investigation and Feasibility Analysis of the Thermophotovoltaic System using Industrial High-temperature Waste Heat. *International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems Lecture Notes in Information Technology*, Vol.9, p. 240-248.
- [3] Bermel, P. and et al. (2010). Design and Global Optimization of High Efficiency thermophotovoltaic systems. *Opt. Express*, Vol. 18, No. 103, A314–A334.
- [4] Mattarolo, G. (2007). Development and Modeling of a Thermophotovoltaic System. *Thesis, Electrical Engineering and Computer Science Dept., University of Kassel, Kassel, Germany*.
- [5] Baxter, J. and et al. (2009). Nanoscale Design to Enable the Revolution in Renewable Energy. *Energy & Environmental Science*, p. 559-588.
- [6] Whale, M. D. and Chavalho, E. G. (2002). Modeling and Performance of Microscale Thermophotovoltaic Energy Conversion Devices. *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 17, p. 130-142.
- [7] Narayanaswamy, A. and Chen, G. (2003). Surface Modes for Near Field Thermophotovoltaics. *Applied Physics Letters*, Vol.82, No. 20, p.3544-3546.
- [8] Laroche, M. and et al. (2006). Near-field Thermophotovoltaic Energy Conversion. *J. Appl. Phys.*, Vol. 100, p. 063704 (1-9).
- [9] Bermel, P. and et al. (2010). Design and Global Optimization of High Efficiency Thermophotovoltaic Systems. *Thermophotovoltaic Generation Of Electricity TPV-9 Conference*.
- [10] Andreev, V. and et al. (2003). Low-Bandgap PV and Thermophotovoltaic Cells. *WCPEC-3, Osaka, Japan, 10B7-02, May*.
- [11] Sarıkaya, S. (t.y.) Demir Çelik Sanayi Sektörel Analiz Raporu. *DAKA*.
- [12] Demir Çelik Üreticileri Derneği. (2007). AB-Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol (IPPC) Demir ve Çelik Üretiminde En İyi Teknolojiler Referans Dökümanı-2001. Ankara, Şubat.
- [13] World Steel Association. (2014). World Steel In Figures. Belgium.
- [14] TOBB. (2014). Türkiye Demir ve Demirdışı Metaller Meclisi Sektör Raporu-2013. Nisan.
- [15] Sanayi Genel Müdürlüğü. (2013). Demir Çelik Sektörü Raporu (2013/2). Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi.
- [16] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (t.y.). *Enerji Dengesi Tabloları*. Alındığı tarih: 10.10.2014, adres: www.enerji.gov.tr
- [17] Erol, M. Ş. (t.y.). Japon Sanayiinde Enerji Tasarrufu ve Yönetimi. *TMOBB, I. Demir Çelik Sempozyum Bildirileri/124*, s.1089-1099.
- [18] Elektrikport, (t.y.). *Atık Isı Geri Dönüşümü*. Alındığı tarih:17.05.2015, adres: <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/atik-isi-geri-kazanimi/8796#ad-image-0>
- [19] Çomaklı, K. ve Terhan, M. (2011). Sıcak Su Üretimi için Baca Gazı Atık Enerjinin Kullanımı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Sayı: 124, s. 43-51.

- [20] **Sögüt, Z. ve diğ.** (2012). Sanayide Enerji Ekonomisi. *T.C. Anadolu Üniversitesi* Yayın No: 2578, Haziran.
- [21] **Energy Efficiency Guide for Industry in Asia.** (t.y). *Thermal Energy Equipment: Waste Heat Recovery Pdf*. Alındığı tarih: 26.02.2015, adres: www.energyefficiencyasia.org
- [22] **BCS, Incorporated.** (2008). Waste Heat Recovery. *Technology and Opportunities in U.S. Industry*, March.
- [23] **Turner, W. C. and Doty, S.** (2007). Energy Management Handbook (Sixth Edition). ISBN: 0-88173-542-6 , Fairmont Press.
- [24] **Kayabaşı, E.** (2012). Endüstriyel Tav Fırını Reküperatörünün Statik ve Dinamik Simülasyonu. *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Karabük.
- [25] **Doğan, V.** (1999). Isı Geri kazanım ve Sudan Suya Isı Pompası Uygulaması. *IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir.
- [26] **Data Center Knowledge.** (t.y.). *Heat Wheel Could Cut Data Center Cooling Bills*. Alındığı tarih : 15.07.2015, adres : <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2008/11/14/heat-wheel-could-cut-data-center-cooling-bills/>
- [27] **Gaz Metro.** (t.y.). *Benefitsof a natural gas condensing stack heat economizer*. Alındığı tarih: 15.07.2015, adres: <http://www.gazmetro.com/en/business/equipment/process/boiler-stack-economizer/>
- [28] **Demir Makine.** (t.y.) *Atık Isı Kazanları*, Alındığı tarih: 18.05.2015, adres: <http://www.demirmakina.com/DEMIR%20MAKINA%20Heat%20Recovery%20Boilers.htm>
- [29] **Atik, K. ve Kayabaşı, R.** (2009). Jeotermal Enerji Kullanılarak Termoelektrik Jeneratör İle Elektrik Enerjisi Üretimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt: 6, No: 3, s.59-64.
- [30] **Temizer, İ. ve diğ.** (2012). Termoelektrik Teknolojisinin Taşıt Sistemleri üzerindeki Etkileri. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, Cilt 1, Sayı 2, s.199-209.
- [31] **Kuyrukluıldız, A. C. ve diğ.** (1997). Isıl Çiftlerin Karşılaştırmalı Metoda Göre Kalibrasyonları. *2. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi*, Eskişehir, Ekim.
- [32] **Molki, A.** (2010). Simple Demonstration of the Seebeck Effect. *Science Education Review*, 9(3), p.103-107.
- [33] **Fettah, S.** (2012). Katı Oksit Yakıt Piliinin Atık Isısından Elektrik Enerjisi Üretim Sisteminin Deneysel Analizi. *Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara.
- [34] **Stuijk, S.** (t.y.). *Sensing, Computing, Actuating*. Alındığı tarih: 09.11.2014, adres: <http://www.es.ele.tue.nl/education/SensingActuating/files/05-nonlinear.pdf>
- [35] **Kaya, A. Y.** (2010). Egzoz Gazındaki Isı İle Çalıştırılan Termoelektrik Sistemin Deneysel İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı*, Isparta.
- [36] **Ahıska, R. ve diğ.** (2011). Termoelektrik Modülün Jeneratör Olarak Modellenmesi ve deneysel Çalışması. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 26, No 4, s.889-896.
- [37] **Takezawa, A. and Kitamura, M.** (2012). Geometrical Design of Thermoelectric Generators Based on Topology Optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 90(11), 1363-1392.
- [38] **Bulut, H.** (2005). Termoelektrik Soğutma Sistemleri. *Soğutma Dünyası*, Sayı 31, s.9-6.

- [39] **Al-Kaby, R. N. M.** (t.y.). *Study Of Thermal Performance Of Thermoelectric cooling System*, Alındığı tarih: 23.03.2015, adres: <http://www.uobabylon.edu.iq/uobColeges/fileshare/articles/2-%20STUDY%20OF%20THERMAL%20PERFORMANCE%20OF%20THERMOELECTRIC%20COOLING%20SYSTEM.pdf>
- [40] **Utlu, Z. and Paralı, U.** (2013). Investigation of The Potential of Thermophotovoltaic Heat Recovery for The Turkish Industrial Sector. *Energy Conversion and Management* 74, p. 308–322.
- [41] **Öztürk, H. ve Kaya, D.** (2013). Güneş enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji. *Umuttepe Yayınları*, Kocaeli.
- [42] **Ege Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü.** (t.y.). *Işık ve Tayf ders notları*, Alındığı tarih: 14.10.2014, adres: http://astronomy.ege.edu.tr/~sevren/Dersler/PratikAstronomi/Isik_ve_Tayf.pdf
- [43] **Fizik, Net, Tr.** (t.y.). *Elektromanyetik Dalgalar*. Alındığı tarih: 38.06.2015, adres: <http://www.fizik.net.tr/site/elektromanyetik-dalgalar/>
- [44] **Davenport, B. P.** (2004). Advanced Thermophotovoltaic Cells Modeling, Optimized for Use In Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGS) for Mars and Deep Space Missions. *Master Of Science in Electrical Engineering, Naval Postgraduate School*, June.
- [45] **Wikipedia.** (t.y.). *Air Mass (Solar Energy)*. Alındığı tarih: 08.11.2014, adres: https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_%28solar_energy%29
- [46] **Zor, M.** (t.y.). *Maddelerin Elektriksel İletkenlik Özellikleri*, Alındığı tarih: 21.05.2015, adres: <http://aop.eogrenme.anadolu.edu.tr/eKitap/FIZ201U.pdf>.
- [47] **Taşar, M. F. ve diğ.** (2012). Fizikte Özel Konular. *Eğitim Fakültesi Fen Bilgisi Öğretmenliği Ders kitabı 3. Baskı*, Pegem Akademi.
- [48] **Mutlugeldi, C.** (2009). Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi ile Be ve Ti Bazlı Sistemlerin Elektronik Yapısının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara.
- [49] **Özbek, Z.** (2007). Kalıksız Maddelerin İnce Film ve Elektrik Özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı*, Balıkesir.
- [50] **Yüksel, M.** (2013). Doğal ve Katkılanmış Bor Minerallerinin Dozimetre Geliştirmek Amacıyla Termoluminesans (TL) Yöntemi Kullanılarak Çalışması. *Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı*, Adana.
- [51] **Yaşar, S.** (2012). Titanyum Oksit Yarıiletken Filminin Elde Edilmesi, Optik ve kristal Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı*.
- [52] **Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü.** (t.y.). *Güneş Pillerinin Yapılması ve Çalışması*, Alındığı tarih: 05.06.2014, adres: <http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/gunes/pvilke.html>
- [53] **Mutlu, T.** (2010). Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs Yapılı P-N Eklem Diyotun Tavlanma Sıcaklıklarına Göre Elektriksel Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı*, Balıkesir.
- [54] **Pişkin, E.** (2014). GaAsP/GaP Yarıiletken Yapılarının Si Üzerine Epitaksiyel Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı*, Ankara.
- [55] **Bakan, A. F.** (t.y.). *Analog Elektronik*. Alındığı tarih: 11.12.2014, adres: <http://www.yildiz.edu.tr/~fbakan/Analog/Analog1.pdf>

- [56] **Kaplan, İ.** (t.y.). Analog Elektronik. Alındığı tarih: 14.12.2014, adres:
<http://www.yyu.edu.tr/abis/admin/dosya/2467/files/Ders%20Notlar%C4%B1/I.D%C3%B6nem/Analog%20Elektronik/1%20Analog%20Elektronik%201%20Mersin%20U.pdf>
- [57] **Sarı, H.** (t.y.). *Yarıiletken Fiziği-Elektronik ve Optik Özellikler*. Alındığı tarih: 20.12.2014, adres:
<http://80.251.40.59/eng.ankara.edu.tr/hsari/bolum-11-yariiletkenler-1.pdf>
- [58] **Heide, J. V. D.** (2009). Cost-efficient Thermophotovoltaic Cells Based on Germanium. *Ph.D. Thesis, Department of Electrical Engineering (ESAT), Katholieke Universitet Leuven, Belgium*.
- [59] **Mattarolo, G. and Bard, J.** (2005). Theoretical Modeling of a Thermophotovoltaic System. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference, Frankfurt*.
- [60] **Gee, J. M. et al.** (2002). Selective Emitters Using Photonic Crystals for Thermophotovoltaic Energy Conversion. *Conf rec twenty-ninth IEEE photovolt spec conf*, p. 896–899.
- [61] **Waits, C. M.** (2012). Thermophotovoltaic Energy Conversion for Personal Power Sources. *Army Research Lab Adelphi Md Sensors and Electron Devices Directorate*.
- [62] **Coutts, T. J.** (2001). An Overview of Thermophotovoltaic Generation of Electricity. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, (66) p. 443–452.
- [63] **Bouزيد, F. and Dehimi, L.** (2012). Performance Evaluation of a GaSb Thermophotovoltaic Converter. *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 15 No:3, s.383 – 397.
- [64] **Bouزيد, F. and Maamri, N.** (2013). Analysis And Optimization of $In_{1-x}Ga_xAs_ySb_{1-y}$ Thermophotovoltaic Cells Under Low Radiator Temperatures. *J. Fund. App. Sci.*, 5(1), 79-95.
- [65] **Utlü, Z. and HEPBAŞLI, A.** (2007). A Review And Assessment Of The Energy Utilization Efficiency In The Turkish Industrial Sector Using Energy And Exergy Analysis Method. *Science Direct Renewable and Sustainable Energy Reviews 11*, p. 1438–1459.
- [66] **Chan, W. and et al.** (2010). Modeling Low-Bandgap Thermophotovoltaic Diodes For High-Efficiency Portable Power Generators. *Solar Energy Materials & Solar Cells 94*, p. 509–514.
- [67] **Utlü, Z.** (2015). Investigation of the potential for heat recovery at low, medium, and high stages in the Turkish industrial sector (TIS). *An application. Energy Elsevier vol.81*, p. 394-405.
- [68] **Turan, O.** (t.y.). *Fotovoltaik Hücre Karakteristikleri*, Alındığı tarih: 23.02.2015, adres:
http://mim.bilecik.edu.tr/Dosya/Icerik/112/DosyaEki/bolum_5_fotovoltaik_hucre_karakteristikleri_son.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı Ünsal AYBEK
E-mail : unsalaybek@aydin.edu.tr



KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Tarihi 1985
Medeni Durum Bekar
Askerlik Durumu Tamamlandı

İŞ TECRÜBESİ

2012-Devam İstanbul Aydın Üniversitesi , Anadolu Bil MYO,
Otomotiv Teknolojisi Programı- Öğr.Gör.
2010-2012 Özel Övün Mtsk-Motor ve Araç Tekniği Öğretmeni

EĞİTİM BİLGİLERİ

2015 İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Lisans, Makine Mühendisliği
2008 Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi
Lisans, Otomotiv Öğretmenliği

BİLGİSAYAR BİLGİSİ

Autocad, Solid Works, Matlab, Microsoft Office

YABANCI DİL BİLGİSİ

İngilizce- Orta Seviye

SERTİFİKALAR

Trafik ve Çevre Bilgisi Eğitimliği Sertifikası

Bilgisayar İşletmenliği Sertifikası

