

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI**

**GÜNÜMÜZÜN ALTERNATİF ENERJİ KAYNAĞI: FOTOVOLTAİK
GÜNEŞ PİLLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ogün Haziran BOZ

Balıkesir, Şubat 2011

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI

GÜNÜMÜZÜN ALTERNATİF ENERJİ KAYNAĞI: FOTOVOLTAİK
GÜNEŞ PİLLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ogün Haziran BOZ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Raif KURTARAN (BAÜ)

Sınav Tarihi : 17/02/2011

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Raif KURTARAN (BAÜ) (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. İsmet BAŞARAN (BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. İbrahim ŞAHİN (BAÜ)

Balıkesir, Şubat - 2011

ÖZET

GÜNÜMÜZÜN ALTERNATİF ENERJİ KAYNAĞI: FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİ

Ogün Haziran BOZ

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Kimya Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi, Tez Danışmanı : Doç. Dr. Raif KURTARAN

Balıkesir, 2011

Alternatif enerji kaynakları, özellikle de fotovoltaik piller enerji ihtiyacımızın günbegün artmasıyla hayatımızda giderek daha fazla önem kazanmaktalar. Bu çalışmada yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi ve güneş pilleri ele alınmıştır. Çalışma altı bölümden oluşmuştur.

İlk bölümde enerji, kullanım alanları ve önemi ile yenilenebilir enerji kaynakları incelenirken, ikinci bölümde fotovoltaik sistemler ve yarıiletkenlerin özellikleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde fotovoltaik pillerin çalışma prensibi ele alınmıştır. Dördüncü bölümde güneş pili çeşitleri incelenmiştir. Beşinci bölümde gelecek nesil güneş pilleri, bunlar üzerine yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Altıncı ve son bölüm olan sonuçlar ve öneriler bölümünde ise güneş pillerinin verimlerinin artırılarak daha da yaygınlaştırılmasının, yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılmasının hem artan enerji talebinin karşılanması hem de çevre sağlığı bakımından önemli olduğu sonucu ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler : fotovoltaik sistemler, güneş enerjisi, güneş pilleri.

ABSTRACT

CURRENT ALTERNATIVE ENERGY RESOURCE: PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS

Ogün Haziran BOZ

**Balıkesir University, Institute of Science,
Department of Chemistry**

M. Sc. Thesis/ Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Raif KURTARAN

Alternative energy sources, especially fotovoltaic cells are getting more and more crucial in our lives as our energy need is increasing day by day. Throughout this study, the solar energy has been worked out as a renewable energy resource. And this study consists of six parts.

While analyzing the energy, its usage and importance with the renewable energy resources in the first part, the fotovoltaic systems and the characteristics of the semiconductors have been studied in the second part. Then there comes the working principles of the fotovoltaic cells in the third part. And for the fourth part, the various types of fotovoltaic cells have been analyzed. When come to the fifth part, there one can encounter the next-generation fotovoltaics and the stuies performed over them. And finally, in the sixth part, which is in fact the conclusion and suggestion part, it has been concluded that it is very important to diffuse the use of fotovoltaic cells by rising their productivity and to diffuse the renewable energy resources for both to meet the energy demand and for the environmental health.

Keywords: fotovoltaic systems, solar energy, solar cells

İÇİNDEKİLER	Adı	Sayfa No
	ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER	ii
	ABSTRACT, KEY WORDS	iii
	İÇİNDEKİLER	iv
	ŞEKİL LİSTESİ	ix
	ÇİZELGE LİSTESİ	xii
	KISALTMA LİSTESİ	xiii
	ÖNSÖZ	xvii
1	GİRİŞ	1
1.1	Dünya Enerji Sektörünün Gelişimi	7
1.2	Türkiye'deki Elektrik Enerjisi Üretimi ve Tüketimi	8
1.3	Alternatif Enerji Kaynakları	10
1.3.1	Yenilenebilir Enerji	10
1.3.2	Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Avantajları	12
1.3.2.1	Hidroelektrik Enerji	12
1.3.2.2	Jeotermal Enerji	15
1.3.2.3	Rüzgar Enerjisi	16
1.3.2.4	Biyokütle Enerjisi	17
1.3.2.5	Deniz Kökenli Yenilenebilir Enerji (Dalga Enerjisi)	18
1.3.2.6	Hidrojen Enerjisi	19
1.3.2.7	Güneş Enerjisi	20

2	FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ	25
2.1	Güneş Pillerinin Tarihi	25
2.2	Yarı İletkenler	26
2.3	Bant Yapısı	26
2.3.2	Enerji bantları	29
2.3.2.1	Katıların Enerji Bant Yapıları	32
2.3.2.1.1	İletkenlerin Enerji Bant Yapısı	32
2.3.2.1.2	Yalıtkanların Enerji Bant Yapısı	33
2.3.2.1.3	Yarıiletkenlerin enerji Bant Yapısı	34
2.4	Yarıiletken Çeşitleri	35
2.4.1	Saf Yarıiletkenler	37
2.4.2	Katkılı Yarıiletkenler	38
2.4.2.1	p-Tipi Yarıiletkenler	38
2.4.2.2	n-Tipi Yarıiletkenler	41
2.4.2.3	p-n Eklemlerinde Meydana Gelen Optik Olaylar	44
3	GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PİLLERİ	46
3.1	Güneş ve Yapısı	46
3.2	Güneş Enerjisi	48
3.3	Güneş Enerjisi Teknolojileri	49
3.4	Fotovoltaik Piller	50
3.4.1	Bir Fotovoltaik Hücrenin Çalışma Prensibi	52
3.4.2	Fotovoltaik Olay ve Güneş Pilleri	53
3.5	Yarıiletken Fotovoltaik Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi	56
3.5.1	Fotovoltaik Güneş Pillerinin Elektriksel Özellikleri	58

3.5.2	Bir Fotovoltaik Güneş Pili'nin Eşdeğer Devresi	58
3.5.3	Yarıiletken Güneş Pillerinde Kullanılan Malzemeler	61
3.6	Yarıiletken Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar	62
4	FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİ ÇEŞİTLERİ	64
4.1	Güneş Pillerinin Kristal Cinsine Bağlı Olarak Sınıflandırılması	64
4.1.1	p-n Homoeklemlili Güneş Pilleri	64
4.1.1.1	Galyum Arsenik Güneş Pilleri	65
4.1.1.2	Silisyum Güneş Pilleri	67
4.1.1.2.1	Czochralski Yöntemi	70
4.1.2	p-n Heteroeklemlili Güneş Pilleri	72
4.1.2.1	Kadmiyum Sülfür-Bakır Sülfür Güneş Pilleri	73
4.1.2.2	Kadmiyum Sülfür-Bakır İndium Diselenoid Güneş Pilleri	74
4.1.2.3	Bakır Sülfür-Çinko Kadmiyum Sülfür Güneş Pilleri	75
4.1.2.4	Kadmiyum Sülfür-Silisyum Güneş Pilleri	75
4.1.2.5	Kadmiyum Sülfür-Kadmiyum Tellür Güneş Pilleri	76
4.1.3	Amorf Silisyum Güneş Pilleri	77
4.2.	Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişim Sırasına Göre Sınıflandırılması	79
4.2.1	1. Nesil Fotovoltaik Piller	79
4.2.2	2. Nesil Fotovoltaik Piller	79
4.2.3	3. Nesil Fotovoltaik Piller	80
4.2.4	4. Nesil Fotovoltaik Piller	82
4.3	Güneş Pillerinden Yüksek Verim Elde Etmek İçin Kullanılan Sistemler	82

4.3.1	Yoğunlaştırıcı Güneş Pili Sistemleri	83
4.3.2	Çok Eklemlili Güneş Pili Sistemleri	84
4.3.3	İnce Film Teknolojisi	87
4.4	Güneş Pili Modülleri	88
4.4.1	Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler	90
4.4.2	Şebekeye Bağımlı Fotovoltaik Sistemler	91
4.4.3	Şebekeye Bağımlı Fotovoltaik Güç Santralleri	92
4.4.4	Şebekeye Bağımlı Dağıtılmış Fotovoltaik Güç Sistemleri	92
5	GELECEK NESİL FOTOVOLTAİK PİLLER	93
5.1	Organik Güneş Pilleri	93
5.1.1	Organik Güneş Pillerinin Özellikleri	93
5.1.2	Yeni Organik Güneş Pili Tasarımı	94
5.1.3	Organik Güneş Pillerinin Avantajları	94
5.1.4	Grafen	94
5.1.5	Grafen ve Pil Teknolojisi	96
5.2	Boya İle Duyarlaştırılmış Solar Hücreler (DSSC)	96
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	98
7	KAYNAKLAR	99

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil Numarası	Adı	Sayfa
Şekil 1.1	Değişik Senaryolara Göre 1990 Yılından 2100 Yılına Kadar Bütün Kaynaklardan Açığa Çıkacak Yıllık Toplam Küresel Karbondioksit Emisyonu	3
Şekil 1.2	Keeling Eğrisi	4
Şekil 1.3	Kyoto Protokolünü İmzalayan Ülkeler	5
Şekil 1.4	Dünyanın Toplam Enerji Üretim ve Tüketimi	8
Şekil 1.5	Türkiye'nin 2006 Yılı İtibariyle Yıllık Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı ve Üretilen Enerjinin Kullanım Oranları	9
Şekil 1.6	2007 Yılı İtibariyle Dünya'da Üretilen Elektrik Enerjisinin Kaynaklara Göre Dağılımı	10
Şekil 1.7	Türkiye'de Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanlarına Göre Dağılımı	14
Şekil 1.8	Türkiye'nin Güneşlenme Haritası	23
Şekil 2.1	Yalıtılmış Durumdaki Bir Atomun Enerji Seviyelerinin Şematik Olarak Gösterimi	27
Şekil 2.2	Dış Elektronlarına Ait Enerji Seviyeleri Belirtilmiş İki Atomun Şematik Gösterimi	29
Şekil 2.3	İki Atomun Birbirine Çok Yakın Olduğu Durumdaki Enerji Seviyesi Diyagramı	30
Şekil 2.4	Kristal bir yapıda meydana gelen valans bandı, iletkenlik bandı ve yasak bandın görünümü	30
Şekil 2.5	Bir Yarıiletkenin Enerji Bant Diyagramı	32
Şekil 2.6	İletkenlerde Enerji Bant Modelinin Şematik Gösterimi	33
Şekil 2.7	Yalıtkanlarda Enerji Bant Modelinin Şematik Gösterimi	34
Şekil 2.8	Yarıiletkenlerde Enerji Bant Modelinin Şematik Gösterimi	35

Şekil 2.9	p - n Ekleminin Oluşması	36
Şekil 2.10	Saf İletkenlik	38
Şekil 2.11	Akseptör Enerji Seviyesinin Gösterimi	39
Şekil 2.12	p-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramında Fermi enerji seviyesinin gösterimi	40
Şekil 2.13	Enerji bant diyagramında donör enerji seviyesinin gösterimi	41
Şekil 2.14	Bor Katkılması ve Fosfor Katkılması	42
Şekil 2.15	Yarı İletken Eklem Bölgesinde Fotovoltaik Dönüşüm	43
Şekil 2.16	p-n Ekleminde Elektrik Alan Oluşumu	44
Şekil 3.1	Güneşten Gelen Işınım Enerjisinin, AM Koşullarına Göre Spektral Dağılımının Gösterimi	47
Şekil 3.2	2008 Fotovoltaik Dünya Pazarının Avrupa Ülkelerine Göre Dağılımı	51
Şekil 3.3	Örnek Fotovoltaik Hücre	52
Şekil 3.4	Fotovoltaik Dönüşüm Sistemi	53
Şekil 3.5	Fotovoltaik Dönüşüm Sistemi	54
Şekil 3.6	p-n Eklemlili Güneş Pili Şematik Gösterimi	57
Şekil 3.7	Bir Güneş Pili Eş Değer Devresi	59
Şekil 3.8	İdeal Bir Fotovoltaik Güneş Pili Eşdeğer Devresi	60
Şekil 3.9	Farklı Malzemelerin Laboratuvar Koşullarındaki Verimlerinin Bant Aralıklarına Göre Kıyaslaması	62
Şekil 4.1	Galyum Arsenik Molekülünün Kristal Yapısı	66
Şekil 4.2	Güneş Pili Yapısı	68
Şekil 4.3	Yansımayı Önleyici Piramit Yapılı Tabaka	69
Şekil 4.4	Czochralski Yöntemiyle mono kristalli Silisyum Üretimi	70
Şekil 4.5	Czochralski Monokristal ve Polikristal Silisyum Üretim Safhaları	71
Şekil 4.6	Kadmiyum Sülfür-Bakır Sülfür (n-CdS/p-Cu ₂ S) Pillerinin Şematik Kesit Görünümü	73
Şekil 4.7	Boya İle Duyarlaştırılmış Fotovoltaik Pil (DSSC)	82
Şekil 4.8	Noktasal Yoğunlaştırıcı Solar Pil	83
Şekil 4.9	Parabolik Yoğunlaştırıcı Solar Pil	84

Şekil 4.10	%29.5 Oranında Bir Verime Sahip Olan GaInP ₂ / GaAs Çok Katlı Güneş Pil Kesitinin Görünümü	85
Şekil 4.11	Merkezi Alıcı Sistemi	86
Şekil 4.12	Bir Güneş Pili Modülü	89
Şekil 5.1	Grafen Molekülleri	95
Şekil 5.2	DSSC Yapısı	97

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge Numarası	Adı	Sayfa
Çizelge 1.1	Nüfus, Ekonomi ve Enerji	2
Çizelge 1.2	Genel Enerji Arzı	2
Çizelge 1.3	Türkiye'deki Önemli Jeotermal Enerji Kaynakları	13
Çizelge 1.4	Türkiyedeki Bölgelerin Yıllık Bazda Ortalama Güneşlenme Süreleri	21
Çizelge 4.1	Gelişim Sırasına Göre Fotovoltaik Güneş Pilleri	78

KISALTMA LİSTESİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açılımı</u>
akb	Atomik Kütle Birimi
GSMH	Gayrı Safi Milli Hasıla
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
GtC	Giga Ton Karbon
ppm	Part Per Million (Milyonda Bir Parçacık)
ppmv	Part Per Million by Volume (Hacimce Milyonda Bir Parçacık)
EIA	Energy Information and Administration
Btu	British Thermal Unit (1 Btu = 1 055.05585 J)
LPG	Likid Petrol Gazı
MW	Mega Watt
PV	(Photo Voltaic) Fotovoltaik
W	Watt
kWh	Kilo Watt Per Hour (Kilovat Saat)
TWh	Tera Watt Per Hour (Teravat Saat)
MWe	(Mega Watt Electrical) Elektriksel Güç
MWt	(Mega Watt Termal) Isısal Güç
EIE	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
TW	Tera Watt
GWEC	(Global Wind Energy Council) Uluslararası Rüzgâr Enerjisi Birliği

RES	Rüzgar Enerjisi Santralleri
K	° Kelvin
J	Joule (Jul)
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
A	Angstrom (10^{-10} m)
E_F	Fermi Enerji Seviyesi
E_g	Yasak Enerji Aralığı
E_c	İletkenlik Seviyesinin En Alt Seviyesi
E_d	Donör Enerji Seviyesi
E_v	Valans Bandının En Üst Seviyesi
k	Boltzmann Sabiti
T	Mutlak Sıcaklık
eV	Elektro Volt
n_0	Serbest Elektron Sayısı
p_0	Serbest Boşluk Sayısı
s_r	Bağıl Dielektrik sabiti
m_e^*	Elektronun Etkin Kütlesi
m_e	Elektronun Kütlesi
E_H	Hidrojen İçin İyonlaşma Enerjisi
n_n	Taşıyıcı Elektronlar
p_n	Taşıyıcı Boşluklar
E_a	Akseptör Enerji Seviyesi
m_h^*	Boşluğun Etkin Kütlesi
mh	Boşluğun Kütlesi
J_{ng}	Elektronların Oluşum Akım Yoğunlukları

J_{pg}	Boşlukların Oluşum Akım Yoğunlukları
J_{nr}	Elektronların Birleşme Akım Yoğunlukları
J_{pr}	Boşlukların Birleşme Akım Yoğunlukları
$q\Phi_0$	Potansiyel Engelinin Yüksekliği
q	Elektron Yüğü
V_d	Potansiyel Farkı
L	Ters Akım
I_0	Ters Akımın Maksimum Değeri
H	Planck Sabiti
μ	Mikro
λ	Lambda (Dalga Boyu)
γ	Frekans
AM	Air Mass (Atmosferik Koşullar)
EJ	Eksa Jul
σ_{sb}	Stefan-Boltzmann Sabiti
TEMEV	Temiz Enerji Vakfı
UGET-TB	Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu - Türkiye Bölümü
USD	Amerikan Doları
DC	Doğru Akım
E_{yap}	Yapısal Elektrik Alan
J_f	Fotoakım Yoğunluğu
e.m.k	Fotovoltaik Elektromotor Kuvveti
R_s	Güneş Pilinin İç Seri Direnci
R_{sh}	Şönt Direncini
R_L	Yük Direncini

J_L	Yük Direnci İçinden Geçen Akım Yoğunlukları
J_{kd}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
A_0	p-n Eklemının İdeal Olma Faktörü
J_0	Karanlık Doyum Akım Yoğunluğu
CSS	Close Space Sublimation (Yakın Mesafeden Buharlaştırma)
MS	Metal-Semiconductor (Metal-Yarıiletken Güneş Pili)
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Güneş Pilleri
SIS	Yarıiletken-Yalıtkan-Yarıiletken Güneş Pilleri
C	Yoğunlaştırma Çarpanı
OPV	Organik Fotovoltaik Hücreler
DSSC	Dye Sensitized Solar Cell (Duyarlaştırılmış Güneş Hücreleri)
EPFL	Ecole Polytechnique Federal De Lausanne (Federal Teknik Üniversite)
BIPV	(Building Integrated Photovoltaics) (Bina Entegre Fotovoltaikler)
UMEFESLAB	Ulusal Metroloji Enstitüsü Fotonik ve Elektronik Sensörler laboratuvarı
R	Rydberg Sabiti ($1,096810^5 \text{ cm}^{-1}$)

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı yaparken değerli desteğini ve katkısını esirgemeyen sayın hocam Doç Dr. Raif KURTARAN' a teşekkürü borç bilirim. Sabrı ve ilgisi olmasaydı bu tezi bitirmem mümkün olmazdı. Tezimin jüri üyeleri Yrd. Doç. Dr. İbrahim ŞAHİN ve sayın Doç. Dr. İsmet BAŞARAN hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca, birlikte geçireceğimiz zamandan feragat ederek beni destekleyen, çevirilerde yardımını esirgemeyen sevgili eşim Melahat BOZ' a, sırtımdan inip atçılık oynamayı erteleyen kızım Mai Nihal BOZ' a da çok teşekkür ederim; İyi ki varlar. Beni bu yaşıma kadar bitmez tükenmez fedakarlıkla destekleyen annem Şevkiye ŞAHİN ve kardeşim Gerçek BOZ' a da minnettarım. İstanbul - Balıkesir köprüsünü hiç kaldırmadan, ne zaman istedimse yardımlarını hiç sakınmayan dostlarım Mesut ALAN ve Sema ÇARIKÇI' ya da teşekkürü borç bilirim. Tüm bölüm hocalarım, arkadaşlarım, tanıdığım tanımadığım ancak zerrece katkısı olan herkese teşekkür ederim.

Rahmetli hocam Yrd. Doç. Dr. İmdat KADAN' a ise ayrıca teşekkür etmeliyim. En başından beri nedenini bilmediğim bir azimle bana inancını ve desteğini hiç kesmedi. Bu tezin bitmiş olmasının en büyük sebeplerinden biri "O" dur, mekanın cennet olsun hocam.

Balıkesir, 2011

Ogün Haziran BOZ

1. GİRİŞ

Gelişmişlik düzeyinin belirlenmesinde farklı parametlerin kullanılması mümkündür. Genel olarak; bir toplumda kişi başına düşen enerji kullanımını arttıkça, o toplumun gelişmekte olduğunu söyleyebiliriz. Enerji ihtiyacı insanlık varolduğundan beri var olmuştur ve artarak sürmektedir. Özellikle teknolojik aletlerin artması ile kişi başına tüketilen enerji miktarı her geçen gün biraz daha artmaktadır. Örneğin; Türkiye’de elektrik enerjisi tüketimi, Çizelge 1.1’ de görüleceği üzere; 1973 – 2001 yılları arasında yaklaşık 5.5 kat artmıştır. Talep günbegün artmaktadır.

Çizelge 1.1 ve 1.2’ de de görüleceği üzere şu an dünyada en fazla kullanılan enerji kaynağı fosil yakıtlar ve bunlardan biri olan petrol ürünleridir. Petrolün ve diğer fosil yakıtların milyonlarca yıl yer altında oluşarak biriktiğini ve bunların kısa sürede yeniden oluşmayacağını dikkate aldığımızda, alternatif enerji kaynakları bulamazsak eninde sonunda enerji sıkıntısına gireceğimiz muhakkaktır.

Ülkemizde tüketilen toplam enerji miktarı 1970 yılında 18845 bin TEP (Ton Eşdeğer Petrol) iken, 2006 yılında ise bu rakam 97995 TEP düzeyine yükselmiştir. Fosil yakıtların bu enerji içindeki payı 1970 yılında % 67 iken, 2006 yılında % 89 a yükselmiştir [1].

Günümüzde kullandığımız enerjinin büyük bir kısmı; Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtlar, kısa süreçte yenilenemeyen yakıtlardır. Bu yakıtların tükenmesi ve fiyatlarının devamlı artmasının yanı sıra, yanmaları sonucu çevreye verdikleri zararlar ve insan sağlığı üzerindeki etkileri de büyüktür.

Fosil yakıtların tüketilmesi sonucu açığa çıkan CO₂, H₂O, N₂O, CH₄, O₃ gibi ağır gazlar sera etkisine sebep olmaktadır ve bu durumun dünyanın sıcaklığının artmasına sebep olduğu da uzun süredir bilinmektedir.

Çizelge 1.1 Nüfus, Ekonomi ve Enerji Talebi [2]

Nüfus, ekonomi ve enerji

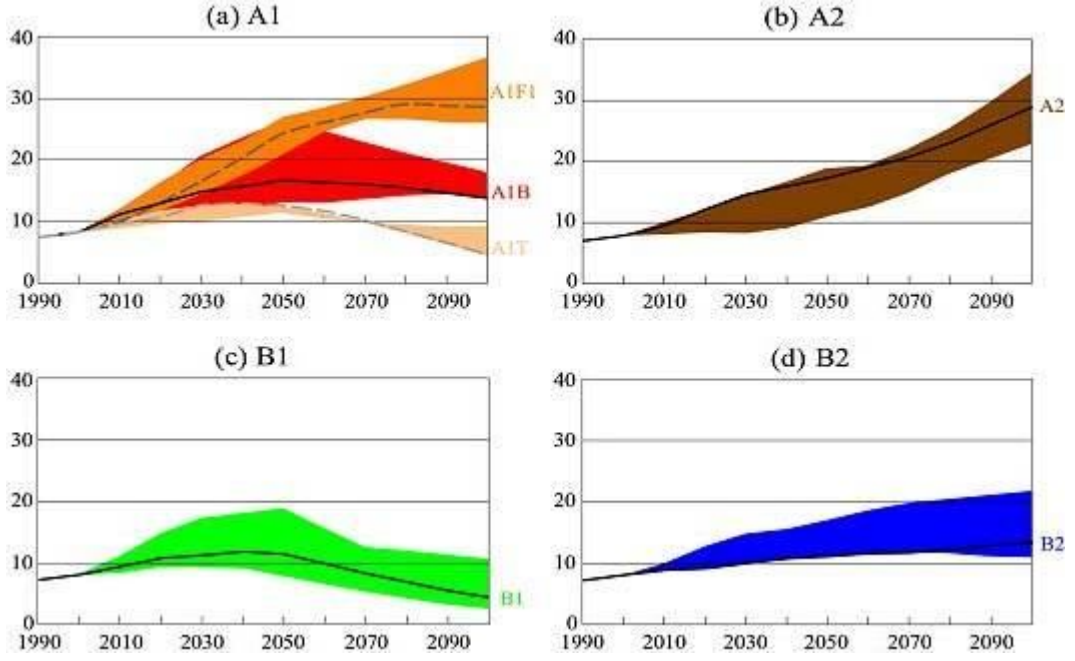
Yıl	Nüfus Bin kişi	GSMH 1990 fiyatı Milyar \$	Kişi başı GSYİH \$/kişi	Enerji talebi Mtep	Elektrik talebi TWh	Kişi başı enerji talebi kep/kişi	Kişi başı elekt. talebi kWh/kişi
1973	38,072	75.9	1,994	24.5	12.4	644	326
1990	56,098	150.0	2,674	53.0	56.8	945	1,013
1995	62,171	177.9	2,861	63.7	85.6	1,025	1,376
1998	65,244	215.5	3,303	74.7	114.0	1,145	1,747
2000	67,804	214.1	3,158	81.3	128.3	1,199	1,892
2001	68,618	193.9	2,826	76.0	126.9	1,108	1,849
2010 *	78,459	421.0	5,366	153.9	286.6	1,962	3,653
2020 *	87,759	812.7	9,261	282.2	566.5	3,216	6,455
2023 *	90,345	821.2	9,090	329.9	675.1	3,652	7,472

Çizelge 1.2 Genel Enerji Arzı [2]

Genel enerji arzı (Mtep)

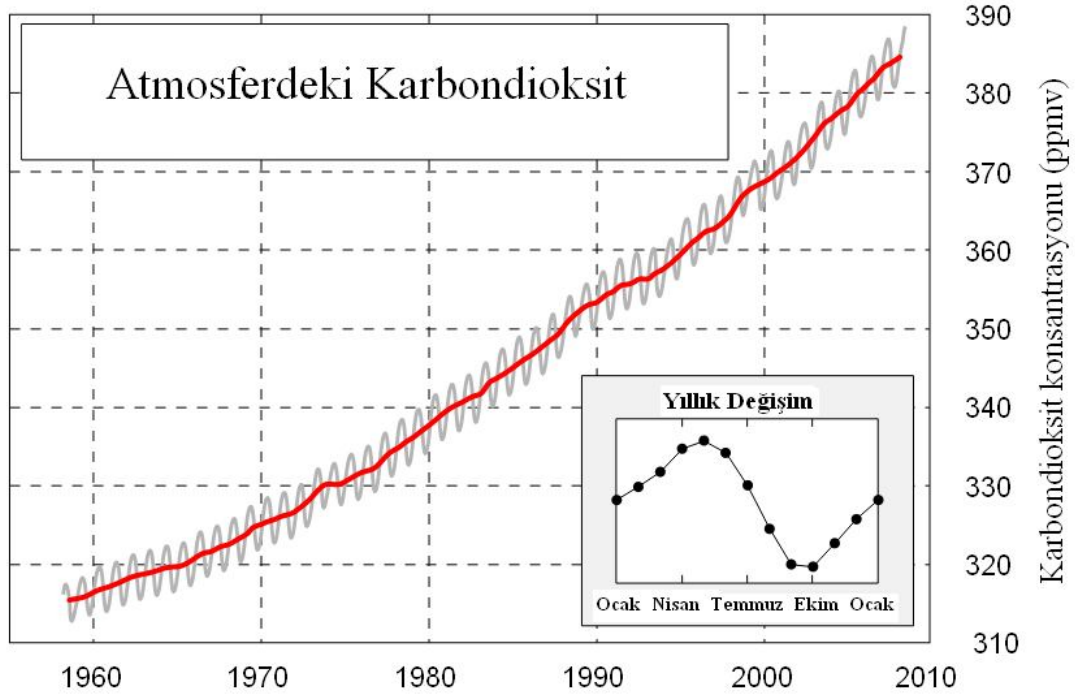
	1990	Pay %	2000	Pay %	2001	Pay %
Petrol	23.901	45.1	32.297	39.7	30.936	40.7
Linyit	9.765	18.4	13.219	16.3	11.929	15.7
Taşkömürü	6.150	11.6	9.983	12.3	7.060	9.3
Doğalgaz	3.110	5.9	13.729	16.9	14.868	19.6
Hidro	1.991	3.8	2.656	3.3	2.065	2.7
Ticari Olmayan	7.208	13.6	6.457	7.9	6.211	8.2
Diğer	0.862	1.6	2.910	3.6	2.883	3.8
Toplam	52.987	100.0	81.251	100.0	75.952	100.0

(Kaynak: ETKB/APK)



Şekil 1.1 Değişik Senaryolara Göre 1990 Yılından 2100 Yılına Kadar Bütün Kaynaklardan (Enerji, Endüstri ve Arazi Kullanımındaki Değişiklik) Açığa Çıkacak Yıllık Toplam Küresel Karbondioksit Emisyonu (Gigaton Karbon Olarak GtC/yıl) [3].

Sera gazları olarak adlandırılan gazların atmosferdeki miktarı yer - atmosfer sistemindeki enerji dengesi, dolayısıyla yer yüzeyi sıcaklığı açısından hayati önem arz etmektedir. Bu ağır gazlardaki artış, atmosferin alt kısmında kalın bir tabaka oluşturur. Yerküre üzerine ulaşan ısının atmosfer dışına kaçışını güç hale getiren bu gaz tabakası dünyamızın ortalama sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Yapılan ölçümler atmosferdeki karbondioksit miktarının sanayileşme öncesindeki 285 ppm seviyesinden günümüzdeki 384 ppm seviyesine çıktığını göstermektedir. Bu durumun, yeryüzü sıcaklığının artmasında etkili olduğu düşünülmekte. Son yüzyıldaki ölçümler atmosfer sıcaklığının 0.7-0.8 °C civarında arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, CO₂ deki artış ile ortalama sıcaklıktaki artış arasındaki ilişkinin, etki eden diğer faktörler sebebiyle ne düzeyde olduğu net bir şekilde ortaya konulamamıştır [3].



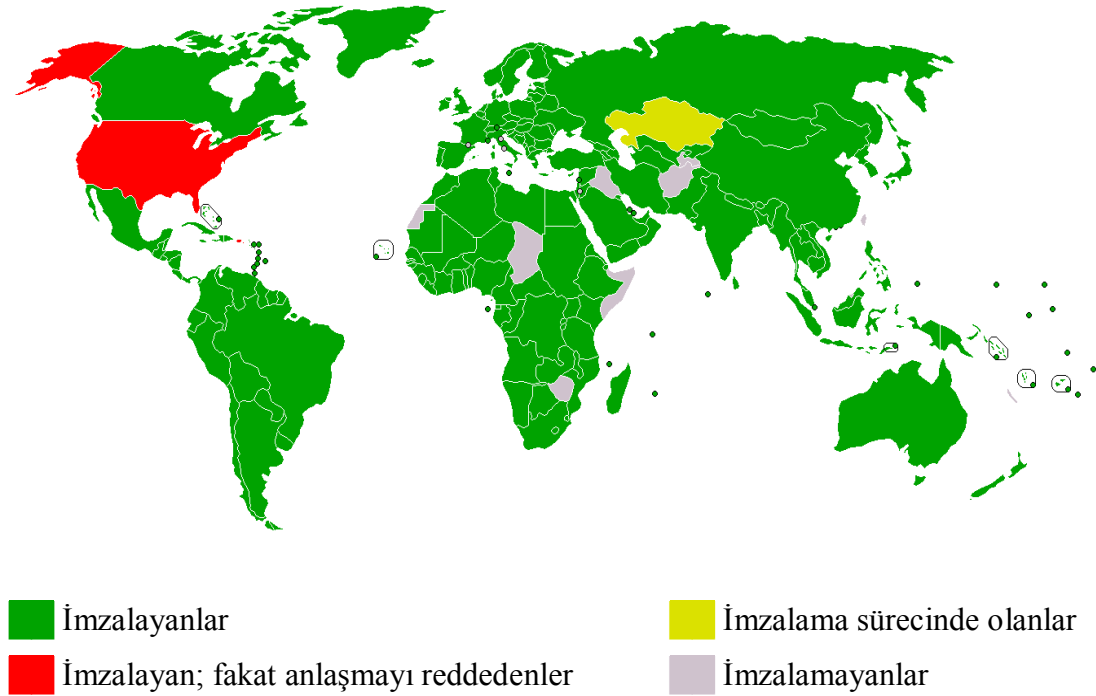
Şekil 1.2 Keeling Eğrisi [4]

Şekil 1.2, 1958 yılından itibaren Hawai' de yapılmış olan ölçümler, CO₂' in, sürekli artan bir grafik oluşturduğunu göstermektedir. Ölçümleri yapan kişinin adının Charles David Keeling olması sebebiyle grafik "Keeling Eğrisi" olarak adlandırılmıştır.

Küresel ısınmanın sebepleri ve sonuçları net olarak ortaya konulamamıştır. Bununla birlikte farklı teorisyenlerin birleştiği nokta, fosil yakıt tüketiminin doğal dengeyi bozacağı yönündedir. Burada belirtmek gerekir ki; Giderek artan enerji ihtiyacını karşılamak için fosil yakıt tüketiminin payının azaltılmasının gerekliliği muhakkaktır. Bu konu ile ilgili en kapsamlı çalışma Kyoto Protokolüdür.

Kyoto Protokolü küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası tek çerçevedir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi içinde imzalanmıştır. Bu protokolü imzalayan ülkeler, CO₂ ve sera etkisine neden olan diğer beş gazın salınımını azaltmaya veya bunu yapamıyorlarsa salınım ticareti yoluyla haklarını arttırmaya söz vermişlerdir.

Protokol, ülkelerin atmosfere saldıkları karbon miktarını 1990 yılındaki düzeylere düşürmelerini gerektirmektedir. 1997' de imzalanan protokol, ancak 2005' te yürürlüğe girebilmiştir. Çünkü, protokolün yürürlüğe girebilmesi için, onaylayan ülkelerin 1990' daki emisyonlarının (atmosfere saldıkları karbon miktarının) yeryüzündeki toplam emisyonun % 55'ini bulması gerekmektedir ve bu orana ancak 8 yılın sonunda Rusya'nın katılımıyla ulaşılabilmektedir [5].



Şekil 1.3 Kyoto Protokolünü İmzalayan Ülkeler [5]

Kyoto Protokolü şu anda yeryüzündeki 160 ülkeyi ve sera gazı salınımlarının %55' inden fazlasını kapsamaktadır. Kyoto Protokolü ile devreye girecek önlemler, pahalı yatırımlar gerektirmektedir. Sözleşmeye göre;

- ✚ Atmosfere salınan sera gazı miktarı %5' e çekilecek,
- ✚ Endüstriden, motorlu taşıtlardan, ısıtmadan kaynaklanan sera gazı miktarını azaltmaya yönelik mevzuat yeniden düzenlenecek,
- ✚ Daha az enerji ile ısınma, daha az enerji tüketen araçlarla uzun yol alma, daha az enerji tüketen teknoloji sistemlerini endüstriye yerleştirme sağlanacak, ulaşımda, çöp depolamada çevrecilik temel ilke olacak,
- ✚ Atmosfere bırakılan metan ve karbon dioksit oranının düşürülmesi için alternatif enerji kaynaklarına yönelinecek,
- ✚ Fosil yakıtlar yerine örneğin biyodizel yakıt kullanılacak,
- ✚ Çimento, demir-çelik ve kireç fabrikaları gibi yüksek enerji tüketen işletmelerde atık işlemleri yeniden düzenlenecek,
- ✚ Termik santrallerde daha az karbon çıkartan sistemler, teknolojiler devreye sokulacak,
- ✚ Güneş enerjisinin önü açılacak, nükleer enerjide karbon sıfır olduğu için dünyada bu enerji ön plana çıkarılacak,
- ✚ Fazla yakıt tüketen ve fazla karbon üreten daha fazla vergi alınacaktır [6].

Dünyada bulunan tüm element ve bileşiklerin bir potansiyel iç enerjileri olduğunu düşünürsek, tüm maddelerin enerji kaynağı olabileceği sonucuna da varabiliriz. Ancak enerji verimliliği, sürekliliği, yenilenebilirliği, depolanabilirliği, taşınabilirliği ve maliyeti göz önünde bulundurulduğunda fosil yakıtların güçlü bir rakibinin henüz olmadığını söyleyebiliriz. Ancak eninde sonunda alternatif bir veya daha fazla enerji kaynağı bulmamız gerekecektir.

Bugün en çok kullanılan ve ihtiyaç duyulan enerji türleri ısı ve elektrik enerjisidir. Bu nedenle tüm enerji kaynaklarından elde edilen enerjilerin büyük bölümü, ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülür. Dünyada bugün kullanılmakta olan önemli enerji kaynakları; Fosil yakıtlar (kömür-petrol-doğalgaz), su gücü, nükleer yakıtlar, güneş, yer-içi ısı (jeotermal) ve rüzgar enerjileri şeklinde sıralanabilir. Bütün bu enerji kaynaklarının her birinden enerji elde edilmesinin; ekonomik, canlı

sağlığı, çevre ve uygulanabilirlik maliyetleri bakımından avantaj ve dezavantajları vardır.

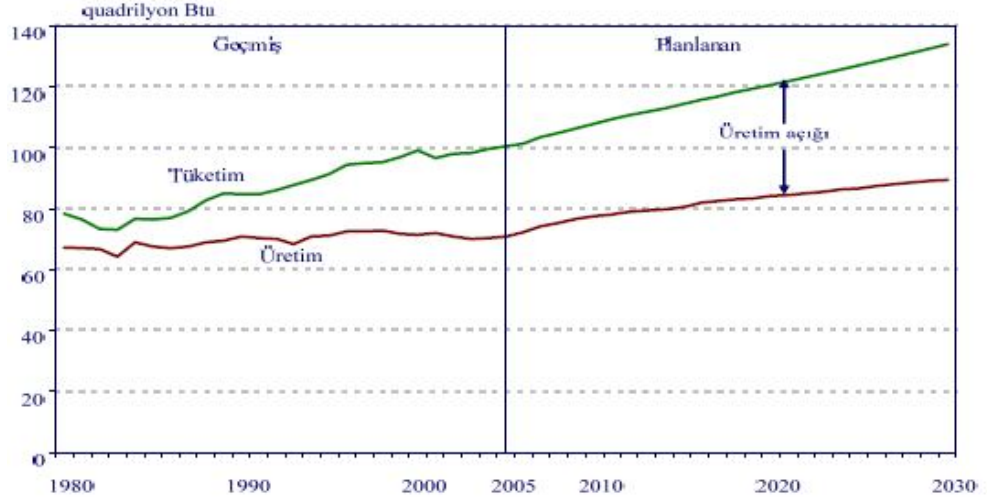
Toplum nüfusundaki artışa ve artan teknolojik gelişmelere paralel olarak, enerji ihtiyacı artmaktadır. Mevcut tükenir enerji kaynaklarının da eninde sonunda tükeneceğini düşünürsek, çevreye daha az zarar veren yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması gerektiği açıkça görülmektedir. Günümüzde ağaçlardan, bitkilerden, nehirlerden ve hatta çöplerden bile; yenilenebilir enerji elde etmek mümkün olabilmektedir. 1973 dünya petrol krizinin sonucu olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilgi artmıştır [48].

1.1 DÜNYA ENERJİ SEKTÖRÜNÜN GELİŞİMİ

Enerjinin verimli kullanımı ve ülkelerin gelişimlerdeki payı önemli ölçüde enerji kaynaklarının yeterli olmasına bağlıdır. Yirmi birinci yüzyıl ortalarına kadar, Dünya enerji talebinin büyük bir kısmının organik yakıtlardan karşılanacağı öngörülmektedir [7].

EIA (Energy Information and Administration) kurumu tarafından oluşturulan istatistiksel veriler ışığında, Dünya'nın toplam elektrik enerjisi üretim ve tüketimine dair sonuçlar Şekil 1.4' te gösterilmiştir. Dünyanın enerji tüketimi özellikle son yıllarda beklenenden çok daha fazla artmıştır [7].

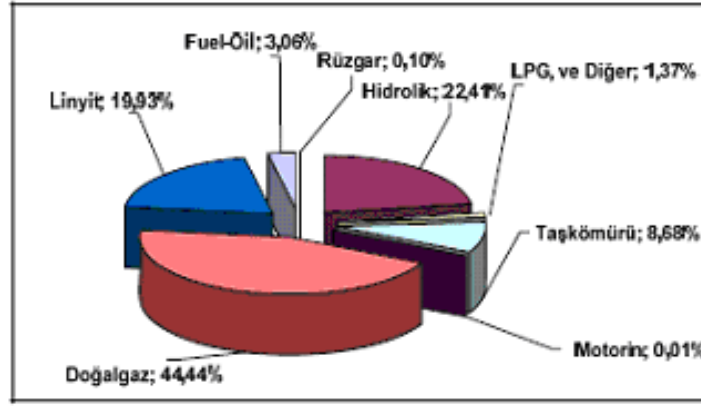
Şekil 1.4' te geçmiş otuz yıla ait elektrik üretim/tüketim bilgileri ve gelecek yirmi yılın tahmin edilen arz/talep bilgileri verilmiştir. Eğriden de görüldüğü gibi gelecek 20-30 yıl içinde, Dünyada üretilen enerji, gerekli enerji miktarını karşılamayacaktır. Ortaya çıkan enerji açığını azaltmak için, ya enerji kullanımında kısıtlamalara gidilmeli ki bu mevcut şartlarda mümkün gözükmemektedir. Çünkü özellikle ekonomik gelişmeye bağlı olarak sanayi yatırımları ve insanların kişisel enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Veya alternatif enerji kaynakları üzerindeki çalışmalar daha da artırılarak ilerletilmelidir [7].



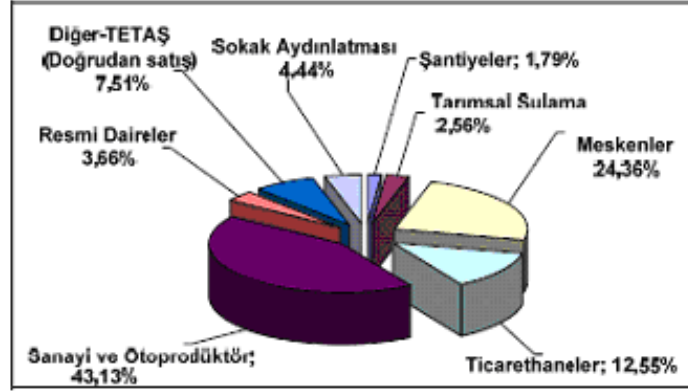
Şekil 1.4 Dünyanın Toplam Enerji Üretim ve Tüketimi (2005 sonrası olan durum öngörüdür) [7]

1.2 TÜRKİYE'DEKİ ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ VE TÜKETİMİ

Şekil 1.5' te Türkiye' deki kaynakların elektrik enerjisi üretiminde kullanılan miktarlarının yıllara göre oranı verilmiştir. 2000' li yıllarda suya bağlı enerji üretim kaynak (hidrolik) kullanım oranı fazla artmamış hatta azalma göstermiştir. Buna karşılık termik kaynakların kullanımı çok hızlı artış göstermiştir. Ayrıca ülkemizdeki jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir kaynakların kullanım oranı şekil üzerinde verilmiştir. Ancak kullanım oranlarının çok az olması sebebiyle, bu kaynakların oranı görülememektedir. Bu da ülkemizde henüz yenilenebilir enerji kaynaklarının yeterli oranda kullanılmadığını göstermektedir [7].



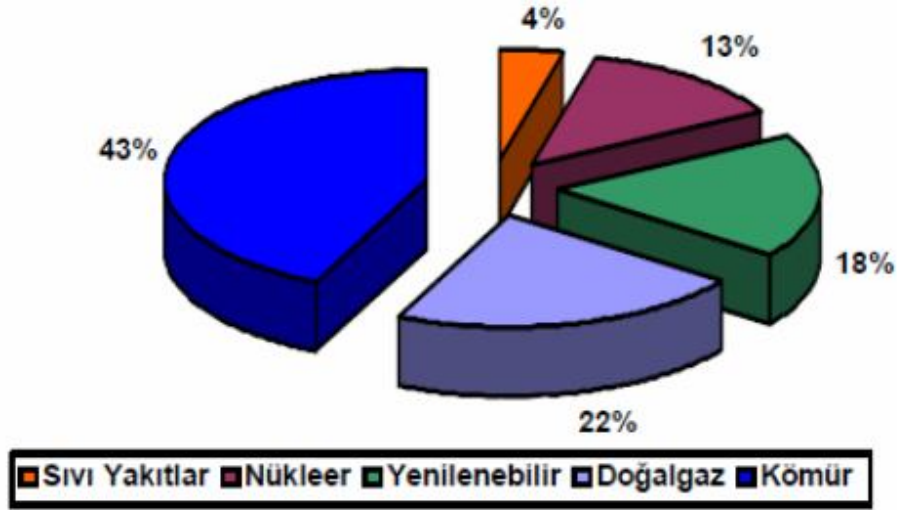
(a)



(b)

Şekil 1.5 Türkiye'nin 2006 Yılı İtibariyle Yıllık Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı ve Üretilen Enerjinin Kullanım Oranları [7]

Ülkemizin, 2007 yılında tükettiği elektrik enerjisi 105695 milyon TEP, ürettiği elektrik enerjisi 33387 milyon TEP dür. Üretim ile tüketim arasındaki fark olan 72308 milyon TEP kısım ise ithal edilen enerji kaynaklarından karşılanmaktadır [7]. Yani Türkiye ihtiyacı olan enerjinin yarıdan fazlasını ithal etmektedir. Bu durum enerji konusunda ülkemizin büyük oranda dışa bağımlı olduğunu açıkça göstermektedir. Türkiye'nin 2006 yılı itibariyle yıllık elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı ve üretilen enerjinin kullanım oranlarına ilişkin grafik Şekil 1.6' da verilmiştir.



Şekil 1.6 2007 Yılı İtibariyle Dünya’da Üretilen Elektrik Enerjisinin Kaynaklara Göre Dağılımı [7]

Şekillerden görüldüğü üzere ülkemizdeki enerji kaynaklarının tasarruflu kullanılması ve yeni enerji kaynakları bulmamız gerektiği sonucuna ulaşabiliriz. Birincil enerji kaynaklarımızın % 50’ sini çok düşük ısı değerine sahip ve yüksek kül oranlı linyitler oluşturmaktadır. Ayrıca 30000 MW’lık kullanılabilir ekonomik hidrolik enerji kapasitemiz bulunmaktadır. Bunun yaklaşık 22000 MW’ı şu anda var olan santrallerde üretilmektedir. Kalan 8000 MW’lık kapasitenin de 2020 yılına kadar kullanılabilir hale getirilmesi planlanmıştır [7].

1.3 ALTERNATİF ENERJİ KAYNAKLARI

1.3.1 YENİLENEBİLİR ENERJİ

Yenilenebilir enerjiyi, Dünyanın ömrü ölçütü olarak alındığında tükenmeyecek ve kaynağı sürekli yenilenebilir enerji olarak tanımlayabiliriz.

Şu anda Dünyada tüketilen elektrik enerjisinin %82’ si fosil bazlı enerji kaynaklarından ve nükleer kaynaklardan; geri kalan %18’ i ise yenilenebilir enerji kaynaklarından (hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal) elde edilmektedir [7]. Elektrik

enerjisi ihtiyacı karşılanırken genellikle kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil bazlı yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan çevre kirliliği de giderek artmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu karbondioksit (CO₂), azot dioksit (NO₂) ve kükürt dioksit (SO₂) salınımları kritik değerlere ulaşmıştır [8]. Teknolojik gelişmelerle birlikte ne yazık ki, enerji tüketiminin artması, mevcut fosil yakıt rezervlerinin gün geçtikçe azalmasına sebep olmakta, bu enerji kaynaklarının kullanımı ise çevre kirliliğine ve doğal dengenin bozulmasına neden olmaktadır.

Bu durum araştırmacıları yenilenebilir enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrojen, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimine ve diğer alanlara uygulanabilmesi için araştırmalar sürdürülmektedir [9]. Kullanım kolaylığı ve temizliği nedeniyle diğer enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisinin enerji tüketimi içerisindeki payı her geçen yıl artmaktadır. Elektrik enerjisinin dezavantajı, depolanamaması ve üretildiği anda hemen tüketilmesi gerekliliğidir. Bu özelliği nedeniyle mutlaka etkin bir planlama yapılarak; proje, tesis ve dağıtım safhaları koordineli olarak düzenlenmelidir. Planlama yapılırken enerjinin ucuzluğu, talebi karşılaması, üretimin güvenilir ve kaliteli olması, en önemlisi de kaynağın süreklilik arzemesine dikkat edilmelidir. Bu nedenle, elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak durumda bulunan alternatif enerji kaynakları, ihtiyacı karşılayabilecek durumda ise mutlaka değerlendirilmelidir [10].

Ülkemizdeki ekonomik gelişme güvenilir ve sürdürülebilir enerji üretimine bağlıdır. Ülkemizde özellikle büyük kentlerde yaşanan hava kirliliğinin azaltılması, Dünya ölçeğinde ise küresel ısınma riskinin azaltılması, bugün kullanılan daha az kirlüten ve daha az sera gazı yayan enerji kaynakları teknolojilerinin kullanılmasının artmasıyla mümkün olacaktır [11].






Güneş enerjisinden elektrik üretimi için tasarlanan fotovoltaik (PV) pillerin verimleri giderek artmakta ve maliyetleri düşmektedir. Küresel ısınma ve diğer çevresel etkiler yüzünden artık enerji üretiminde fosil yakıtların yerine güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal gibi yenilenebilir kaynakların kullanımı zorunlu hale gelmektedir [12].

1.3.2 YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE AVANTAJLARI




1.3.2.1 HİDROELEKTRİK ENERJİ

Hidroelektrik, su gücünden elektrik elde etme işine varilen addır. Türkiye'nin teknik olarak değerlendirilebilir hidrolik enerji potansiyeli 216 milyar kWh, bunun 126 milyar kWh'ı ekonomik olarak değerlendirilebilir durumdadır. Şu anda ise bu potansiyelin % 35' i değerlendirilmiş bulunmaktadır. 2020 yılında hidrolik enerji potansiyelinin % 90'dan fazlasının değerlendirilmesi öngörülmektedir. Türkiye'deki hidrolik enerjinin toplam üretilen enerji içerisindeki yıllara göre payı: 1990' da %40, 2004' te %31, 2006' da %22.4' tür [7].

HİDROELEKTRİK ENERJİSİNİN AVANTAJLARI

-  Kirlilik yaratmaz.
-  Enerji ihtiyacında çok hızlı devreye girer.
-  Acil durumlarda hızla devreden çıkarılabilir.
-  Doğal kaynaklar kullanılırken dışa bağımlı değildir.
-  Sulama amaçlı da kullanılabilir.

HİDROELEKTRİK ENERJİSİNİN DEZAVANTAJLARI

-  Yatırım maliyetleri fazladır.
-  Toplam inşaat süresi uzundur.
-  Yağışlara bağlı olarak su taşkını sebebiyle çevreye zararlı etkileri olabilir.

1.3.2.2 JEOTERMAL ENERJİ

Jeotermal enerji, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş olan ve sıcaklığı yeryüzü sıcaklığının üzerinde olan sıcak suyun kullanılmasıyla elde edilen enerji türüdür.

Jeotermal enerji kaynakları sıcaklıklarına bağlı olarak başta elektrik üretimi olmak üzere, ağırlıklı olarak ısıtıcılıkta (konut, sera, termal tesis ısıtması), endüstriyel uygulamalar, termal turizm, tedavi ve kültür balıkçılığında kullanılmaktadır.

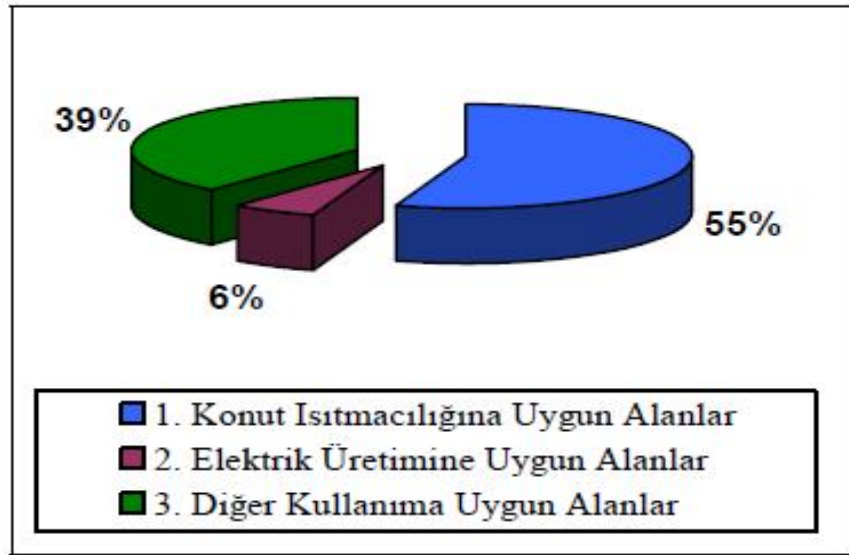
Türkiye'de 1000 civarında mineralli su kaynağı ve jeotermal kuyu mevcuttur. Sıcaklığı 40°C' nin üzerinde olan jeotermal alan sayısı ise 170'dir. Bunların yüksek sıcaklığa sahip olup, elektrik üretimine uygun olanlardan bazı örnekler Çizelge 1.3' de gösterilmiştir [7].

Çizelge 1.3 Türkiye'deki Önemli Jeotermal Enerji Kaynakları

<i>Saha Adı</i>	<i>Sıcaklık (°C)</i>	<i>2010 Tahminleri (MWe)</i>	<i>2013 Tahminleri (MWe)</i>
Denizli-Kızıldere	200-242	75	80
Aydın-Germencik	200-232	100	130
Manisa-Alaşehir-Kavaklıdere	213	10	15
Manisa-Salihli-Göbekli	182	10	15
Çanakkale-Tuzla	174	75	80
Aydın-Salavatlı	171	60	65
Kütahya-Simav	162	30	35
İzmir-Seferihisar	153	30	35
Manisa Salihli-Caferbey	150	10	20
Aydın-Sultanhisar	145	10	20
Aydın-Yılmazköy	142	10	20
İzmir-Balçova	136	5	5
İzmir-Dikili	130	30	30
Toplam		455	550

Türkiye jeotermal enerjide dünyadaki jeotermal ısı kullanımını ve kaplıca kullanımında, Çin, Japonya, ABD ve İzlanda'nın ardından 5. sırada yer almaktadır.

Termal kapasitesinin 3173 MWt (Mega Watt Termal), kullanılabilir potansiyelinin ise 31500 MWt dolayında olduğu tahmin edilmektedir [7]. Türkiye'deki jeotermal enerji kullanımı halen; şehir, konut, termal tesis, sera vb. uygulamalardaki toplam 665 MWt'lık 61000 konut eşdeğeri merkezi ısıtma ve 327 MWt'lık 195 adet kaplıca kullanımı olmak üzere, toplam 992 MWt doğrudan ısı kullanımı ve 17.5 MWe (Mega Watt Elektrik) elektrik üretimi şeklinde kullanılmaktadır. Türkiye' de jeotermal enerjinin kullanım alanına göre dağılımını gösteren grafik Şekil 1.7' de verilmiştir.



Şekil 1.7 Türkiye'de Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanlarına Göre Dağılımı [7]

JEOTERMAL ENERJİNİN AVANTAJLARI

- ✚ Çevre dostudur. Suyun ısıtılması ve buharlaştırılması için karbon temelli yakıtlara ihtiyaç duymaz.
- ✚ Dışa bağımlılık gerektirmez.

JEOTERMAL ENERJİNİN DEZAVANTAJLARI

✚ Yapılarında bulunan hidrojen sülfür ve karbondioksit gibi gazların açığa çıkması nedeniyle reenjeksiyon (tekrar basma) gereklidir. Suyun etken olduğu jeotermal kaynaklardan çok yüksek miktarlarda sıcak su üretimi yapılır. Üretilen sıcak suyun bir kısmı sıcak su olarak doğrudan kullanılırken geri kalan önemli bir kısmı ise merkezi jeotermal ısıtma sistemlerinde ısıyı alındıktan sonra artık su olarak kalır. Bu suyu yeraltına tekrar geri basmak için açılan kuyulara reenjeksiyon kuyusu denir [49].

1.3.2.3 RÜZGAR ENERJİSİ

Türkiye'nin teknik rüzgâr enerjisi potansiyeli 166 Terrawatt saat/yıl' dır. Bu değer 2001 yılında Türkiye'deki tüm elektrik tüketiminden fazladır (130 TWs/yıl). Türkiye' de rüzgâr enerjisi kullanımının artırılmasına yönelik olarak, Türkiye rüzgâr haritası çıkarılmış ve bölgelere göre kurulabilecek tesislerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Ülkemizin rüzgâr enerjisinden elektrik üretimine başlaması ise 1990'lı yılların ortalarına denk gelmiştir. İlk olarak 1.5 MW'lık bir rüzgâr çiftliği Şubat 1998'de Çeşme'de kurulmuştur. Bu çiftlik Türkiye'nin ilk ticari rüzgâr yatırımıdır [45]. Aralık 1998' de yine Çeşme'de 7.2 MW'lık, Haziran 2000' de ise Bozcaada' da 10.2 MW'lık rüzgâr santralleri devreye girmiş durumdadır. Uluslararası Rüzgâr Enerjisi Birliği' nin (GWEC) 2008 yılı raporuna göre Türkiye' deki 2000 yılı ile 2005 yılı arasında kurulu rüzgâr enerjisi gücü 19 MW seviyesinde kalmıştır. Ancak son birkaç yıldaki yapılan projeler ve yatırımlar ile ülkemizde şu anda kurulu güç 1100 MW düzeyine yükselmiştir. Devam eden projeler ve mevcut lisansların hayata geçmesiyle bu rakamın ileriki zamanda 5600 MW' a ulaşacağı planlanmaktadır. Ayrıca Türkiye'nin rüzgar enerjisinde 50000 megawatt (MW) gibi oldukça yüksek bir üretim potansiyeline sahip olduğu da belirlenmiştir. [45]

RÜZGAR ENERJİSİNİN AVANTAJLARI :

- ✚ Kararlı, güvenilir, sürekli bir kaynaktır.
- ✚ Dışa bağımlı değildir.
- ✚ Zamanla gelişen teknoloji sonucu birim maliyetleri düşmektedir.

RÜZGAR ENERJİSİNİN DEZAVANTAJLARI :

- ✚ Türbin için geniş alanlar gerekmektedir.
- ✚ Fazla yer işgal ederler. Gürültüdürlük ve kuş ölümlerine neden olabilirler.
- ✚ Radyo ve TV alıcılarında parazitlenme yaparlar. Bu sebeple İngiltere ve diğer bir çok Avrupa ülkesinde büyük rüzgar türbinlerinin, neden oldukları çevre sorunları nedeniyle milli park alanlarının sınırları içine ve çok yakınlarına kurulması yasaklanmıştır [50].

Ülkemizin geneli olmasa da rüzgar enerjisi yönünden zengin sayılan bir çok bölgesi mevcuttur. Dünyada ise 1990 yılında kurulu rüzgar santralleri gücü 2160 MW iken bu rakam 1994' de 3738 MW, 1995' de 4843 MW, 1996 yılında ise 6097 MW düzeyine gelmiştir. Özellikle son yıllarda rüzgar enerji santrallerinde gözle görülür bir artış olmuştur [13].

Bu enerjinin hammaddesi olan rüzgar ücretsizdir. Ancak, rüzgar enerjisi tamamen bedava bir enerji değildir. Rüzgarın taşıdığı enerjinin tutularak enerjiye dönüştürülmesi, bir maliyet gerektirir. ABD 'de 750 Dolar/kW olan maliyet, Avrupa'da 1400 Dolar/kW düzeyindedir. Bu enerjinin ekonomik olması için 1000 Dolar/kW olması gerekmektedir. Denizlere kurulan rüzgar türbinleri ise karadakilere oranla iki kat pahalıya mal olmaktadır. Gelişen teknoloji ile bu rakamların yakın bir gelecekte çok daha aşağılara çekilmesi beklenmektedir.

1.3.2.4 BİYOKÜTLE ENERJİSİ

Biyoküteller de, petrol ve kömür gibi, güneş enerjisinin depolanmış halidirler. Bitkiler güneş enerjisini fotosentez aracılığıyla tutarlar. Biyoyakıtların içerisindeki karbon, bitkilerin havadaki karbondioksiti parçalaması sonucu elde edildiği için, biyoyakıtların yakılması, dünya atmosferinde net karbondioksit artışına neden olmaz. Bu nedenle, pek çok insan, atmosferdeki karbondioksit miktarının artışına engel olabilmek için, fosil yakıtlar yerine biyoyakıtların kullanılması gerektiği görüşünü savunmaktadırlar [14].

Dünyanın çoğalan nüfusu ve sanayileşmesi ile giderek artan enerji gereksinimi çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek kaynaklardan belki de en önemlisi biyokütle enerjisidir. Ayrıca, biyokütle içinde, fosil yakıtlarda bulunan kanserojen madde ve kükürt olmadığı için, çevreye zarar son derece azdır. Bütün bunların ötesinde, bitki yetiştirilmesi, güneş var olduğu sürece süreceği için, biyokütle tükenmez bir enerji kaynağıdır. Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanımındaki olumlu ve olumsuz yönleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

BİYOKÜTLE ENERJİSİNİN AVANTAJLARI :

- ✚ Hemen her yerde yetiştirilebilmesi
- ✚ Üretim ve çevrim teknolojilerinin iyi bilinmesi
- ✚ Her ölçekte enerji verimi için uygun olması
- ✚ Düşük ışık şiddetlerinin yeterli olması
- ✚ Depolanabilir olması
- ✚ 5 – 35 ° C arasında sıcaklık gerektirmesi
- ✚ Sosyo-ekonomik gelişmelerde önemli olması
- ✚ Çevre kirliliği oluşturmaması
- ✚ Sera etkisi oluşturmaması
- ✚ Asit yağmurlarına yol açmaması

BİYOKÜTLE ENERJİSİNİN DEZAVANTAJLARI :

- ✚ Düşük verime sahip olması
- ✚ Tarım arazileri için rakip olması, tarım arazilerinin azalmasına sebep olabilmesi
- ✚ Kullanımı sonucu açığa çıkan su miktarının fazla olup, nemi ve ısıyı arttırması

1.3.2.5 DENİZ KÖKENLİ YENİLENEBİLİR ENERJİ

(DALGA ENERJİSİ)

Deniz dalga enerjisi, deniz sıcaklık gradyent enerjisi, deniz akıntıları enerjisi (boğazlarda) ve med-cezir enerjisi olarak tanımlanabilmektedir. Ülkemiz için üzerinde durulabilecek enerji grubu ise özellikle deniz dalga enerjisidir.

Deniz dalga enerjisinin temelinde yine rüzgar enerjisi yatmaktadır. Ülkemizin Marmara hariç olmak üzere açık deniz kıyı uzunluğu 8210 km civarındadır. Bunun turizm, balıkçılık kıyı tesisleri gibi nedenle en fazla beşte birlik kısmı kullanılabilir ve bunun için yıllık olarak 18.5 TWh / yıl düzeyinde bir enerji elde edilebilir [15].

DENİZ KÖKENLİ YENİLENEBİLİR ENERJİNİN AVANTAJLARI :

- ✚ Dünyamızın 3 / 4 ü denizlerle çevrilidir.
- ✚ Doğal ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır.
- ✚ Sera gazı salınımına neden olmayan bir enerji türüdür.
- ✚ Hammadde alanla sınırlı olmakla beraber çok miktarda bulunur.
- ✚ Tesis öngörülen enerji ihtiyacına göre boyutlandırılabilir ve tüketileceği yere yakın kıyı şeridinde yapıldığı takdirde kısa iletim hatları yeterli olacaktır.
- ✚ Çevre dostudur.

- ✚ Gürültüsüz çalışır.
- ✚ Balıkların göç yollarını olumsuz yönde etkilemez.
- ✚ Üretim teknolojileri hızla gelişmektedir.
- ✚ Dış ülkelere bağımlı olmayı gerektirecek hiçbir girdisi yoktur. Yerli teknoloji ile üretilebilir.

DENİZ KÖKENLİ YENİLENEBİLİR ENERJİNİN DEZAVANTAJLARI :

- ✚ Birincil enerji kaynağı olamaz, birincil depolama imkansız.
- ✚ Coğrafi olarak uzakta üretilmek zorunluluğu olabilir, bu da ek maliyet anlamına gelebilir (deniz dibi kabloları vb.).
- ✚ Tesislerdeki ekipmanın büyük ve güçlü dalgalara dayanıklı olmasının yanı sıra elektrik üretebilecek hassasiyette tasarlanması gerekir.
- ✚ Üretim, dalga frekansına bağlı olduğundan gücün düzenlenmesi zamanla sorun yaratabilir.
- ✚ Deniz ortasında yüzen sistemlerle elde edilen enerjinin bağlantısının verimli olarak yapılması için ek yatırım gerekebilir.
- ✚ Santral verimlilikleri iyileştirilmelidir.

1.3.2.6 HİDROJEN ENERJİSİ

Atmosferden veya sudan elde edilmiş hidrojen yakıt olarak kullanılabilir. Doğada bileşikler halinde bol miktarda bulunan hidrojen serbest olarak bulunmadığından doğal bir enerji kaynağı değildir. Bununla birlikte hidrojen birincil enerji kaynakları ile değişik hammaddelerden üretilebilmekte ve üretiminde dönüştürme işlemleri kullanılmaktadır. Bu nedenle hidrojen enerjisi, elektrikten neredeyse bir asır sonra teknolojinin geliştirdiği ve geleceğin alternatif kaynağı olarak yorumlanan bir enerji taşıyıcısıdır.

Hidrojen karbon içermediği için fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunlar yaratmaz. Isınmadan elektrik üretimine kadar çeşitli alanların ihtiyacına cevap verebilecektir. Gaz ve sıvı halde olacağı için uzun mesafelere taşınabilecek ve iletimde kayıplar olmayacaktır.

2010 yılından itibaren hidrojenin ticari amaçlar için kullanılması düşünülmektedir. Her türlü maliyet göz önüne alındıktan sonra ilk yıllarda benzinden 1.5 –5.5 arası daha pahalı olması beklenmektedir. Fakat gelecek yıllarla birlikte çevresel katkıları da göz önüne alındığı zaman bu maliyetin çok daha aşağılara çekilmesi hesaplanmaktadır [15].

HİDROJEN ENERJİSİNİN AVANTAJLARI :

- ✚ Hidrojen yenilenebilir enerji kaynakları da dahil olmak üzere herhangi bir enerji kaynağı kullanılarak üretilebilir.
- ✚ Fosil yakıtlara göre çok daha verimli bir enerji kaynağıdır.
- ✚ Hava ve çevre kirliliği yaratmaz.

HİDROJEN ENERJİSİNİN DEZAVANTAJLARI :

- ✚ Hava ile karıştığında düşük konsantrasyonlar da kolayca yanabilir. Bu durum güvenlik önlemlerini arttırmayı gerektirir.
- ✚ Hidrojenin sıvı formda depo edilmesi zordur. Çok düşük sıcaklıklar gerektirir.
- ✚ Şu an için üretim maliyeti yüksek düzeydedir.

1.3.2.7 GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneşten gelen ve dünya atmosferi dışında şiddeti sabit ve 1370 W / m^2 olan ve yer yüzeyinde $0-1100 \text{ W / m}^2$ değerleri arasında değişen yenilenebilir bir enerji

kaynağıdır. Özellikle ısınma ve elektrik üretimi amaçlı kullanılabilir. Ülkemizin yıllık güneşlenme süresi ortalama olarak 2640 saattir. [51].

Çizelge 1.4 Türkiye'deki Bölgelerin Yıllık Bazda Ortalama Güneşlenme Süreleri [20]

BÖLGE	Güneşlenme Süresi (saat /yıl)
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	3016 saat
Akdeniz Bölgesi	2923 saat
Ege Bölgesi	2726 saat
İç Anadolu Bölgesi	2712 saat
Doğu Anadolu Bölgesi	2693 saat
Marmara Bölgesi	2528 saat
Karadeniz Bölgesi	1966 saat

Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölge Güneydoğu Anadolu bölgesidir. Bunu sırası ile Akdeniz, Ege, İç Anadolu, Doğu Anadolu, Marmara ve Karadeniz Bölgesi izlemektedir.

Güneş enerjisi günümüzde elektrik enerjisi üretiminde, konutlarda ve iş yerlerinde ısıtmada, tarımsal teknolojide, sanayide, ulaşım araçlarında, iletişim araçlarında, sinyalizasyon ve otomasyonda kullanılmaktadır.

GÜNEŞ ENERJİSİNİN AVANTAJLARI :

- ☀ Doğrudan güneş enerjisini kullanır.
- ☀ Doğal ısıtma ve soğutma sistemleri kullanarak binaların gereksiz ve aşırı ticari enerji tüketimlerini önler.
- ☀ Çevre değerlerini korur, çevreye verilen zararları en aza indirir.
- ☀ Doğal ve sağlığa zararsız malzemeler kullanır.
- ☀ Ekonomiktir.
- ☀ Dışa bağımlı değildir.

GÜNEŞ ENERJİSİNİN DEZAVANTAJLARI :

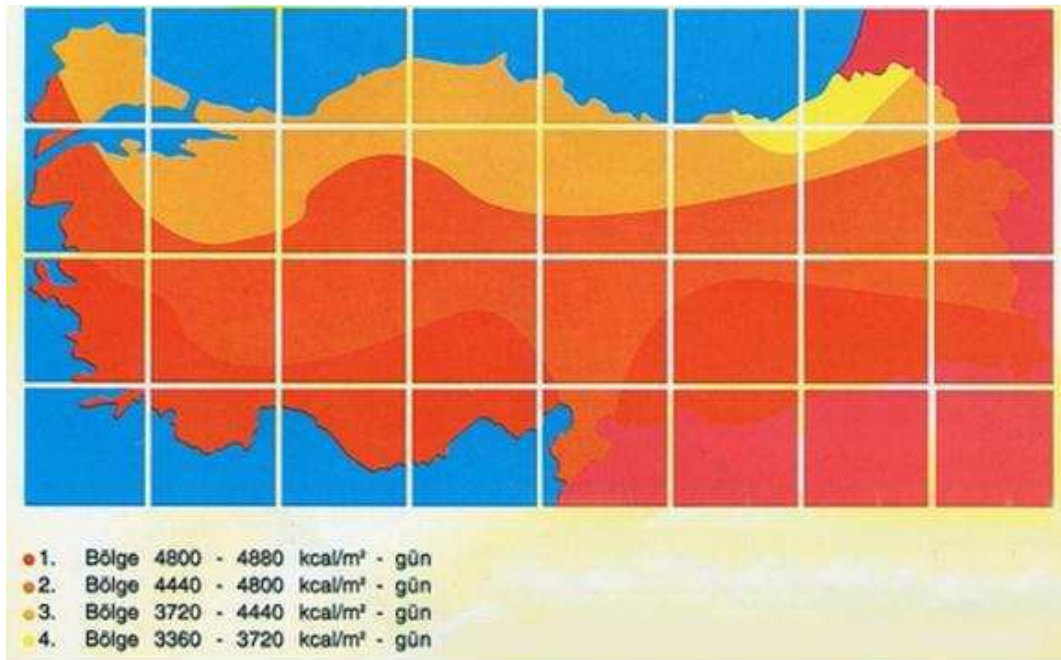
- ✚ Yarıiletkenlerin temini sıkıntısı.
- ✚ Verim / maliyet oranının halen yüksek olması.

Güneş enerjisinin kayda değer bir dezavantajı bulunmamaktadır. Verim arttırma, maliyet ve depolama zorlukları şimdilik önümüzde durmaktadır. Ancak fotovoltaik piller ile ilgili çalışmalar arttıkça bu sorunlar aşılabacaktır.

Güneşin çapı 1,4 milyon km'dir. Çapı Dünya'nın çapının 110 katıdır. Dünya'dan $1,5 \times 10^{11}$ m uzaklıkta ve oldukça yüksek sıcaklıkta bir yıldızdır. Yüzey sıcaklığı yaklaşık 6000 K olup iç kısmındaki sıcaklığın 8×10^6 K ile 4×10^7 K arasında değiştiği tahmin edilmektedir [52].

Güneş doğal ve tükenmeyen bir füzyon reaktörüdür. Güneşin enerji kaynağını 4 Hidrojen atomunun 1 Helyum atomuna dönüşmesi sırasında gerçekleşen reaksiyon karşılar. 4 hidrojen atomu 4,032 akb birim ağırlıktadır. Halbuki 1 Helyum atomu 4.003 akb birim ağırlıktadır. Bu olay sonucunda 0.029 akb kütle $E = mc^2$ bağıntısı sonucu enerjiye dönüşmektedir. Yani güneşte her saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle enerjiye dönüşerek ışınım şeklinde uzaya yayılmaktadır. Bu enerji miktarı 3.86×10^{26} J'dür. Toplam enerji rezervi 1.785×10^{47} J olan Güneş daha milyonlarca yıl ışınmasını sürdüreceğinden dünya için sonsuz olarak kabul edilebilecek bir enerji kaynağıdır. "Dünyanın çapına eşit bir dairesel alan üzerine çarpan güneş gücü, 178 trilyon kW düzeyindedir" [16]. Güneş enerjisi uzaya ve gezegenlere elektromanyetik ışınım (radyasyon) biçiminde yayılır. Güneş'ten Dünya'ya gelen enerji, Dünya'da bir yılda kullanılan toplam enerjinin yaklaşık 20 bin katıdır [16]. Teorik olarak Dünya'da kullanılabilir güneş enerjisi miktarı ise 120000 TW düzeyindedir [54]. Bu da yaklaşık 76 milyar TEP'e eşdeğer enerjidir [55]. Şu anda güneşten yıllık enerji üretiminin 3942 MWh (339 TEP) olduğunu baz alırsak, milyonda 4.6'ya karşılık gelen kullanım oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir [55].

Türkiye coğrafi konumu itibariyle dünyada güneş kuşağı olarak tarif edilen bölge içinde bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak ülkemiz güneş enerjisi kullanım imkanı açısından özellikle Avrupa ülkelerine göre çok daha şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü' nün (DMI) verileri ve Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7.2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti ise 1311 kWh / m² yıl (günlük toplam 3.6 kWh/m²) düzeyindedir [12].



Şekil 1.8 Türkiye'nin Güneşlenme Haritası [12]

Güneş enerjisi, yeni ve yenilenebilir bir enerji kaynağı oluşu yanında; insanlık için önemli bir sorun olan çevreyi kirletici atıklarının bulunmaması, kolay uygulanabilmesi ve karmaşık bir teknoloji gerektirmemesi gibi üstünlükleri sebebiyle son yıllarda üzerinde yoğun çalışmalar yapıldığı bir alandır. Güneş enerjisi, dünyadaki hayatın temelini oluşturur, bol ve temiz bulunan bir kaynaktır [52]. Güneş enerjisinin kullanım alanları, özel amaçlara göre değişebilmektedir. Bu enerjinin kullanımındaki temel amaç, ekonomik rekabet koşullarında olabildiğince

fosil yakıtların yerini almasıdır. Amaçlanan ve uygulanan kullanım alanları şöyle sıralanabilir:

- ✚ Konutlarda, işyerlerinde ve gündelik yaşam yapısının çeşitli kesimlerinde ısı ve elektriğe dayalı bir bölüm enerji ihtiyacının karşılanması.
- ✚ Endüstriyel enerji ihtiyacının bir bölümünün, ısı ve elektriğin birlikte üretim teknolojisiyle karşılanması.
- ✚ Kırsal yörelerde ve tarımsal teknolojide enerji ihtiyacının karşılanması.
- ✚ Kara, deniz ve hava taşıtlarının bir bölümünde hareketi sağlayıcı kaynak olarak kullanılması.
- ✚ İletişim araçlarında (radyo, TV, telefon), sinyalizasyon ve otomasyonda bir bölüm enerji ihtiyacının karşılanması.
- ✚ Elektrik sektörünün birincil kaynakları arasına güneş enerjisinin de girmesi.
- ✚ Askeri alanda özel amaçlarla güneş enerjisinin kullanılması.
- ✚ Uzay çalışmalarında enerji gereksiniminin karşılanması

2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİ

2.1 Güneş Pillerinin Tarihi

1839 yılında Edmond Becquerel, elektrolit üzerine düşen ışığın, elektrotlar arasında bir gerilim yarattığını gözlemleyerek fotovoltaik olayı keşfetmiştir. Bu, ilk kez fotovoltaik etkinin gözlemlendiği durumdur. Katılardaki benzer bir olayı ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day göstermiştir. 1914 yılında fotovoltaik diyotların (akımı tek yönde geçiren elektronik devre elemanı) verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında silikon kristali üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu tarih fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilir. Ayrıca bu tarihten sonraki yıllarda uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için de araştırmalar ve tasarımlar yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960' ların başından beri uzay çalışmalarında kullanılan malzemelerdir [46].

Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954' lerde başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki "1. petrol bunalımı" ndan sonraki yıllarda olmuştur. Amerika' da, Avrupa' da, Japonya' da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları devam etmekte, diğer yandan çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu nedenle daha ucuza maledilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalar hızlanmıştır [53].

Güneş pilleri konusunda araştırmalar, yoğun bir şekilde devam etmektedir. Güneş pilleri genellikle yarıiletken maddeler kullanılarak yapılırlar. Fotovoltaik pillerin yapılarının anlaşılması ve verimlerinin arttırılabilmesi için yarıiletken maddelerin özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

2.2 Yarıiletkenler

Dünyadaki maddelerin çoğu katı haldedir. Katılar düzenli kristalik yapıda veya amorf (yığın) halde bulunabilirler. Kristaller içlerinde “bölge” olarak isimlendirilen, kristal yapıları barındırırlar. Eğer kristalde; daha küçük bölgelerin hepsi aynı yapıya sahipse, buna tek kristal adı verilir. Bölgeler farklı ise; yani kristal yapılanmaları değişiyorsa, buna da polikristal denir. Şu noktaya dikkat edilmelidir ki; tek kristal, tümüyle aynı yapıya sahip değildir ve bölgeler birbirinden farklılıklar gösterebilir.

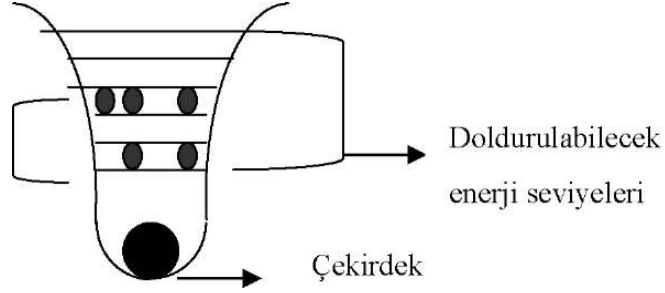
Katı maddeleri elektriksel ve optik özelliklerine göre üç gruba ayırabiliriz. Bunlar; iletken, yalıtkan ve yarıiletken malzemelerdir. En genel tanımıyla elektriği iyi ileten maddelere iletken, iletmeyen veya çok çok az ileten maddelere yalıtkan denir. Belli bir değere kadar elektriği iletmeyen, ancak belli bir eşik değerinden sonra ileten maddelere ise yarıiletken denir. Yarıiletkenler elektrik iletkenliği bakımından, iletken ile yalıtkan arasında kalan maddelerdir diyebiliriz. Yarı iletkenler periyodik cetvelde 3A ve 5A gruplarında bulunurlar.

İlk olarak Edmond Becquerel 1839 yılında aynı elektrolit içine batırılmış iki elektrottan birinin üzerine düşen ışığın, elektrotlar arasında bir potansiyel farkı oluşturduğunu görmüştür. Daha sonra Faraday 1883 yılında, sıcaklık artışıyla gümüş sülfatın direncinin azaldığını keşfetmiştir [18]. Bu buluş bugünkü elektronik sanayi açısından dönüm noktasıdır denebilir.

2.3 Yarıiletkenlerin Yapısı

Yarıiletkenlerin yapısı, enerji bant modeliyle açıklanabilir. Enerji bant yapılarına bakarak iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenleri kıyaslayabiliriz. Element atomları, pozitif yüklü çok ağır bir çekirdek ile onun etrafında farklı yörüngelerde hareket eden belirli sayıda negatif yüklü elektronlardan meydana gelmiştir. Elektronlar, atomun çevresinde belirli enerji seviyelerinde bulunurlar. Dolu bir tabakaya başka bir elektron yerleşemez. Yani her bir elektronun tüm kuantum

sayıları aynı olamaz. Şekil 2.1’ de elektronların yerleşebilecekleri yörüngeler sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yalıtılmış Durumdaki Bir Atomun Enerji Seviyelerinin Şematik Olarak Gösterimi [18]

Yatay çizgiler enerji seviyelerini belirtmektedir. Çekirdeğe en yakın elektronun, enerjisinin en küçük olduğu hesaplanmıştır. Yani elektronlar önce atoma en yakın olan, düşük enerji seviyelerine yerleşirler. Farklı yörüngeler, farklı sayıda elektron alabilirler. 1. yörünge 2, ikinci yörünge 8, üçüncü yörünge 18 elektron alabilir. Bu elektronlardan her birini bir üst veya daha üst yörüngelere çıkarmak mümkündür. Farklı yörüngelere çıkarmak için gereken enerji miktarları da farklıdır. H atomunu inceleyen Bohr; elektronların üst yörüngelere çıkabilmesi için atomun enerji alması (absorbe etmesi) gerektiğini, elektronun üst enerji bölgesinden daha alt enerji bölgelerine geçişi sırasında ise dışarı enerji yaydığını ortaya koymuştur. Bu durumu 2.1 nolu bağıntı ile ifade edebiliriz.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (2.1)$$

λ yayılan fotonun dalga boyunu, R Rydberg sabitini, n_1 düşük enerjili enerji seviyesini, n_2 ise yüksek enerjili enerji seviyesini temsil eder. Birinci halde, yani elektron yüksek bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine geçtiğinde, enerjisi E_{ilk} ve E_{son} seviyeleri arasındaki farka eşit ve frekansı,

$$v = c / \lambda \quad (2.2)$$

$$E_{son} - E_{ilk} = h c / \lambda \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilen bir foton yayınlanır. Burada; E_{ilk} elektronun geçiş yapmadan önce bulunduğu seviyenin enerjisi, E_{son} elektronun geçiş yaptıktan sonra bulunduğu seviyenin enerjisi ve h Planck sabitidir.

Tersi durumda; yani elektronun düşük bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine çıkabilmesi için elektrona, en az bu iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit bir enerji vermek gerekir. Elektrona yeterli enerji verildiğinde, elektron denge konumu etrafında titreşim hareketi yapmaya başlar. Bu enerji aşağıdaki etkilerden biri ile sağlanabilir:

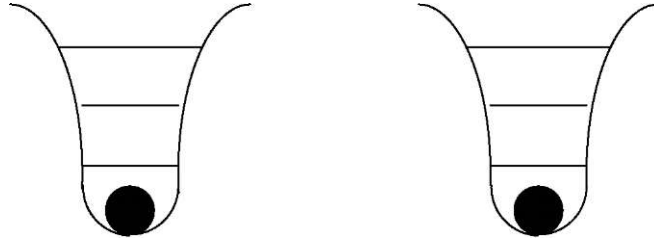
- 1) Elektriksel etki
- 2) Isı etkisi
- 3) Işık etkisi
- 4) Elektronlar kanalıyla yapılan bombardıman etkisi
- 5) Manyetik etki

Enerji yeterli miktarda ise titreşimin genliğine bağlı olarak; elektron bulunduğu yörüngeyi terk ederek, daha yüksek enerji seviyesindeki bir yörüngeye geçebilir. Bu durumda elektronun enerji absorblaması söz konusudur. Elektronun enerji alarak daha yüksek enerji seviyesine çıkmasına uyarılma denir. Uyarılmış

elektronlar, bu seviyede çok kısa bir süre kalırlar. Elektron, iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit enerjiye sahip bir foton yayımlayarak ilk konumuna geçer. Elektronu yeterli enerji verilirse, elektron atomdan kopar. Bu olaya ise iyonlaşma denir.

2.3.2 Enerji bantları

Gaz halinde atomu yalıtılmak teorik olarak mümkündür. Ancak katılarda atomlar arası uzaklık çok düşüktür ve atomların birbirlerini elektrostatik olarak etkilemeleri sebebiyle elektronlar eşleşen enerji seviyelerini doldururlar [47].

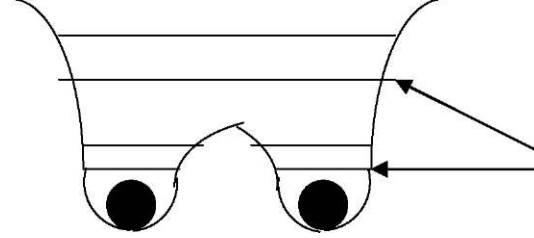


Şekil 2.2 Dış Elektronlarına Ait Enerji Seviyeleri Belirtilmiş İki Atomun Şematik Gösterimi [18]

Değerlik elektronları ve son tabakanın hallerinde ayrılımlar olur. Yalıtılmış durumdaki her bir enerji seviyesinin yerini; bir birinden farklı, fakat birbirine yakın enerji seviyeleri alır. Bu enerji seviyeleri arasındaki fark $\sim 10^{-19}$ eV 'dur ve fark çok küçüktür. Bu sonuca bağlı olarak, bu seviyeler arasındaki enerji aralığı sürekli kabul edilerek, enerji bandı olarak tanımlanır [47].

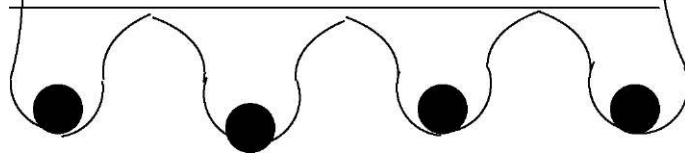
Katılarda kristal yapı içinde atomların birbirine yakındırlar. Bir atomun değerlik elektronlarını, komşu atomun çekirdeğinin çekmesi sebebiyle enerji aralığı küçülür. Yani elektronun atomdan kopması, diğer atomun çekirdeği üzerine geçmesi için gereken enerji azalır.

Şekil 2.3. 'de birbirine yakın olan atomlar arasında enerji seviyesi farkının azaldığı sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3 İki Atomun Birbirine Çok Yakın Olduğu Durumdaki Enerji Seviyesi Diyagramı [12]

Bir araya gelen atomların oluşturduğu düşük farklı enerji topluluğunun tümünü enerji bandı olarak adlandırabiliriz.



Şekil 2.4 Kristal Yapıda Enerji Bandı Oluşumu [12]

Elektriksel iletkenlik için atomun dış kılıfındaki elektronlara karşılık gelen bantlar söz konusudur. Bu elektronlar, komşu atomlarla olan bağlantıyı sağlarlar.

Serbest hale geçtiklerinde, yani atomlar iyonize olduklarında; bir elektrik alanın etkisi altında oluşan toplu hareketleri elektrik akımını meydana getirir.

Mutlak sıfır sıcaklığında, yalıtılmış durumdaki bir yarıiletken atomu göz incelenirse; atom en temel haldedir. Elektronlar en düşük enerjiye sahiptir. Element

atomlarının bir araya gelmesiyle oluşan kristalde ise temel seviye, değerlik bandı denilen bir enerji seviyesi ile değişmiştir. Bu bant, diğer bantlara göre en düşük enerji seviyeli banttır. Elektronlar mevcut enerji seviyelerinin her birine birer tane olacak şekilde yerleşirler [47].

Yalıtılmış durumdaki elektronun üst enerji seviyelerinde elektronu bulunmaz. Boş olan bu banda, iletkenlik bandı denir. Değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasında oluşan ve elektron bulunması mümkün olmayan bölgeye yasak bant denir [47]. Elementin iletkenlik özelliğini gösterebilmesi için elektronlarının yasak bant aralığını atlamaları gerekir.

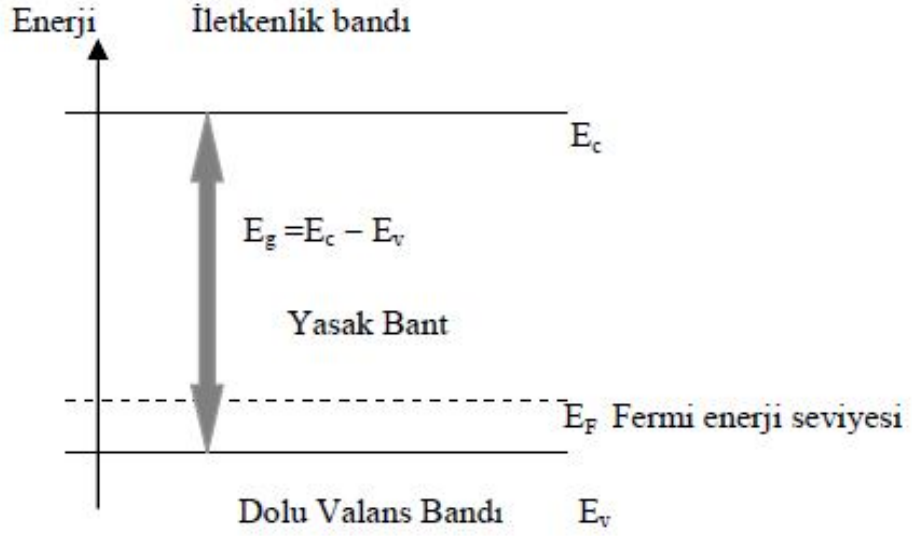
Yarıiletkenler normalde yalıtıkandırlar. Yani değerlik bandı dışında hiç serbest elektronları yoktur. Ancak ısı, ışık ve magnetik etki veya gerilim uygulandığında bir miktar değerlik elektronu serbest hale gelir ve iletkenlik bandına geçebilir. Bu durumda yarıiletken iletkenlik özelliği kazanır. Bu durum geçicidir. Yani etki ortadan kalkarsa, elektronlar tekrar değerlik bandına geri dönerler.

Yasak enerji aralığı E_g 'nin değeri;

$$E_g = E_c - E_v \quad (2.4)$$

bağıntısına göre E_g iletkenlik seviyesinin en alt seviyesi E_c ile değerlik bandının en üst seviyesi E_v arasındaki farka eşittir .

Herhangi bir dış etki ile elektronlar yasak enerji aralığına eşit veya daha fazla enerji kazanırlarsa; iletim bandına geçerler ve geride boşluklar bırakırlar. Bu durumda bir elektrik alan uygulandığında; iletim bandında bulunan elektronlar ile değerlik bandındaki boşlukların hepsi akım oluşturmada etkilidirler.



Şekil 2.5 Bir Yarıiletkenin Enerji Bant Diyagramı

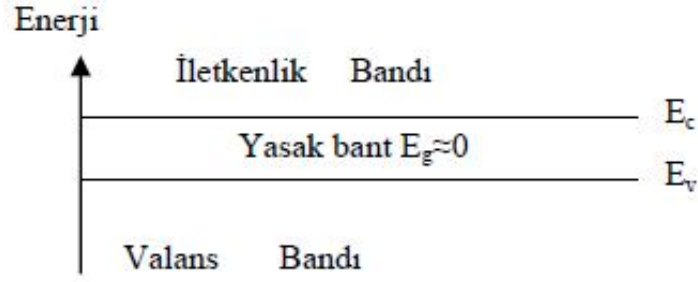
Şekil 2.5' de E_F ile gösterilen Fermi enerji seviyesidir. Fermi enerji seviyesi; katıda, mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronların bulunabileceği en yüksek enerji olarak tanımlanır. Fermi enerji seviyesi, katkı maddesi içermeyen saf yarıiletkenler için yasak bandın ortasında yer alır. Katkılı yarıiletkenler için katkı türüne ve yoğunluğuna bağlı olarak; yukarı veya aşağı doğru kayabilir.

İletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler arasındaki farklar enerji bant modeliyle açıklanabilir.

2.3.2.1 Katıların Enerji Bant Yapıları

2.3.2.1.1 İletkenlerin Enerji Bant Yapısı

İletkenlerin değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasındaki fark yoktur. İletkenlerin enerji bant modeli Şekil 2.6' da görülmektedir.



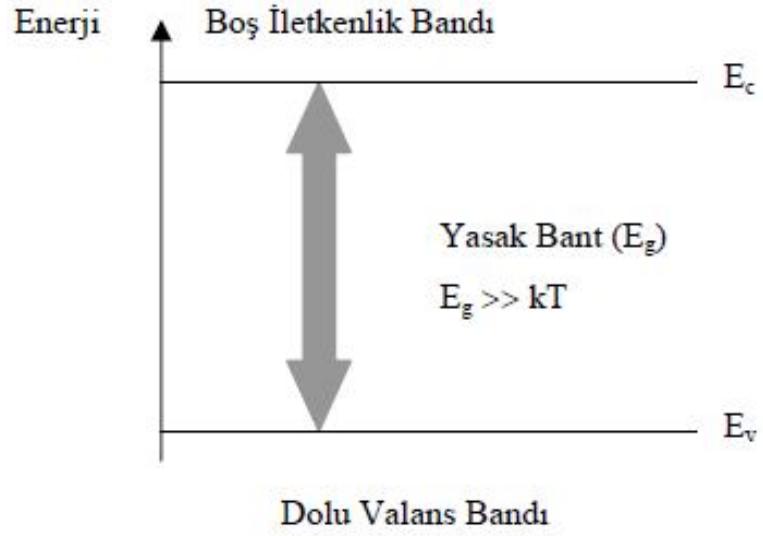
Şekil 2.6 İletkenlerde Enerji Bant Modelinin Şematik Gösterimi [47]

Değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasında fark olmadığından, metaller elektriği iyi iletirler. Değerlik elektron sayısı 1 olan metaller iyi iletken, 2, 3 gibi daha fazla elektron bulunan metaller kötü iletken olarak kabul edilirler. Çünkü 1 elektronun alınıp verilmesi daha az enerji gerektirir ve daha kolaydır.

2.3.2.1.2 Yalıtkanların Enerji Bant Yapısı

Yalıtkanlarda yasak bant aralığı fazla büyüktür ve yalıtkanların değerlik elektron sayıları da 4' ten büyüktür. Elektronların iletkenlik bandına taşınması zordur ve madde elektriği iletmez. Bunun sebebi, yasak bant genişliğinin, elektronların iletkenlik bandına geçebilmeleri için almaları gereken enerjiye nazaran çok büyük olmasıdır. Yalıtkan bir malzemenin değerlik elektronlarının, iletkenlik bandına geçebilmesi için ona çok büyük bir enerji verilmesi gerekir. Ancak bu derece büyük bir enerji kristale zarar verir [18].

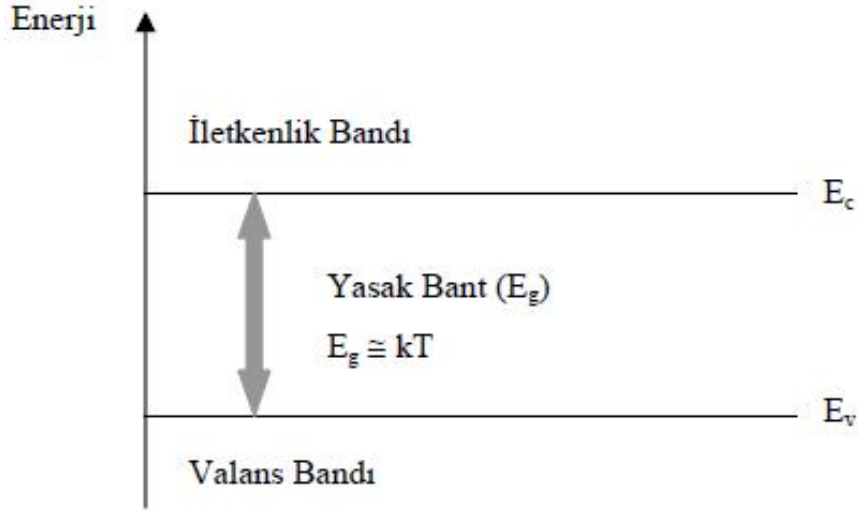
Şekil 2.7' de bir yalıtkana ait enerji bant modeli gösterilmiştir. Burada k Boltzmann sabitini, T ise mutlak sıcaklığı ifade eder. kT çarpımı ise, elektronun iletkenlik bandına geçebilmesi için gerekli termal enerjiye eşittir.



Şekil 2.7 Yalıtkanlarda Enerji Bant Modelinin Şematik Gösterimi [47]

2.3.2.1.3 Yarıiletkenlerin enerji Bant Yapısı

Yarıiletkenlerin yasak bant aralığı yalıtkanlarda olduğu gibi aralıktır. Ancak yalıtkanlarda olduğu kadar geniş değildir. Yarıiletkenlerin yasak bant genişliğinin yalıtkanlar ve iletkenler arasında bir değere sahip olduğu söylenebilir. Mutlak sıcaklıkta yalıtkan özellik gösteren yarıiletkenler, sıcaklık arttırıldığında iletkenlik özelliği kazanırlar. Bu durum fotovoltaik pil yapımında yarıiletkenleri, iletkenlere göre avantajlı duruma getirir. Çünkü sıcaklık arttığında iletkenlerin direnci de artar ve iletkenlikleri azalır. Yarıiletkenlerin direnci ise sıcaklık arttığında azalır ve yarıiletken malzemenin elektrik iletkenliği artar. Bu da güneş ışığı ve ısısına maruz kalan fotovoltaik piller açısından uygunluk arzeder.



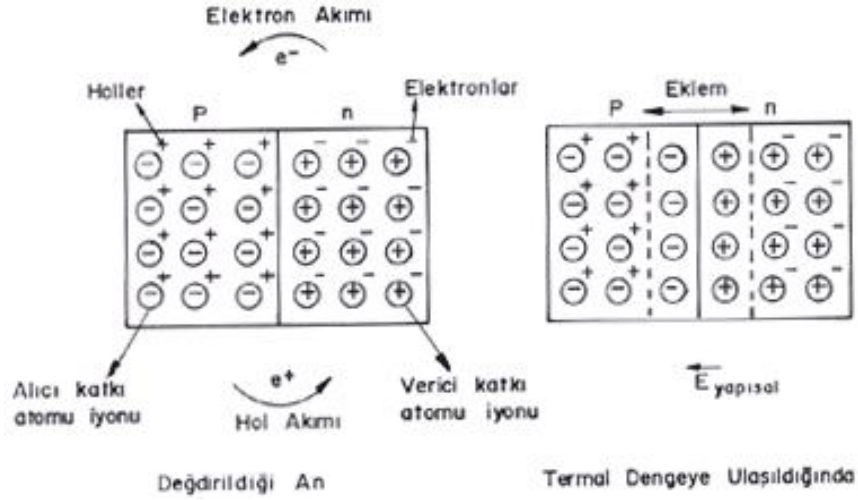
Şekil 2.8 Yarıiletkenlerde Enerji Bant Modelinin Şematik Gösterimi [47]

2.4 Yarıiletken Çeşitleri

Yarıiletkenlerin iletkenliği termal, manyetik vb. enerji türlerinden biri ile iletkenlik kazanabilir. Ancak yine de pillerden yüksek verim elde etmeye yetmez. Yarıiletkenlerin iletkenliği, katkılama yapılararak arttırılabilir. Katkılamadan kasıt; yarıiletken kristalinin atomlarının arasına, uygun işlemler yapılarak IIIA ve VA grubu atomlarından katılması işlemidir. Bu şekilde elde edilen elektriksel özellikleri değişen maddelere saf olmayan ya da katkılı yarıiletkenler denir. Katkılama işlemiyle p-tipi veya n-tipi yarıiletkenler elde edilir [18].

p ve n tipi katkılandırılmış yarıiletkenler bir araya getirildiğinde yarıiletken eklemler oluşturulur. n tipi yarıiletkende elektronlar, p tipi yarıiletkende boşluklar yük taşıyıcısıdır. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler biraraya getirilmeden önce, her iki tip madde de elektriksel olarak nötr özelliktedir. Yani p tipinde negatif enerji seviyeleri ile boşluk sayıları eşit, n tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. p-n eklem oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengeleninceye kadar devam eder. p-n tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, p bölgesi tarafında negatif, n bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu bölgeye "geçiş bölgesi" ya da

"yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan (E_y)" olarak adlandırılır. Aşağıda p-n eklem oluşması şematize edilmiştir [20].



Şekil 2.9 p - n Eklemine Oluşması [20]

Hangi tür akım taşıyıcı fazla ise buna çoğunluk taşıyıcısı (majority carrier); diğerine azınlık taşıyıcısı (minority carrier) adı verilir. Çoğunluk yük taşıyıcısının boşluklar olduğu p-tipi yarıiletkenler ile çoğunluk yük taşıyıcısının elektronlar olduğu n-tipi yarıiletkenler elde edilip, bunlar bir birine eklenirse p-n eklemi elde edilmiş olur. p-eklemi pozitif-eklem, n-eklemi ise negatif-eklem olarak tanımlanan eklemelerin kısaltmasıdır. p-tipi eklemde yarıiletken elektron verici, n-tipi eklemde ise elektron alıcı olarak konumlanır.

Yarıiletkenleri; saf yarıiletkenler ve katkılı yarıiletkenler olmak üzere iki bölümde inceleyebiliriz. Bünyesinde hemen hiç yabancı atom bulundurmayan yarıiletkenlere saf yarıiletkenler denir. Periyodik cetvelin IV A grubunda yer alan silisyum (Si), germanyum (Ge) gibi elementler içerisinde III A ve V A gruplarından bir atom katkılanması işlemiyle elde edilen yarıiletkenlere ise katkılı yarıiletkenler denir [18].

2.4.1 Saf Yarıiletkenler

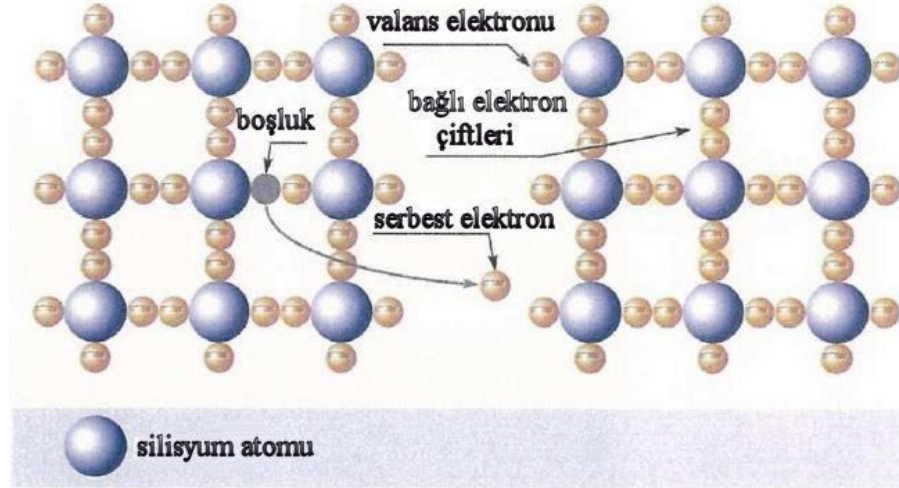
Saf yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğunu gösteren terim n_i dir. n_i ;

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (2.5)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada n_0 ve p_0 sırasıyla, saf yarıiletkenler için birim hacimdeki serbest elektron ve boşluk sayısıdır. Bu tür yarıiletkenlerde elektronlara ve boşluklara “yük taşıyıcılar” denir. Taşıyıcı yoğunluğunu ifade eden n_i , sadece sıcaklığa bağlıdır ve yarıiletkenin iletkenlik seviyesini belirler. Taşıyıcı yoğunluğunu belirleyen Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F / kT)}} \quad (2.6)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada E_F Fermi enerji seviyesi, k Boltzmann sabiti, T ise mutlak sıcaklıktır. Bu dağılım fonksiyonu; sistem T sıcaklığında, bir E enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığını verir. E_F ile ifade edilen Fermi enerji seviyesi; mutlak sıfır sıcaklığında, elektronların doldurabileceği en yüksek enerji seviyesini ifade eder. Saf yarıiletkenlerde tek Fermi enerjisi serbest elektronların ve boşlukların dağılımını belirler. Çok düşük sıcaklıklarda bu bağıntı geçerli değildir. Çünkü kristal mükemmel kristal yapıya sahip değildir. Saf yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, yasak bant aralığının tam ortasında yer alır [19].



Şekil 2.10 Saf İletkenlik [21]

2.4.2 Katkılı yarıiletkenler

Bu tip yarıiletkenler yapılarında farklı tür atom içerirler. Bu atomlara “safsızlık atomları” denir. Katkılama işlemiyle yarıiletkenin elektriksel özellikleri büyük ölçüde değişmiş olan katkılı yarıiletkenler elde edilmiş olur. Bu şekilde iletkenlik tipine göre, n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler elde edilir.

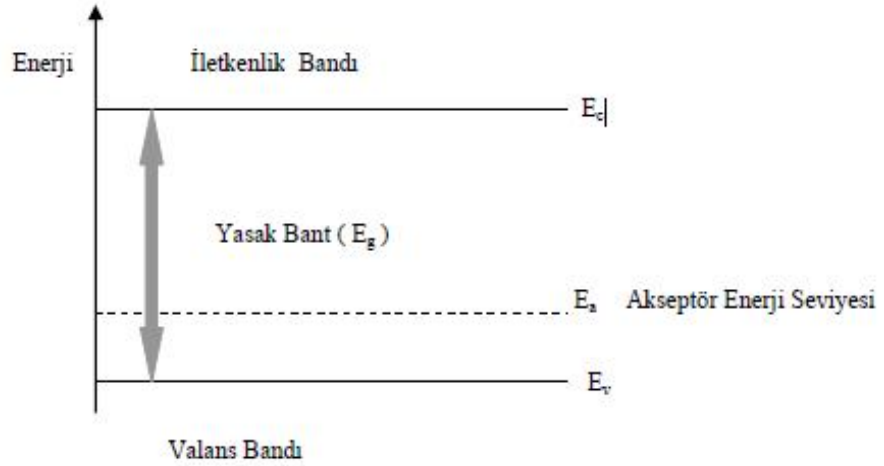
2.4.2.1 p-Tipi Yarıiletkenler

Bu tip yarıiletkenlere Al, B, In, Ga gibi IIIA grubunda yer alan akseptör (elektron alıcı) atomlarla katkılama yapılır. Katkılamaya örnek olarak, Silisyuma büyütme sırasında B katılması verilebilir. Bu durumda borun üç değerlik elektronu, silisyumun dört değerlik elektronunun üçü ile kovalent bağ yapar. Silisyumun açıkta kalan 1 elektronu elektron göçünü arttırır. Her katkı atomuna karşılık, değerlik bandında bir boşluk oluşur.

Akseptör atomlarının yarıiletken içerisinde buldukları enerji seviyesine akseptör enerji seviyesi denir ve E_a ile ifade edilir. E_a ;

$$E_a = (1/\epsilon_r)^2 (m_h^* / m_h) E_H \quad (2.7)$$

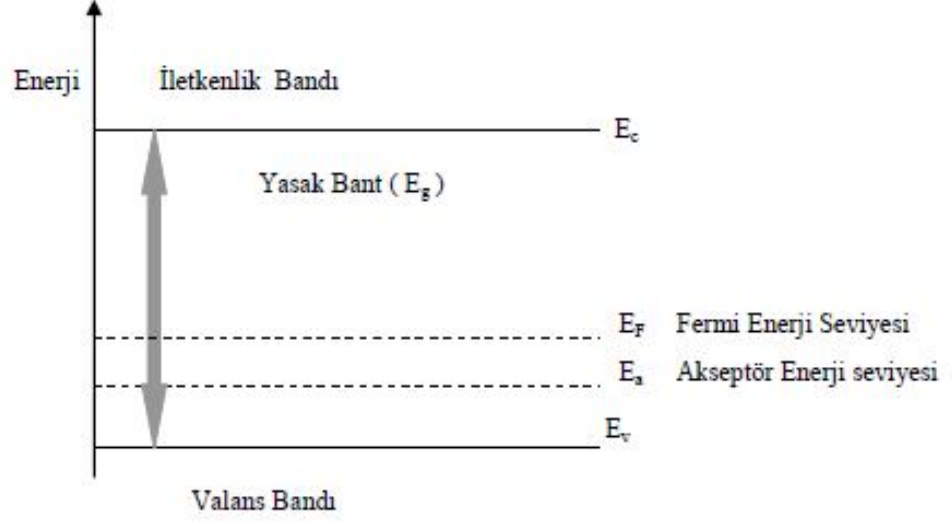
bağıntısı ile tanımlanır ve enerji bant diyagramında Şekil 2.11' deki gibi gösterilir. Burada ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabitini, E_H Hidrojen için iyonlaşma enerjisini, m_h^* boşluğun etkin kütleini, m_h ise boşluğun kütleini ifade eder.



Şekil 2.11 Akseptör Enerji Seviyesinin Gösterimi [47]

Akseptör enerji seviyesi, değerlik bandına çok yakındır. Bu seviyede bulunan akseptör atomları, bağlarını tamamlayabilmek için değerlik bandından elektron alırlar. Değerlik bandından akseptör enerji seviyesine geçen her elektron, değerlik bandında bir boşluk oluşturur ancak; iletkenlik bandındaki elektron sayısı artmaz. Elde edilen p-tipi yarıiletken, çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklar (p_p) ve azınlık yük taşıyıcıları da elektronlardır (n_p). Boşlukların elektrik iletkenliğine katkısı elektronlardan daha fazladır [19].

p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi; yasak enerji aralığında bulunduğu bölgeden kayarak, değerlik bandına doğru ilerler. Kayma miktarı, katkılanan maddenin yoğunluğuna bağlıdır. Fermi enerji seviyesi Şekil 2.12' de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 p-Tipi Bir Yarıiletkenin Enerji Bant Diyagramında Fermi Enerji Seviyesinin Gösterimi [47]

Belirli bir sıcaklıkta saf yarıiletkenlerde de, katkılı yarıiletkenlerde de elektron ve boşluk yoğunlukları çarpımı sabittir. Buna göre saf yarıiletkenler için,

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (2.8)$$

ve katkılı yarıiletkenler için de;

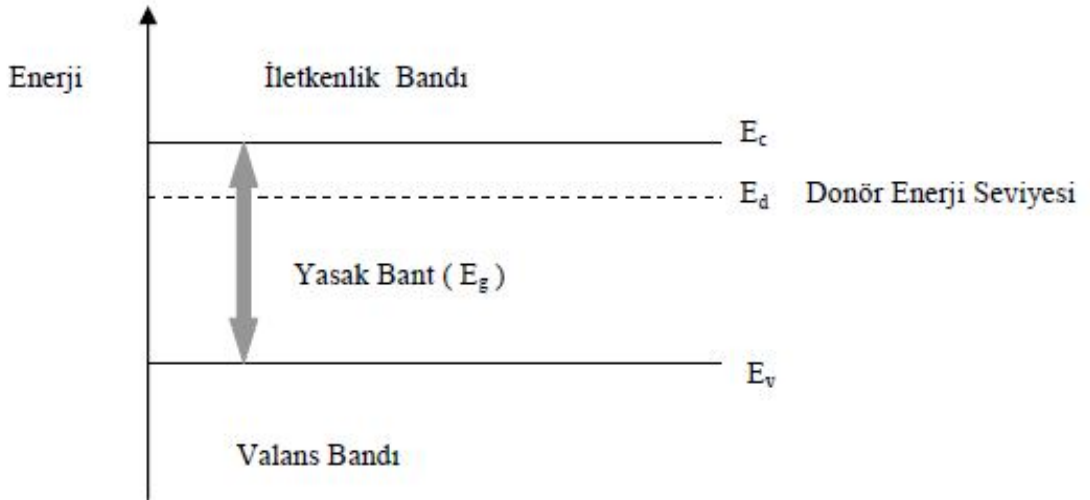
$$n_n p_n = p_p n_p = n_i^2 \quad (2.9)$$

bağıntısı yazılabilir.

2.4.2.2 n-Tipi Yarıiletkenler

Bu tip yarıiletkenler, VA grubu elementlerinden (As, N, Sb, P gibi) biriyle katkılama yapılarak oluşturulabilir.

Örneğin; Fosforun (P) beş değerlik elektronundan dördü, Silisyumun dört değerlik elektronuyla kovalent bağ yapar. Fosforun geriye kalan 5. değerlik elektronu bağ yapmaz. Fosfor, silisyuma elektron verdiği için fosfora donör (elektron verici) atom denir. Açıkta kalan ve fosfor atomlarına zayıf elektriksel kuvvetle bağlı olan bu elektron iyonlaşarak, kristal içerisinde serbestçe hareket edebilir.

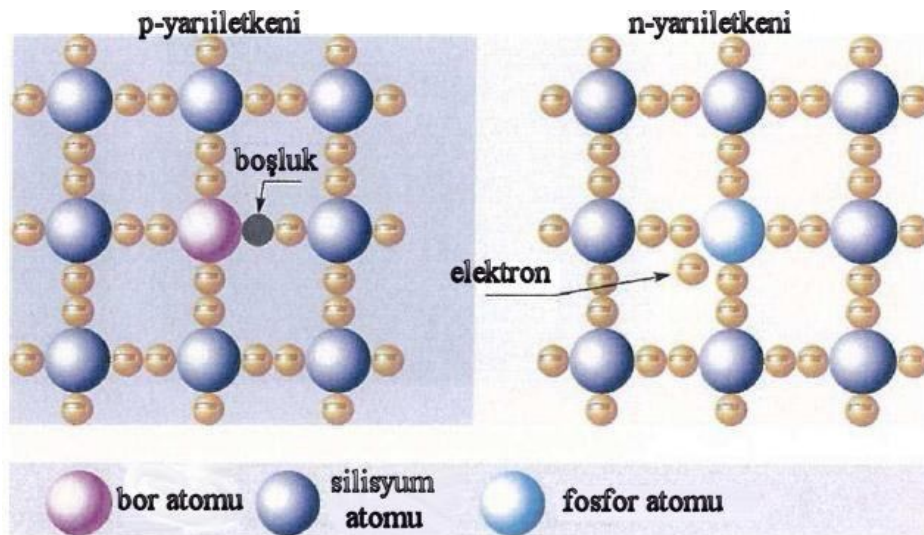


Şekil 2.9 Enerji Bant Diyagramında Donör Enerji Seviyesinin Gösterimi [47]

Donör atomlarının yarıiletken içerisinde buldukları enerji seviyelerine donör enerji seviyesi denir ve E_d ile ifade edilir. E_d ile ifade edilen donör enerji seviyesi,

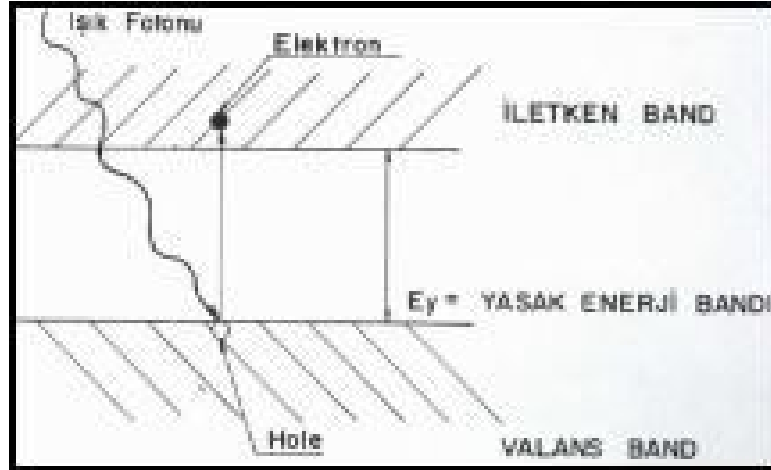
$$E_d = (1/\epsilon_r)^2 (m_e^* / m_e) E_H \quad (2.10)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada; ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabitini, m_e^* elektronun etkin kütleini, m_e elektronun kütleini, E_H ise hidrojenin iyonlaşma enerjisini ifade eder. Donör enerji seviyesi iletkenlik bandına çok yakın olduğundan; bu seviyedeki donör atomları, küçük bir enerjiyle iyonlaşarak iletkenlik bandına geçerler. Sonuçta iletkenlik bandında elektron sayısı artmasına karşılık, değerlik bandında boşluklar oluşmaz. Bu şekilde elde edilen n-tipi yarıiletkende, çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar(n_n) ve azınlık yük taşıyıcıları da boşluklardır(p_n). Elektronların elektrik iletkenliğine katkısı boşluklardan daha fazladır [19].



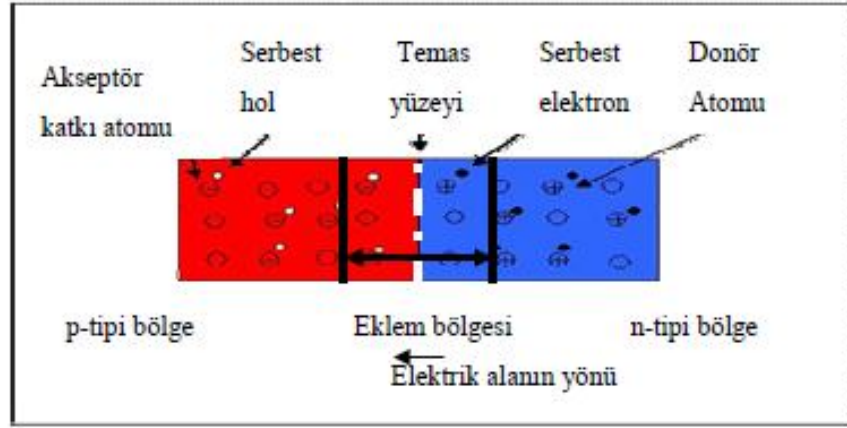
Şekil 2.14 Bor Katkılması ve Fosfor Katkılması [21]

Yarıiletkenin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur; ilk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-boşluk çiftleri oluşturulur, ikinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.



Şekil 2.15 Yarı İletken Eklem Bölgesinde Fotovoltaik Dönüşüm [20]

Yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini değerlik bandındaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece bir elektron-boşluk çifti oluşur. Bu olay, p-n eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron-boşluk çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, elektronları n bölgesine, boşlukları da p bölgesine sürekli iter. Birbirlerinden ayrılan elektron-boşluk çiftleri, güneş pilinin uçlarında bir potansiyel farkı oluştururlar. Bu durum fotonların pil yüzeyine sürekli çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarıiletkenin iç kısımlarında da fotonlar tarafından elektron-boşluk çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadır ve potansiyel gerilim oluşturmamaktadırlar [20].



Şekil 2.16 p-n Eklemde Elektrik Alan Oluşumu [47]

Bazı elektronlar, elektrik kontaklarına ulaşamazlar, bunun yerine tekrar bir atoma bağlanıp serbest konumlarını kaybedebilirler. Bu olaya rekombinasyon (yeniden birleşme) denir [21]. Fotovoltaik olay sonucu oluşan akıma da fotoakım adı verilir. Fotoakım elde edebilmek için p-n eklemının ışık alması gereklidir. p-n eklemının uzağında meydana gelen elektron-boşluk çiftleri, tekrar birleşerek yok olurlar. Bu yüzden fotoakıma bir katkıları olmaz [23].

2.4.2.3 p-n Eklemlerinde Meydana Gelen Optik Olaylar

Güneş pillerinde ışık enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü, p-n eklem bölgesindeki optik olaylar sonucu gerçekleşir. Bu olaylardan bir tanesi fotoiletkenlik olayı, diğeri ise fotovoltaik olaydır. Uygun frekanstaki ışık altında kalan bir yarıiletkenin, iletkenliğinin ve elektriksel özelliklerinin değişmesine fotoiletkenlik olayı denir. Yarıiletken üzerine gelen ışığın foton enerjisi E , yarıiletkenin yasak bant genişliği E_g 'ye eşit veya ondan büyük olduğunda gözlenebilen bir olaydır. Buna göre, fotoiletkenliğin gerçekleşmesi için,

$$E_g \leq E_f = h c / \lambda \quad (2.11)$$

bağıntısının sağlanması gerekir. Burada h Planck sabiti, c ışık hızı ve λ yarıiletken üzerine gelen ışığın dalga boyunu gösterir. Katkılı yarıiletkenlerde katkı atomlarının iyonlaşma enerjileri çok küçük olduğundan, fotoiletkenlik daha büyük dalga boyuna sahip ışınlarla da oluşabilir [23]. Işınımın varlığını ortaya koymaya yarayan düzeneklerde (dedektörlerde) fotoiletkenlikten yararlanılır [18].

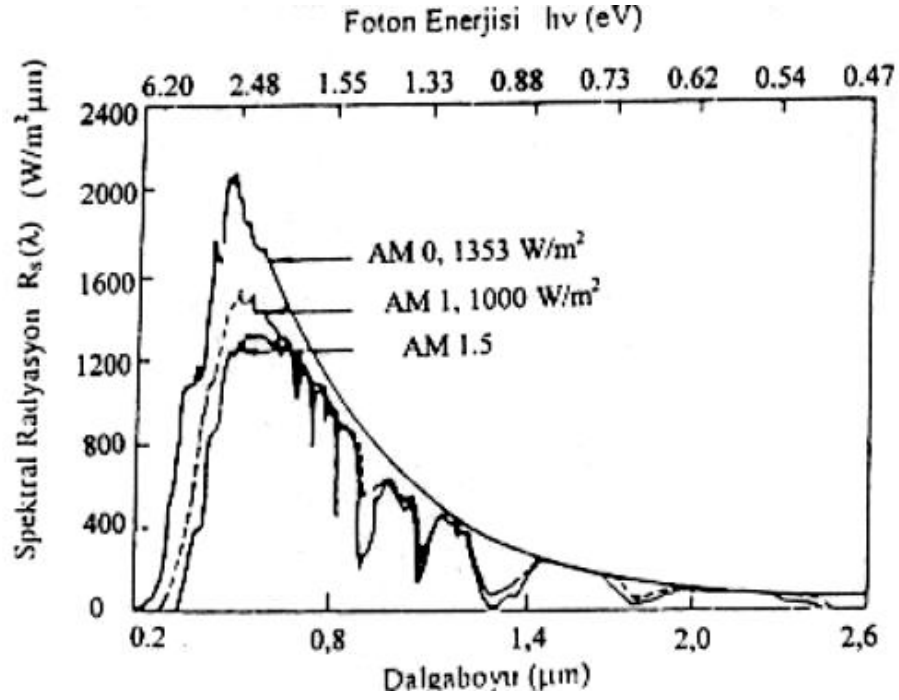
p-n eklemde gözlenen optik olaylardan ikincisi fotovoltaj olayıdır. Işığın herhangi bir yarıiletken, foton enerjisi etkisiyle elektron-boşluk çifti oluşturması olayına denir. Fotovoltaj olay sonucu oluşan akıma da fotoakım denir. Fotoakım elde edebilmek için p-n eklemine ışık alması sağlanmalıdır. p-n ekleminden uzakta meydana gelen elektron-boşluk çiftleri, tekrar birleşerek yok olurlar. Bu yüzden fotoakıma bir katkıları olmaz.

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PİLLERİ

3.1 Güneş ve Yapısı

Samanyolu galaksisinde bulunan 200 milyar yıldızdan birisi olan Güneş, kütlesi sıcak gazlardan oluşan ve çevresine ısı ve ışık yayan bir yıldızdır. Güneş'in çapı Dünya' nın çapının 109 katı (1.5 milyon km), hacmi 1,3 milyon katı ve ağırlığı 333000 katı kadardır. Güneşin yoğunluğu Dünyanın yoğunluğunun ¼' ü kadardır. Güneş kendi eksenini etrafında saatte 70000 km hızla döner. Bir turunu ise 25 günde tamamlar. Güneşin yüzey sıcaklığı 5500 °C ve çekirdeğinin sıcaklığıysa 15.6 milyon °C' dir. Güneşten yayılan enerjinin yaklaşık 2 milyonda 1' i yeryüzüne ulaşır. Güneş ışınları 8.44 dakikada yeryüzüne ulaşır ve Güneş Dünya' ya en yakın yıldızdır. Çekim kuvveti Dünya yer çekiminin 28 katıdır [66]. İçinde çok yoğun gazlar vardır [24]. Kütlece %75 hidrojenden ve %24.9 helyumdan oluştuğu belirlenmiştir. Atom sayılarına göre %92.1 hidrojen ve %7.8 helyum içerir. Geri kalan her şey (metaller), kütlenin ancak %0.1' ini oluşturmaktadır. Bu oran, çekirdekte hidrojenin helyuma dönüşmesi nedeniyle, zaman içinde helyumun çoğalması yönünde değişmektedir [25].

Güneş ışığı, farklı frekanstaki elektromanyetik dalgaların birleşiminden oluşmuştur. Güneş tarafından yayınlanan elektromanyetik spektrum; bir Angströmün kesirlerinden, yüzlerce metreye kadar uzanır [18]. Güneş spektrumu üç ana bölgeden oluşmuştur. Dalga boyu 0.4 µm' den küçük olan ultraviyole (morötesi) bölgenin güneş ışınımındaki payı %9' dur. Dalga boyu 0.4 µm ile 0.7 µm arasındaki bölgede bulunan görünür ışığın bulunma oranı %45' tir. Dalga boyu 0.7 µm' den büyük olan infrared (kızılötesi) bölgenin payı ise %46' dır ve Güneş' in ısıtma etkisi buradan kaynaklanmaktadır. Atmosfer dışında, birim yüzeye dik olarak, birim zamanda ulaşan güneş ışınımı, Güneş sabiti olarak tanımlanır ve değeri 1.353 kW/m² dir. Yeryüzüne ulaşan maksimum güneş ışınımı ise 0.3-2.5 µm dalga boyları arasında 1 kW / m² kadardır. Yere, zamana ve iklime bağlı olarak Dünya' daki yaşam alanlarına gelen güneş enerjisi 3 ile 50 MJ / m² gün arasında değişir [26].



Şekil 3.1 Güneşten Gelen Işınımın, AM Koşullarına Göre Spektral Dağılımının Gösterimi [27]

Dünya yüzeyine düşen güneş enerjisinin miktarını belirleyen koşullar atmosferik koşullardır. Bu durum Air Mass (AM) koşulu ile tanımlanır. Şekil 3.1' de , AM0 ve AM1 koşullarında güneşten yayınlanan enerjinin spektral dağılımını (birim yüzeye, birim dalga boyunda güneşten ulaşan güç) gösteren eğriler gösterilmiştir. Üstteki eğri, dünya atmosferi dışındaki güneş ışığının (güneş sabitinin) spektral dağılımını gösterir. Bu AM0 koşulu olarak adlandırılır. Ortadaki eğri Güneş tam tepede iken dünya atmosferinden geçerek, yeryüzüne ulaşan Güneş ışığının spektral dağılımını verir. Bu koşul ise AM1 koşulu olarak bilinir. Son olarak, Güneş' in Dünya' nın tepesi ile 48° lik açı yaptığı durumda yeryüzüne ulaşan güneş ışığının spektral dağılımı görülmektedir. Buna da AM1.5 koşulu denir. AM0, AM1 ve AM1.5 koşullarında dünyaya ulaşan ışık şiddetleri ve spektrumları farklıdır. Çünkü bu koşulların her birinde, güneş ışığının dünyaya giriş açıları, yeryüzüne ulaşana kadar aldığı yollar, soğurulma ve saçılma oranları da farklılık gösterir [27].

Güneş, ısı ve ışığa ek olarak; yoğunluğu düşük, çoğunluğunu elektron ve protonların oluşturduğu artı ve eksi yüklü parçacıklar yayar. Güneş rüzgarları olarak

da bilinen yüklü parçacıkların bu akımı, güneşten çevreye saniyede 450 km hızla yayılır [25].

Güneş' in bilimsel yöntemlerle hesaplanan yaşının 4.57 milyar yıl olduğu düşünülmektedir [66]. Yıldız ana dizi üzerinde yıldız evrimi aşamasının yarı yolundadır. Bu aşamada çekirdekte oluşan nükleer füzyon reaksiyonları hidrojeni helyuma dönüştürmektedir. Her saniye Güneş' in çekirdeğinde 4 milyon ton madde enerjiye çevrilir ve ortaya nötrinolarla radyasyon çıkar. Bu hızla günümüze kadar 100 Dünya kütlesine eşdeğer kütle enerjiye çevrilmiştir. Güneş yaklaşık olarak 10 milyar yıl ana dizi yıldızı olarak yaşamına devam edecektir [66]. En sonunda ise kendi içine çökerek yok olacağı iddia edilmektedir [25].

3.2. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, Dünya üzerinde yer alan tüm potansiyel enerjilerin kaynağı olarak kabul edilir. Fosil yakıtlar, rüzgar, hidroelektrik, biyogaz gibi tüm enerji türleri güneş enerjisinden türerler.

Güneş enerjisinin kaynağı güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlar sırasıyla şunlardır [47]:



Güneş' te; 1 saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle, 386 milyon EJ (eksa joule) enerjiye dönüşerek yayılmaktadır. Füzyon reaksiyonlarının gerçekleştiği çekirdek kısmında,

sıcaklık yaklaşık 2×10^7 K olmakla birlikte, yüzey (fotosfer) sıcaklığı yaklaşık 5800 K' dir. Bütün sıcak cisimler gibi güneş de, bir çok dalga boyunda elektromanyetik ışınımlar yapar. Güneşin yayınladığı ışınımların spektrumu; yaklaşık 6000 K sıcaklığında bulunan bir kara cismin yayınladığı spektruma benzerliği sebebiyle Güneş' in yayınladığı enerjinin, siyah cisim ışınmasını açıklamak için kullanılan fizik ve kimya yasaları ile belirlenmesi mümkündür [26].

Güneşten yeryüzüne gelen toplam güneş ışınımı, dolaysız (direkt) ve dolaylı (yaygın) olarak iki bileşene ayrılabilir. Direkt ışınım adından da anlaşılacağı gibi, doğrudan güneşten gelen ışınımdır. Yaygın ışınımlarsa, tüm gök küreden gelen belirli yönü ve doğrultusu olmayan ışınımlardır. Yutulan ve saçılan güneş ışınımının dağınık bir şekilde yeryüzüne ulaşabilen kısmı, yaygın ışınımı oluşturur [29].

3.3 Güneş Enerjisi Teknolojileri

Güneş enerjisinin yeterince kullanılabilmesi, uygun teknolojilerin geliştirilmesi ile mümkün olacaktır. Güneş santralleri için gerekli koşul sayılan yıllık en az 2000 saat güneşlenme süresi; Türkiye' de yaklaşık 2600, özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi' nde, 3000 saatlik süre ile sağlanmaktadır [30].

Güneş enerjisinden ısınma, soğutma veya elektrik elde etmede yararlanılabilir. Güneş enerjisinden yeterince yararlanmak, daha az yakıt (kömür, petrol, doğal gaz) kullanmayı beraberinde getirir. Daha az yakıt kullanmak, daha temiz ve sağlıklı çevre demektir. Temiz Enerji Vakfı (TEMEV) ve Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu-Türkiye Bölümü (UGET-TB) güneş enerjisinin ülkemizdeki kullanımını arttırmak için çalışmaktadırlar [30].

Güneş enerjisi teknolojilerini şu şekilde sınıflandırabiliriz:

- 🚧 “Isıl Güneş Teknolojileri,
- 🚧 Düşük sıcaklık sistemleri: Düzlemsel güneş kolektörleri, vakumlu güneş kolektörleri, güneş havuzları, güneş bacaları, su arıtma sistemleri, güneş mimarisi, ürün kurutma sistemleri ve seralar, güneş ocaklarıdır.

- ✚ Yoğunlaştırıcı sistemler: Parabolik kollektörler, parabolik çanak sistemler, merkezi alıcı sistemlerdir “ [47].

Güneş enerjisi, kullanılacak alana göre uygun bir teknoloji ile başka bir enerji türüne dönüştürülür. Bugün en çok ihtiyaç duyduğumuz enerji türleri, ısı ve elektrik enerjisidir. Bu yüzden de bugün yapılan çalışmaların çoğunluğu, güneş enerjisinden ısı ve elektrik enerjisi elde edilmesine yöneliktir. Güneş enerjisinden ısı enerjisi elde etme yöntemi, pasif ısıtma ve aktif ısıtma yöntemleriyle yapılmaktadır [31]. Güneş enerjisi kullanılarak hidrojen eldesi gibi dolaylı enerji elde etme yöntemleri de mevcuttur.

Elektrik enerjisi üretimi açısından, güneşten gelen enerji başlıca iki sınıfa ayrılabilir. Bunlardan biri, kızılötesi dalga boylarını içeren ve ısı enerjisi olarak ortaya çıkan kısım, diğeri ise görünür ve mor ötesi dalga boylarını kapsayan kısımdır [22].

Güneşin ısı enerjisini kullanan elektrik santrallerinde, güneş ışığı bilgisayar kontrollü aynalar tarafından bir kulede odaklanmaktadır. Burada, güneşten gelen ısı enerjisi bir akışkana aktarılmaktadır. Daha sonra bu ısı enerjisi, bir jeneratörü tahrik edecek buharı elde etmek için kullanılmaktadır. Bu tip bir santralden %5 ile %6 arasında verim elde edilmektedir [22]. Güneş kaynaklı fotonların enerjileri, fotovoltaik güneş pilleri ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

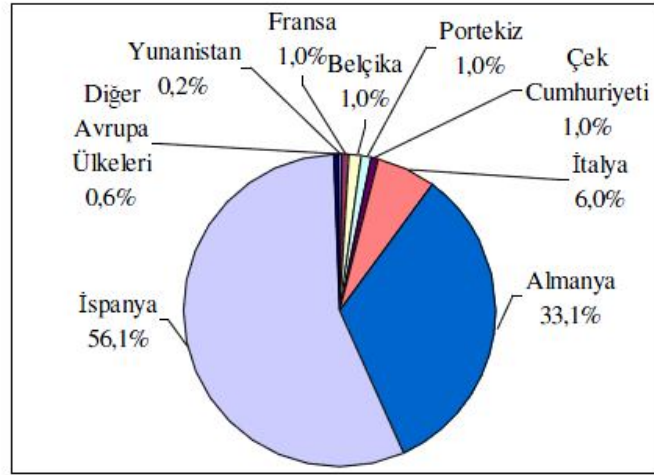
3.4 Fotovoltaik Piller

Fotovoltaik hücreler ve bunların birleşimiyle elde edilen piller kullanılan malzemeye göre farklı verim ve maliyete sahiptirler. Dünya pazarında şu an özellikle fosil yakıtların bitme ve tek elde toplanma endişesi sebebiyle, fotovoltaik pil pazarında büyük bir rekabet bulunmaktadır. Başta pahalıya mal olması ve enerji sıkıntısının bugünkü kadar olmadığı dönemde fotovoltaik piller üzerine çalışma ve araştırmalar da daha yavaş yürütülüyordu. Örneğin Türkiye’ de fotovoltaikler

üzerine ilk doktora çalışması 1966 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi' nde yapılmıştır [67]. İlk ulusal kongre ise 1975 yılında yapılmıştır. 1978 yılında ise Ege Üniversitesi Güneş Enstitüsü kurulmuştur [67]. Oysa 1946' da Amerika' da Russel OHL ilk güneş pili patentini almıştır [67].

Şu anda İspanya, Almanya, Japonya, Amerika gibi ülkeler güneş pili araştırmalarına teşvik vermektedirler. Halen Watt başına 2.5 – 3 USD civarında olan hücre fiyatları zamanla inecek ve fotovoltaik güneş pili uygulamaları hızla artacaktır [12].

Şekil 3.2' de görüldüğü gibi 2008' de fotovoltaik pazarı gelirin % 56.1 gibi büyük bir kısmı bu alanda liderliği elinde tutan İspanya tarafından elde edilmiştir [32].



Şekil 3.2 2008 Fotovoltaik Dünya Pazarının Avrupa Ülkelerine Göre Dağılımı [32]

3.4.1 Bir Fotovoltaik Hücresinin Çalışma Prensipleri

Fotovoltaik hücreler gene olarak yarı iletken malzemeden üretilmektedirler. Güneş ışığı bu maddeler tarafından absorbe edildiği zaman, elektronlar bağlı buldukları atomlardan ayrılarak madde içinde serbest dolaşmaya başlarlar ve böylece bir elektrik akımı oluşur.



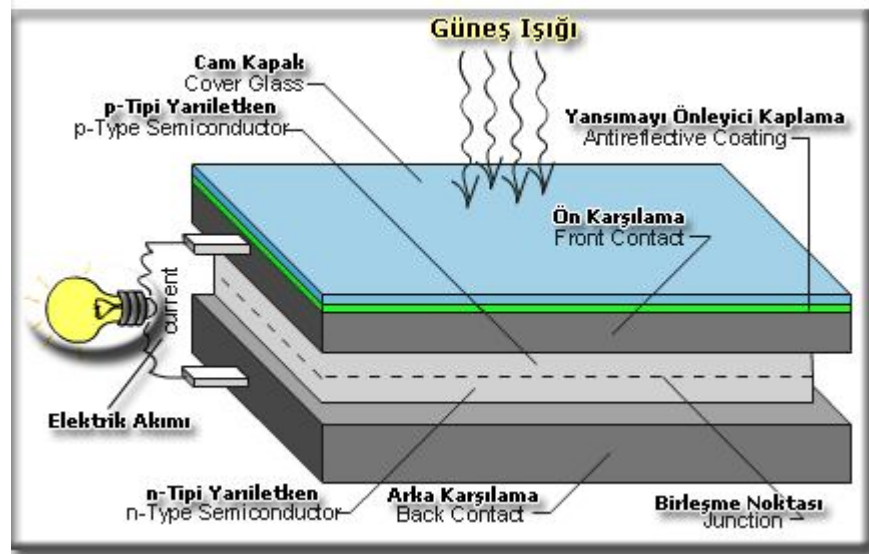
Şekil 3.3 Örnek Fotovoltaik Hücre [58]

Bir güneş hücresinin performansı verimi ile ölçülmektedir. Aldığı enerjinin yüzde kaçını kullanılabilir elektriğe dönüştürdüğü, verimi belirleyen en önemli parametredir. Verim, panel üzerine düşen fotonların enerjisinin, oluşan gerilime oranı olarak tanımlanabilir. Pili, belli dalga boylarındaki ışığı elektriğe dönüştürülebilir. Çünkü belli bir enerjinin üzerindeki dalga boyuna karşılık gelen ışık demeti (özellikle uv) gerekli enerjiyi sağlayabilir. Geriye kalanın büyük miktarı, hücreyi oluşturan madde tarafından ya emilmekte ya da yansıtılmaktadır. Dolayısıyla sıradan bir güneş hücresinin verimi günümüzde %15 civarındadır. Yani; aldığı enerjinin yaklaşık altıda birini elektriğe çevirebilmektedir. Laboratuvar koşullarında ise % 40' lar civarında verim elde edilmektedir.

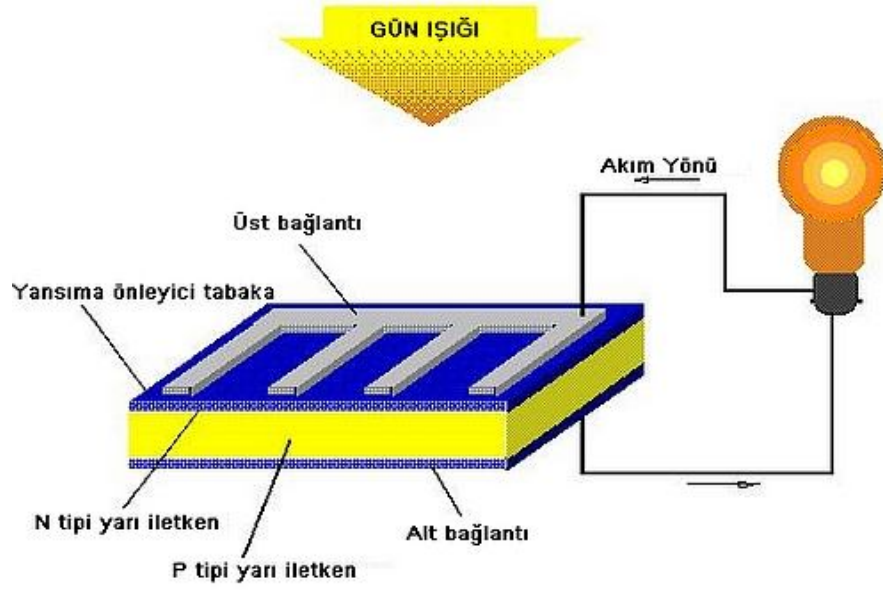
3.4.2 Fotovoltaik Olay ve Güneş Pilleri

Fotovoltaik (photovoltaic) terimi, ışıktan gerilim üretilmesi anlamına gelir ve genellikle "PV" ile gösterilir. Fotovoltaik dönüşüm sistemi; yarıiletken malzemelerden oluşmuş hücrelerle güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine (DC) dönüştürebilen bir teknolojidir.

Şematik gösterimi Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 ' de yer alan fotovoltaik dönüşüm sistemleri için fotovoltaik piller ve güneş pilleri terimleri de kullanılmaktadır. Bununla birlikte her türlü ışık altında elektrik üretebilirler. Işık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güneş pilleri; fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar. Yarıiletken maddeden yapılmış yüzeyleri üzerine ışık düştüğü zaman, uçları arasında potansiyel farkı oluşur ve bir dış devreye bağlanırlarsa devreden akım geçer.



Şekil 3.4 Fotovoltaik Dönüşüm Sistemi



Şekil 3.5 Fotovoltaik Dönüşüm Sistemi [56]

Fotovoltaik olay 1839 yılından beri bilinmesine rağmen, gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında elde edilmiştir. p-n eklemi oluşturulması ile bu verime ulaşmak mümkün olmuştur. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerle oluşturulan ilk p-n eklemine, CdS (Kadmiyum sülfür) ve Si (Silisyum) kullanılmıştır. Daha sonra Silisyum p-n eklemli pili kullanılarak %15 verim elde edilmiştir.

Işık bir yarıiletken tarafından soğurulduğunda fotovoltaik bir etki oluşur. Fotonların enerjisi, yarıiletkenin değerlik bandındaki elektronlara aktarılır. Değerlik bandındaki elektronların iletim bandına geçmesi sonucunda elektron-boşluk çiftleri oluşur. Sadece yarıiletkenin yasak bant enerji aralığını aşan enerjiye sahip fotonlar bu olayı gerçekleştirebilir. Yarıiletken bant aralığı küçükse; fotovoltaik pilin uçları arasında oluşan potansiyel farkı küçük, dış devre akımı ise büyük olur [28].

Yalıtılmış yarıiletkende uyarılan elektron, esas olarak değerlik bandındaki boşlukla birleşir ve fazla enerjisini foton ya da fonon (ısı) olarak yayımlar. Bundan dolayı kayda değer düzeyde bir elektrik enerjisi elde edilemez ve fotovoltaik pilin verimi düşük olur. Foton enerjisini kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürebilmek için fotovoltaik sistemde yarıiletken yüzeyler üzerinde p-n eklemeleri oluşturulur.

Güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektronik cihazlara güneş pili veya fotovoltaik pil (solar cell) denir. Yüzey ölçüleri genellikle 100 cm² kadar ve kalınlıkları 0.2-0.4 mm arasında olan güneş pillerinin yüzeyleri; kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilebilir [33]. Fotovoltaik güneş pili yapımında en çok kullanılan malzemeler, silisyum (Si), galyum arsenik (GaAs), kadmiyum sülfür (CdS) ve kadmiyum tellür (CdTe)'dür [23].

Bölge bölge farklılaşarak 1 yılda Türkiye' de 1 m²' ye düşen güneş enerjisi miktarı 800-2600 KWh arasında değişir. Bu enerji, güneş pilinin yapısına bağlı olarak %5 - %70 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir.

Güneş pillerinin çalışması; fotovoltaik ilkeye dayanır. Levhaları üzerine ışık düştüğü zaman, uçları arasında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Çok sayıda güneş pilini bir birine paralel ya da seri bağlayarak güç çıkışını artırmak mümkündür. Bu sistem, pilleri bir yüzey üzerine monte ederek gerçekleştirebilir [34]. Bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak, modüller bir birlerine seri ya da paralel bağlanarak; bir kaç Watt' tan megaWatt' lara ulaşabilen sistemler oluşturulabilir [20].

Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde ve jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılabilirler. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür [30].

İlk güneş pili Schottky, Lange ve Grondahl tarafından, bakır oksit (CuO₂) ve selenyumdan (Se) meydana getirilmiştir. 1954 yılında, RCA ve Bell Telephone Laboratuvarları' nda, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerden oluşan p-n eklemleri ile %6 oranında bir verim elde edilmiştir. Daha sonra p-n eklemlili silisyum güneş pilleri ile %15 oranında bir verime ulaşılmıştır. Bu piller, 1958 yılından beri yapay uydulara elektrik enerjisi sağlamaktadır. 1973 yılındaki petrol krizinden sonra, yeryüzünde enerji üretimi için yaygın olarak güneş pilleri kullanılmaya başlanmıştır. 1970 'li yılların sonunda, yeryüzündeki fotovoltaik pil kullanımı uzaydaki kullanımı geçmiştir. Dünyadaki ilk güneş pili santrali, 1982 yılında Alarko Solar Inc.

tarafından A.B.D' nin Kaliforniya Eyaleti' nde kurulmuş olan 1 MW gücündeki santraldir. Bu santral ulusal elektrik şebekesine bağlanmıştır [23]. Sonuçta fiyatlar da düşmüştür. 1980' li yılların başında güneş pilleri için yeni üretim yöntemleri geliştirilerek küçük çapta üreilmeye başlanmıştır. Bu gelişmeler, büyük ihtimalle gelecekte fiyatları daha da düşürecektir [29].

Güneş pilleri; son yıllarda en hızlı büyüyen endüstriyel mallardan biridir. Artan üretim hacmi ve düşen fiyatlar, güneş pillerini önceleri elektrik şebekesinin olmadığı bölgelerde müstakil uygulamalar için uygun hale getirmiştir. Özellikle 90' lı yılların ortalarına kadar güneş pillerinin esas pazarları, çeşitli uluslararası yardım uygulamalarının hedefi olan 3. dünya ülkelerindeki gelişmemiş altyapı destek programları olmuştur [33]. Enerji sorunu baş gösterdiğinden beri ise Avrupa ve Amerika' da da Güneş ve diğer alternatif kaynaklara ilgi armıştır.

Bu değişimin temel nedeni, gelişmiş ülkelerde 90' lı yılların ortalarından itibaren uygulanmaya başlanan teşvik programlarıdır. Bu alanda örnek gösterilen Federal Alman Yenilenebilir Enerji Yasası ile Alman pazarı, en hızlı büyüyen pazarlardan biridir. Güneş pillerinin kullanımı Almanya' da her gün bira da ha artmaktadır. Devlet teşvikleri ile hem maliyetler aşağı inmekte hem de üretim hacmi artmaktadır [33].

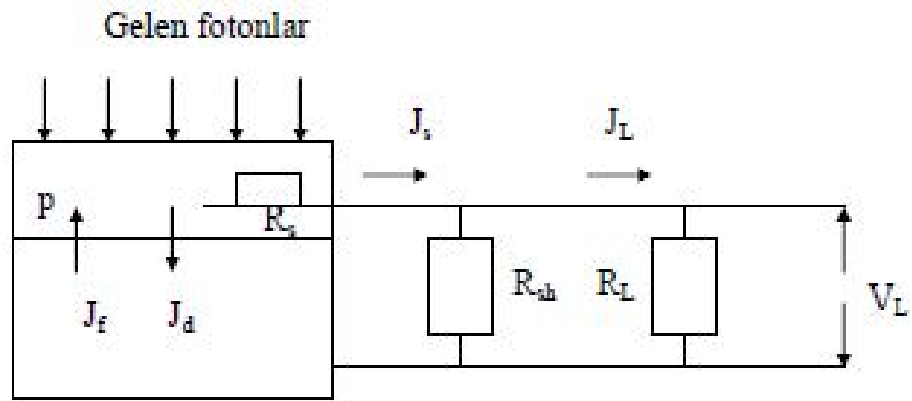
Kullanım alanları ve kullanıcı kitleleri büyük bir hızla artan güneş pilleri konusundaki araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu pillerin üstün yanları arasında uzun ömürlü olması (yaklaşık 20-30 yıl), çevre kirliliği yaratmaması, hareketli kısımlar içermediğinden aşınmaması sayılabilirken; zayıf yanları arasında ise düşük verimli olması, üretilen elektriğin depolanma sorunları, yalnız gündüzleri çalışması ve ekonomik olmaması sayılabilir [29].

3.5 Yarıiletken Fotovoltaik Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi

Fotovoltaik güneş pilleri; yüzeyine düşen güneş ışığını, doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen düzeneklerdir. Bu enerji çevriminde, herhangi hareketli parça bulunmaz. Güneş pilleri, bugün hayatın her kesiminde kullanım olanağı bulan

elektronik düzeneklerin içerisinde kullanılan ve çok küçük boyutlara sahip olan yarıiletken diyetlerin, geniş yüzey alanlara uygulanmış şeklidir. Kullanılan malzemeler ve üretim şekilleri, diyetlerin çalışma ilkeleriyle temel olarak birbirlerine benzemektedir. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, fotovoltaiik dönüşüm olayına dayanır. Fotovoltaiik dönüşümde güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile çalışabilecek yapıda ve elektrik yüklerinin bir birinden ayrılabilmesine izin verebilecek uzunlukta yasak bant genişliğine sahip bir yarıiletken olmalıdır [24]. Fotovoltaiik olay, iki aşamada meydana gelir. Bunlar, birer taşıyıcı yük çifti olan elektron-boşluk çiftinin oluşturulması, ardından da bu yük çiftlerinin birbirinden ayrılmasıdır [23].

Fotovoltaiik bir güneş pili yapımı; herhangi bir yarıiletkende n-tipi ve p-tipi bölgeler oluşturularak gerçekleştirilebilir. Oluşturulan bu n-tipi ve p-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki p-n eklemi kesiminde, bir elektrik alanı kurulur. Bu bölgede oluşan elektrik alan, yapısal elektrik alan (E_{yap}) olarak isimlendirilmektedir. Yarıiletken eklemin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaiik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur. Önce eklem bölgesine ışık düşürülerek, elektron-boşluk çiftleri oluşturulur. Sonra bunlar, oluşan elektrik alan yardımıyla bir birlerinden ayrılır [47].



Şekil 3.6 p-n Eklemlili Güneş Piliinin Şematik Gösterimi [23]

3.5.1 Fotovoltaik Güneş Pillerinin Elektriksel Özellikleri

Fotovoltaik güneş pilleri; absorplanmış fotonların oluşturduğu akımı geçirecek yöndeki bir diyot üzerine paralel bağlanmış sabit bir akım kaynağı gibi hareket eder. Fotovoltaik güneş pilleri, ileri yönde beslenmiş bir p-n eklem diyotu gibi çalışırlar. Şekil 3.6' da şematik olarak gösterilen p-n eklemli bir güneş pilinde foton absorplanması ile eklem her iki yanında, taşıyıcı yük (elektron-boşluk) fazlalıkları meydana gelir. Eklem her iki yanındaki çoğunluk yük taşıyıcıları difüzyon yoluyla, azınlık yük taşıyıcıları ise eklem bölgesinde elektrik alanın sürüklemesiyle eklem bölgesini geçerek fotoakım yoğunluğunu meydana getirirler [23].

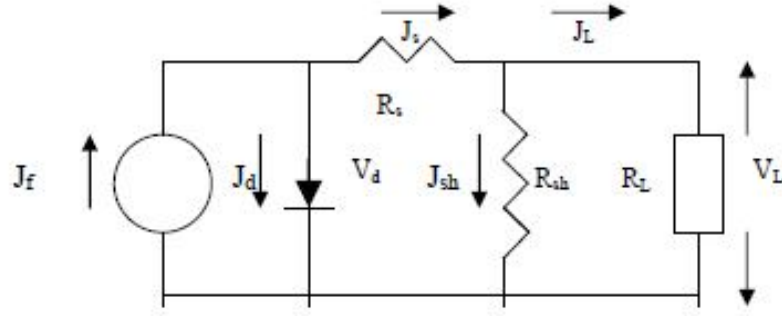
Fotoakım yoğunluğu (J_f), p-n eklemine ileri yönde kutuplaştırır. Eğer fotovoltaik güneş pilinin çıkışında herhangi bir yük bağlı değilse ($R_L=0$) J_f ; p-tipi bölgeyi pozitif, n-tipi bölgeyi negatif olarak yükler. Bu durumda p-n eklemine potansiyel engeli Φ_0 azalır ve çoğunluk yük taşıyıcıları, azınlıkta oldukları bölgelere doğru difüzyon yoluyla göç ederler. Çoğunluk yük taşıyıcılarının oluşturduğu bu birleşim akım yoğunluğu olan J_r ; p-tipi bölgeyi negatif, n-tipi bölgeyi pozitif yükler ve sonucunda bu yüklenmeden dolayı J_f fotoakım yoğunluğu, p-n eklemine ters yönde besler. Bu durumda Φ_0 potansiyel engelinin yüksekliği tekrar artar ve çoğunluk yük taşıyıcılarının eklem bölgesini geçmeleri de engellenmiş olur. Bu sırada tekrar bir foton absorplanır ve Φ_0 potansiyel engelinin yüksekliği tekrar azalır. Böylece Φ_0 potansiyel engelinin bir azalış bir artması, güneş pilinin güneş ışınlarının etkisinde kaldığı sürece devam eder [28].

3.5.2 Bir Fotovoltaik Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi

Bir fotovoltaik güneş pili; fotonlar tarafından meydana getirilen akımı geçirmekte olan bir diyot ve üzerine paralel bağlı sabit bir akım kaynağı gibi davranır [47]. Diyotun uçları arasında, potansiyel duvarının indiği miktara eşit bir potansiyel farkı meydana gelir. Bu potansiyel farkına, fotovoltaik elektromotor kuvveti (e.m.k) denir. Fotovoltaik e.m.k; silisyumdan yapılmış güneş pilleri için yaklaşık 0.5 volt,

germanyum malzeme kullanılarak yapılmış piller için yaklaşık 1 volt düzeyindedir [18].

Şekil 3.7' de, örnek bir güneş pilinin eşdeğer devresi gösterilmiştir. Burada R_s güneş pilinin iç seri direncini, R_{sh} şönt direncini, R_L yük direncini, J_L ise yük direnci içinden geçen akım yoğunluklarını ifade etmektedir [23].



Şekil 3.7 Bir Güneş Pilinin Eş Değer Devresi [23]

Bir güneş pilinin açık devre gerilimi, pilden geçen akımın sıfır olduğu durumda pil uçlarında ölçülen potansiyel farkıdır. Pilin kısa devre akımı ise, sıfır gerilim altında ve aydınlatma altında pilden geçen akımdır. Bu akımın şiddeti, seri direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda ışıkla oluşan akıma eşit olup, ışık şiddetine bağlıdır. İdeal bir güneş pili için $R_s=0$ ve $R_{sh}=\infty$ kabul edilir [35].

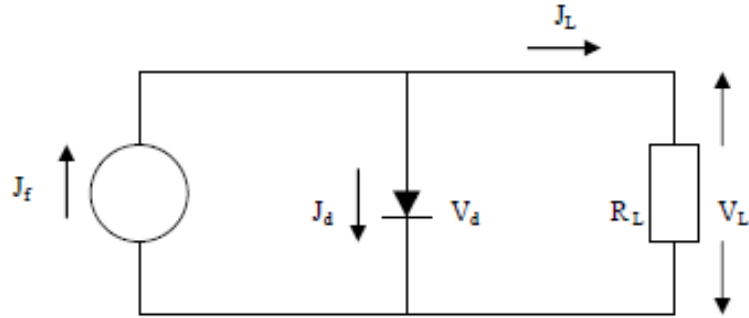
Bu durumda pilin kısa devre şartı altında, yani $V_d=0$ olması halinde; pilin kısa devre akım yoğunluğu (J_{kd}) ve fotoakım yoğunluğu (J_f) birbirine eşit olur. Bu durum;

$$J_{kd} = J_f \quad (3.4)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Açık devre şartı altında, yani $R_L = \infty$ için güneş pili içerisinde geçen toplam akım sıfır olacağından; $J(\lambda) = 0$ alındığında, açık devre gerilimi V_{ad} için,

$$V_{ad} = \left(\frac{A_0 k T}{e} \right) \ln \left(1 + \frac{J_f}{J_0} \right) \quad (3.5)$$

bağıntısı bulunur. Burada A_0 , p-n eklemine ideal olma faktörü, J_0 karanlık doyum akım yoğunluğunu ifade eder. Düzgün olmayan eklem bölgesi, kristalin yapısında bulunan ve istenmeyen safsızlıklar, kristaldeki boşluklar, J_0 akım yoğunluğunun artmasına sebep olur [47]. Güneş pilinin açık devre voltajı fotovoltaik elektromotor kuvvetine (e.m.k) eşittir [18]. Fotovoltaik emk, yarıiletken malzemenin yasak enerji bant aralığının ve şönt direnci ile doğru orantılı olarak artar; J_0 akım yoğunluğunun ve sıcaklığın artması ile de ters orantılı olarak azalır. İdeal bir fotovoltaik güneş pilinin eşdeğer devresi Şekil 3.8. 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 İdeal Bir Fotovoltaik Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi [23]

3.5.3 Yarıiletken Güneş Pillerinde Kullanılan Malzemeler

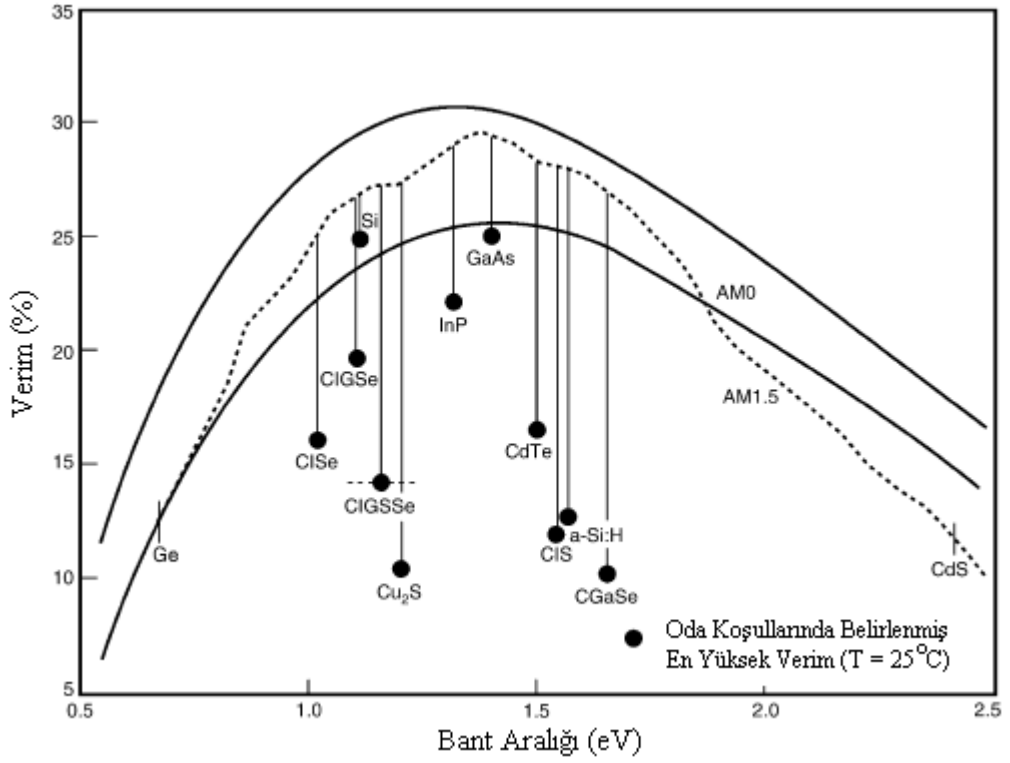
Fotovoltaik güneş pilleri, pek çok farklı maddeden yararlanarak üretilir. Malzeme seçimi; üretilen güneş pillerinin hem ekonomik, hem de yüksek verimli olması açısından büyük önem taşımaktadır. Silisyum, güneş pili üretiminde en yaygın kullanılan yarımetaldir. Güneş pili; tek-çoklu kristal veya tabakadan elde edilebilir. Dilimlenmiş kalın kristal malzemeden veya bir taşıyıcı üzerinde oluşturulmuş çoklu kristal veya ince film tabakalarından üretilmektedir. Güneş pili üretiminde kullanılan başlıca malzemeler şunlardır [47]:

Kalın kristal malzeme: Kristal silisyum, galyum arsenik (GaAs).

İnce film malzeme: Amorf silisyum, kadmiyum sülfür (CdS), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indium diselenoid (CuInSe₂).

Optik yoğunlaştırıcı hücreler

Şekil 3.9' da çeşitli malzemeler için ölçülen en yüksek verimler, yasak bant aralığı üzerinde gösterilmiştir. Şekilde görülen eğri Loferski tarafından, atmosfer dışında bulunduğu düşünülen, ideal bir diyot için teorik hesaplara göre çizilmiştir [47]. Teorik sonuçlara göre çizilen grafik, yasak bant genişliği 1.1 eV ile 2.3 eV arasında olan yarıiletken malzemeden yapılan güneş pillerinden daha yüksek verim elde edildiğini ortaya koymaktadır. Yasak bant genişliği bu aralıkta bulunan malzemeler şunlardır: Silisyum (Si-1.21 eV), indium fosfor (InP-1.27 eV), galyum arsenik (GaAs-1.36 eV), alüminyum antimon (AlSb-1.49 eV), kadmiyum tellür (CdTe-1.5 eV), çinko tellür (ZnTe-2.1 eV), alüminyum arsenik (AlAs-2.16 eV) ve galyum fosfordur (GaP-2.24 eV) [23].



Şekil 3.9 Farklı Malzemelerin Laboratuvar Koşullarındaki Verimlerinin Bant Aralıklarına Göre Kıyaslaması [43]

3.6 Yarıiletken Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

Güneş pillerinde kullanılan yarıiletken malzemenin yasak bant aralığı E_g arttıkça; J_0 karanlık doyum akım yoğunluğu azalır, V_{ad} açık devre gerilimi artar. Çünkü bu durumdayken, pilin absorbladığı, yasak bant genişliğinden daha büyük enerjili ($h\nu > E_g$) fotonların sayısı azdır. Yasak bant aralığı E_g azaldıkça; J_0 karanlık doyum akım yoğunluğu artar, J_f fotoakım yoğunluğu azalır. Çünkü bu durumda düşen fotonların tamamı güneş pili tarafından absorblanamaz. Yeterli miktarda elektron-boşluk çifti oluşturulamaz ve J_f fotoakım yoğunluğu azalarak pilin verimi düşer [47]. Üretilen güneş pilinden yüksek verim elde edilebilmesi için, kullanılacak yarıiletken malzemenin yasak bant enerji aralığının kullanıma uygun olması gerekir.

Güneş pili yapımında kullanılacak malzeme seçilirken, yarıiletkenin optik özellikleri dikkate alınmalıdır. Doğrudan bant geçişine sahip yarıiletkenlerde gelen

ışınlar daha kısa mesafelerde absorplanmalarına rağmen, indirekt bant geçişli malzemelerde daha derinlerde absorplanmaktadır. Bu sebeple direkt bant geçişli malzeme kullanılarak yapılan güneş pilleri, indirekt bant geçişli materyal kullanılarak yapılanlara göre daha ince olarak ve daha az malzeme kullanılarak üretilebilirler. Bu durumda indirekt bant geçişli malzemelerde, yüzey birleşmeleri daha çok olur ve pilin çıkış gücü düşer. Diğer yandan; direkt bant geçişli yarıiletkenlerin elde edilmesi hem zor, hem de pahalıdır [23].

Yüksek verimlikte fotovoltaik dönüşüm için yasak enerji aralığı en uygun malzemenin seçilmesi önemlidir. Malzemenin yapısal ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi ve heteroeklem yapının oluşturulurken, yarıiletkenlerin seçiminde en uygun kombinasyonun kullanılması gerekmektedir. Ayrıca seçilen malzemenin büyük ölçekte üretiminin ekonomik olması, bol bulunması, ayrıca bu malzemenin çevreye de en az zararı verecek nitelikte olması gözden kaçırılmaması gereken koşullardır [24].

Güneş pili yapımında kullanılacak yarıiletken malzeme seçiminde diğer ölçüt, yarıiletken maddenin kristalik yapısıdır. Yarıiletken malzemedeki kusurlar, taşıyıcıların iletilmesini önemli ölçüde düşüren unsurlardır ve elektron hareketini kısıtlarlar. Tek kristalli malzemelerde teorik olarak yapısal özellikler kristali oluşturan tüm yapıda aynıdır. Oysa çok kristalli malzemedeki yapısal özellikleri birbirlerinden farklı olan ve “damar” adı verilen bölgeler vardır. Damarlar arası geçişlerde elektron göçünün hareketi kısıtlanır. Bu durumun önüne geçebilmek için ise p veya n-tipi katkılandırılmış yarıiletkenlerin uygun şekilde üst üste getirilmesi ile oluşturulan heteroeklemlili yapı kullanılabilir. Bu uygulamada; güneş ışınlarının büyük oranda soğurulmasını sağlayan düşük yasak bant aralığına sahip bir yarıiletken malzeme ile eklem ışık alan tarafı oluşturulur. Eklem diğer tarafının oluşturulmasında seçilen yarıiletken malzemenin, eklemde yüksek bir gerilim elde etmeyi sağlayacak yasak bant aralığına sahip olmasına dikkat edilir. Ancak bu şekilde üretilmiş yapılarda da eklem ara yüzeyleri ve taşıyıcıların yeniden birleşmesine neden olan kusurlar da; aşılması gereken yeni sorunlar olarak karşımıza çıkmaktadır [24].

4. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİ ÇEŞİTLERİ

Teknolojik olarak tek kristal, çok kristal (polikristal) ve ince film olarak üretilmekte olan güneş pilleri; iki şekilde sınıflandırılabilirler:

- a) Kullanılan Kristalin Cinsine Göre
- b) Tarihsel Gelişim Sırasına Göre

4.1 Fotovoltaik Güneş Pillerinin Kristal Cinsine Bağlı Olarak Sınıflandırılması

Güneş pillerinin üretimlerinde kullanılan kristalin cinsine bağlı olarak yapılan sınıflandırmada, güneş pilleri üç ana grup altında incelenebilir [47]:

- a) p-n Homoeklemlili Güneş Pilleri,
- b) p-n Heteroeklemlili Güneş Pilleri,
- c) Amorf Silisyum (a:Si) Güneş Pilleri' dir.

4.1.1 p-n Homoeklemlili Güneş Pilleri

Homoeklemlili bir güneş pilinde, p-n eklemının her iki tarafında aynı kristal yapılı yarıiletken kullanılmaktadır. Fakat bu tip güneş pillerinde katkılama yöntemleri çeşitlilik göstermektedir. Katkılama yöntemlerine göre, dört ayrı p-n homoeklemlili güneş pili yapısı vardır. Bunlar; sıg homoeklemlili güneş pilleri, yüksek alçak yayınlayıcı güneş pilleri, ön yüzey alanlı güneş pilleri ve düşey homoeklemlili güneş pilleri olarak sayılabilir [29].

Tek kristalli veya çok kristalli (polikristal) olarak aynı cins yarı iletken malzeme kullanılarak üretilebilirler. Polikristalleri elde etmek ise zor ve pahalıya mal olmaktadır. Polikristalden yapılan homoeklemlı güneş pilleri, tek kristalden yapılanlara göre sıcaklığa karşı daha dayanıklı, daha yüksek verimli ve daha uzun ömürlüdürler. p-n homoeklemlı güneş pillerinin ideal verimlilikleri yaklaşık %28 civarındadır [47].

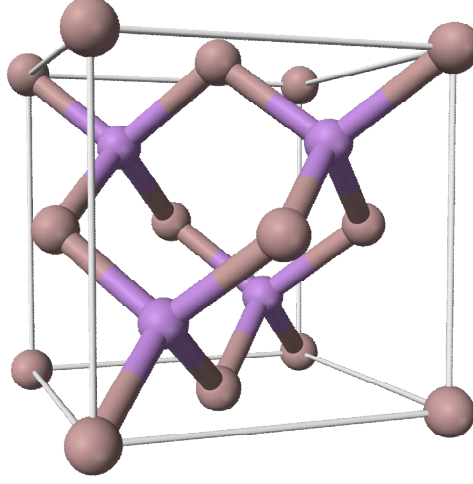
p-n homoeklemlı güneş pillerinin yapımında en yaygın olarak kullanılan malzemeler, Silisyum (Si) ve Galyum arseniktir (GaAs). Güneş pillerinin yapımında daha çok silisyum tercih edilir. Çünkü silisyum malzeme kullanılarak elde edilen p-n eklemının açık devre gerilimi daha büyüktür. Silisyum, germanyum gibi ışığın geniş dalga boyu spektrumunda kararlılık göstermez. Fakat bu sınırlama, ışık kaynağı olarak güneş kullanıldığı için ciddi bir sorun oluşturmaz. Çünkü güneş ışığında en yüksek enerjili ışınım, görünür bölgede yeşil ışınım dır ve bu her iki madde için de uygundur. Akkor ışık kaynağı kullanılması halinde; germanyumun uçları arasındaki gerilim küçük olmasına rağmen, çıkışından elde edilen güç silisyuma göre daha büyüktür. Çünkü germanyumun yasak bant genişliği silisyumdan daha küçüktür ve daha küçük enerjilerde fotoakım elde edilmesine imkan verir [23].

4.1.1.1 Galyum Arsenik Güneş Pilleri

Galyum ve arsenik elementlerinden oluşan Galyum arsenik (GaAs), polikristal bir yapıya sahiptir. Kristal yapıları silisyuma benzer. Bununla birlikte, silisyumdan yapılan güneş pillerinin p-n ekleminde daha büyük bir açık devre gerilimi elde edilmesi yüzünden güneş pili yapımında silisyum galyum arseniğe oranla daha fazla tercih edilir. Galyum arsenik kristalinin yasak bant genişliği 300 K' de 1.43 eV değerindedir ve bu enerjiye eşit ya da büyük enerjiye sahip fotonları soğurarak elektron-boşluk çifti oluşturur [24]. Direkt bant aralıklı bir yarıiletkendir ve bu yüzden üzerine gelen ışınları daha kısa mesafede absorplayabilir. Bu yüzden GaAs güneş pilleri ince yapılı ve yapımında az malzeme kullanılır [29].

Galyum arsenik radyasyona karşı çok dayanıklı bir malzemedir. Bu durum da onu uzay araştırmaları ve uydu yapımında elverişli hale getirmektedir. Ancak

arseniğin zehirli olması, çevresel koşullar göz önüne alındığında bu yarıiletkenin yeryüzü uygulamalarında çok da uzun süre kullanılamayacağını göstermektedir.



Şekil 4.1 Galyum Arsenik Molekülünün Kristalik Yapısı

GaAs güneş pilleri hem elektrik, hem de termal enerji elde etmek üzere iki amaç için kullanılır. Bu ise Fresnel merceklerinin (ışığın tümüne yakınına toplayan çok ince mercekler) arkasına uygun olarak yerleştirilmiş GaAs güneş pil panelleri ile sağlanabilir. Bu paneller su ile soğutulurak 120 °C ve 140 °C arasında sıcak su buharı elde edilir ve klima cihazları çalıştırılabilir [23].

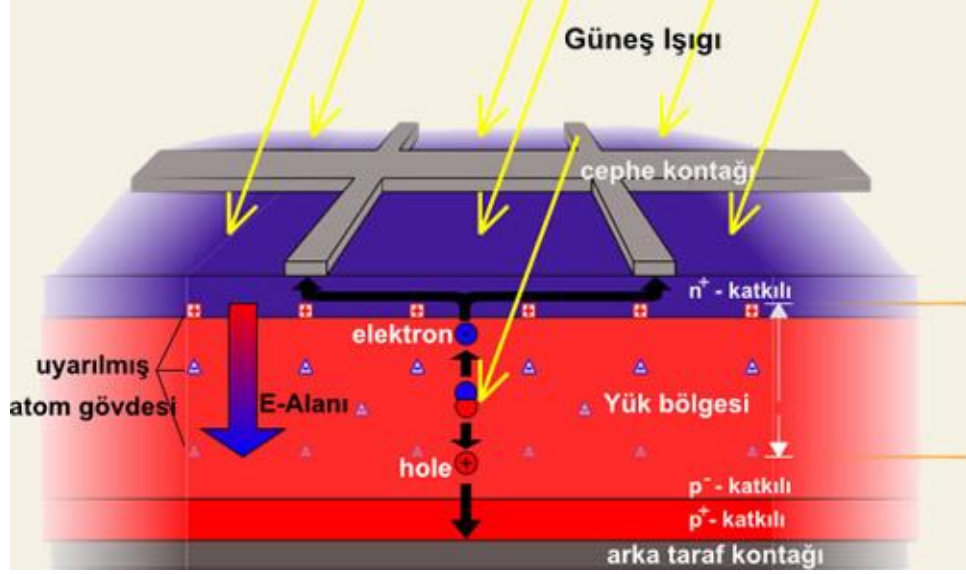
GaAs güneş pilleri ile ticari modüllerde %22, laboratuvar şartlarında %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcı) verim elde edilmiştir [23]. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemli GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir[20]. Fakat galyum elementi yeryüzünde az olduğundan; GaAs güneş pilleri, daha çok uzay uygulamaları için üretilen optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır [29]. GaAs' in uzay uygulamalarındaki güneş pillerinde kullanılmasının diğer sebebi de; sıcaklığa ve radyasyona karşı, silisyuma nazaran daha dayanıklı olmasıdır [23]

4.1.1.2 Silisyum Güneş Pilleri

Elektronik sanayisinde çok önemli bir rol oynayan silisyum (Si), güneş pili üretiminde en çok kullanılan malzemedir. Silisyumun özelliklerinin uzun süre değişmemesi ve silisyum üretim teknolojisinde elde edilen büyük başarılar; Bu malzemenin uzun zamandır en popüler malzeme olarak öne çıkmasını sağlamıştır [47]. Oksijenden sonra yer yüzünde en çok bulunan element olan silisyum, doğada en yaygın şekilde kum (SiO_2) ve kuartz yapısında bulunur. Kumun saflık derecesi çok düşük olduğundan teknik olarak kullanılmaya uygun değildir. Ancak kuartzın %90' ı silisyumdur. Kuartz işlenerek %99 silika, ondan da yüksek saflık oranında silisyum elde edilebilir [24]. Silisyumun yasak bant aralığı 0 K 'de 1.21 eV, oda sıcaklığında (300 K) 1.12 eV' tur [23].

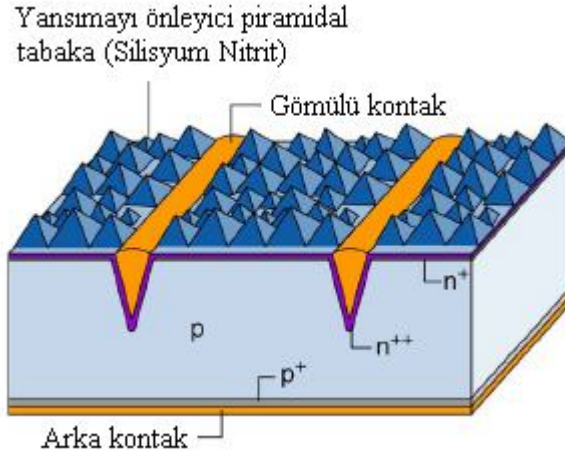
Uzay araştırmalarında kullanılan güneş pillerinin çoğunluğu silisyum kullanılarak yapılmıştır [18]. Silisyum güneş pillerinde bulunan p-n eklemleri, kristalin büyütülmesi sırasında oluşturulur. Kristal büyütme işleminde kullanılan yöntemler kimyasal buharlaştırma, Czochralski, yüzdürme ve kesme yöntemleridir. Galyum (Ga), arsenik (As), bor (B), fosfor (P) ve alüminyum (Al); silisyum (Si) kristalinde katkı maddesi olarak kullanılan atomlardır. Bunlardan bor (B) ve fosfor (P), uzay uygulamalarındaki fotovoltaik güneş pillerinde kullanılırlar [23].

Şu anda piyasanın faaliyetlerinin büyük bölümünün monokristal silisyum yarıiletken malzeme üretimine yönelik olması, teknolojik olarak monokristal yarıiletken malzeme üretim tekniklerinin gelişmiş olması sonucunu doğurmuştur. Ancak yüksek verim elde edilmesini sağlayacak sistemlerin tasarlanma ve araştırma çalışmaları halen sürdürülmektedir. Saf tek kristal üretimi oldukça zor ve pahalı bir teknolojiyi gerektirmektedir. Bunu izleyen aşamada ise silisyum saflaştırılarak, yarıiletken niteliğinde çok kristalli silisyum elde edilir. Polikristal silisyum elde edilmesine kadar olan aşamaların her birisi, oldukça enerji gerektiren ve maliyeti yükselten işlemlerdir [24]. Bu yüzden çoğu güneş pili uygulamasında monokristal yarıiletken tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra polikristal yapı da zaman zaman tercih edilmektedir.



Şekil 4.2 Güneş Pili Yapısı [57]

Tek kristalli silisyum güneş pilinin rengi koyu mavidir. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi pilin üst yüzeyinde bakır olan ön kontaklar vardır ve bunlar pil tarafından üretilen akımı toplamaya yararlar. Bunlar negatif kontaklardır. Kontakların altında yaklaşık 150 nm kalınlığında, yansıtıcı özelliği olmayan, ışığın büyük oranda absorbe edilmesini sağlayan bir kaplama tabakası vardır. Bu tabaka olmazsa; silisyum, üzerine düşen ışınımın büyük kısmını geri yansıtacaktır ve bu da pil verimini düşürecektir. Pilin ön yüzeyi, normal olarak yansıyan ışığın bir kısmını daha yakalayabilmek amacıyla piramitler ve konikler şeklinde düzenlenmiştir. Yansıtıcı olmayan kaplamanın altında, pildeki elektrik akımının oluştuğu p-n eklemi bulunur. n-bölgesi, pilin negatif tarafını; p-bölgesi ise, pilin pozitif tarafını oluşturur. Pilin arka yüzeyinde, elektronların girdiği pozitif kontak görevi gören arka kontak yer alır [37].



Şekil 4.3 Yansımayı Önleyici Piramit Yapılı Tabaka [43]

Ortam sıcaklığı $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, ortalama ışınım şiddeti 1000 W/m^2 ve hava-kütle oranı 1.5 olarak test koşulları belirlenmiştir. Piller standart koşullar altında test edilir ve karşılaştırmalar yapılır. Hava-kütle oranı, güneş ışınımının geçirilme oranını gösteren atmosfer kalınlığıdır. Güneşin tam tepede olduğu durumda (AM1 koşulu), bu oran 1 olarak alınır. Atmosfer tarafından emilen ışınımın oranına bağlı olarak, pilin üreteceği elektrik miktarı da değişeceğinden; bu oran önemli bir etkidir. Tipik bir silisyum güneş pili, 0.5 volt kadar elektrik üretebilir. Pilleri bir birine seri bağlayarak üretilen gerilim değerini arttırmak mümkündür [37].

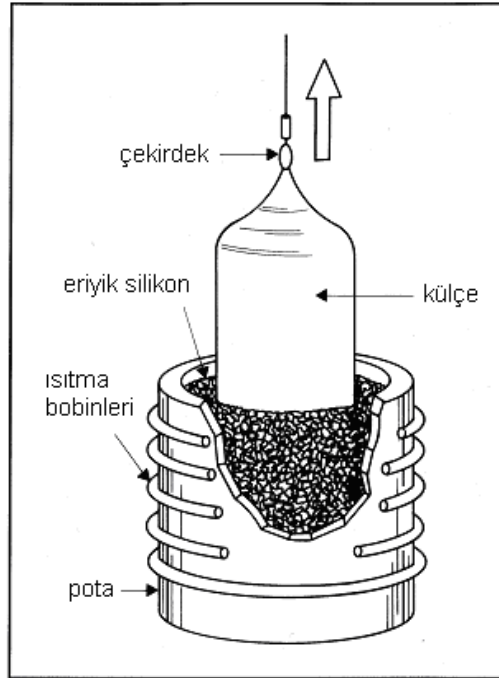
Çok kristalli silisyumun üretilmesinde en fazla kullanılan yöntem dökme yöntemidir. Tek-kristalli silisyumda da, çok kristalli silisyumda da başlangıç maddesi aynıdır. Erimiş durumdaki silisyum kalıplara dökülür ve soğumaya bırakılırsa döküm tekniği ile polikristal silisyum elde edilebilir. Bu teknoloji ile üretilen malzemelerden fabrika edilen güneş pillerinin verimleri ve maliyetleri düşük olmaktadır [24]. Bununla birlikte birkaç milimetre tanecik büyüklüğündeki polikristal silisyumdan, verimi %14 civarında olan güneş pilleri yapılabilmektedir [29].

Tek kristalli ya da çok kristalli silisyum güneş pilleri, verimlilikleri ve kararlılıkları ile 1950' li yıllardan bu yana dikkat çekicidir. Son yıllarda geliştirilen

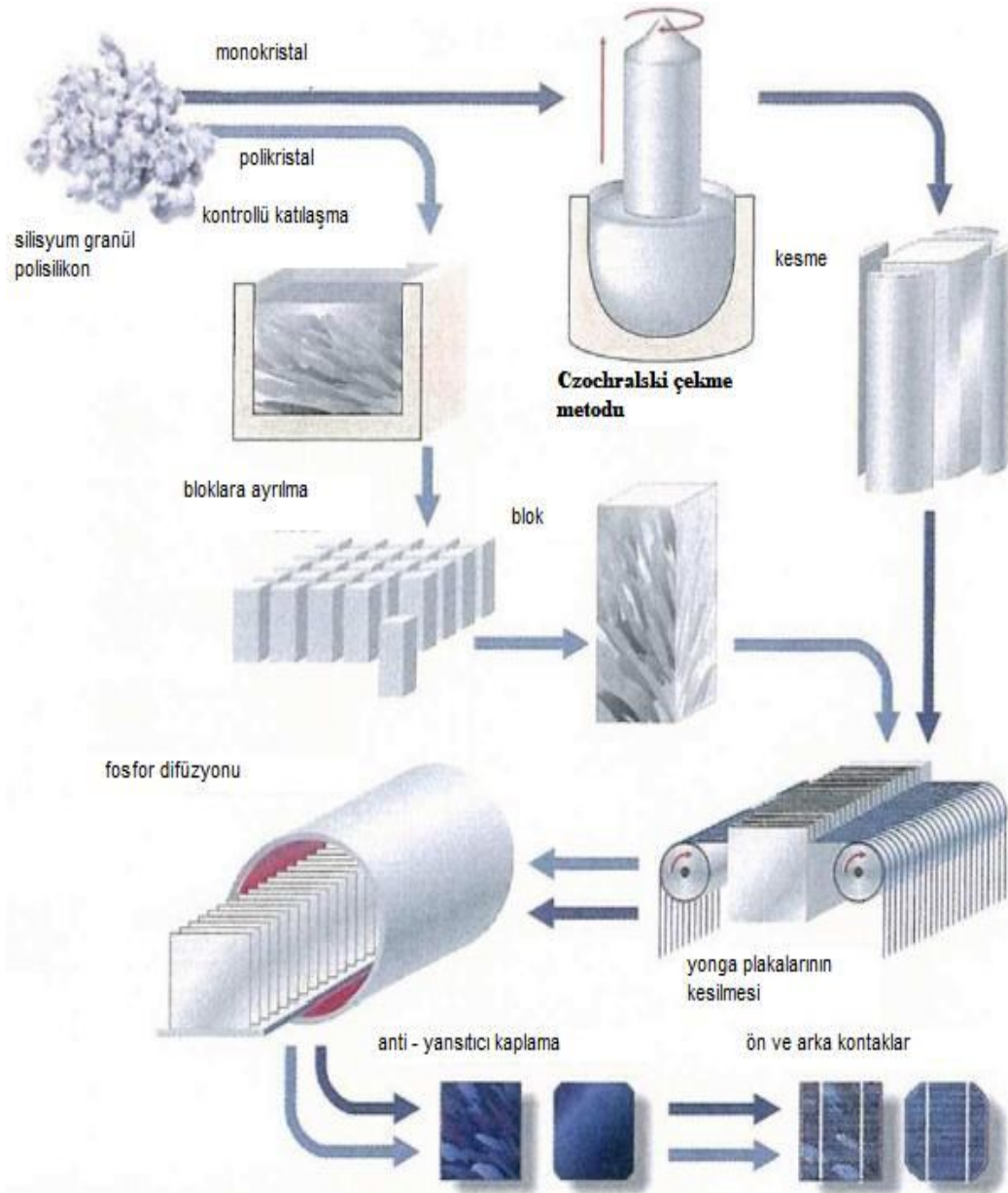
teknolojiler ile güneş-elektrik dönüşüm verimlilikleri ise gitgide arttırılmaktadır [24]. Tek kristal silisyum güneş pillerinde laboratuvar şartlarında %24, ticari modüllerde ise %15' in üzerinde verim elde edilmiştir [20]. Polikristal silisyum güneş pillerinden, laboratuvar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarında verim elde edilmiştir [20].

4.1.1.2.1 Czochralski Yöntemi

Polonyalı kimyager Jan Czochralski' den ismini alan Czochralski metodu ile mono kristalli silisyum elde edilebilir. Bu yöntemde erimiş haldeki silisyum eriği içerisine döner şekilde bir aşılama kristali sokularak yavaş yavaş dışarı çekilir. Bu şekilde molekül düzeyinde kristal yönlendirilir. Bu nedenle de Czochralski metodu ile elde edilen kristaller tek kristal olarak da adlandırılır. Bu metot iki ile üç gün arası zaman almaktadır. Bu tek kristallerden çok etkin güneş hücreleri elde etmek mümkündür ancak dezavantajı ise imalat için çok yüksek enerji giderine sahip olmasıdır.



Şekil 4.4 Czochralski Yöntemiyle mono kristalli Silisyum Üretimi



Şekil 4.5 Czochralski Monokristal ve Polikristal Silisyum Üretim Safhaları [38]

4.1.2. p-n Heteroeklemlı Güneş Pilleri

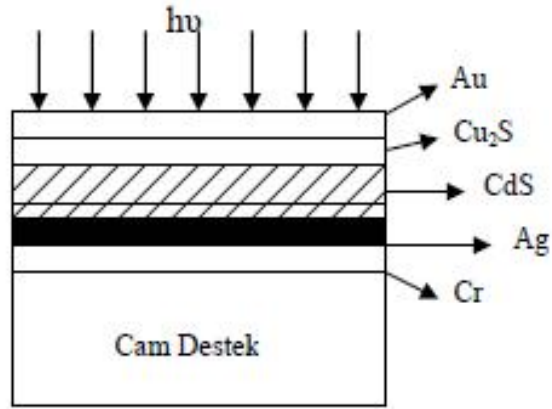
Son zamanlarda p-n homoeklemlı güneş pillerine göre daha kolay ve daha ucuza mal olması, sıcaklığa ve radyasyona karşı daha fazla dayanıklılık göstermesi gibi üstün özelliklerinden dolayı; heteroeklem adı verilen ince film güneş pilleri kullanılmaya başlanmıştır [18]. Buna karşın, verimleri homoeklemlı güneş pillerine göre düşüktür [23].

Heteroeklemlı bir güneş pilinde p-n ekleminin iki tarafında farklı iki yarıiletken kullanılır. Bu yarıiletkenlerin elektron ilgileri, bant aralıkları ve katkı atom yoğunlukları farklıdır [29].

İki yarıiletken birleştirildiğinde, Fermi düzeyleri sistemin her yerinde eşitlenir. Fakat sistemde iş fonksiyonlarının farkına eşit olan bir elektrostatik bir potansiyel engeli ortaya çıkar. Aynı zamanda p-n ekleminin iletim bandı kenarında süreksizlikler oluşur. Bantlarda oluşan bu süreksizlikler, fotovoltajik olay açısından uygun olmayan durumlardır. Bu tür süreksizlikler, uygun katkılamanın yapılması ve uygun elektron ilgisi olan yarıiletkenlerin bir arada kullanılması ile ortadan kaldırılabılır [29].

Heteroeklemlı güneş pillerinde, eklemin iki yanındaki yarı iletkenlerin örgü sabitlerinin birbirine çok yakın olmasına dikkat edilir [29]. Bir de, soğurucu materyal ile pencere materyalinin yarıiletkenlik tipleri karşıt tipte seçilmelidir [18].

İlk örneği kadmiyum sülfür-bakır sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) olan heteroeklem ince film düzeneklerinin en fazla kullanılanları; kadmiyum sülfür-bakır indium diselenoid (n-CdS/p-CuInSe₂), bakır sülfür-çinko kadmiyum sülfür (p-Cu₂S/n-Zn_xCd_{1-x}S), kadmiyum sülfür-silisyum (n-CdS/p-Si), kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür (n-CdS/p- CdTe) ince film güneş pilleridir [47].



Şekil 4.6 Kadmiyum Sülfür-Bakır Sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) Pillerinin Şematik Kesit Görünümü

4.1.2.1 Kadmiyum Sülfür-Bakır Sülfür Güneş Pilleri

Kadmiyum sülfür-bakır sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) pillerinin yapımı 1954 yılında, silisyum güneş pilleri ile aynı yılda olmasına rağmen ticari amaçlı bir üretim henüz yapılamamıştır. Bunun nedeni hem verimlerinin düşük olması, hem de uzun ömürlü olmalarını engelleyen bazı sorunların olmasıdır. Bu pillerin en büyük sorunu; Cu₂S bileşiğindeki bakırın, bulunduğu ortamdaki oksijen ile reaksiyona girerek oksitlenmesidir [23].

Bu güneş pillerinin üretilmesinde vakumda buharlaştırma veya püskürtme yöntemleri kullanılır. Elektriksel bağlantı; taban elemanı olan CdS için çinko, indium, kalay; soğurucu katman olan Cu₂S için bakır veya altın kullanılarak yapılır [18]. Bakırın absorpsiyon katsayısı daha büyük olduğundan ışığın absorplanması Cu₂S ortamında gerçekleşir.

Şekil 4.4' te kesiti görülen bu pillerin Cu₂S soğurucu katmanı, Clevite işlemiyle oluşturulur. Bu işlemden önce CdS filmi; vakumda buharlaştırma ya da başka bir yöntem kullanılarak, kalınlığı yaklaşık 20 pm olacak şekilde, iletken bir madde ile kaplanmış cam üzerine depo edilir. CdS polikristal filminin tanecik büyüklüğü ise yaklaşık 5 µm' dir. Sonra bu CdS filmi; 80 °C-100 °C' de bulunan bakır (I) klorür çözeltisine çok kısa bir süre daldırılarak, Cu₂S soğurucu katmanının

oluşumu sağlanır (Clevite işlemi). Kadmiyum sülfür-bakır sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) güneş pilinin p-bölgesini oluşturan bu soğurucu katmanın kalınlığı 0.1-0.3 µm' dir [29].

Heteroeklem oluşturulmadan önce CdS' ün yasak bant genişliği 2.4 eV, Cu₂S' ün ise 1.2 eV' tur. Bu değerler heteroeklem oluşturulduktan sonra CdS için 2.31 eV ve Cu₂S için 1.21 eV olarak değişir [23]. Bu pillerin verimleri teorik olarak %10 olmasına rağmen, pratikte %3 ile %8 arasında değişmektedir. Verimi arttırmak için temizleme işlemi daha saf bir madde ile yapılır. Cu₂S bileşiğindeki bakırın oksitlenmesini önlemek için pilin üst metal kısmı, buharlaştırma yerine temas yoluyla yapılır ve gelen ışınların yansımaları önlemek için fotonların çoğunu absorplayan bir madde kullanılır [23].

4.1.2.2 Kadmiyum Sülfür-Bakır İndium Diselenoid Güneş Pilleri

“Fotovoltaiklerin araştırılmasında en büyük ilgi, bakır indium diselenoid üzerinde toplanmıştır. Periyodik sistemin I., III. ve VI. grup elementlerinden elde edilen, tetragonal kalkopirit adı verilen örgü yapısına sahip I-III-VI₂ yarıiletken bileşiklerinden biridir” [47]. I-III-VI₂ bileşikleri; örgü parametreleri, büyük absorpsiyon katsayıları ve oda sıcaklığında sahip oldukları direkt bant aralıklarıyla güneş pilleri, non-lineer optik ve termoelektrik gibi birçok kullanım alanı için uygun malzemelerdir [39]. Bakır indium ve selenyumdan yapılan üçlü bileşik yarıiletkenlerden yapılan güneş pilleri, CIS güneş pilleri olarak anılırlar [24]. Kadmiyum sülfür-bakır indium diselenoid güneş pilleri (n-CdS/ p-CuInSe₂), yaygın olarak üretilen CIS güneş pilerinden biridir. Bakır indium diselenoid, fotovoltaik düzeneklerde özellikle soğurucu katman için uygun olan belirli yarıiletken davranışları gösterir. Atmosferik ve mekanik etkilere karşı dayanıklılığı ve kararlılığı kusursuzdur. Bu bileşik yarıiletkenlerin soğurma katsayıları oldukça yüksek olup, yasak bant genişlikleri güneş spektrumu ile uyuşacak biçimde ayarlanabilir. İnce filmleri hem n-tipi, hem de p-tipi biçimde kolaylıkla hazırlanabilir. Bu nedenle hem homoeklem, hem de heteroeklem olarak kullanım potansiyeli taşımaktadır. Soğurma katsayısının büyük oluşu, bakır indium diselenoid

ince filmlerinin çok ince üretilmesine imkan tanır. Böylece üretim aşamasındaki materyal maliyeti ve bulunabilirliği konusundaki engeller kendiliğinden ortadan kalkar [24].

Yüksek kalitede ve geniş yüzeyli CIS güneş pillerinin ekonomik olarak üretilmesi istendiğinden, bu pillerin çeşitli ince film kaplama yöntemleriyle üretilme aşamalarının araştırılmasına sebep olmuştur.

Bu çok kristalli pilin verimi, laboratuvar şartlarında % 17.7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip bir modülde ise % 10.2 düzeyinde olmuştur [20]. Bugün CIS ince film güneş pillerinin çoğu, içerisine galyum elementinin katılması ile daha verimli hale getirilir. Ancak yarıiletkeni oluşturan element sayısı artıkça, gereken teknoloji ve malzemenin özelliklerinin denetimi de bir o kadar zorlaşmaktadır [24].

4.1.2.3 Bakır Sülfür-Çinko Kadmiyum Sülfür Güneş Pilleri

n-CdS/p-Cu₂S pillerinin p-n eklemlerinde açık devre voltajı 500 mV' dir. Bu pillerin kristal örgü uyumsuzluklarını kısmen de olsa önlemek için CdS kristali yerine, Zn_xCd_{1-x}S kristali kullanılarak bakır sülfür-çinko kadmiyum sülfür (p-Cu₂S/n-Zn_xCd_{1-x}S) güneş pilleri üretilmektedir. Sonuçta 800 mV açık devre voltajı elde edilerek, verim %10' un üzerine çıkarılabilmektedir [23].

Zn_xCd_{1-x}S malzemesi içerisindeki çinko konsantrasyonu artırıldığı zaman, bu pilin elektrik ve optik özellikleri değişmektedir. Açık devre voltajı artarken, kısa devre akımı azalmaktadır [23].

4.1.2.4 Kadmiyum Sülfür-Silisyum Güneş Pilleri

Kadmiyum sülfür-silisyum (n-CdS/p-Si) güneş pilleri; yasak bant genişliği 1.21 eV olan silisyumun, yasak bant aralığı 2.24 eV olan CdS ile özel şartlar altında birleştirilmesinden elde edilirler. p-tipi silisyum üzerine CdS kristali kaplanarak, p-n

heteroeklemi oluşturulur. Yüksek bir verim elde etmek için kontak; silisyum için Altından (Au), CdS için İndiyumdan (In) yapılmalıdır. Bu güneş pillerinin verimi %9 civarındadır [23].

4.1.2.5 Kadmiyum Sülfür-Kadmiyum Tellür Güneş Pilleri

VIB gurubunda bulunan tellür ile, IIB gurubunda bulunan kadmiyum elementinin bir araya gelmesiyle oluşan II-VI yarıiletken bileşiği kadmiyum tellürün (CdTe), oda sıcaklığında yasak enerji aralığı (Eg) 1.5 eV düzeyindedir. Bu değer, güneş spektrumundan maksimum dönüşümü elde etmek için gerekli olan değere oldukça yakındır. Yüksek soğurma katsayısına sahip olmasının yanında; ince film büyütme teknolojisinin bir çoğu ile kolayca üretilebilmesi, geniş yüzey alanlı güneş pili üretiminde CdTe bileşik yarıiletkeninin öne çıkmasının sağlamıştır [47].

Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür (n-CdS/p-CdTe) güneş pili üretiminde; kadmiyum tellür (CdTe), kadmiyum sülfür (CdS) ile bir araya getirilerek heteroeklem diyot üretilebilir. Yasak enerji aralığı yaklaşık 2.4 eV olan CdS yarıiletkeni, çok ince bir tabaka olarak uygulanır. Güneş ışınlarının çoğunu geçiren CdS, heteroeklemede saydam bir pencere görevi yapar [24].

CdTe ince filmlerinin büyütülmesinde üç teknoloji ortaya çıkmıştır. Bunlardan birincisi olan yakın mesafeden buharlaştırma (Close Space Sublimation/ CSS) yöntemi ile en yüksek kalitede CdTe malzeme üretilmektedir. Bu yöntemde sıcaklık farklılıkları çok az olan kaynak ve filmin büyüdüğü yüzey bir birine çok yakın tutularak, malzemenin sublimasyon yoluyla büyümesi sağlanır. İkinci CdTe büyütme yöntemi olan elektro-depozisyon (elektrotta biriktirim) yönteminde ise; Kadmiyum ve Tellür iyonu taşıyan elektrolitten akım geçirilerek, CdTe yarıiletkeninin katotta büyümesi sağlanır. Çok ucuz olan bu yöntemde, büyüyen malzemenin kontrolü CSS yönteminde olduğu kadar kolay değildir. BP solar firması, bu yönteme dayalı pilot üretime başlamıştır ve 10 megaWatt / yıl üretim kapasiteli bir fabrikayı Fairfield California-ABD' de kurma çalışmalarını sürdürmektedir. BP solar, Solar Inc. ve Antek gibi çok uluslu şirketler, büyük ölçekli üretimler için ciddi adımlar atmaktadır [24].

4.1.3 Amorf Silisyum Güneş Pilleri

Hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) ilk olarak, 1955 yılında Sterling tarafından incelenmiş; fakat hidrojenin konumu ile ilgilenmemiştir. a-Si:H, amorf silisyumdan (a-Si 'dan) farklı bir çok özelliğe sahiptir. Fotoiletkenlik, a-Si filmlerde ihmal edilebilir düzeyde olduğu halde, a-Si:H filmlerde büyük bir fotoiletkenlik olayı gözlenmektedir. Güneş pilleri için de önemli faktör fotoiletkenliktir ve 1977 yılında, Wronski ve Carlson, ilk defa a-Si:H güneş pili yapmış ve verimi %5.5 bulmuştur [23].

Amorf silisyum malzemesini kristalli silisyumdan ayıran özellik; silisyum atomlarının malzeme içindeki düzenlerinin, birinci derece komşu atomların ötesinde geliştiği güzel olmasıdır. Amorf silisyum malzemedeki atomların, uzun mesafelerde etkili olabilen (uzun erimli) bir düzenlemesi yoktur. Silisyum atomlarının arasındaki bağların bazıları doymamış durumdadır. Atomların düzenli sıralanmayışı; yasak bant aralığına çok fazla izinli enerji durumu sokarak, birleşme merkezleri oluşmasına sebep olur. Malzeme içerisindeki yapı taşlarının bu gelişigüzel dizilişi, amorf-silisyumun elektriksel iletim kalitesini düşürse de; yarıiletken içerisine %5-10 oranında hidrojen katılarak, elektriksel özellikleri fotovoltaik çevrime uygun düzeyde tutulabilir. Hidrojen; doymamış Si bağlarının bazılarını doyurarak, yasak enerji aralığında bulunan izinli durumların sayısını azaltır.

Amorf silisyum elde edilmesi için kullanılan en yaygın yöntem ışık boşalım tekniğidir (glow-discharge). Bu yöntemde silan (SiH_4) gazı ve hidrojen karışımı, bir çift elektrot arasından geçirilerek; elektrotların yükleri, yüksek frekanslarda değiştirilir. Bunun sonucu olarak, SiH_4 parçalanarak kararsız SiH_3 radikalini oluşturur. İzleyen aşamada, kararsız SiH_3 elektrotlardan birine giderek toplanır ve kararlı hale gelir. Ardından hidrojen, yüzeyden ayrılarak geride silisyumu bırakır. Böylece yüzey silisyumla kaplanmış olur. Elektrot üzerinde kütlesi artan silisyum gazının içerisine bor ya da fosfor katılarak, n-tipi ya da p-tipi yapılabilir [24].

Soğurma katsayısı çok büyük olan amorf silisyum, 250 °C dolayındaki sıcaklıklarda geniş yüzeylere düzgün bir şekilde kaplanabilmektedir. Bu özellikleri amorf silisyumdan elde edilen güneş pillerinin, kristal yapıdakilere göre daha ucuza

mal edilebilmelerini sağlar [29]. Bu üstünlüklerinin yanında en büyük dezavantajları, üzerlerine düşen ışığın artmasıyla, verimlerinin azalmasıdır (Steabler-Wronsky etkisi). Güneş piline ışık düşürülmesi sonucu, serbest yük taşıyıcıları (elektronlar ve boşluklar) oluşur. Güneş pilinde meydana gelen bu elektron ve boşlukları birbirinden ayıracak, yapısal bir elektrik alan (E_{yap}) oluşturulmalıdır. Katkılanmış bölgelerdeki yüksek orandaki kusur yoğunluğu, taşıyıcı mobilitesini düşürür. Bunu yapmak için güneş pilindeki p-tipi ve n-tipi yarıiletken tabakaların arasına, düşük kusurlu katkısız bir tabaka konur. Bu tabaka optik olarak aktiftir ve üzerine ışık düştüğünde yapısal elektrik alan tarafından birbirinden ayrılacak serbest taşıyıcılar oluşturmaktadır. Böylece p-i-n eklem yapısına sahip a-Si:H güneş pilleri elde edilir [27].

Kristal yapı özelliği göstermeyen bu amorf silisyum pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 düzeyindedir. Günümüzde saat, hesap makinesi ve oyuncak gibi küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılmaktadırlar. Amorf silisyum güneş pillerinin, binalara entegre yarı saydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üretici olarak kullanılabileceği tahmin edilmektedir [20].

Çizelge 4.1 Gelişim Sırasına Göre Fotovoltaik Güneş Pilleri

- 1. Nesil Fotovoltaik Piller :** Monokristal Silisyum Piller
- 2. Nesil Fotovoltaik Piller :** Polikristal Silisyum Piller
Amorf Silisyum Piller
Kadmiyum Tellür Piller
Bakır İndiyum Selenoid Piller
Galyum Arsenik Piller
- 3. Nesil Fotovoltaik Piller :** Çok Eklemlili Piller
Organik Piller (OPV)
Boya İle Duyarlaştırılmış Piller (DSSC)
Plastik Piller
Nanokristalik Yapılar
- 4. Nesil Fotovoltaik Piller :** Bitkiler (Öngörülen)

4.2 Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişim Sırasına Göre Sınıflandırılması

4.2.1 1. Nesil Fotovoltaik Piller

İlk üretilen fotovoltaik piller bu sınıfa girerler. Verimleri % 20' nin altında olmasında rağmen üretim kolaylıkları ve ucuzluğu sebebiyle piyasanın % 86' sına hakimdir. Düşük verimli olması sebebiyle güneş kolektörlerinin oldukça geniş yüzeyli olması gereklidir. Tek eklemlili ve tek kristal silisyum yarıiletken yapısını kullandığından verimleri düşüktür.

4.2.2 2. Nesil Fotovoltaik Piller

İnce film teknolojisinin kullanılması ile üretim maliyetleri düşürülmeye başlanmıştır. Ucuza malolmasına rağmen henüz verimleri yeryüzünde % 10 civarında olduğu için yaygınlaşmasının önünde engeller bulunmakta. Ancak çalışmalar sonucu verim arttırılmaya çalışılmaktadır. Pahalıya mal olmalarına

rağmen uzay ve uydu uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü atmosfer dışındaki verim % 28-30 civarındadır [55].

Bu piller Amorf Silisyum, Polikristal Silisyum, Kadmiyum Tellür, Bakır İndiyum Selenoid, Galyum Arsenik olarak sayılabilir.

4.2.3 3. Nesil Fotovoltaik Piller

Yarıiletkenlerin uygun şekilde üst üste eklendiğinde verimin arttırılabildiği belirlendiğinden beri bu konu üzerine çalışmalar hızlandırılmıştır. Nanoteknolojideki gelişime bağlı olarak mikrokristal yapıli yarıiletken üretimi ile de verim arttırma çalışmaları yapılırken, maliyet de düşürülmeye çalışılmaktadır.

Amorf ve mikrokristal silisyum üretimi plazma reaktörlerinde olur. Genel olarak bu sistemlerde plazma 13.6 MHz frekansındaki elektrik sinyali ile uyarılır. Uyarı frekansının artırılması daha kaliteli a-Si:H tabakalar üretilmesini sağlar. Aynı zamanda $\mu\text{c-Si:H}$ üretiminde de yüksek frekanslar kullanılır. $\mu\text{c-Si:H}$, VHF-PECVD yöntemiyle silan (SiH_4) gazının uyarılmasıyla üretilir. Mikrokristal üretiminde hidrojen gazı önemli bir etkidir. Saf silan gazıyla yapılan filmlerden amorf filmler oluştuğunda bir miktar hidrojen gazı ilave edilirse film kalitesi artacaktır. Belirli bir hidrojen gazı miktarından sonra film artık mikrokristal yapıya kaymaya başlar. Hidrojen gazının daha da artması kristal formunu da arttıracaktır [64].

Nanoteknolojinin gelişmesi ile birlikte nanokristal sentezi ile pil yapımına daha uygun, daha küçük yasak bant aralığına sahip, iletkenliği daha yüksek, daha kararlı moleküller sentezlemek mümkün olmaktadır. Karbon alotroplarının, özellikle de grafen moleküllerinin sentezi ise sadece güneş pilleri için değil, elektronik sanayinin gelişiminde de çığır açacak gibi görünmektedir. Son bölümde inceleyeceğimiz organik yapıli iletken malzemelerin kullanıldığı yapıların, maliyet / verim oranı düşükçe yarıiletken malzemelerin yerini alacakları düşünölmektedir.

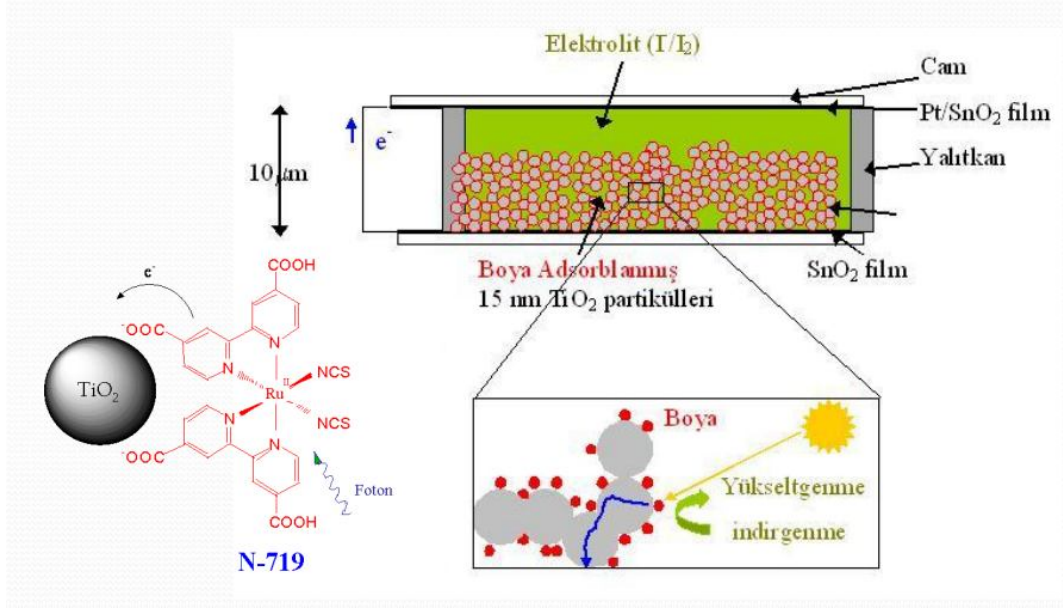
Plastik güneş pilleri ise hem esneklik hem hafiflik hem de şeffaflık özelliklerini barındırdığından bir süredir bilim adamlarının ilgi alanında yer

almaktadır. Tüm dünyada birçok bilim adamı elektrik üretiminde kullanılacak, kolay üretilen ve düşük maliyetli organik güneş pilleri geliştirmeye çalışmaktalar [60].

Applied Physics Letters dergisinde yayınlanacak araştırma sonuçlarında, Wake Forest Üniversitesi araştırmacıları organik veya esnek güneş pillerinin verimliliğini geliştirmeye çalışırken; ışığı emen plastiklerin içinde, tıpkı yapraklarda olduğu gibi nano-teller oluşturmuşlardır. Bu yoğun katmanları kullanmaları sayesinde daha fazla güneş ışığının emilmesini sağlamış ve verimi % 6' dan daha yüksek düzeye arttırmışlardır [62].

Boya Duyarlı Güneş Pilleri (DSSC) de üzerinde verim artırma çalışmaları yapılan pil çeşitlerindedir. Cam esaslı ve esnek boya duyarlı piller olarak iki çeşittir. Diğer PV malzemelere göre avantajları şunlardır:

- ✚ Diğer PV teknolojilerine göre aktif madde kullanımı daha düşüktür.
- ✚ Organik tabaka kalınlıkları, yüksek absorpsiyon verimi nedeniyle diğer silisyum güneş pillerinin 1/10 u kadardır.
- ✚ Çözelti prosesi kolaydır.
- ✚ Tabaka uygulama teknikleri için yüksek üretim potansiyeliyle birlikte düşük miktardaki aktif madde kullanımının bir araya gelmesi çok düşük maliyetleri de beraberinde getirecektir [61].



Şekil 4.7 Boya İle Duyarlaştırılmış Fotovoltaik PİL (DSSC) [61]

4.2.4 4. Nesil Fotovoltaik Piller :

Bu piller gelecekte üretilmesi ve kullanılması düşünülen ancak henüz sadece tasarım aşamasında olan pillerdir. Özellikle bitkilerin yaptığı fotosentezi elektrik enerjisine çevirmekte kullanmak isteyen bilim adamları, bitkileri de doğal güneş pilleri olarak kullanmak istemektedirler. Teknolojik gelişmelerin, enerji üretiminde kullanılacak teknolojileri hangi noktalara getireceğini ise zaman gösterecektir.

4.3 Güneş Pillerinden Yüksek Verim Elde Etmek İçin Kullanılan Sistemler

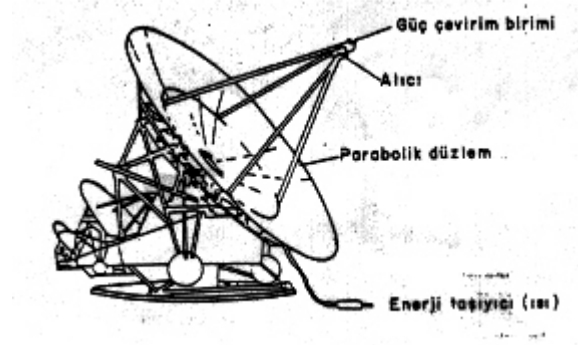
Güneş pillerinde giriş gücünün etkili biçimde alınmasını ve güneşten gelen enerjinin en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak amacıyla, bazı sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler şöyle sıralanabilir:

- ✚ Yoğunlaştırıcı güneş pili sistemleri,
- ✚ Çok katlı (birçok bant aralıklı) güneş pili sistemleri,
- ✚ İnce Film Güneş Pili Teknolojisi.
- ✚

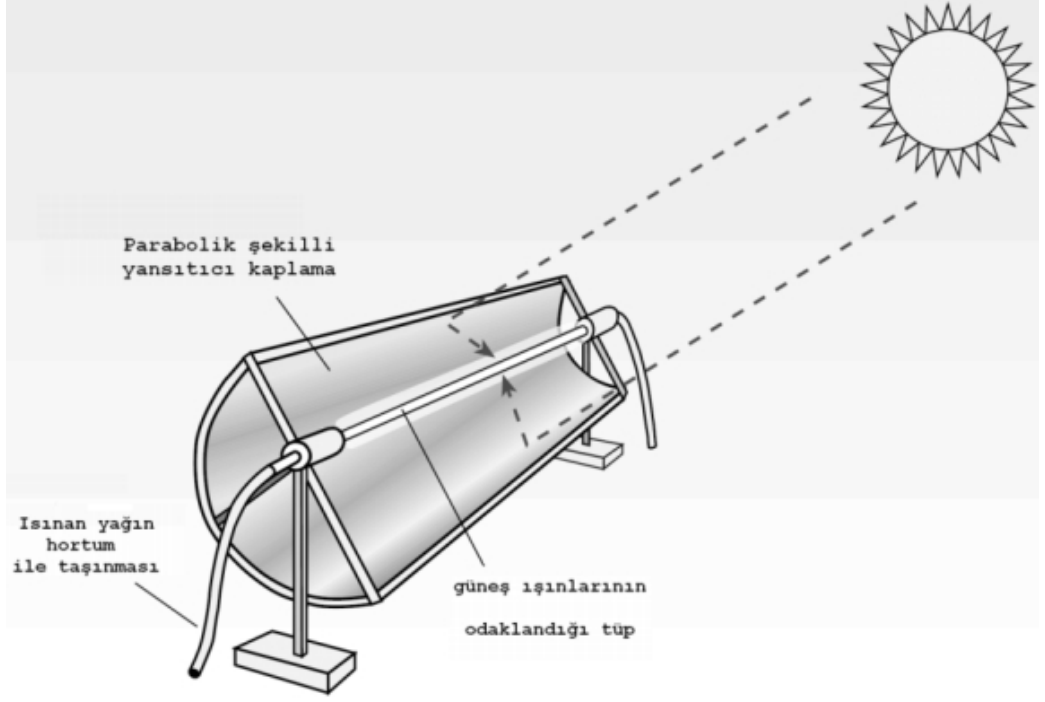
4.3.1 Yoğunlaştırıcı Güneş Pili Sistemleri

Güneş pillerinden elde edilen elektrik enerjisi miktarını daha ucuza elde edebilmek için tasarlanmış sistemlerdir. Küçük alanlı güneş pilleri kullanılarak, güneş ışınları; yansıtıcı veya ışın kırıcı yüzeyler yardımı ile yoğunlaştırılarak toplanır. Güneş ışınları, doğrusal ve noktasal olmak üzere iki şekilde yoğunlaştırılabilir. Doğrusal yoğunlaştırmada iki boyutlu doğrusal yoğunlaştırıcılar; noktasal yoğunlaştırmada, üç boyutlu parabolik çanak yoğunlaştırıcılar ve merkezi alıcı sistemler kullanılabilir [20]. Yoğunlaştırıcılar, sabit veya sürekli güneşi takip eden hareketli yapıda tasarlanabilirler.

Yoğunlaştırıcı sistemler kullanılarak Si güneş pillerinin verimi yaklaşık %25' in üzerine, GaAs güneş pillerinin verimi ise, %30 civarına çıkarılabilmektedir [29].



Şekil 4.8 Noktasal Yoğunlaştırıcı Solar Pil



Şekil 4.9 Parabolik Yoğunlaştırıcı Solar Pil

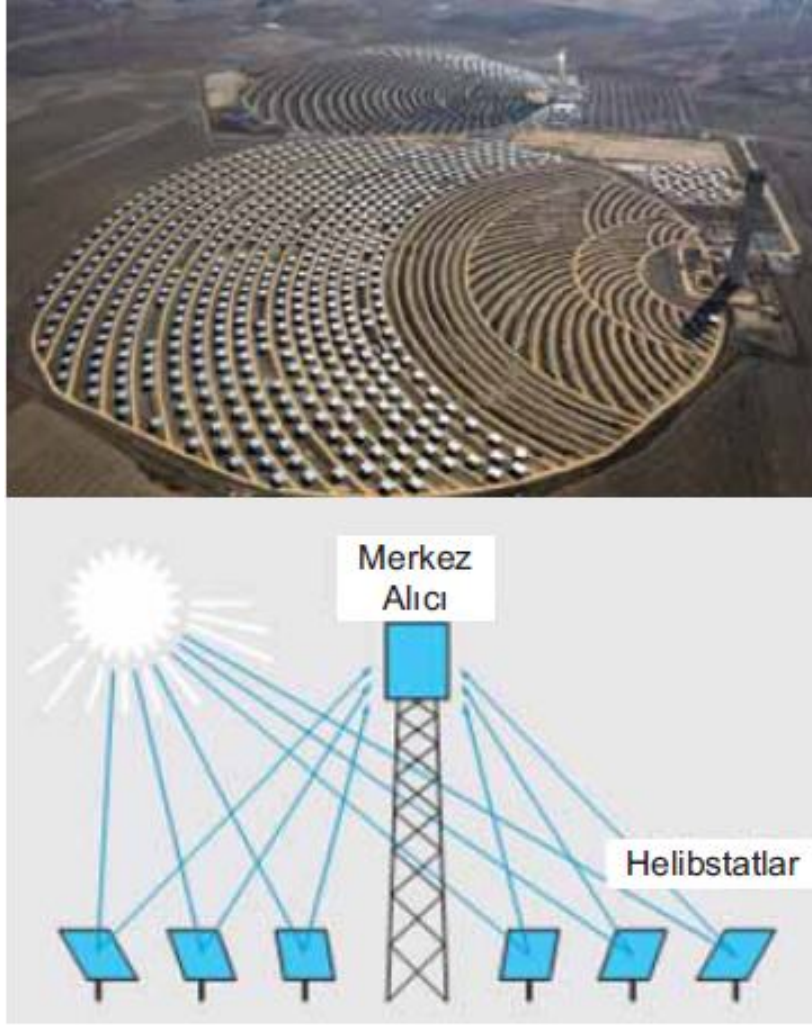
4.3.2 Çok Eklemli Güneş Pili Sistemleri

Çok katlı sistemler kullanılarak, verimi %29' un üzerine çıkarmak mümkündür [27]. Şekil 4.6' da bu sistemlere bir örnek olarak; %29.5 oranında bir verime sahip olan, $\text{GaInP}_2 / \text{GaAs}$ çok katlı güneş pilinin şematik kesiti görülmektedir [47].

MgF ₂	0.12
ZnS	0.066
n-AlInP ₂	0.04
i- GaInP ₂	0.1
p- GaInP ₂	0.8
p+- GaAs	0.02
n+- GaAs	0.02
n-AlGaAs	0.2
n- GaAs	0.1
p- GaAs	0.1
p+- GaAs	0.05

Şekil 4.10 %29.5 Oranında Bir Verime Sahip Olan GaInP₂ / GaAs Çok Katlı Güneş Pil Kesitinin Görünümü x(µm) [27]

Çok katlı güneş pillerinin yapımları daha karmaşık ve pahalı olduğundan, yoğunlaştırıcıli sistemlerde kullanılması daha uygundur. Çok katlı pillerin kullanım alanları maliyetinin düşürülmesi ile genişleyecektir [27].



Şekil 4.11 Merkezi Alıcı Sistemi [65]

Çok katlı güneş pilleri, azalan bant aralıklarına göre üst üste büyütülmüş p-n eklem yapılarından oluşmuştur. Aydınlatmanın olduğu tarafa en büyük bant aralıklı tabaka konmuştur [27]. Düşük enerjili fotonlar dar bant aralıklı yarıiletken üzerine, yüksek enerjili fotonlar geniş bant aralıklı yarıiletken üzerine geldiğinde; daha verimli güneş pilleri oluşturulabilir. Böylece hem düşük enerjili fotonların, hem de yüksek enerjili fotonların elektron-boşluk çiftleri oluşturması ve yükün verimli göçü sağlanabilir [47]. Spektrum yarılması (spectrum splitting) ve ardışık (tandem) güneş pili yapımıyla bu yapılabilir. Spektrum yarılımında, güneş ışınları spektrum duyarlı aynalarla uygun güneş pilleri üzerine düşürülürler. Ardışık güneş pili yaklaşımında ise en geniş yasak bant genişliğine sahip güneş pili en üste gelecek

şekilde, gittikçe daha küçük yasak bant genişliğine sahip güneş pilleri, seri halinde art arda getirildiklerinde güneş pillerinin verimi arttırılabilir [29].

4.3.3 İnce Film Teknolojisi

Güneş pillerinde kullanılan malzemenin ve işçiliğin azaltılması, teknolojinin basitleştirilerek maliyetlerinin düşürülmesi yönünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları sonunda kaba malzemenin tamamını kullanmak yerine; yarıiletken malzemenin geniş yüzeyler üzerine ince film şeklinde kaplanması fikri ortaya çıkmıştır. Bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, güneş pili üretiminde kullanılacak bir çok yarıiletken malzemenin; düşük maliyetlerde cam, metal ya da plastik folyo gibi tabakalar üzerinde geniş yüzeylere kaplanabileceğini ortaya çıkarmıştır [47].

İnce film fotovoltaiik malzemeler genellikle çok kristalli yapıya sahiptir. Yani ince film yarıiletken malzemeler; büyüklükleri bir milimetrenin binde birinden, milyonda birine kadar değişen damarlardan oluşmaktadır denebilir. Kristal yapı içinde teoride kusur bulunmaması gerekir. Ancak pratikte oluşan kristalin içinde kusurlar vardır ve bu durum iletkenlikte sapmalara sebep olur. Yarıiletken malzemenin elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri; her damar içerisinde fotovoltaiik uygulamalar için çok uygundur ancak; damarlar arasındaki bölgelerde yer alan mikro düzeydeki yapısal kusurlar, çok kristalli malzemede karşılaşılan en önemli problemlerden biridir. Optik özellikleri uygun seçilen bir yarıiletken malzemede; milimetrenin binde biri kadar bir kalınlık içerisinde, güneş ışınlarının tamamına yakın bir kısmı soğurulabilir. Bu da mikro düzeyde yapılan çalışmaları etkilemektedir. Uzun bir süredir araştırma geliştirme çalışmalarının konusu olan ince film güneş pilleri, tahmin edilen üretim hedeflerinin gerisinde kalmıştır. Mevcut durumda laboratuvar verimlilikleri %18' e kadar çıkmıştır. Fakat halen istenen düzeyde verim alınamaması, bu teknoloji üzerine yapılan çalışmaların devamını da tehlikeye sokmaktadır. Yine de şu an ulaşılan düzeyde bile ince film güneş pilleri için Siemens, BP Solar, Conan gibi firmalar üretim denemelerini sürdürmektedirler [24]. İnce film güneş pilleri arasında üç büyük aday öne çıkmaktadır. Bunlar; amorf

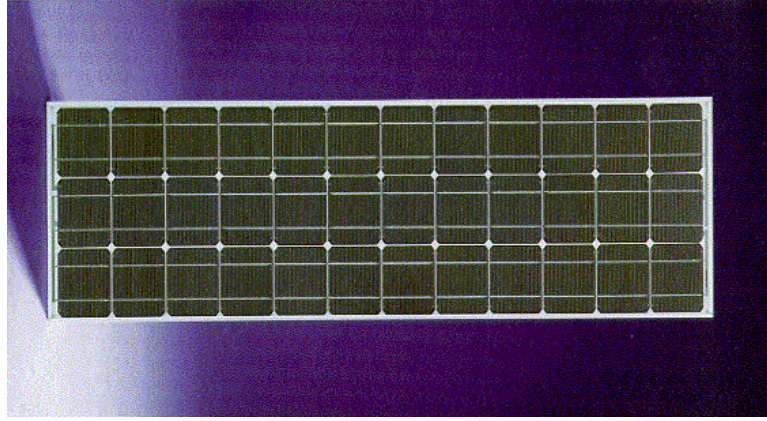
silisyum (a:Si), kadmiyum ve tellür elementlerinden meydana gelen bileşik yarıiletken kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır, indium selenyum elementlerinin birleşiminden oluşan bakır indium-diselenoid (CuInSe₂) bileşik yarıiletkenidir. [24].

4.4 Güneş Pili Modülleri

Bir güneş pilinden elde edilebilecek güç pratikte 1-2 Watt' tır. İşe yarar ve kullanılabilir düzeyde yüksek güçler elde etmek için, güneş pillerinin bir düzen içinde seri ya da paralel olarak birbirlerine bağlanmaları gerekir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine bağlanarak, bir yüzey üzerine monte edilebilir [20]. Fotovoltaik modül meydana getirilirken; güneş pilleri seri bağlanarak sistemin çıkış gerilimi, paralel bağlanarak ise çıkış akımı artırılabilir. Modülün çıkış akımı, yüzeyi üzerine gelen güneş ışık şiddetiyle doğru orantılıdır. Bu yüzden modül tasarımı, modül çıkış akımıyla doğrudan bağlantılıdır. Bunlardan başka, modülün camı üzerinde biriken tozun, %5 ile %10 arasında bir verim azalmasına sebep olacağından, modül tasarımında bu durum da göz önüne alınmalıdır [29].

Modülleri daha verimli hale getirebilmek için, güneşin hareketine göre yönlendirmek daha uygun olabilir [34]. Kuzey yarımkürede kullanılacak modüller güneşe bakacak şekilde, güney yarımkürede kullanılacak modüller kuzeye bakacak şekilde konumlandırılırlarsa, güneş ışınımından daha verimli faydalanılabilmektedir. Yıl boyunca maksimum çıkış gücünü elde edilmesi için modüllerin yatayla yaptığı açığı, genellikle buldukları yerin enlem açısına eşit almak gerekir [47].

Kışın maksimum güç elde etmek için ise modüllerin yatayla yaptığı açığı, buldukları yerin enlem açısından 15 °C kadar büyük seçmek gerekir [29].



Şekil 4.12 Bir Güneş Pili Modülü [59]

Güneş pillerinin bir birine bağlanmasıyla modüller, modüllerin bir birine bağlanması ile örgüler oluşturulabilir. En basit sistem, bir modül ve buna bağlı bir elektrik motoru veya aküden oluşmuş bir sistemdir. Her modül; paralel veya seri bağlanabilmesine olanak verecek şekilde, bağlantı kutusuyla birlikte tasarlanır. Modüllerin seri ya da paralel bağlanıp bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya panel adı verilir. Paneller bir modülden elde edilen gücü arttırmak için başvurulan bir yöntemdir. Arka arkaya bağlanmış modüllerden oluşmuş sistemlerde gücü megaWatt lara kadar çıkarmak mümkündür. Birden fazla panelin kullanıldığı bir sistemde, paneller kontrol cihazına veya akü grubuna birlikte bağlanabilecekleri gibi, her panel tek olarak da bağlanabilir. Tek tek bağlandıklarında sistemin bakımı daha kolay olacaktır. Sistemde kullanılan fotovoltaik üreteçlerin tümünün oluşturduğu yapı, örgü ya da ağ olarak tanımlanmaktadır. Örgünün çok büyük olduğu uygulamalarda daha kolay yerleştirme ve çıkış kontrolü için sistem 100000 veya daha fazla modülden de oluşabilir [37]. Sistemi tek bir modülden ibaret de, birbirine bağlanmış biçimde de oluşturmak mümkündür. Güneş pillerini bir birine bağlamak için geçerli olan kurallar, modüllerin ve panellerin bir birlerine bağlanmalarında da aynen uygulanır [27]. Güneş pillerinden elde edilecek gücü bu şekilde kat kat arttırmak mümkündür.

Fotovoltaik bir örgüde bir birine bağlanan güneş pilleri ya da güneş pili modülleri arasında, elektriksel ve termal dengesizlikler oluşabilir. Bu

dengelesizliklerin sebebi fotovoltaiik örgüyü oluşturan güneş pillerinin veya modüllerinin her birinin, farklı kendilerine has özelliklere sahip olmasıdır. Gerçekte, güneş pillerinin elektriksel karakteristiklerinin ortalama bir değerden saptığı çokça görülür [47]. Bu durum, güneş pili üretiminde yapılan teknik işlemlerden kaynaklanabileceği gibi, kullanılan yarıiletken malzemeden de kaynaklanabilir. Aynı zamanda kısmi ya da tamamen tozlanma ve gölgelenme de elektriksel kayıplara yol açar. Bu dengelesizlikler engellenmediği zaman; örgüdeki bir veya daha fazla modül istem dışı çalışabilir ve bu durum da örgüye zarar verebilir. Örgüdeki modüllerden biri veya daha fazlası bir yük gibi davranmaya başlayarak, örgüdeki diğer modüllerin ürettiği enerjiyi tüketecek duruma gelebilir ve pillerin veya modüllerin yanmasına sebep dahi olabilir. Örgüyü oluşturan birimlerden biri veya birden fazlası, yüksek güçlerde (kW mertebesinde) zarar görerek kullanılmaz duruma gelebilir [47]. Yüksek güçlere ulaşıldığında, fotovoltaiik örgüyü oluşturan birimleri korumak için maliyeti fazla arttırmamak üzere ve üretilen enerjinin azalmasına yol açmayacak şekilde koruyucu elemanlar sisteme eklenmeli ve uygulanmalıdır [27].

Güneş pilleri ve modüller sadece elektriği üretirler. Üretilen bu elektrik enerjisinin depolanması, iletilmesi ve düzenlenmesi gereklidir. Bunun için modüllere dengeleyici bileşenler eklenerek fotovoltaiik güneş sistemleri meydana getirilir [34].

Günümüzde kullanılan fotovoltaiik sistemlerden elde edilen elektriksel güç, watt mertebelerinden (küçük elektronik devrelerin beslenmesi) kilowatt mertebelerine (katodik koruma, sinyalizasyon, iletişim üniteleri, pompalama ve sulama tesisleri, evler, çiftlikler) ve hatta megawatt mertebelerine (fotovoltaiik santraller) kadar uzanabilmektedir. Bu sistemler, şebekeden bağımsız (stand-alone) ve şebekeye bağımlı olmak üzere iki grupta ele alınabilir.

4.4.1 şebekeden Bağımsız Fotovoltaiik Sistemler

Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yerlerde, jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar.

Bununla birlikte, jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte, karma olarak kullanılmaları da mümkündür.

Şebekeden bağımsız sistemlerde yeterli sayıda güneş pili modülü, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere, genellikle sistemde akü bulundurulur. Güneş pili modülleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek, bunu akümülatörde depolar. Yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır [20]. Akülere düzenli bakım yapılmalıdır. Sistemde tükenen akü, yenisiyle değiştirilmelidir. Bir fotovoltaik sistemin, birkaç bulutlu gün boyunca talep edilen gücü karşılaması için akülerde yeterli güç depolayacak biçimde boyutlandırılması gerekir [34].

Bir fotovoltaik sistemdeki akülerin, güneş pili modülleri tarafından aşırı şarj olmasından veya yük tarafından aşırı deşarj olmasından zarar görmesini engellemek için sisteme bir denetim birimi eklemek gerekir. Bunun için kullanılan denetim elemanına şarj kontrolörü denir. Şarj kontrolörü, fotovoltaik modüllerden aküye ve yüke akan elektriği düzenler. Kontrolör, aküyü aşırı şarj etmeden sürekli tam şarjlı durumda tutar. Yük çekmeye başladığı zaman; kontrolör şarjın modüllerden aküye, yüke veya her ikisine birden akışına izin verir. Aküler tamamen şarj olduğunda, modülden geçen şarj akışını durdurur. Ayrıca birçok kontrolör yüklerin aküden çok fazla akım çektiğini tespit ederek, akü yeterli şarja sahip olana kadar akımı durdurur. Bu özellik, akü grubunun ömrünü önemli ölçüde arttırır [34].

4.4.2 Şebekeye Bağımlı Fotovoltaik Sistemler

Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri; yüksek güçte santral boyutunda sistemler şeklinde olabileceği gibi, daha çok binalarda küçük güçlü kullanım şeklinde uygulanır [20]. Bu tür fotovoltaik sistemler akülere ihtiyaç duymazlar. Çünkü şebeke ağı, yedekleme gücü için kullanılabilir. Bununla birlikte, çok daha ayrıntılı güç düzenlemelerini gerektiren özelliklere sahiptirler.

Şebekeye bağımlı sistemlerde kullanılan invertörler; şebekeden yüke, fotovoltaik örgüden yüke ve örgüden şebeke ağına akan elektriği, şebekenin AC

dalga formuyla uyum sağlayacak şekilde düzenlemek zorundadırlar. Şebekeye bağımlı fotovoltaik sistemler iki başlık altında ele alınabilir: Bunlardan birincisi, şebekeye bağımlı fotovoltaik güç santralleridir. İkincisi ise, şebekeye bağımlı dağıtılmış fotovoltaik güç santralleridir.

4.4.3. Şebekeye Bağımlı Fotovoltaik Güç Santralleri

Güçleri, 10 kilowatt ile onlarca megawatt arasında değişen fotovoltaik sistemler olup, çoğunlukla yerel enerji gereksinimlerine destek olmak üzere kurulmuşlardır. Özellikle güç gereksiniminin arttığı saatlerde, yerel fotovoltaik sistemlerini devreye sokacak düzenlemeler için ticari olarak enerji hatlarının geliştirilmesinden daha uygun olabilmektedir [24].

Fotovoltaik santral olarak adlandırılan yüksek güçteki güneş pili jeneratörleri şebekeye bağımlı olarak çalıştırılırlar.

Güneş enerjisi verilerinin bulunmadığı durumlarda; benzer bölgelerin güneş enerjisi verilerinden, kullanım bölgesinin güneş enerjisi verileri çıkarılabilir [29].

4.4.4. Şebekeye Bağımlı Dağıtılmış Fotovoltaik Güç Sistemleri

Son yıllarda yaygın hale gelen bu sistemlerden tipik olarak 1 kilowatt ile 50 kilowatt arasında güç elde edilebilmektedir. Kullanıcıların bina çatı ve yüzeylerine yerleştirdikleri bu sistemlerde, iki yönlü sayaç uygulaması kullanılmaktadır. Bu şekilde bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken; üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Avrupa 'da bu tür uygulamaların yaygınlaştırılması, devlet desteği ile sağlanmaktadır [47].

5 GELECEK NESİL FOTOVOLTAİK PİLLER

5.1 Organik Güneş Pilleri

Güney Kaliforniya Üniversitesi'nden bir grup, "Ekonomik ve esnek solar hücreler hangi tipteki hücreler olacaktır ?" sorusunu yanıtlamaya yakın gibi görünmektedir. Onlarca insana göre Organik Fotovoltaik Hücreler (OPV) gelecekteki solar hücreler olarak kabul görmektedir. Hafiflikleri, düşük maliyetleri ve kolay üretilbilir olmaları sebebiyle dikkat çekmektedirler [41].

5.1.1 Organik Güneş Pillerinin Özellikleri

- ✚ **Boya İle Duyarlaştırılmış Güneş Hücreleri (DSSC):** Elektrokimyasal PV'ler: Elektrokimyasal fotovoltaik piller olarak da bilinirler. Üretim maliyeti düşük ince film teknoloji hücre sınıfına girmektedirler. Bu tip hücreleri ilk olarak Gratzell bulduğu için Gratzell hücreleri olarak da bilinirler.
- ✚ **Küçük Molekül Organik Güneş Hücreleri (OPV):** Vakum kaplama tekniği ile üretilmektedirler. Mükemmel güç dönüşüm verimi, tersinir yükseltgenme-indirgenme işlemleri içermektedirler.
- ✚ **Polimer Güneş Hücreleri (OPV):** Çözelti fazında düşük sıcaklıkta üretilirler. 620 nm den daha uzun dalga boylarını absorbe edebilen, yani bant aralığı 2 ev tan daha düşük olan polimerler düşük bant aralığına sahip olan polimerlerdir. Polimer güneş pilleri, iki elektrot arasında aktif bir tabaka yerleştirilerek yapılır. Aktif tabaka genellikle, elektron vericisi ve elektron alıcısını bünyesinde barındıran kopolimerden oluşur [67].

Organik güneş pillerinin ilk bakışta görülen en önemli farklılıkları şeffaf iletken elektrotlardır. Bu elektrotlar, ışığın iç yüzeyde aktif malzeme ile reaksiyona girip elektrik üretmesine sebep olurlar. Grafen gibi alotroplar hem elektrik iletimini arttırmakta, hem de esnek ve şeffaf iletken üretiminin önündeki engelleri kaldırmaktadır.

5.1.2 Yeni Organik Güneş Pili Tasarımı

Yeni sentezlenen bir molekül olan grafen ile ilgili halen farklı araştırmalar yapılmaktadır. Bu yeni materyalin fotovoltaiik hücrelerde kullanılması ile şaşırtıcı sonuçlar alınmaya başlanmıştır. Şimdilik klasik silisyum solar hücrelere göre daha az verimli olmasına rağmen, fiziksel olarak esnek olması ve daha ucuza mal olması gibi avantajları yüzünden araştırmalar açısından dikkat çekici olmaya başlamıştır.

Tipik silisyum güneş pilleri 1000 watt güneş ışığından 14 watt güç elde ederken, Grafen-OPV hücreler şimdilik sadece 1.3 watt güç elde etmektedirler [40].

5.1.3 Organik Güneş Pillerinin Avantajları

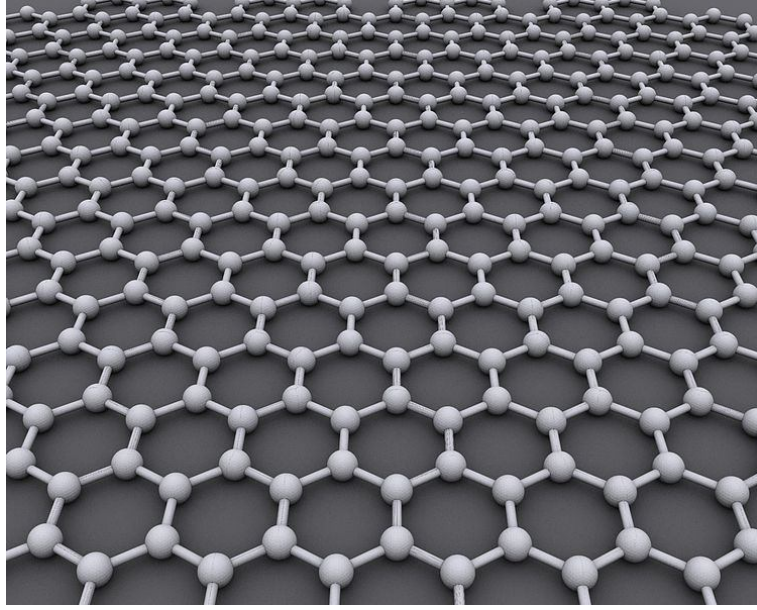
OPV'lerin esnek olmaları önemli bir avantaj sağlıyor. Ayrıca düşük maliyet, iletkenlik, stabilite, elektrot/organik film uyumu ve kolay elde edilebilirlik de grafen-OPV hücrelerine, diğer solar hücrelere nazaran ayrıca avantaj sağlamaktadırlar.

5.1.4 Grafen (Küçük Molekül Organik Güneş Hücresi)

Periyodik tablodaki en ilginç elementlerden biri karbon atomudur. Karbonun grafit (kurşun kalem, katı yağlayıcılar vb.) ve elmas gibi gündelik hayattan çok iyi bilinen allotroplarının yanında nanotüp ve fulleren gibi yeni sentezlenen formları da mevcuttur. Özellikle karbon nanotüpler ve C₆₀ (fulleren) molekülleri ilk sentezlendikleri yıllardan günümüze kadar katı hal fiziğinin son derece aktif

araştırma alanları arasına girmiştir. Bal peteği kristal yapısında, sp^2 melezleşmesi yapan; grafitin, nanotübün ve C_{60} 'ın ana yapıtaşı olan grafen ise ancak 2004 yılında sentezlenebilmiştir. İngilizce'de "graphite" ve "ene" kelimelerinden türetilen "graphene" terimi türkçede karşılığı ise grafendir. 2010 Nobel Fizik Ödülü, "iki-boyutlu grafen malzemesine ilişkin çığır açan deneyleri için" Andre Geim ve Konstantin Novoselov'a verilmiştir [41]. Seloteyp yardımıyla iki boyutlu grafen yapısını elde edebilmişlerdir.

Karbonun balpeteği örgülü yapıları olan grafen, grafit, karbonnanotüp ve fulleren sp^2 melezleşmesinin ürünüken, elmas ise sp^3 melezleşmesi ve dört-yüzlü ağ örgüsü ile öncekilerden farklı bir kategoride değerlendirilebilir. Grafen, iki boyutlu düzlemsel yapıların çok ender örneklerinden birisidir. Karbon atomları 1s ve 2p orbitallerinin birleşimi ile 120 derece açılı sp^2 melezleşmesi yaparken boşta kalan p_z orbitalleri de grafen malzemesine sıradışı özellikler kazandırmaktadır [41].



Şekil 5.1 Grafen Molekülleri

5.1.5 Grafen ve Pil Teknolojisi

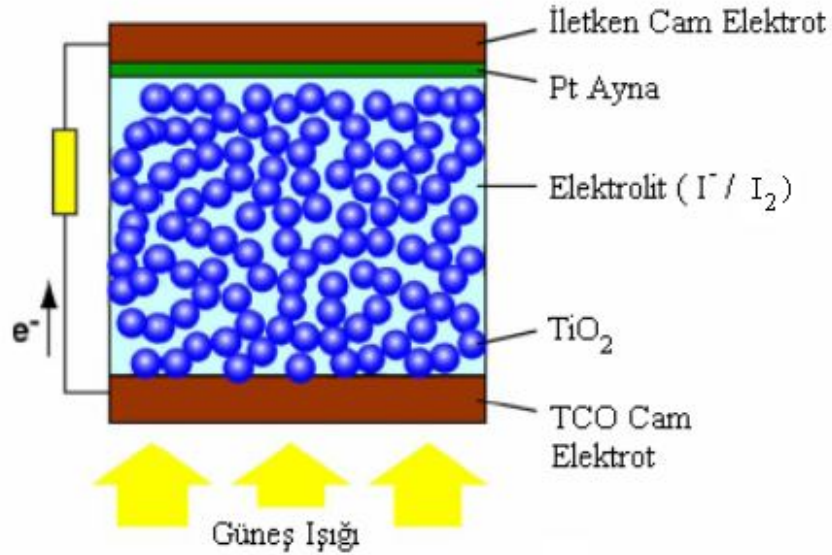
Grafen, sağlam olduğu kadar iyi de elektrik tutmakta ve bu özelliğinin pil teknolojisinde devrim yaratması beklenmektedir. Elmas keskilerine dayanacak kadar güçlü bir karbon tabakası olan grafenin, yongaların bileşiminde silikonun yerini alabilecek olmanın yanı sıra şarj ömrünü de inanılmaz uzatabileceğı düşünölmektedir. Amerika'da bulunan Teksas Üniversitesi'nin araştırmacıları, normal pillerden daha güçlü elektrik depoları olan ultrakapasitörleri grafen tabanlı olarak imal etmeyi başardılar. Sonuç, normalin iki katı kapasiteye sahip olan ultrakapasitörler oldu. Bu gelişme hayata geçirilirse, şarjlı pille çalışan cihazlar yanında, rüzgarsız veya güneşsiz günler için büyük miktarda enerji depolama yöntemleri arayan yenilenebilir enerji endüstrisi için de çok faydalı olacak gibi görünmektedir [41].

5.2 (DSSC) Boya İle Duyarlaştırılmış Solar Hücreler

Boya ile duyarlaştırılmış güneş pilleri (DSSC) üçüncü nesil güneş pilleri ailesine aittir. DSSC'lerin çalışma prensibi fotosenteze benzerdir. DSSC teknolojisi 1991 yılında İsviçre'de bulunan Ecole Polytechnique Federal de Lausanne (EPFL)'da halen çalışmalarını yürütmekte olan Prof. Michael Grätzel tarafından keşfedilmiştir [42]. DSSC'lerde ışığın soğurulması ve yükün taşınması fonksiyonları ayrı olduğundan çalışma prensibi bilinen yarıiletken teknolojilerden farklıdır. Güneşten gelen fotonlar boya molekülleri tarafından soğurulur ve TiO_2 ' in iletken bandına elektron göç ettirilir. Daha sonra boya molekölü, kaybettiğı elektronu elektrolitten (I^-) alır ve elektrolitin (I_2) de Pt elektrotta indirgenmesiyle devre tamamlanır.

DSSC teknolojisi 3. nesil güneş pilleri içinde günümüzde en çok kullanılan kristal silisyum teknolojisinin yerini alacak teknoloji olarak görölmektedir. Örnek olarak günümüzde DSSC modülleri ve panellerinin seri üretimleri Dyesol (Avusturalya), Konarka (ABD), Sony (Japonya) ve Aisin Seiki (Japonya) tarafından yapılmaktadır. DSSC panelleri özellikle güneş ışığından gün boyunca elektrik

üretebilme özelliğine sahip olduğundan bina entegre fotovoltaik (BIPV) uygulamalarına uygun PV teknolojisi olarak görülmektedir. Tıpkı bitkilerdeki klorofil gibi, gözenekli titanyum (IV) oksit (TiO_2) üzerine tek katman halinde tutunmuş boya molekülleri (ya da duyarlayıcıları) da güneşten gelen ışığı soğurur ve güneş enerjisi elektriğe dönüştürülür. DSSC teknolojisinin güneş ışığını-elektriğe dönüştürme verimliliklerinin laboratuvar boyutunda % 11 modül boyutunda % 6 civarında olduğundan, düşük maliyetli güneş pillerinin endüstriyel üretimi için çok önemli bir potansiyele sahiptir.



Şekil 5.2 DSSC Yapısı [43]

Ulusal Meteoroloji Enstitüsü Fotonik ve Elektronik Sensörler Laboratuvarı (UME FESLAB)' da DSSC' lerin fabrikasyonu için gerekli nano-parçacık sentez, mikron kalınlığında kaplama, elektot yapımı, film karakterizasyonu, güneş pili / modül laminasyonu (yerleştirilmesi) ve elektriksel karakterizasyonu için gerekli alt yapı mevcuttur [44].

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Değişen ve nüfusu sürekli artmakta olan dünyamızın enerji ihtiyacı her geçen gün biraz daha artmaktadır. Bunun sonucu olarak, kısıtlı olan dünya kaynaklarının verimli kullanılması da en önemli gündem maddelerinden birini teşkil etmektedir. Alternatif enerji kaynaklarının kullanılabilirliğinin artırılmasının gerekliliği tartışılmaz. Sonlu olan petrol ve organik enerji kaynaklarının bir gün tükeneceğini göz önüne alırsak, yenilenebilir enerjinin ne kadar önemli olduğunu anlamamız da kolaylaşır.

Güneş enerjisinin diğer enerji kaynakları arasında en avantajlılarından biri olarak öne çıktığını görebiliyoruz. Özellikle depolama ve maliyet sorunlarının aşılması ile gelecekte etrafımızda daha fazla solar uygulama ile karşılaşacağımız da kesin gibi görünüyor. Şimdiden bazı toplu konut uygulamalarında bile reklam amaçlı olarak güneş enerjisi sistemleri kullanılmaktadır.

Tüm dünyada özellikle güneş enerjisine yapılan yatırımlar her geçen gün biraz daha artmaktadır. Ülkemizde de güneş pili uygulamalarının artması, araştırmalara ticari kurumlarca destek verilmesi, yarışmalar yapılarak projelerin teşvik edilmesi gerekmektedir.

Sokak lambaları, trafik ışıkları gibi sürekli elektrik harcayan sistemlerin güneş enerjisi ile çalışma sistemine geçirilmesi gerekmektedir. Isınma için harcanan enerjinin de güneş enerjisi ile desteklenmesi ile enerji maliyetlerinin düşürülebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] www. enerji.gov.tr – Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Resmi Sitesi
(20.12.2010)
- [2] “Vizyon 2023 Teknoloji Öngörü Projesi, Enerji Ve Doğal Kaynaklar Paneli Raporu”, Tübitak, Ankara, 24 Temmuz 2003
- [3] Karaca, Mehmet - Ömer Lütfi Şen: Küresel ısınma: Gerçekler ve belirsizlikler. ATSO Antalya Ticaret ve Sanayi Odası / Vizyon, 19 (227), Aralık 2006, 18-21
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Keeling_Curve (20.02.2011)
- [5] http://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:Kyoto_Protocol_participation_map_2009.png
(24.01.2011)
- [6] Tübitak-TTGV Enerji Teknolojileri Politikası Çalışma Grubu Ankara, 1998
- [7] Çolak İ., Bayındır R., Demirtaş M., “Türkiye'nin Enerji Geleceği”, *Tübav Bilim Dergisi*, 1, 2, 2008, 36
- [8] Ültanır, M.Ö., Güneş Enerjisi, *Bilim ve Teknik Dergisi*, 340, 1996, 50-56
- [9] Z. Şen, "Temiz Enerji ve Kaynakları", *Su Vakfı Yayınları*, İstanbul, 2002
- [10] Varınca K.B., Varank G., "Güneş Kaynaklı Farklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Kıyaslanması ve Çözüm Önerileri", Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, 24-25 Haziran 2005
- [11] İ. Atılğan, Türkiye'nin Enerji Potansiyeline Bakış, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1), 2000, 31-47

[12] Türe İ.E., 4. Ulusal Çatı & Cephe Kaplamalarında Çağdaş Malzeme ve Teknolojiler” Sempozyumu, İTÜ Mimarlık Fakültesi Taşkışla - İstanbul 13-14 Ekim 2008

[13] Çolak İ., Demirtaş M., “Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Türkiye’deki Gelişim” , *Tübav Bilim Dergisi*, 1, 2, 2008, 55

[14] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Biyokütle> (24.01.2011)

[15] TÜBİTAK-TTGV (Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı) Enerji Teknolojileri Politikası Çalışma Grubu 1998, ANKARA

[16] Varınca, K. B., Varank, G., “Güneş Kaynaklı Farklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Kıyaslanması ve Çözüm Önerileri”, Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi ,İçel, 24–25 Haziran 2005

[17] Taylor, J.R. ve Zafaritos, C., Fizik ve Mühendislikte Modern Fizik, (Çeviri:Bekir Karaoğlu), Güven Kitap Yayın Dağıtım Ltd. Şti, 1996, 434

[18] Oral, M., Güneş Pilleri, İzmir İlker Matbaası, 1979, 59

[19] Kittel, C., Katıhal Fiziğine Giriş, Güven Kitap Yayın Dağıtım Ltd. Şti, 1996, 434

[20] <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/pvilke.html> (24.01.2011)

[21]<http://www.akademimuhendislik.net/pv-etki-panel-calismaprensibi.html> (24.01.2011)

[22] Batman, A., “Elektrik Üretimi İçin Güneş Pillerinin Kullanımında Verimi Arttırıcı Yeni Bir Yöntem”, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (2001), 104

[23] Köse, S., “Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1986), 78

[24] Oktik, S., Güneş Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri, Ankara Temiz Enerji Vakfı Yayınları, 2001, 40

[25] Sökmen, K., 2003, Gökyüzüne Merhaba, <http://www.catamaranvega.com/astro>

[26] Ültanır, M.Ö., 1996, Güneş Enerjisi, Bilim ve Teknik Dergisi, 340, 50-56

[27] Tercan, M.B., “Güneş Pili Karakterizasyon Yöntemleri”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2000), 129

[28] Serway, R. A., Fen ve Mühendislik İçin Fizik, Palme Yayıncılık, Cilt:3, 1996, 344

[29] Engin R., Güneş Pilleri, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Fizik Bölümü Yayınları No:3, 1995, 151

[30] İnan D. ve Ültanır, M.Ö., Güneş Enerjisi, TEMEV; UGET-TB ve DÜÇAM Ortak Yayını, 1996

[31] Gürsoy, U., Dikensiz Gül: Temiz Enerji; Doğu Akdeniz Çevrecileri, Temiz ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarımız Raporu, İskenderun Çevre Koruma Derneği Yayını Temiz Enerji Dizisi 1, 1999, 283

[32] Bedeloğlu A., Demir A., Bozkurt Y., “Fotovoltaik Teknolojisi: Türkiye ve Dünyadaki Durumu, Genel Uygulama Alanları ve Fotovoltaik Tekstiller”, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 2, (2010), 43

[33] Kuban, B., Güneşten Elektrik; Teknolojik Öğrenme ve Tarihsel Deneyim Işığında Sektör Oluşumu Önündeki Engeller, Tesisat Mühendisliği Dergisi, TMMOB-MMO, 2003, 76

[34] Çetinkaya, H. B., ”Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, (2001), 2-10

- [35] Çabuk, S., “İnce Film SnO_2 / CuO_2 Güneş Pilleri”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı, (1992), 46
- [36] Yüksel, Ö. F., “p-n Eklem Güneş Pillerinin Verim Parametreleri ve Bunları Ölçme Yöntemi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (1990), 65
- [37] <http://www.mmo.org.tr/muhendis/makine/arsiv/2000/gunes.htm> (20.07.2010)
- [38] <http://www.akademimuhendislik.net/kristal-silisyum-solar-hucrei.html> (24.01.2011)
- [39] Peker, D., “ $\text{CuAl}_x\text{In}_{1-x}\text{S}_2$ Yarıiletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri”, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1999), 169
- [40] <http://www.alternative-energy-news.info/graphene-solar-cells/> (24.01.2011)
- [41] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Grafen> (24.01.2011)
- [42] Grätzel M, O'Regan B., “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films”, *et al. Nature* (1991), 353, 737-740
- [43] Kazmerski L. L., “Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview”, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, (2006), 125
- [44] <http://www.ume.tubitak.gov.tr> (24.01.2011)
- [45] <http://www.windtech-istanbul.com/tr/content.asp?PID={05EB26DA-1476-4D14-9D57-77862BCE3FA7}> (10.02.2011)
- [46] <http://www.gunessistemleri.com/tarihsel.php> (10.02.2011)
- [47] Küpeli A.Ö., “Güneş Pilleri ve Verimleri”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005)
- [48] https://www.xing.com/net/Xpert_enerji/enerji-finansman%C4%B1-471976/enerji-uretiminde-yeni-trend-29464702/ (10.02.2011)
- [49] http://geocen.iyte.edu.tr/teskon/2003/teskon2003_08.pdf (20.02.2011)
- [50] <http://www.ibb.gov.tr/sites/aydinlatmaenerji/Pages/EnerjiKaynaklari.aspx> (15.02.2011)

- [51] http://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F_enerjisi (20.02.2011)
- [52] <http://www.istanbulcevor.gov.tr/pdf/cdr2005/03BDogalKaynaklar.pdf>
(22.02.2011)
- [53] Karamanav M., “Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007)
- [54] Kurt S., “Türkiye’ nin Enerji Tedarik Politikalarının Avrasya Enerji Boru Hattı Projeleri Çerçevesinde Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, (2006)
- [55] 193.140.122.139/solar/solarcells_in_TR.ppt (20.02.2011)
- [56] <http://ugrasi.blogcu.com/gunes-pili-yapimi/7067650> (20.02.2011)
- [57] <http://www.solarenergyturkey.com/wp-content/uploads/2009/03/gunes-pili-bilimsel111.jpg> (20.02.2011)
- [58] <http://tr.dpesolar.com/14112141801441-41.html> (22.02.2011)
- [59] <http://www.arfenteknoloji.com/GES.htm> (22.02.2011)
- [60] <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/haberler/teknoloji/s-502-9.pdf> (22.02.2011)
- [61] http://www.uftp.org.tr/3fuvar/sunumlar/Ceylan_Zafer_EU.pdf (22.02.2011)
- [62] <http://www.wfu.edu/news/release/2007.04.18.n.php> (22.02.2011)
- [63] <http://www.guneshaber.net/haber/58-teknik-bilgiler-yogunlastirici-gunes-sistemleri.html> (22.02.2011)
- [64] http://tr.wikipedia.org/wiki/Mikrokristal_Silisyum_ve_Mikromorf_G%C3%BCne%C5%9F_Pili (22.02.2011)
- [65] Aydar E., Üresin E, Livatyalı H, Günal A., Yoğunlaştırılmalı Güneş Enerjisi Teknolojileri, Solar Future 2010, İstanbul, Şubat 2010, 65-70

[66] <http://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F> (20.02.2011)

[67] http://tr.wikipedia.org/wiki/Organik_g%C3%BCne%C5%9F_pili (20.02.2011)