

GÜNEŞ PİLLERİ VE VERİMLERİ

Ayşe Özge KÜPELİ

Yüksek Lisans Tezi
Fizik Ana Bilim Dalı

2005

SOLAR CELLS AND THEIR EFFICIENCIES

Ayşe Özge KÜPELİ

Msc. Thesis

Physics Department

2005

GÜNEŞ PİLLERİ VE VERİMLERİ

Ayşe Özge KÜPELİ

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Genel Fizik Bilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Derya PEKER

Temmuz 2005

Ayla KÜPELİ
ve
Ali KÜPELİ 'ye

Ayşe Özge KÜPELİ 'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “GÜNEŞ PİLLERİ VE VERİMLERİ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

.../.../2005

Üye:

Üye:

Üye:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu 'nun.....gün
vesayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada, “Güneş Pilleri ve Verimleri” konusu ele alınmıştır. Çalışmanın başında güneş pillerinin yapımında seçilen malzemeler olarak yarıiletkenlerin özellikleri incelenmiştir. Daha sonra fotovoltaik dönüşüm sistemleri, bu sistemlerin yapılarındaki p-n eklemleri ve çalışma ilkeleri açıklanmıştır. Fotovoltaik bir dönüşüm sistemi olarak güneş pilleri tanımlanmıştır. Güneş pillerinin optik, yapısal ve elektriksel özellikleri incelenerek sınıflandırılmaları yapılmıştır. Bu çalışmaların ardından, güneş pillerinin verimlerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler açıklanarak verimleri incelenmiştir. Çalışmanın sonunda, güneş pillerinin bütün özellikleri ve verimleri göz önünde bulundurularak, geçmişten günümüze kullanım alanları ve uygulama yöntemleri sıralanmıştır. Avantajları ve dezavantajları karşılaştırılarak, kullanımlarının yaygınlaştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. En son olarak, bu amaçla yapılabilecek çalışmalar konusunda önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar sözcükler: Fotovoltaik sistemler, Güneş enerjisi, Güneş pilleri.

SUMMARY

In this study, “Solar Cells and Their Efficiencies” were considered. At the beginning of the study, the properties of the semiconductor materials in our research for production of solar cells were investigated and then, the photovoltaic systems, the p-n junctions in the structure of this system and working principles were also studied. As a photovoltaic transforming system, the solar cells were defined. The optical, structural and electrical properties of the solar cells were studied and they were classified. After these studies, the methods used for the determination of efficiencies of solar cells have been investigated and efficiency levels were also studied. At the end of the study, all of the properties and efficiencies of the solar cells were taken into account, their fields of using and application methods were classified. Advantages and disadvantages of them were compared and in conclusion has been reached that their usage should be expanded. Finally, some recommendations were given for the studies planned for this purpose.

Key words: Photovoltaic systems, Solar energy, Solar cells.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başından sonuna kadar, destek ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Derya PEKER 'e ve eşi Yrd. Doç. Dr. Mehmet PEKER' e en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Katkılarından dolayı Raziye TEKİN 'e, Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyeleri Yrd. Doç. Dr. Cebail GÜMÜŞ ve Süleyman ÇABUK 'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarında sağladığı kolaylıklardan dolayı önceki görev yerim Adıyaman Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi Müdürü Sayın Mehmet ESEN 'e, Müdür Yardımcıları Kazım ÖZBEY, Orhan Veli TURAÇ ve Muhittin TUZCU 'ya, Elektrik Bölümü Öğretmenleri Aziz CAMCI 'ya, Dinçer KOÇAK 'a ve tüm okul personeline teşekkürlerimi göndermekten büyük zevk duyarım. Çalıştığım kurum Kırka Şehit Halil Kara Lisesi Müdürü Sayın Fethi Fahri KAYA ve tüm okul personeline desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında maddi ve manevi yardımlarını fazlasıyla gördüğüm sevgili aileme; sınav öncesi sağladıkları güzel tatil için Hülya DALGALI ve Yusuf DALGALI 'ya, en büyük desteklerimden biri yeğenim Ozan 'a, eski dostum Miraç KARAKOÇ 'a, psikolojik ve teknik destek servisi olarak yılmadan çalışan sevgili arkadaşım Mehmet ALTUĞ 'a, Burcu ÖZAYDIN, Bahar YAMAN ve emeği geçen diğer bütün arkadaşlarıma; yanımdan hiç ayrılmayarak bilgisayar masasının altında derin uykulara dalan küçük köpeğim Zibidi 'ye; adlarını bilmediğim bilgisayar tamircilerine, kargo kuryelerine, postacılara, kütüphane görevlilerine, bilgisayarına, kendime ve eline sağlık diyen herkese teşekkür ederim.

Son olarak; bize bilgiyi armağan ederek doğanın gizemini çözme konusunda cesaret veren bilim adamlarına ve onları bize başışlayan tarihe teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç	4
2. YARIİLETKENLERİN ÖZELLİKLERİ	6
2.1. Giriş	6
2.2. Yarıiletkenler	7
2.3. Bant Yapısı	8
2.3.1. Madde yapısı	8
2.3.2. Enerji Bantları	10
2.3.2.1. İletkenlerin enerji bant modeliyle incelenmesi	14
2.3.2.2. Yalıtkanların enerji bant modeliyle incelenmesi	15
2.3.2.3. Yarıiletkenlerin enerji bant modeliyle incelenmesi	16
2.4. Yarıiletken Türleri	16

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4.1. Has yarıiletkenler	17
2.4.2. Katkılı yarıiletkenler	18
2.4.2.1. n-tipi yarıiletkenler	18
2.4.2.2. p-tipi yarıiletkenler	20
2.5. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri	23
2.6. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri	26
2.6.1. Yarıiletkenlerde gerçekleşen temel geçişler	27
2.6.2. Yarıiletkenlerde gerçekleşen absorpsiyon olayları	29
2.6.2.1. Temel absorpsiyon	29
2.6.2.2. Serbest yük taşıyıcılarının absorpsiyonu	30
2.6.2.3. Eksitonların absorpsiyonu	30
2.6.2.4. Katkı atomlarının absorpsiyonu	31
2.6.3. Yarıiletkenlerde gerçekleşen bant geçişleri	31
2.6.3.1. Direkt bant geçişi	32
2.6.3.2. İndirekt bant geçişi	33
2.7. Yarıiletkenlerde Gerçekleşen Birleşme Olayları	35
2.8. Yarıiletken Alet Fiziğinde Kullanılan Temel Bağıntılar	35
2.8.1. Poisson bağıntısı	36
2.8.2. Akım yoğunluğu bağıntıları	36
2.8.3. Süreklilik bağıntıları	37

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3. FOTOVOLTAİK DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ	39
3.1. Giriş	39
3.2. Fotovoltaik Olay Ve Güneş Pilleri	39
3.3. p-n eklemleri	41
3.3.1. p-n eklemlerinin elektrostatığı	42
3.3.2. p-n eklemlerinin iletkenliği	45
3.3.2.1. p-n ekleminin ileri yönde beslenmesi	45
3.3.2.2. p-n ekleminin ters yönde beslenmesi	46
3.3.3. p-n ekleminde meydana gelen optik olaylar	48
4. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PİLLERİ	50
4.1. Giriş	50
4.2. Güneş Ve Yapısı	50
4.3. Güneş Enerjisi	52
4.3.1. Kara cisim ışıması ve güneşin yayınladığı enerji	53
4.4. Güneş Enerjisinin Kullanımı	55
4.5. Güneş Enerjisi Teknolojileri	56
4.6. Güneş Pilleri	57
4.6.1. Yarıiletken güneş pillerinin çalışma ilkesi	59
4.6.2. Güneş pillerinin elektriksel özellikleri	61
4.6.3. Bir güneş pilinin eşdeğer devresi	64

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.7. Yük Taşıyıcılarının Ömrü Ve Difüzyon Mesafesi	66
4.8. Yarıiletken Güneş Pilleri İçin Materyal Seçimi	67
5. YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLİ ÇEŞİTLERİ	71
5.1. Giriş	71
5.2. Güneş Pillerinin Kristal Cinsine Bağlı Olarak Sınıflandırılması	71
5.2.1. p-n homoeklemlı güneş pilleri	71
5.2.1.1. Silisyum güneş pilleri	72
5.2.1.2. Galyum Arsenik (GaAs) Güneş Pilleri	75
5.2.2. p-n heteroeklemlı güneş pilleri	76
5.2.2.1. Kadmiyum sülfür-bakır sülfür güneş pilleri	77
5.2.2.2. Kadmiyum sülfür-bakır indium diselenit güneş pilleri	79
5.2.2.3. Bakır sülfür-çinko kadmiyum sülfür güneş pilleri	80
5.2.2.4. Kadmiyum sülfür- silisyum güneş pilleri	80
5.2.2.5. Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür güneş pilleri	80
5.2.3. Amorf silisyum güneş pilleri	81
5.3. Güneş Pillerinin p-n Eklem Yapısına Göre Sınıflandırılması	83
5.3.1. Çok eklemlı güneş pilleri	83
5.3.2. Metal- yarıiletken (MS) heteroeklem güneş pilleri	84
5.3.3. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) heteroeklem güneş pilleri	84
5.3.4. Yarıiletken-yalıtkan-yarıiletken (SIS) heteroeklem güneş pilleri	85

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.3.5. Elektrolitik güneş pilleri	85
6. GÜNEŞ PİLLERİNİN VERİMİ	86
6.1. Giriş	86
6.2. Güneş Pillerinin Verimi	86
6.3. Güneş Pillerinin Verim Hesaplamaları	87
6.4. Kuantum Verimi	89
6.5. Güneş Pillerinin Verim Ölçümleri	91
6.5.1. Bir güneş pilinin karakteristik akım-gerilim eğrisi	92
6.5.2. Bir güneş pilinin I-V eğrisinden yararlanılarak veriminin bulunması	93
6.6. Güneş Pillerinin Verimini Sınırlayan Etkenler	94
6.6.1. Sıcaklık etkeni	94
6.6.2. Yüzey parametresi etkeni	96
6.6.3. Spektral etken	97
6.6.4. Foto açılmal etken	98
6.7. Güneş Pillerinin Verim Kayıpları	99
6.7.1. Işıksal kayıplar	100
6.7.1.1. Işıksal yansıma kayıpları	100
6.7.1.2. Işıksal dış soğurulma kayıpları	101
6.7.2. Elektriksel kayıplar	103
6.7.2.1. Akım kayıpları	103

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.7.2.2. Açık devre gerilimi kayıpları	104
6.7.2.3. Direnç kayıpları	105
6.7.2.4. Fill faktörü kayıpları	107
6.7.3. Ara yüzeyde yeniden birleşme	110
6.7.4. Verim kaybı süreçleri	111
6.7.4.1. Belirleyici öz süreçler	111
6.7.4.2. Çevreden kaynaklanan geçici süreçler	111
6.8. Güneş Pillerinden Yüksek Verim Elde Etmek İçin Kullanılan Sistemler ...	112
6.8.1. Yoğunlaştırıcı güneş pilleri sistemleri	112
6.8.2. Çok katlı (birçok bant aralıklı ya da çok eklemlili)	
güneş pili sistemleri	114
6.8.3. İnce film teknolojisi	115
7. GÜNEŞ PİLİ UYGULAMALARINDA DÜN-BUGÜN-YARIN	117
7.1. Giriş	117
7.2. Güneş Pili Uygulamaları	117
7.3. Güneş Pili Modülleri	119
7.4. Güneş Pili Sistemleri (Fotovoltaik Sistemler)	121
7.4.1. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler	122
7.4.2. Şebekeye bağımlı fotovoltaik sistemler	125
7.4.2.1. Şebekeye bağımlı fotovoltaik güç santralleri	125

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.4.2.2. Şebekeye bağımlı dağıtılmış fotovoltaik güç sistemleri	126
7.4.3. Güneş pili sistemlerinin kullanımı	126
7.5. Güneş Pillerinin Kullanım Alanları	128
7.6. Güneş Pillerinin Uygulama Örnekleri	131
7.6.1. Güneş pillerinin aydınlatma birimlerindeki uygulamaları	131
7.6.2. Güneş pillerinin trafik sistemlerindeki uygulamaları	132
7.6.3. Güneş pillerinin su pompalama sistemlerindeki uygulamaları	133
7.6.4. Şebeke bağlantılı güneş pili sistemi uygulamaları	134
7.7. Güneş Pili Uygulamalarının Türkiye 'deki Durumu	135
7.8. Güneş Pillerinin Geleceği	135
TARTIŞMA VE SONUÇ	138
ÖNERİLER	140
KAYNAKLAR	142

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Yalıtılmış durumdaki bir atomun enerji seviyelerinin şematik gösterimi	8
Şekil 2.2. Dış elektronlarına ait enerji seviyeleri belirtilmiş iki atomun şematik gösterimi	11
Şekil 2.3. İki atomun birbirine çok yakın olduğu durumdaki enerji seviyesi diyagramı	11
Şekil 2.4. Kristal bir yapıda meydana gelen valans bandı, iletkenlik bandı ve yasak bandın görünümü	12
Şekil 2.5. Bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı	13
Şekil 2.6. İletkenlerde enerji bant modelinin şematik gösterimi	14
Şekil 2.7. Yalıtkanlarda enerji bant modelinin şematik gösterimi	15
Şekil 2.8. Yarıiletkenlerde enerji bant modelinin şematik gösterimi	16
Şekil 2.9. Enerji bant diyagramında donör enerji seviyesinin gösterimi	19
Şekil 2.10. n-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramında Fermi enerji seviyesinin gösterimi	20
Şekil 2.11. Enerji bant diyagramında akseptör enerji seviyesinin gösterimi	21
Şekil 2.12. p-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramında Fermi enerji seviyesinin gösterimi	22
Şekil 2.13. Yarıiletkenlerde gerçekleşen temel geçişlerin şematik gösterimi	28
Şekil 2.14. Yarıiletken bir materyalin temel absorpsiyon spektrumu	30
Şekil 2.15. Yarıiletkenlerde gerçekleşen temel bant geçişinin şematik gösterimi ...	32
Şekil 2.16. Yarıiletkenlerde gerçekleşen indirekt bant geçişinin şematik gösterimi	34

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.17. Herhangi bir yarıiletkenin üzerinden alınmış δ_x uzunluğundaki hacim elemanının gösterimi	38
Şekil 3.1. Fotovoltaik dönüşüm sisteminin şematik gösterimi	40
Şekil 3.2. p-n eklemindedelektrik alan oluşumunun gösterimi.....	42
Şekil 3.3. Termal denge durumunda p-n eklemının enerji bant diyagramı	44
Şekil 3.4. İleri yönde beslenen bir p-n eklemının şematik gösterimi	45
Şekil 3.5. İleri yönde beslenen bir p-n eklemının enerji bant diyagramı	46
Şekil 3.6. Ters yönde beslenen bir p-n eklemının şematik gösterimi	46
Şekil 3.7. Ters yönde beslenen bir p-n eklemının enerji bant diyagramı	47
Şekil 3.8. Ters yönde beslenen bir p-n eklemının I-V karakteristiği	47
Şekil 4.1. Güneşten gelen ışınım enerjisinin AM koşullarına göre spektral dağılımının gösterimi	51
Şekil 4.2. p-n eklemli güneş pilinin şematik gösterimi	61
Şekil 4.3. Bir güneş pilinin eşdeğer devresinin gösterimi	65
Şekil 4.4. İdeal bir güneş pilinin eşdeğer devresinin gösterimi	66
Şekil 4.5. Çeşitli yarıiletken materyallerin verimlerinin yasak bant aralıkları ile teorik olarak karşılaştırmasının grafik üzerinde gösterimi	68
Şekil 5.1. Güneş pili yapısının şematik gösterimi	74
Şekil 5.2. Kadmiyum sülfür-bakır sülfür (n-CdS/p-Cu ₂ S) pillerinin şematik görünümü	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.1. Kuantum veriminin dalgaboyuna bağlılığının gösterimi	90
Şekil 6.2. Bir güneş pilinin karakteristik akım-gerilim (I-V) eğrisinin gösterimi ...	93
Şekil 6.3. Taramalı elektron mikroskobu altında özel yapılı silisyum yüzeyin görünümü	97
Şekil 6.4. Bir güneş pilinin temel kesimlerinin şematik görünümü	98
Şekil 6.5. Açık devre voltajının (V_{ad}), pil üzerine gelen ışığın açısıyla (Φ) ilişkisinin şematik gösterimi	99
Şekil 6.6. Absorpsiyon katsayısının dalgaboyu ile değişiminin görünümü	102
Şekil 6.7. Bir güneş pilinin seri direnciyle verimi arasındaki ilişkinin gösterimi	106
Şekil 6.8. Fill faktörü ile yasak bant aralığı arasındaki ilişkinin gösterimi	109
Şekil 6.9. İdeal verimin yasak bant aralığına bağlı değişiminin gösterimi	110
Şekil 6.10. Yoğunlaştırıcı bir güneş pilinde verimin yoğunlaştırma çarpanı ile değişiminin gösterimi	113
Şekil 6.11. %29.5 oranında bir verime sahip olan GaInP ₂ /GaAs çok katlı güneş pili kesitinin görünümü	114
Şekil 7.1. Güneş pili hücresinin fotoğrafı	119
Şekil 7.2. Bir güneş pili modülünün fotoğrafı	120
Şekil 7.3. Doğru akım (DC) elde edilen bir fotovoltaik sistemin yapısal görünümü	123
Şekil 7.4. Alternatif akım (AC) elde edilen bir fotovoltaik sistemin yapısal görünümü	124

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 7.5. 1992-2000 yılları arasında tüm dünyadaki güneş pilinden elde edilen enerji satışlarının grafik üzerinde gösterimi	126
Şekil 7.6. Dünyada kurulu güneş pili sistemlerinin kullanım alanlarına göre dağılımının grafik üzerinde gösterimi	127
Şekil 7.7. Güneş pillerinin sokak aydınlatmasında kullanımının fotoğrafı	131
Şekil 7.8. Güneş pillerinin bahçe aydınlatmasında kullanımının fotoğrafı	132
Şekil 7.9. Güneş pillerinin karayollarında kullanımının fotoğrafı	132
Şekil 7.10. Güneş pillerinin trafik ikaz sistemlerinde kullanımının fotoğrafı	133
Şekil 7.11. Güneş pillerinin su pompalama sisteminde kullanımının fotoğrafı.....	133
Şekil 7.12. Şebekeye elektrik veren bir güneş santralinin fotoğrafı	134
Şekil 7.13. Çatısı güneş pilleriyle kaplı artı enerjili bir binanın fotoğrafı	134

ÇİZELGELER DİZİNİ**Çizelge****Sayfa****Çizelge 6.1.** Bazı güneş pillerinin verimlerinin çizelge üzerinde gösterilmesi(Global AM1.5 spektrumu, 1000 Wm^{-2} , $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
\AA	Angström
A_0	Diyodun ideal olma faktörü
A_a	Güneş pilinin ışığı gören aktif alanı
C	Yoğunlaştırma çarpanı
C_m	Maksimum yoğunlaştırma çarpanı
$C_{m(2D)}$	2 boyutlu yoğunlaştırıcılar için maksimum yoğunlaştırma çarpanı
$C_{m(3D)}$	3 boyutlu yoğunlaştırıcılar için maksimum yoğunlaştırma çarpanı
c	Işığın boşluktaki hızı
D_e	Elektronlar için difüzyon sabiti
D_h	Holler için difüzyon sabiti
E	Enerji
\vec{E}	Elektrik alan
E_a	Akseptör atomlarının enerji seviyesi
E_c	İletim bandının en alt enerji seviyesi
E_d	Dönör atomlarının enerji seviyesi
E_{eks}	Eksitonların bağlanma enerjileri
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_{fn}	Fonon enerjisi
E_{ft}	Foton enerjisi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
E_g	Yasak bant aralığı
E_{g_0}	0 °C sıcaklıkta yasak bant genişliği
E_H	Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi
E_v	Valans bandının en üst enerji seviyesi
E_{yap}	Yapısal elektrik alan
EJ	Eksajoule
eV	elektronvolt
eV_d	p-n eklemının geçiş bölgesindeki potansiyel engeli
$e^{V_d/kT}$	Maxwell-Boltzman faktörü
$e\Phi_0$	p-n eklemının potansiyel engeli yüksekliği
$f(E)$	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
FF	Fill Faktörü
FF_0	Seri direncin ve şönt direncinin olmadığı durumda güneş pilinin fill faktörü
F_v	Voltaj faktörü
G	Elektron-hol çifti oluşum hızı
h	Planck sabiti
$h\nu$	Foton enerjisi
$\hbar\vec{k}$	Momentum

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
\vec{hk}_e	Elektronun kristal içerisinde sahip olduğu kristal momentumu
\vec{hk}_h	Holün kristal içerisinde sahip olduğu kristal momentumu
I	Materyalden geçen elektromanyetik dalganın şiddeti
I_0	Diyodun ters doyum akımı
I_e	Cismin birim yüzeyinden birim zamanda yayınlanan enerji
I_{kd}	Kısa devre akımı
I_m	Maksimum akım
I_l	Materyale gelen elektromanyetik dalganın şiddeti
I_s	Seri dirençten geçen akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
I_{sh}	Şönt dirençten geçen akım
J	Toplam akım yoğunluğu
J_0	Karanlık doyum akım yoğunluğu
J_e	Elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu
J_f	Fotoakım yoğunluğu
J_h	Hollerin oluşturduğu akım yoğunluğu
J_{kd}	Kısa devre akım yoğunluğu
J_L	Yük direncinden geçen akım yoğunluğu
J_{ng}	n-tipi yarıiletken için oluşum akım yoğunluğu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
J_r	Birleşim akım yoğunluğu
J_{pg}	p-tipi bir yarıiletken için oluşum akım yoğunluğu
J_{pr}	p-tipi bir yarıiletken için birleşme akım yoğunluğu
K	Kelvin
k	Boltzmann sabiti
\vec{k}	Dalga vektörü
\vec{k}_e	Elektrona eşlik eden dalga vektörü
\vec{k}_h	Hole eşlik eden dalga vektörü
k_y	Yok olma katsayısı
kT	Termal enerji
L	Difüzyon mesafesi
m_e	Elektron kütlesi
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
m_h	Hol kütlesi
m_h^*	Holün etkin kütlesi
N	Foton akısı
N_a	Akseptör atomları yoğunluğu
N_d	Dönör atomları yoğunluğu
n	Elektron yoğunluğu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
n_0	Has yarıiletkenlerde serbest elektron yoğunluğu
n_i	Has yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu
n_k	Kırıcılık indisi
n_n	n-tipi yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu
n_p	p-tipi yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu
n_Q	Kuantum verimi
p	Hol yoğunluğu
p_0	Has yarıiletkenlerde serbest hol yoğunluğu
p_n	n-tipi yarıiletkenlerde hol yoğunluğu
p_p	p-tipi yarıiletkenlerde hol yoğunluğu
q	Elemanter yük
R	Pil yüzeyi yansıtma katsayısı
R_{ch}	Güneş pili belirtgin direnci
R_L	Yük direnci
R_s	İç seri direnç
R_{sh}	Şönt direnci
r_s	Seri direncin belirtgin dirence oranı
r_{sh}	Şönt direncinin belirtgin dirence oranı
S_n	Elektronların yüzey birleşim hızı
S_p	Hollerin yüzey birleşim hızı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
T	Mutlak sıcaklık
T_g	Işığın güneş pilinden geçen kısmı
U	Yük taşıyıcılarının birleşerek yok olma hızı
V	Voltaj
V_{ad}	Açık devre gerilimi
V_d	Diyod üzerinde görülen voltaj
V_{g_0}	0 °C sıcaklıkta pilin uçları arasındaki gerilim
V_m	Maksimum voltaj
V_{oc}	Açık devre gerilimi
\vec{v}	Hız
\vec{v}_e	Elektronların sürüklenme hızı
\vec{v}_h	Hollerin sürüklenme hızı
x	Materyal kalınlığı
α	Lineer absorpsiyon katsayısı
Γ	Pili aydınlatan $h\nu > E_g$ enerjili foton akısı
ϵ	Materyalin geçirgenliği
η	Güneş pilinin verimi
θ_m	Dünyadan güneşin görüldüğü minimum açı
λ	Dalgaboyu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
λ_g	Temel absorpsiyon oluşturabilecek ışığın dalgaboyu
λ_m	Maksimum dalgaboyu
μ	Mobilite
μ_e	Elektronların mobilitesi
μ_h	Hollerin mobilitesi
ν	Frekans
π	pi sayısı
ρ	Özdirenç
ρ_q	Yük yoğunluğu
σ	Elektriksek iletkenlik
σ_i	Has yarıiletkenler için elektriksel iletkenlik
σ_{S-B}	Stefan Boltzmann sabiti
τ	Taşıyıcı ömrü
τ_n	Elektron ömrü
τ_p	Hol ömrü
Φ_0	p-n eklemının kontak potansiyeli
Ω	ohm

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
AC	Alternatif akım
AM	Atmosferik koşullar
AM0	Dış uzaydaki güneş spektrumu (1. 353 kW/m ²)
AM1	Deniz seviyesinde güneş tam tepede iken dünya atmosferinden geçerek yeryüzüne ulaşan güneş ışığının spektral dağılımı
AM1.5	Güneşin dünyanın başucu (tepesi) ile 48 ⁰ 'lik açı yaptığı durumda yeryüzüne ulaşan güneş ışığının spektral dağılımı
Ar-Ge	Araştırma-Geliştirme
AOÇ	Atatürk Orman Çiftliği
DC	Doğru akım
FET	Alan etkili transistör (Field Effective Transistor)
GSM	Küresel Mobil İletişim Sistemi (Global System For Mobile)
kW	kilowatt
Mev	megaelektronvolt
MIS	Metal-yalıtkan-yarıiletken (metal-isolator-semiconductor)
MJ	megajoule
MS	Metal-yarıiletken (metal-semiconductor)
MW	megawatt
PMR	Profesyonel mobil telsiz
PV	Fotovoltaik

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
SIS	Yarıiletken-yalıtkan yarıiletken (semiconductor-isolator-semiconductor)
TV	Televizyon
TEMEV	Temiz Enerji Vakfı
TEAŞ	Türkiye Elektrik Üretim ve İletim Anonim Şirketi
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Şirketi
UGET-TB	Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu-Türkiye Bölümü

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Giriş

Antropologlara göre bir toplumun gelişmişlik düzeyini belirleyen en sağlıklı ölçüt, o toplumda kişi başına tüketilen enerjidir. Enerji, klasik termodinamikte iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır (Uyarel ve Öz, 1987), birçok yolla elde edilir ve gereksinimlerimize göre pek çok yolla tüketilir.

İnsan, yaşamını doğal çevrede sürdürürken; ihtiyaçlarını da doğal kaynaklardan sağlıyordu. Nüfus artıp ihtiyaçlar çeşitlenince, daha çok ve daha hızlıyı isteyen insan, yeni kaynakların arayışına girdi. Böylece yakıldığında daha fazla enerji açığa çıkaran yakıtlara yöneldi. Fakat, bu yakıtların çevreye ve atmosfere verdiği zarar, sağladığı faydayı gölgeledi (Uyar, 2004).

Bugün için en çok kullanılan ve ihtiyaç duyulan enerji türleri ısı ve elektrik enerjisidir. Bu nedenle tüm enerji kaynaklarından elde edilen enerjiler, ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülür. Dünyada halen kullanılmakta olan önemli enerji kaynakları; Fosil yakıtlar (kömür-petrol-doğalgaz), su gücü, nükleer yakıtlar, güneş, rüzgar, biyokütle, yer-içi ısı (jeotermal), dalga ve gel-git enerjileri şeklinde sıralanabilir. Bütün bu enerji kaynaklarının her birinden enerji elde edilmesinin; ekonomi, sağlık ve çevre maliyetleri üzerinde yarar ve zararları vardır.

Bugün kullanılan enerjinin büyük bir kısmı; kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Dünya toplam elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynaklar arasında; fosil yakıtların payının 1993 'te %63 iken, 2010 'da %69 'a çıkacağı hesaplanmaktadır (Kızıroğlu, 2005). Fosil yakıtlar; bitkilerin ve hayvanların milyonlarca yıl boyunca çürümesi ile oluşmuştur. Bunları yeryüzüne çıkarabilmenin yolu, yeryüzünü delmek (sondaj) ya da kazmaktır. Yeraltında ısı ve basınçla oluşan bu yakıtlar, oluşumlarından daha hızlı olarak tüketilmektedir. Bu sebeple fosil yakıtlar, kısa süreçte yenilenemeyen yakıtlar olarak düşünülürler. Bu yakıtların tükenmesi ve fiyatlarının devamlı artmasının yanı sıra, yanmaları sonucu çevreye verdikleri zararlar ve insan sağlığı üzerindeki etkileri de büyüktür.

Dünya genelinde enerji tüketimi, önümüzdeki 50 yılda iki misli artacaktır (Kızıroğlu, 2005). Sanayileşme ve şehirleşmeye bağlı olarak, toplumların enerji ihtiyacı arttıkça; güneş, rüzgar ve jeotermal enerji gibi çevreye daha az zarar veren, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için yeni teknikler geliştirilmesine gereksinim artmaktadır. Günümüzde ağaçlardan, bitkilerden, nehirlerden ve hatta çöplerden bile; yenilenebilir enerji elde etmek mümkün olabilmektedir. 1973 dünya petrol krizi, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilginin artmasına sebep olmuştur. 1992 yılında Rio 'da birincisi, 2002 yılında Johannesburg 'da ikincisi ve 2004 'de Almanya 'nın Bonn kentinde üçüncüsü yapılan yenilenebilir enerji kaynakları konferansları, sürdürülebilir kalkınmayı sağlama ve küresel iklim değişikliğini engellemek yönünde dünya çapında atılan üç önemli adımdır (Wille, 2004).

1-4 Haziran 2004 tarihleri arasında, 154 ülke bakanı ve hükümet temsilcisi; üçüncü yenilenebilir enerji konferansı için Bonn 'da bir araya geldi. Bu konferansta enerji verimliliği ile birlikte, yenilenebilir enerjilerin sürdürülebilir kalkınmasının, enerjiye ulaşımın kolaylaştırılmasının, sera gazlarının azaltılmasının, yeni ekonomik fırsatlar yaratılmasının ve güvenli enerjinin büyük önem taşıdığı kabul edildi. Burada, ülkemizi TBMM Enerji Komisyonu Başkanı Yüksek Mühendis Soner Aksoy ve yardımcısı Nejat Gencan temsil etti. Toplantıya katılan bakan ve hükümet temsilcileri; Rio de Janerio Dünya Zirvesi (1992), Milenyum Deklarasyonu ve Milenyum Gelişme Hedefleri (2000) ve Sürdürülebilir Kalkınma Dünya Zirvesi (2002) sonuçları ile anlaşmalarının güçlendirilmesi konusunda anlaşıldılar (Uyar, 2004).

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun Tasarısı, 7 Temmuz 2004 Çarşamba gününden itibaren TBMM Komisyonları 'nda görüşülmeye başlanmıştır. İlgili görüşmeler, TBMM Sanayi, Ticaret, Enerji, Tabii Kaynaklar, Bilgi ve Teknoloji Komisyonları 'nda yapılmaktadır. Avrupa Yenilenebilir Enerji Birliği Türkiye Bölümü (EUROSOLAR Türkiye); bu tasarının AB enerji yasalarıyla tam uyumlu olması için ilgilileri duyarlı olmaya ve sorumluluklarının gereğini yerine getirmeye davet ediyor (Uyar, 2004).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ülkelerdeki potansiyeline göre değişir. Kuşkusuz yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en güncel olanı ve en çok uygulama

alanı bulunan güneştir (Kılıç ve Öztürk, 1980). Güneşten dünyaya bir günde gelen ışık enerjisi, dünyada tüketilen günlük enerjinin on-onbeş bin katı kadardır (Kızıroğlu, 2005).

Güneş enerjisi, yeni ve yenilenebilir bir enerji kaynağı oluşu yanında; insanlık için önemli bir sorun olan çevreyi kirletici atıklarının bulunmayışı, yerel olarak uygulanabilmesi ve karmaşık bir teknoloji gerektirmemesi gibi üstünlükleri sebebiyle son yıllarda üzerinde yoğun çalışmalar yapıldığı bir konu olmuştur. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisidir. Bu enerji, güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanır. Güneş enerjisi, dünyadaki hayatın temelini oluşturur. Bol ve temiz bulunan bir kaynaktır (Altın, 2002). 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:

1. Konutlarda, işyerlerinde ve gündelik yaşam yapısının çeşitli kesimlerinde ısı ve elektriğe dayalı bir bölüm enerji ihtiyacının karşılanması.
2. Endüstriyel enerji ihtiyacının bir bölümünün, ısı ve elektriğin birlikte üretim teknolojisiyle karşılanması.
3. Kırsal yörelerde ve tarımsal teknolojide enerji ihtiyacının karşılanması.
4. Kara, deniz ve hava taşıtlarının bir bölümünde hareketi sağlayıcı kaynak olarak kullanılması.
5. İletişim araçlarında (radyo, TV, telefon), sinyalizasyon ve otomasyonda bir bölüm enerji ihtiyacının karşılanması.
6. Elektrik sektörünün birincil kaynakları arasına güneş enerjisinin de girmesi.
7. Askeri alanda özel amaçlarla güneş enerjisinin kullanılması.
8. Uzay çalışmalarında enerji gereksiniminin karşılanması (İnan ve Ültanır, 1996).

Güneş enerjisinden elektrik elde etmek için kullanılan teknolojilerden biri, güneş

pilleridir. Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken düzeneklerdir. Güneş pilleri; 1960 'larda uzay çağının teknolojisi olarak ticarileştiği zamanlardan bugüne, hayranlık uyandırıcı bir basitliğe ve mükemmelliğe sahiptir. Son on yılda; pazarını cep telefonlarından sonra, en hızlı büyüyen endüstriyel mallardan biridir. Güneş pili sistemlerinin kullanıldığı tipik uygulama alanlarından bazıları; haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri, petrol boru hatlarının katodik koruması, metal yapıların (köprüler, kuleler vb) korozyondan korunması, elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan tele metrik ölçümler, bina içi ya da dışı aydınlatma, dağ evleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde tv, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması, tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompajı, deniz fenerleri, ilkyardım, alarm ve güvenlik sistemleri, deprem ve hava gözlem istasyonları, ilaç ve aşı soğutma, hava gözlem istasyonları, uzay çalışmaları, uyduların enerji ihtiyaçlarının karşılanması, bazı yerleşim merkezlerinde şebekeye bağlı olarak elektrik üretilmesi şeklinde sıralanabilir.

Kullanım alanları ve kullanıcı kitleleri büyük bir hızla artan güneş pilleri konusunda araştırmalar, yoğun bir şekilde devam etmektedir. Günümüz elektronik ürünlerinin çoğunda olduğu gibi, güneş pilleri de yarıiletken maddelerden yapılırlar. Bu yüzden çalışma ilkeleri yarıiletken teknolojisine dayanır. Yapılarının anlaşılıp, verimlerinin artırılabilmesi için öncelikle, yarıiletken maddelerin özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

1.2. Amaç

Bu çalışmadaki amacımız, dünya ekolojisine zarar vermeden enerji elde etme konusunda bir umut ışığı olan güneş pillerinin yapısını, bazı fiziksel özelliklerini (optik ve elektriksel özelliklerini), verimliliklerini incelemektir. Ayrıca, tüm dünyada ihtiyaç duyulan yenilenebilir enerji kaynakları konusundaki araştırmalara katkıda bulunmaktır. Bu amaçla şu işlemler gerçekleştirilmiştir: İlk olarak, güneş pillerinin yapımında seçilen maddeler olarak yarıiletkenlerin yapıları ele alınmıştır. Daha sonra, fotovoltaik bir dönüşüm sistemi olan güneş pillerinin çalışma ilkeleri, yarıiletken teknolojisine dayanarak açıklanmıştır. Optik ve elektriksel özellikleri, verimleri incelenerek; kullanım alanları araştırılmıştır. Geçmişteki ve günümüzdeki güneş pili

uygulamaları incelenmiştir. Güneş pili kullanımının olumlu ve olumsuz tarafları ele alınarak, uygulamaların geleceği konusunda bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Son olarak, dünyadaki enerji sorununa alternatif bir çözüm olarak görülen güneş pillerinin kullanımlarını yaygınlaştırmak amacıyla önerilerde bulunulmuştur.

2. YARIİLETKENLERİN ÖZELLİKLERİ

2.1. Giriş

İnsanlar çevrelerini algılamaya başladıkları andan itibaren, daha rahat ve kaliteli bir yaşam için karşılaştıkları maddeleri tanımlamaya, sınıflandırmaya ve onlardan en verimli şekilde yararlanmaya çalışmışlardır. Bu sınıflandırmalardan biri de, elementlerin ve bunların kimyasal bileşiklerinin doğada katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç halde bulunduğuna ait olan sınıflandırmadır. Son zamanlarda bu üç hale, sıvı kristal hal ve plazma hali de katılarak, maddenin beş halde bulunduğu vurgulanmaktadır. Herhangi bir maddenin bu hallerden birinde bulunması; atom veya molekülleri arasındaki çekim kuvvetine, dolayısıyla da sıcaklık ve basınca bağlıdır. Çevremizde gördüğümüz ve her alanda kullandığımız maddelerin çoğu katı haldedir.

Katılarda iki komşu atom arasındaki uzaklık birkaç angströmdür ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Atomlarının diziliş ve düzen özelliklerine göre iki grupta toplanırlar. Bunlardan birincisi: Atomlarının çok düzenli bir şekilde sıralandıkları kristal yapıdır. Diğeri ise atomlarının veya moleküllerinin bir sıvı içerisindeki kadar düzensiz ve karmaşık oldukları amorf yapıdır (Taylor ve Zafaritos, 1996; Erol, 2001).

Kristaller içlerinde grain olarak isimlendirilen, çeşitli kristal bölgeciklerini bulundururlar. Eğer büyük bir parça kristalde; grainler (daha küçük kristal bölgecikler) hep aynı yapıya sahipse, buna tek kristal adı verilir. Grainler farklı ise; yani kristal yapılanmaları değişiyorsa, buna da polikristal denir. Bu arada tek kristalin, tümüyle aynı yapıya sahip mükemmel bir kristal yapı olmadığını ve zaten hatasız kristal yapılanmaların da, termodinamik yasalarına ters düştüğünü unutmamak gerekir. Kristal yapılanmadaki hatalar; nokta hataları, çizgi hatası, düzlem hataları başlıkları altında toplanabilirler.

Elektriksel ve optik özellikleri göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmaya göre katılar; iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere üç grupta toplanırlar. Bu farklı özelliklerinin nedenleri; katıyı oluşturan atomların dış yörüngelerindeki elektron sayısı, kristal yapıdan gelen periyodiklik ve Pauli İlkesi 'dir.

En genel tanımlamalarla: iletken, elektriği iyi ileten maddelere; yalıtkan, elektriği iyi iletemeyen maddelere denir. Yarıiletkenler ise; öz dirençleri sıcaklıkla hızlı bir şekilde azalan, iletken cisimlerden daha az, fakat yalıtkanlardan daha çok elektriği ileten maddelerdir (Oral, 1979; Kittel, 1996; Erol, 2001).

2.2. Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin tarihine bakıldığında, Edmond Becquerel 'in 1839 yılındaki çalışmalarına kadar gitmek gerekir. Edmond Becquerel 1839 yılında, aynı elektrolit içine batırılmış iki elektrottan biri üzerine ışık düşürmüştü ve bunlar arasında bir potansiyel farkı oluştuğunu görmüştür. Bundan sonra, Faraday 1883 yılında gümüş sülfatın direncinin sıcaklıkla azaldığını bulmuştur. 1915 yıllarına doğru galen detektörler, 1920 'de ise selenyum ve bakır oksit detektörler kullanılmaya başlanmıştır. 1923 yılında Schottky 'nin yayınladığı kuru redresörler teorisi, yarıiletkenlerin teorik incelemesinde ilk adım olarak kabul edilmektedir. İkinci Dünya Savaşı 'nda radar gereksinmelerinin bir sonucu olarak, yarıiletken diyotlar yeni bir gelişme alanı bulmuştur. 1958 'de Amerika Birleşik Devletleri 'nde, Brattain ve Bordein tarafından nokta temaslı detektörler keşfedilmiştir. Bundan kısa bir süre sonra Shockley, yüzey temaslı transistörü gerçekleştirmiştir (Oral, 1979; Kavcar, 2001).

İletkenlerde, sıcaklık arttıkça direnç artar. Bunun temel sebebi; iletkenliği sağlayan elektronların birbirleri ve civardaki diğer saçılma faktörleriyle (fononlar, kristal hataları v.b) daha fazla çarpışma yapmaları ve bundan dolayı hareketlerinin engellenmesidir. Sıcaklığın artmasıyla elektron yoğunluğunda bir değişim olması iletkenler için söz konusu değildir. Diğer bir deyişle; iletkenler için birim hacimdeki elektron sayısı her sıcaklık için sabittir. Tüm metaller bu gruba girerler.

İletkenlerde direncin sıcaklıkla artmasına karşın, yarıiletkenlerde öz direnç sıcaklıkla azalır. Normal sıcaklıkta, yarıiletkenlerin öz dirençleri 10^{-2} – 10^9 Ω cm arasında değişmektedir. Bu değer, iletkenlerin öz dirençleri için verilen 10^{-6} – 10^{-4} Ω cm değerleri ile yalıtkanların öz dirençleri için verilen 10^{12} – 10^{18} Ω cm değerleri arasındadır.

Sıcaklık arttığı zaman öz direncin küçülmesi, yarıiletkenleri iletkenlerden ayıran bir özelliktir. Sıcaklıktan başka yarıiletkenin öz direncini etkileyen diğer bir faktör de,

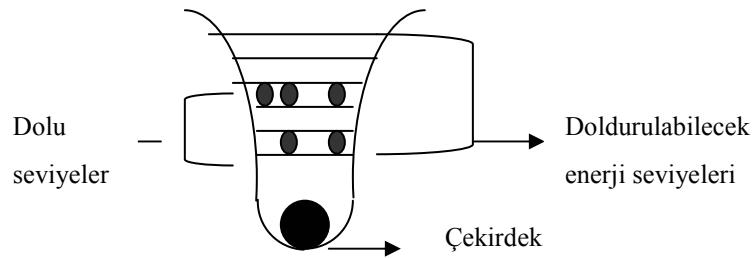
yabancı madde yoğunluğudur (Oral, 1979; Kittel, 1996; Erol, 2001).

2.3. Bant Yapısı

Yarıiletkenlerin yapısı, enerji bant modeliyle açıklanmıştır. Enerji bant modelinde, yarıiletkenler ile iletkenler ve yalıtkanlar arasındaki farklar kolaylıkla görülebilmektedir.

2.3.1. Madde yapısı

Maddenin her atomu, pozitif yüklü çok ağır bir çekirdek ile onun etrafında farklı yörüngelerde dolanan belirli sayıda negatif yüklerden (elektronlardan) meydana gelmiştir. Elektronlar, bir biri ardından gelen ve her biri belirli sayıda elektron içeren tabakalarda bulunurlar. Dolu bir tabakaya başka bir elektron yerleşemez.



Şekil 2.1. Yalıtılmış durumdaki bir atomun enerji seviyelerinin şematik gösterimi

(Oral, 1979).

Yalıtılmış durumdaki bir atomun enerji seviyeleri, Şekil 2.1. 'de gösterilmiştir. Yatay çizgilerle enerji seviyeleri belirtilmektedir. Bu çizgilerin uzunluğu, söz konusu elektronun yörüngesinin yarıçapıdır. Çekirdeğe en yakın elektronun, enerjisinin en küçük olduğu görülür. Bir sistemin, enerjisinin en küçük olduğu duruma gelme eğilimi vardır. Buna göre; verilen atomun bütün elektronlarının, en düşük enerji seviyelerini işgal etmelerinin gerekli olduğu düşünülür. Fakat Pauli İlkesi, özel bir enerji seviyesinde bulunabilecek elektron sayısının sınırlı olduğunu göstermiştir.

Her atom için birinci tabakaya yerleşebilecek elektron sayısı en fazla 2, ikinci tabakaya yerleşebilecek elektron sayısı en fazla 8 ve üçüncü tabakaya yerleşebilecek elektron sayısı en fazla 18 'dir. Bu farklı enerji tabakalarının her biri, belirli enerji seviyelerine karşılık gelirler. Çünkü alt seviyelerde bulunan bir elektronu, üst seviyelerden herhangi birine çıkarmak için gerekli enerjiler farklıdır. Son tabakadaki elektronlara valans elektronları denir. Son tabakada bulunabilecek toplam elektron sayısı veya elektronlar tarafından işgal edilebilecek yerlerin sayısı da, hal olarak adlandırılır (Ökten, 1994). Örneğin hidrojen atomu için iki hal vardır. Sadece bir tabakası vardır ve bu tabakadaki iki halden biri doludur (Oral,1979; Kavcar, 2001).

Çekirdek etrafındaki yörüngelerden birinde dolanan elektron; yörüngesini koruduğu sürece ne enerji yayar, ne de enerji absorplar (soğurur). Ancak bir elektron yörüngesini değiştirdiği zaman, enerji absorplanması ya da emisyonu (yayınlanması) olabilir. Elektron, yüksek bir enerji seviyesinden daha alçak bir enerji seviyesine geçtiğinde enerji emisyonu olur. Elektron alçak bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine çıktığı zaman ise, enerji absorplanması (soğurulması) söz konusudur (Sılay, 2000). Birinci halde, yani elektron yüksek bir enerji seviyesinden daha alçak bir enerji seviyesine geçtiğinde, enerjisi E_{ilk} ve E_{son} seviyeleri arasındaki farka eşit ve frekansı,

$$\nu = \frac{E_{ilk} - E_{son}}{h} \quad (2.1)$$

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 (Sılay, 2000).

İkinci durumun gerçekleşmesi için; yani elektronun alçak bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine çıkabilmesi için elektrona, en az birbirini takip eden iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit bir enerji kazandırmak gerekir. Bunu elektrona yeterli derecede bir termik enerji vererek gerçekleştirmek mümkündür. Belirli bir yörüngede dolanan elektrona termik enerji verildiğinde, elektron denge konumu etrafında titreşim hareketi yapmaya başlar. Termik enerji yeterli miktarda ise titreşimin

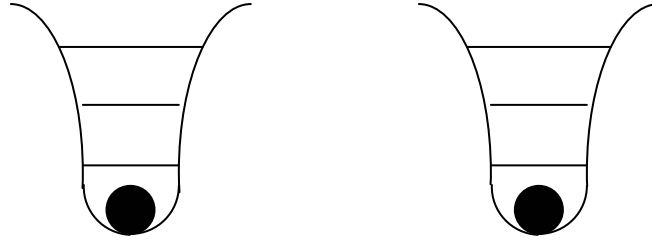
genliği o kadar büyük olabilir ki; elektron bulunduğu yörüngeyi terk ederek, daha yüksek enerji seviyesindeki bir yörüngeye geçer. Bu durumda elektronun enerji absorplaması söz konusudur. Elektronun dışarıdan enerji alarak daha yüksek enerji seviyesine çıkmasına uyarılma denir. Elektronun ulaştığı enerji seviyesi, uyarım (eksitasyon) seviyesi olarak adlandırılır. Uyarılmış elektronlar, bu seviyede çok kısa bir süre kalırlar. Elektron, iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit enerjiye sahip bir foton yayınlarken ilk konumuna geçer (Sılay, 2000). Elektronu yeterli enerji verilirse, elektron uyarılma seviyelerinin üzerinde bir seviyeye geçerek; çekirdeğin etkisinden kurtulur. Bu olaya ise iyonizasyon denir (Oral, 1979; Kavcar, 2001).

2.3.2. Enerji bantları

Katı bir maddenin özellikleri, katıyı oluşturan atomların yapısına ve bunların diziliş durumlarına bağlıdır. Yalıtılmış durumdaki bir atomda; yani diğer atomlarla etkileşmeyen bir atomda, elektronlar belirli enerji seviyelerini işgal ederler. Fakat katılarda olduğu gibi, atomlar bir birine çok yakın olduğunda durum böyle değildir. İki özdeş atomun birbirlerine çok yakın olması durumunda her enerji seviyesi ikileşir.

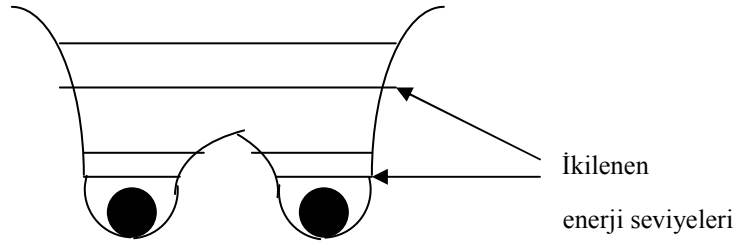
Bir kristalin atomları, kristal içinde düzgün diziler halinde yer almışlardır. Bunlar arasında, bir arada olmalarını sağlayan büyük kuvvetler vardır. Kristal içinde atomlar birbirlerine çok yakındırlar ve son tabakanın elektronlarının kuantum hallerinin dağılımını değiştirecek şekilde birbirlerini etkilerler. Valans elektronları ve son tabakanın hallerinde ayrılmalar olur. Yalıtılmış durumdaki her bir enerji seviyesinin yerini; bir birinden farklı, fakat yakın enerji seviyeleri alır. Bu enerji seviyeleri arasındaki fark $\approx 10^{-19}$ eV 'dur. Bu farkın çok küçük olması sebebiyle seviyelerin gösterdiği enerji aralığı; sürekli kabul edilerek, enerji bandı olarak tanımlanır.

Dış elektronlarına ait enerji seviyeleri Şekil 2.2. 'deki gibi belirtilmiş iki atom bir birlerine yaklaştırıldıklarında; her iki atomdaki valans elektronları, her iki atom tarafından çekilirler. Böylece bir elektronu bir çekirdeğin çevresinden kaldırıp, diğerinin çevresine yerleştirmek için gerekli enerji azalır. Bu durumda bir elektron, her iki atom tarafından aynı derecede etkilenecek şekilde yerleşecek demektir. Böylece her iki atomun elektronları arasındaki karşılıklı etki sebebiyle, her enerji seviyesi ikilenir.



Şekil 2.2. Dış elektronlarına ait enerji seviyeleri belirtilmiş iki atomun şematik gösterimi (Oral, 1979).

İki atomun bir birine çok yakın olduğu durumdaki enerji seviyesi diyagramı, Şekil 2.3. 'deki gibi her atomun çekirdeğinin yakınında iki enerji seviyesi içerir. İşgal edilmemiş enerji seviyeleri de buna benzer biçimde, her biri iki elektron içerecek şekilde ikileşir.



Şekil 2.3. İki atomun birbirine çok yakın olduğu durumdaki enerji seviyesi diyagramı (Oral, 1979).

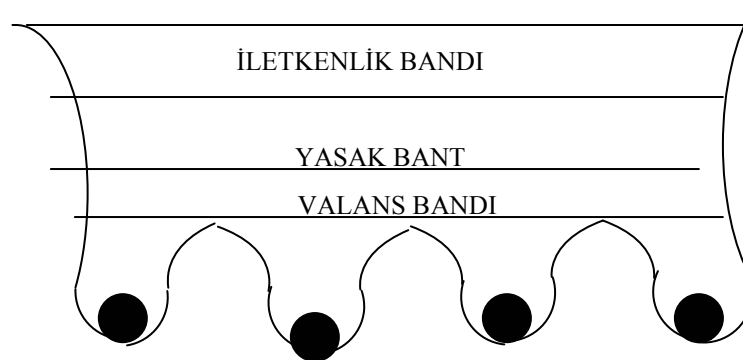
Birbirine çok yakın üç atom bulunması durumunda ise, birbirine çok yakın üç enerji seviyesi oluşur. Bir katıyı oluşturmak üzere atomların bir araya gelmesiyle meydana gelen ve bu atomların yalıtılmış ya da birbirlerini etkilemeyecek uzaklıklarda buldukları durumdaki enerji seviyesinin yerini alan; bir araya gelen atom sayısı kadar farklı ve yakın enerji seviyeleri topluluğuna enerji bandı denir.

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 alanının etkisi altında oluşan toplu hareketleri elektrik akımını meydana getirir.

Mutlak sıfır sıcaklığında, yalıtılmış durumdaki bir yarıiletken atomu, örneğin Germanyum atomu göz önüne alınırsa; atom temel haldedir. Her elektron en düşük enerjiye sahiptir. Germanyum atomlarının bir araya gelmesiyle oluşan germanyum kristalinde ise temel seviye, valans bandı denilen bir enerji seviyesi ile değişmiştir. Bu bant, diğer bantlara göre daha düşük bir enerji seviyesindedir. En alt seviyede bulunan valans bandı, mevcut enerji seviyelerinin her birinde bir elektron bulunacak şekilde doludur (Oral, 1979; Kavcar, 2001).

Yalıtılmış durumdaki bir atomda, işgal edilmemiş yüksek seviyelere karşılık gelen yukarıdaki bantta elektron yoktur. Tamamen boş olan bu banda, iletkenlik bandı denir. Valans bandı ile iletkenlik bandı arasında yer alan ve hiçbir elektronun yer alamayacağı bölgeye yasak bant denir (Oral, 1979; Kittel, 1996; Ökten, 2001). Yasak bant aralığı E_g ile ifade edilir. Şekil 2.4. 'de kristal bir yapıda meydana gelen valans bandı, iletkenlik bandı ve yasak bant gösterilmiştir.



Şelil 2.4. Kristal bir yapıda meydana gelen valans bandı, iletkenlik bandı ve yasak bandın görünümü (Oral, 1979).

Mutlak sıfır sıcaklığında, yarıiletkenlerin valans bandındaki enerji seviyelerinin hiçbirinde serbest elektron yoktur. Bütün seviyeler, elektronların hareket etmelerine olanak vermeyecek şekilde tamamen doludur. Bu durumda, mutlak sıfır sıcaklığında,

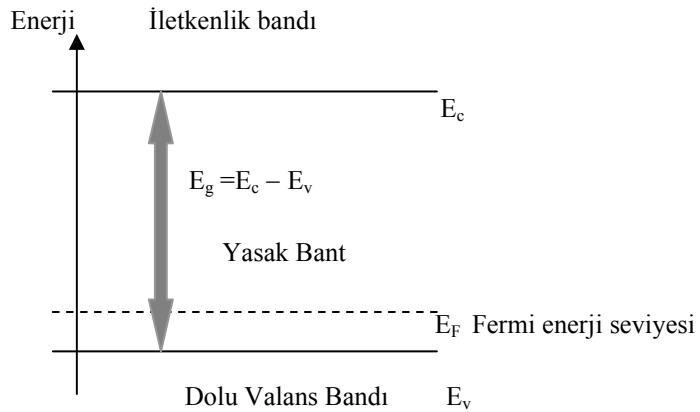
yarıiletkenler yalıtkandırlar (Kittel, 1996; Erol, 2001).

Elektronlar, valans bandının en üst seviyesi E_v ile iletkenlik bandının en alt seviyesi E_c arasında yer alan yasak bant aralığındaki hiçbir enerji seviyesinde yer alamazlar. Yasak enerji aralığı E_g 'nin değeri,

$$E_g = E_c - E_v \quad (2.2)$$

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

Termik uyarım, foton ve tanecik bombardımanı durumunda, elektronlar yasak enerji aralığına eşit veya daha fazla enerji kazanırlarsa; arkalarında holler bırakarak iletim bandına geçebilirler. Bu durumda bir elektrik alan uygulandığında; hem iletim bandında bulunan elektronlar, hem de valans bandındaki holler akıma katkıda bulunurlar.



Şekil 2.5. Genel olarak tipik bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı.

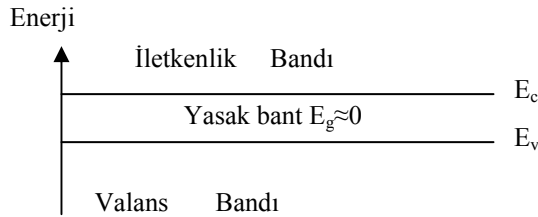
Şekil 2.5. 'de E_F ile gösterilen Fermi enerji seviyesi; bir katıda, mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronların bulunabileceği en yüksek enerji seviyesi olarak tanımlanır (Ökten, 1994). Fermi enerji seviyesi, katkı maddesi içermeyen saf yarıiletkenler olarak tanımlanan has yarıiletkenler için yasak bandın ortasındadır. Katkılı yarıiletkenler için katkı türüne ve yoğunluğuna bağlı olarak; yasak bant

içerisinde, aşağı ya da yukarı doğru kayar (Kittel, 1996; Erol, 2001).

Katıların bant yapısının bilinmesi, onların elektriksel ve optik özelliklerinin anlaşılmasını sağlar. Bir kristalde enerji seviyelerinin elektronik olarak tanımlanması, enerji bant modeli olarak adlandırılır. İletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler arasındaki farklar enerji bant modeliyle kolayca açıklanabilir. İletkenlerin, yalıtkanların ve yarıiletkenlerin, enerji seviyelerinin enerji bant modeliyle incelenmesi sırasıyla şu şekildedir:

2.3.2.1. İletkenlerin enerji bant modeliyle incelenmesi

İletkenlerin valans bandı ile iletkenlik bandı, birbiriyle çakışıktır ve iletkenlerin enerji bant modeli Şekil 2.6. 'da görülmektedir.

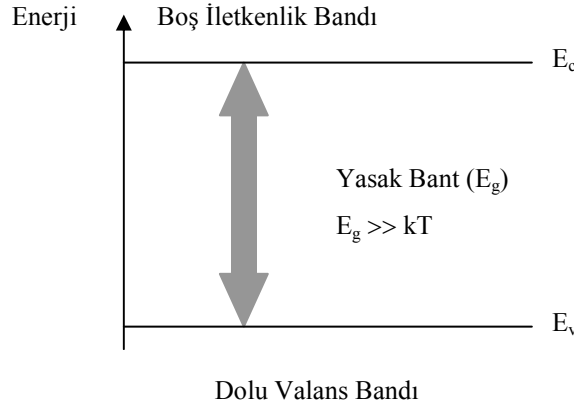


Şekil 2.6. İletkenlerde enerji bant modelinin şematik gösterimi.

İletkenlerde yasak bant aralığı hemen hemen sıfırdır ($E_g \sim 0$). Dolayısıyla valans bandında bulunan tüm elektronlar, aynı zamanda iletkenlik bandında kabul edilirler. Bu yüzden iletkenlik ve valans bandı tamamen doludur denir. Valans elektronlarının birçoğu, bir elektrik alanının varlığında katının içinde hareket etmeye hazırdırlar. Sıcaklık değiştirildiğinde, elektron yoğunluğu değişmez. Sıcaklık arttığında, elektronların birbirleriyle ve çevredeki diğer saçılma faktörleriyle (fononlar, kristal hataları) çarpışmaları artar. Bu durum elektronların hareketlerinin engellenmesine yol açar. Bu sebeple iletkenlerin direnci sıcaklıkla artar (Kittel, 1996; Erol, 2001).

2.3.2.2. Yalıtkanların enerji bant modeliyle incelenmesi

Bir iletkende veya yarıiletkendeki yük taşıyıcıları elektronlar ve hollerdir. Elektronlar maddenin yapısında bulunan negatif yüklü taneciklerdir. Holler ise, valans bandından iletkenlik bandına geçen elektronların geride bıraktıkları boşluklardır. Bu yük taşıyıcılarının, sadece sıcaklıklarından dolayı sahip oldukları kT değerindeki kinetik enerjiye termik kinetik enerji veya termal enerji denir (Ökten, 1994). Termal enerji ifadesinde; k Boltzmann sabitini, T ise mutlak sıcaklığı ifade eder.



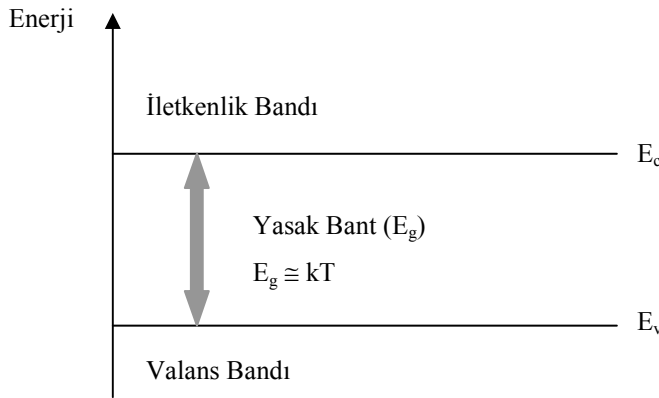
Şekil 2.7. Yalıtkanlarda enerji bant modelinin şematik gösterimi.

Enerji bant modeli Şekil 2.7. 'deki gibi olan yalıtkan bir kristalin yasak bant aralığı, taneciklerin sıcaklık etkisi ile kazanabilecekleri kT değerindeki termal enerjiden çok çok büyüktür. Bu yüzden valans bandındaki hiçbir elektron, üstteki iletkenlik bandına geçemez. Valans bandı tamamen dolu iken iletkenlik bandı tamamen boş olduğundan, iletimi sağlayacak elektronların sayısı yok denecek kadar azdır. Valans bandındaki elektronlar da iletkenliğe katılamazlar. Bu yüzden elektriği iyi iletmezler (Kittel, 1996; Erol, 2001).

Yalıtkan bir kristalin valans bandında bulunan bir elektronun, iletkenlik bandına geçebilmesi için ona çok büyük bir enerji verilmesi gerekir. Fakat bu derecede büyük bir enerji kristale zarar verir (Oral, 1979).

2.3.2.3. Yarıiletkenlerin enerji bant modeliyle incelenmesi

Yarıiletkenlerin enerji bant modeli Şekil 2.8. 'de görüldüğü gibi yalıtkanların enerji bant modeline benzemekle birlikte, yarıiletkenin yasak bant aralığı daha küçüktür (1eV mertebesindedir).



Şekil 2.8. Yarıiletkenlerde enerji bant modelinin şematik gösterimi.

Mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronların termal enerjileri kT ifadesine göre sıfır olacağından, bütün elektronlar valans bandında bulunurlar. Başka bir deyişle, $T=0$ K 'de yarıiletkenler yalıtkan gibi davranırlar. Sıcaklık arttığında, elektronlar sıcaklığa bağlı olarak kT değerinde bir termal enerji kazanırlar. Bu enerji yasak enerji aralığına eşit veya büyük olursa; valans bandındaki elektronlar arkalarında holler bırakarak, iletkenlik bandına geçerler. Geride bıraktıkları holler, valans bandındaki elektronlara hareket imkanı tanıdığından; hem bu holler, hem de iletkenlik bandına geçen elektronlar iletkenliğe katkıda bulunurlar (Kittel1996; Erol, 2001).

2.4. Yarıiletken Türleri

Yarıiletkenler günümüzde elektronik endüstrisinde, bilimsel çalışmalarda, enerji üretiminde ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarıiletkenlerden faydalanılarak yapılan düzenekler arasında; diyotlar, foto-diyotlar, transistörler, güneş pilleri, detektörler, termistörler, fotoseller, modülatörler sayılabilir. Bu düzenekleri elde etmek için kullanılacak olan uygun özelliklere sahip yarıiletkenler, çoğu zaman doğal

bir şekilde bulunmazlar. Bu yüzden yarıiletkenlerin bazı işlemlerden geçirilerek, bir takım özelliklerinin değiştirilmesi gerekir. Örneğin yarıiletken düzenerler p-n eklemi içerirler. Bir p-n eklemi elde edebilmek için çoğunluk yük taşıyıcısı holler olan p-tipi yarıiletkenler ile çoğunluk yük taşıyıcısı elektronlar olan n-tipi yarıiletkenler elde edilip, bunlar bir birine eklenmelidirler. Çünkü p-n eklemi, mono kristal (tek kristal) yarıiletkenin iletkenliğinin bir tipten başka bir tipe değiştiği bölgedir. p-tipi ve n-tipi iletkenliğe sahip yarıiletkenler uygun katkılama işlemleriyle elde edilebilirler.

Çok saf, yani içinde hemen hemen hiç yabancı atom bulundurmayan yarıiletkenlere has yarıiletkenler denir (Kittel, 1996;Erol, 2001). Periyodik cetvelin IV. grubunda yer alan silisyum (Si), germanyum (Ge) gibi elementler içerisine III. ve V. gruptan bir atom katılması işlemine katkılama denir. Bu şekilde elde edilen elektriksel ve optik özellikleri değişen maddelere has olmayan ya da katkılı yarıiletkenler denir. Katkılama işlemiyle p-tipi ve n-tipi iletkenliğe sahip yarıiletkenler elde edilir (Oral, 1979; Kavcar, 2001).

2.4.1. Has yarıiletkenler

Has yarıiletkenler, katkılama yapılmamış saf yarıiletkenlerdir. Bu tür yarıiletkenlerde elektron ve hol yoğunluklarını ayrı ayrı ifade etmek yerine, has yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğunu gösteren n_i ,

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilir. Burada n_0 ve p_0 sırasıyla, has yarıiletkenler için birim hacimdeki serbest elektron ve hol sayısıdır. Bu tür yarıiletkenlerde elektronlara ve hollere serbest taşıyıcılar ya da taşıyıcılar denir. Taşıyıcı yoğunluğunu ifade eden n_i de sadece sıcaklığa bağlıdır ve yarıiletkenin iletkenlik derecesini belirler. Taşıyıcı yoğunluğunu belirleyen Fermi-dirac dağılım fonksiyonu,

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F/kT)}} \quad (2.4)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada E_F Fermi enerji seviyesi, k Boltzmann sabiti ve T de 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 seviyesidir. Has yarıiletkenlerde tek Fermi enerjisi serbest elektronların ve boşlukların dağılımını belirler. Ancak yarıiletken içerisinde çok sayıda tuzak olduğundan, özellikle çok düşük sıcaklıklarda (2.3) bağıntısı geçerli değildir. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, yasak bant aralığının tam ortasındadır (Kittel, 1996; Erol,2001).

2.4.2. Katkılı yarıiletkenler

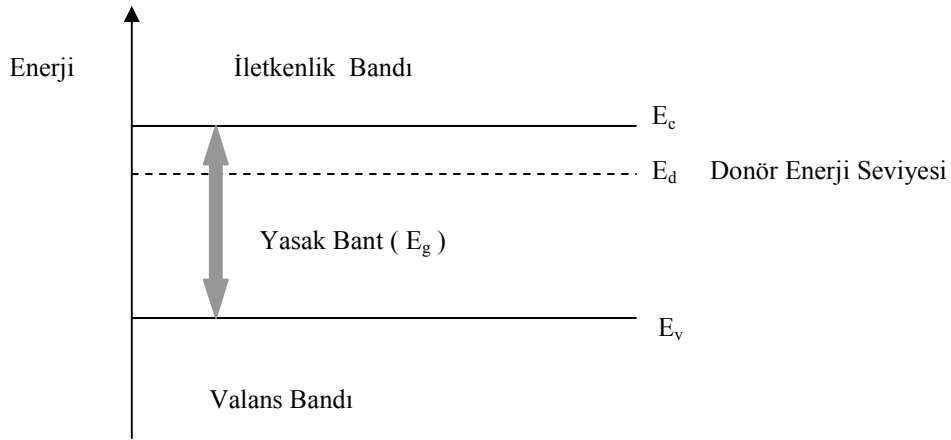
Bütün yarıiletkenler bünyelerinde bir miktar yabancı atom bulundurlar. Bu yabancı atomlara safsızlık atomları denir. Safsızlık atomları, safsızlık enerji seviyeleri denilen enerji seviyelerinde bulunarak; yarıiletkenin iletkenlik özelliklerini önemli ölçüde etkilerler. Safsızlık enerji seviyeleri izinli bölgede bulunabileceği gibi, çoğu zaman yasak bandın içinde bulunurlar. Yarıiletkenin içinde doğal olarak bulunan yabancı atom yoğunluğu, özellikle yüksek sıcaklıklarda daha düşüktür. Fakat sıcaklık azaldıkça, safsızlık enerji seviyeleri tarafından kapılan elektronlar, yarıiletkeni iletkenlik bakımından p-tipi ya da n-tipi yapar.

Yarıiletkenlere büyütme sırasında, belli oranlarda uygun katkı atomlarının, çeşitli tekniklerle katılmasına katkılama ve bu şekilde elde edilen yarıiletkenlere de katkılı yarıiletkenler denir. Katkılama işlemiyle yarıiletkenin elektriksel özellikleri büyük ölçüde değişir. Bu şekilde iletkenlik tipine göre, n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler elde edilir (Kittel, 1996; Erol, 2001).

2.4.2.1. n–tipi yarıiletkenler

n–tipi yarıiletken elde etmek için yarıiletkenler donör (verici) atomlarıyla katılanırlar. Periyodik tablonun IV. grubunda bulunan Si ve Ge elementlerinden birine, V. grup atomlarından birinin (As, N, Sb, P olabilir) uygun bir yöntemle katılmasıyla bu tip bir katkılama yapılabilir. Ge 'a büyütme sırasında, 10^{-7} oranında As katılması örnek

olarak verilebilir. Bu durumda; As 'nin beş valans elektronundan dördü, Ge 'un dört valans elektronuyla kovalent bağ yapar. As 'nin geriye kalan V. valans elektronu bağ yapamaz. Fakat As atomuna çok zayıf bir elektriksel kuvvetle bağlı olduğundan; çok küçük enerjilerle iyonlaşarak, kristal içerisinde serbest hareket edebilir. Böylece Ge atomu fazladan bir elektron kazanmış olur. Bundan dolayı As 'ye donör (elektron verici) atomu denir.



Şekil 2.9. Enerji bant diyagramında donör enerji seviyesinin gösterimi.

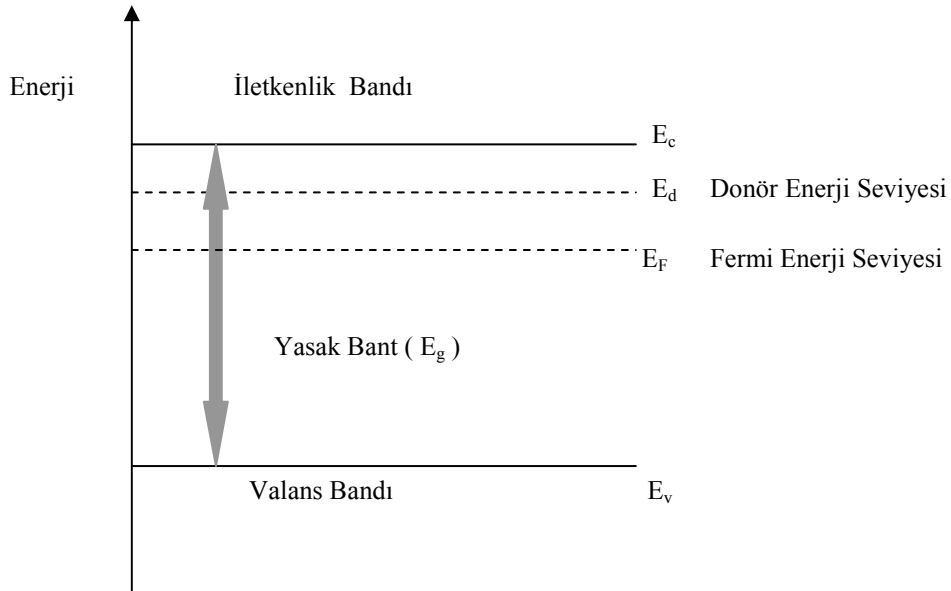
Donör atomlarının yarıiletken içerisinde buldukları enerji seviyelerine donör enerji seviyesi denir (Ökten, 1994). Enerji bant diyagramındaki yeri Şekil 2.9. 'da görüldüğü gibi olan ve E_d ile ifade edilen donör enerji seviyesi,

$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e} \right) E_H \quad (2.5)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada; ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabitini, m_e^* elektronun etkin kütleini, m_e elektronun kütleini ve E_H Hidrojen için iyonlaşma enerjisini ifade eder. Donör enerji seviyesi iletkenlik bandına çok yakın olduğundan; bu seviyedeki donör atomları, çok küçük bir enerjiyle iyonlaşarak iletkenlik bandına geçerler. Bu şekilde iletkenlik bandında elektron sayısı artmasına karşılık, valans bandında holler

oluşmaz. Böylece elde edilen n-tipi yarıiletkende, çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar (n_n) ve azınlık yük taşıyıcıları da hollerdir (p_n). Elektronların elektriksel iletkenliğe katkısı hollerden daha fazladır (Kittel, 1996; Erol, 2001).

n-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi; yasak enerji aralığının ortasından ayrılarak, iletim bandına doğru kayar. Kayma miktarı, katkılanan maddenin yoğunluğuna bağlıdır. n-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramında Fermi enerji seviyesinin yeri ise Şekil 2.10. 'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. n- tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramında Fermi enerji seviyesinin gösterimi.

2.4.2.2. p-tipi yarıiletkenler

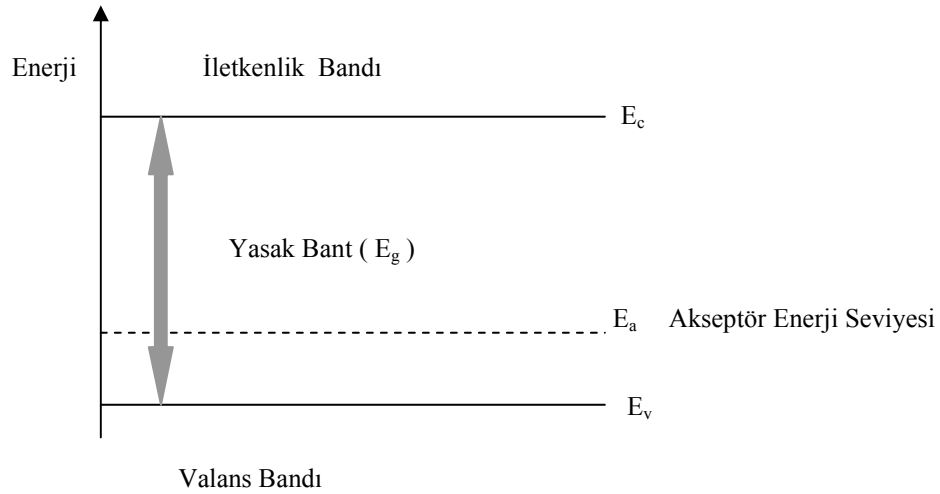
p-tipi yarıiletken elde etmek için yarıiletkenler akseptör atomlarıyla katkılanırlar. Periyodik tablonun IV. grubunda bulunan Ge, Si elementlerinden birine; III. grup atomlarından birinin (Al, B, In, Ga olabilir) uygun bir yöntemle katılmasıyla bu tip bir katkılama yapılabilir. Si 'a büyütme sırasında In katılması örnek olarak verilebilir. Bu durumda In 'un üç valans elektronu, Si 'un dört valans elektronunun üçü ile kovalent bağ yapar. In 'un bağlarını tamamlayabilmesi için Si atomlarının birinden

bir elektron alması ve bu elektronun geldiği yerde bir hol oluşturması söz konusudur. Her katkı atomuna karşılık, valans bandında bir hol oluşur. İn atomları Si 'dan elektron aldığından, bunlara akseptör (alıcı) atomları denir.

Akseptör atomlarının yarıiletken içerisinde buldukları enerji seviyesine akseptör enerji seviyesi denir (Ökten, 1994). E_a ile ifade edilen akseptör enerji seviyesi,

$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_h^*}{m_h} \right) E_H \quad (2.6)$$

bağıntısı ile tanımlanır ve enerji bant diyagramında Şekil 2.11. 'deki gibi gösterilir. Donör enerji seviyesini veren (2.5) bağıntısından farklı olarak, burada m_h^* holün etkin kütlelerini ve m_h de holün kütlelerini ifade eder.

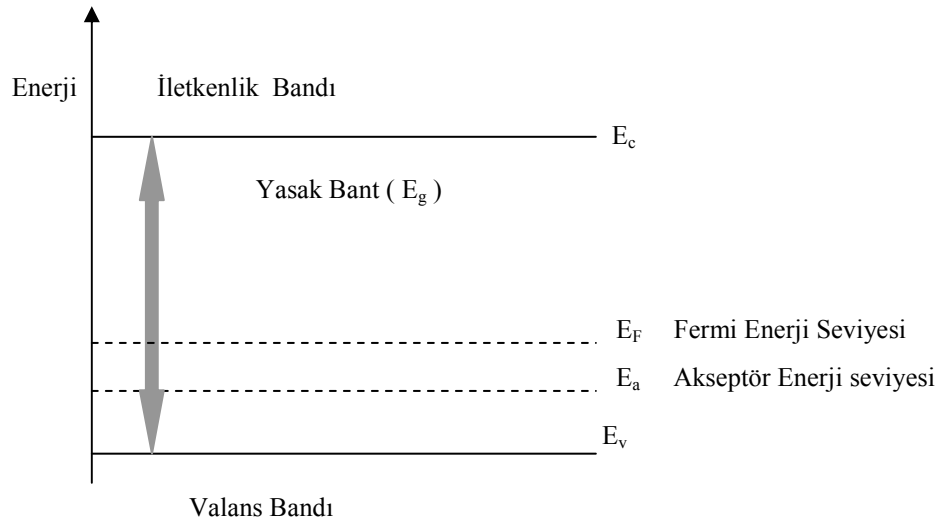


Şekil 2.11. Enerji bant diyagramında akseptör enerji seviyesinin gösterimi.

Akseptör enerji seviyesi, valans bandına çok yakındır. Bu seviyede bulunan akseptör atomları, bağlarını tamamlayabilmek için valans bandından elektron alırlar. Valans bandından akseptör enerji seviyesine geçen her elektron, valans bandında bir hol oluşturmasına karşın; iletkenlik bandındaki elektron sayısı artmaz. Böylece elde edilen p-tipi yarıiletken, çoğunluk yük taşıyıcıları holler (p_p) ve azınlık yük taşıyıcıları da

elektronlardır (n_p). Hollerin elektriksel iletkenliğe katkısı elektronlardan daha fazladır (Kittel, 1996; Erol, 2001).

p–tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi; yasak enerji aralığının ortasından ayrılarak, valans bandına doğru kayar. 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.

Belirli bir sıcaklıkta hem has yarıiletkenlerde, hem de katkı yarıiletkenlerde; elektron ve hol yoğunlukları çarpımı sabittir. Buna göre has yarıiletkenler için,

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (2.7)$$

ve katkı yarıiletkenler için de;

$$n_n p_n = p_p n_p = n_i^2 \quad (2.8)$$

bağıntısı yazılabilir. Yarıiletkenlerde serbest yük taşıyıcılarının çarpımları sabittir, fakat toplamları sabit değildir.

2.5. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri

Elektriksel iletkenlik, elektriksel öz direncin tersidir. Birim elektrik alan başına akım yoğunluğu olarak tanımlanan elektriksel iletkenlik σ ,

$$\sigma = \frac{|\vec{J}|}{|\vec{E}|} = \frac{J}{E} \quad (2.9)$$

bağıntısı ile verilir. Burada J akım yoğunluğunu, E ise elektrik alanın değerini gösterir. İletkenlik, serbest yüklerin madde içerisindeki hareketinin bir ölçüsü olduğundan; serbest yüklerin hareketliliği, yani mobiliteleri öz direnci etkileyen bir parametredir. Mobilite, yüklü bir taneciğin birim elektrik alan başına kazandığı hıza denir. Hızı v olan bir tanecik, şiddeti E olan bir elektrik alanın etkisi altındaysa; mobilitesi μ ,

$$\mu = \frac{|\vec{v}|}{|\vec{E}|} = \frac{v}{E} \quad (2.10)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Mobilitenin birimi m^2/Vs 'dir. Bu tanıma göre elektronların ve hollerin mobilitelerini ayrı ayrı yazmak mümkündür. Mobilite tanımına göre μ_e elektronların mobilitesi,

$$\mu_e = \frac{|\vec{v}_e|}{|\vec{E}|} = \frac{v_e}{E} \quad (2.11)$$

ve hollerin mobilitesi μ_h ,

$$\mu_h = \frac{|\vec{v}_h|}{|\vec{E}|} = \frac{v_h}{E} \quad (2.12)$$

bağıntısı ile verilir. (2.11) bağıntısındaki \vec{v}_e elektronların hızını, (2.12) bağıntısındaki \vec{v}_h ise hollerin hızını göstermektedir. Toplam mobilite, elektronların ve hollerin mobiliteleri toplamına eşit olduğuna göre,

$$\mu = \mu_e + \mu_h = \frac{v_e}{E} + \frac{v_h}{E} \quad (2.13)$$

bağıntısına eşit olur (Kittel, 1996).

Bir yarıiletkene elektrik alan uygulandığında, serbest yükler belirli hızlarla sürüklenmeye başlar. Böylece yarıiletkende bir sürüklenme akımı oluşur. Yarıiletkene uygulanan elektrik alan \vec{E} ise; \vec{J} ile ifade edilen toplam akım yoğunluğu, elektronların oluşturduğu \vec{J}_e akım yoğunluğu ile hollerin oluşturduğu \vec{J}_h akım yoğunluğunun toplamıdır. Buna göre toplam akım yoğunluğu,

$$\vec{J} = \vec{J}_e + \vec{J}_h = -qn\vec{v}_e + qp\vec{v}_h \quad (2.14)$$

bağıntısı ile verilir. Burada; $-q$, n ve \vec{v}_e sırasıyla, elektronların yükleri, yoğunlukları ve sürüklenme hızlarıdır. Benzer şekilde; q , p ve \vec{v}_h de, sırasıyla hollerin yükleri, yoğunlukları ve sürüklenme hızlarıdır.

Elektronların ve hollerin mobilite bağıntılarından yola çıkılarak, elektronların ve hollerin sürüklenme hızlarını veren bağıntılara ulaşmak mümkündür. Buna göre, elektronların sürüklenme hızı,

$$\mu_e = \frac{v_e}{E} \Rightarrow v_e = \mu_e E \quad (2.15)$$

ve hollerin sürüklenme hızı,

(2.16)

$$\mu_h = \frac{V_h}{E} \Rightarrow v_h = \mu_h E$$

bağıntısı ile verilir. (2.15) ve (2.16) bağıntıları, (2.14) bağıntısında \vec{v}_e ve \vec{v}_h yerine konulursa akım yoğunluğu,

$$\vec{J} = \vec{J}_e + \vec{J}_h = q(n\mu_e + p\mu_h)\vec{E} \quad (2.17)$$

bağıntısına ile ifade edilir. Bu bağıntı, (2.9) bağıntısında J yerine konulursa, yarıiletkenin iletkenliği için,

$$\sigma = q(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2.18)$$

bağıntısına ulaşılır. Görüldüğü gibi bir yarıiletkenin iletkenliği, yük taşıyıcılarının yoğunluklarına ve mobilitelerine bağlıdır.

Has bir yarıiletkende, elektron yoğunluğu hol yoğunluğuna eşit olduğundan elektriksel iletkenlik σ_i ,

$$\sigma_i = qn_i(\mu_e + \mu_h) \quad (2.19)$$

bağıntısına eşit olur. Has bir yarıiletkendeki toplam taşıyıcı yoğunluğu n_i , sıcaklığın fonksiyonu olarak;

$$n_i(T) = 2 \left(\frac{2\pi(\mu_e^* + \mu_h^*)^{3/2} kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (2.20)$$

bağıntısı ile verilir. Burada, μ_e^* ve μ_h^* sırasıyla; elektronların ve hollerin etkin kütleleri, k Boltzmann sabiti, h Planck sabiti, E_g ise yarıiletkenin yasak enerji aralığıdır. (2.20) bağıntısı, (2.19) bağıntısında n_i yerine yazıldığında has yarıiletkenlerin iletkenliği

için,

$$\sigma_i = 2q(\mu_e + \mu_h) \cdot \left(\frac{2\pi(\mu_e^* + \mu_h^*)^{1/2} kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (2.21)$$

bağıntısı elde edilir (Kittel, 1996; Erol, 2001). (2.18) bağıntısına göre bir yarıiletkenin özdirenci ρ için,

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_e + p\mu_h)} \quad (2.22)$$

bağıntısı bulunur. Yarıiletken n-tipi ise elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan çok çok büyük olacağından ($n \gg p$), (2.22) bağıntısındaki $p\mu_h$ ifadesi ihmal edilir. Böylece n-tipi bir yarıiletken için özdirenç bağıntısı,

$$\rho = \frac{1}{qn\mu_e} \quad (2.23)$$

ile ifade edilir. p-tipi yarıiletkenlerde ise hol yoğunluğu elektron yoğunluğundan çok çok büyük olacağından ($p \gg n$), (2.22) bağıntısındaki $n\mu_e$ ifadesi ihmal edilir. Bu durumda da p-tipi bir yarıiletken için özdirenç bağıntısı,

$$\rho = \frac{1}{qn\mu_h} \quad (2.24)$$

olarak verilir (Kittel, 1996; Erol, 2001).

2.6. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri

Yarıiletkenlerin optik özellikleri bilindiğinde, bazı elektriksel davranışları da anlaşılabilir. Çünkü optik özelliklerinden yararlanılarak, yarıiletkenlerin bant yapıları incelenebilir ve yasak bant aralıkları belirlenebilir. Bunun için kullanılan en kolay

yöntemlerden biri, maddelerin temel absorpsiyon spektrumlarının incelenmesine dayanan optik absorpsiyon yöntemidir. Bu yöntem optik yöntem olarak da bilinir.

Absorpsiyon, bir maddeye gelen elektromagnetik dalga ile maddedeki yüklerin etkileşmeleri sonucu ortaya çıkan enerji kaybı olarak tanımlanır. Bu yeterli enerjiye sahip bir fotonun, bir elektronu alçak enerji düzeyinden yüksek enerji düzeylerinden birine uyarması şeklinde bir etkileşme de olabilir.

Geniş bir dalga boyu aralığındaki dalga boyları ile absorpsiyon ölçümleri yapıldığında, ortamdan geçen bu ışınların bağıl şiddetleri ile dalga boyları arasındaki bağıntıya absorpsiyon spektrumu denir. Her maddenin absorplayacağı dalga boyları, diğer maddelerden farklı olacaktır. Bu nedenle absorpsiyon spektrumları kullanılarak; yarıiletken maddelerin bant yapıları incelenip, yasak enerji aralıkları hesaplanabilir. Optik yöntem olarak bilinen bu yöntemle kristal bant yapıları hakkında bilgi edinilir

Bir maddenin üzerine ışık düşürüldüğünde; ışığın bir kısmı maddeden geçer, bir kısmı da yansır. Maddeden geçen ve yansıyan ışınların absorplanmasından yararlanılarak yapılan ölçümler, absorpsiyon spektrometrisinin temelini oluşturur (Kul, 1996; Akyüz, 2000).

Kalınlığı x olan bir materyal üzerine ışık demeti gönderildiğinde, materyale gelen ışın şiddeti I_1 ile materyali geçen ışın şiddeti I arasında,

$$I = I_1 e^{-\alpha x} \quad (2.25)$$

bağıntısı vardır. Burada α lineer absorpsiyon katsayısını ifade etmektedir. Materyalin yapısal özelliklerine ve materyale gelen ışığın dalgaboyuna bağlı olarak değişir. Materyali geçen ışığın şiddeti, α ile ters orantılıdır.

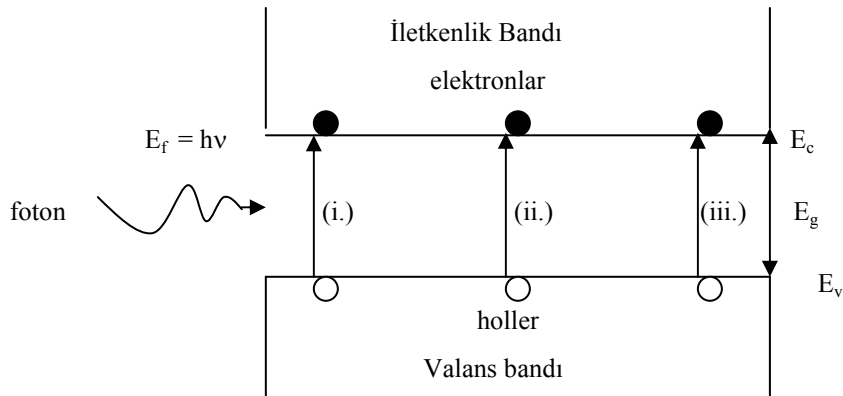
2.6.1. Yarıiletkenlerde gerçekleşen temel geçişler

Yarıiletken bir materyal üzerine ışık gönderildiğinde; valans bandındaki elektronlar gelen fotonları absorplayarak, iletkenlik bandına ya da yasak enerji aralığındaki uygun enerji seviyelerine geçerler. Böylece yarıiletkende elektron-hol

çiftleri oluşur. Yarıiletken üzerine gelen fotonun E_f ile ifade edilen enerjisi, Planck sabiti h ile fotonun ν değerindeki frekansının çarpımına eşittir. Buna göre, yarıiletken üzerine gelen fotonun enerjisi,

$$E_f = h\nu \quad (2.26)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Valans bandındaki elektronların fotonları absorplayarak, yarıiletken içerisinde daha yüksek enerji seviyelerine geçişleri; gelen fotonun enerjisine bağlı olarak üç şekilde gerçekleşir. Şekil 2.13. 'de gösterilen bu geçişler şu şekilde sıralanır:



Şekil 2.13. Yarıiletkenlerde gerçekleşen temel geçişlerin şematik gösterimi.

1. Yarıiletken materyal üzerine gelen fotonun enerjisi $h\nu$, yarıiletkenin yasak enerji aralığı E_g 'ye eşit ise ($h\nu = E_g$); valans bandındaki bir elektron Şekil 2.13(i.). 'de gösterilen biçimde iletkenlik bandına geçer. Bu geçişle valans bandında bir boşluk oluşturur. Böylece yarıiletkende bir elektron-hol çifti meydana gelir.
2. Yarıiletken materyal üzerine gelen fotonun enerjisi $h\nu$, yarıiletkenin yasak enerji aralığı E_g 'den büyük ise ($h\nu > E_g$); valans bandındaki bir elektron Şekil 2.13(ii.). 'de gösterilen biçimde iletkenlik bandına geçer. Bu geçişle

valans bandında bir boşluk oluşturur. Böylece yarıiletkende bir elektron-hol çifti meydana gelir. $(hv - E_g)$ değerindeki fazla enerji ısı için harcanır.

3. Yarıiletken materyal üzerine gelen fotonun enerjisi hv , yarıiletkenin yasak enerji aralığı E_g 'den küçük ise ($hv < E_g$); fiziksel kusurlara ve yasak enerji aralığındaki kimyasal kusurlara bağlı olarak, uygun enerji durumları olduğunda foton absorpsiyonu gerçekleşebilir. Böyle bir durumda; valans bandındaki bir elektron; Şekil 2.13(iii). 'de gösterilen biçimde, absorpladığı fotonun enerjisine göre yasak bant içerisinde oluşmuş uygun bir enerji seviyesine geçer.

2.6.2. Yarıiletkenlerde gerçekleşen absorpsiyon olayları

Bir materyal üzerine elektromagnetik dalga gönderildiğinde; bu dalganın bir kısmı, materyalin yükleriyle etkileşimi sonucu absorplanır. Kristal kusurları dikkate alınmazsa, yarıiletkenlerin elektromagnetik bir dalgayla etkileşimlerinin sonucunda gerçekleşen absorpsiyon olayları dört tanedir.

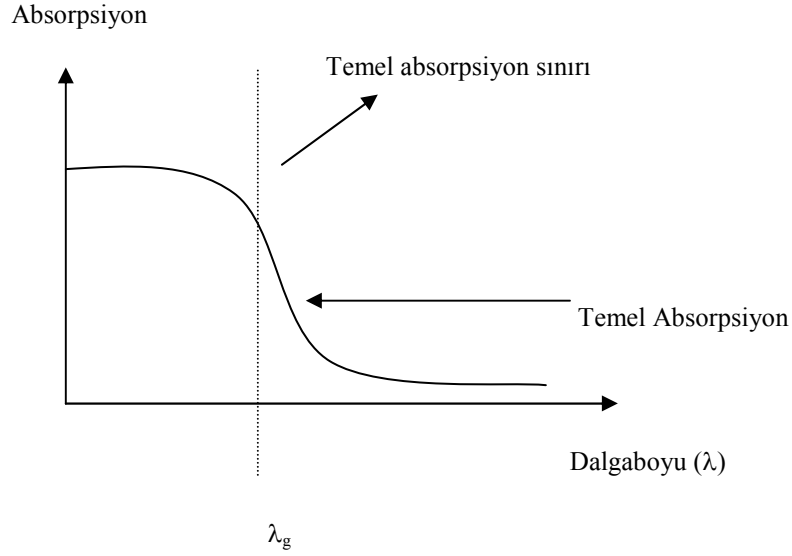
2.6.2.1. Temel absorpsiyon

Valans bandında bulunan bir elektronun yarıiletken üzerine gelen fotonu absorplayarak, iletkenlik bandına geçmesi olayı temel absorpsiyon olarak tanımlanır. Temel absorpsiyon olayı ancak; yarıiletken üzerine gelen fotonun enerjisi hv 'nün, yarıiletkenin yasak enerji aralığı E_g 'ye eşit veya ondan büyük olduğu durumlarda ($hv \geq E_g$) gerçekleşebilir. (2.26) bağıntısına göre, temel absorpsiyon olayının gerçekleşmesi için yarıiletkene gelen fotonun sahip olması gereken dalga boyu λ_g ,

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \quad (2.27)$$

bağıntısıyla verilir. Burada h Planck sabitini, c ışık hızını ve E_g de yarıiletkenin yasak enerji aralığını ifade etmektedir. Yarıiletkenlerin temel absorpsiyon spektrumu

Şekil 2.14. 'deki gibidir.



Şekil 2.14. Yarıiletken bir materyalin temel absorpsiyon spektrumu.

Bir yarıiletkenin temel absorpsiyon spektrumunda, λ_g değerinde çok hızlı bir artış olur. Yarıiletken daha küçük dalga boylarında kuvvetli bir soğurucu, daha büyük dalga boylarında ise geçirgen olur. Bu iki bölgeyi ayıran sınıra, temel absorpsiyon sınırı denir

2.6.2.2. Serbest yük taşıyıcılarının absorpsiyonu

Yarıiletken materyal üzerine yasak enerji aralığı E_g 'den daha küçük bir $h\nu$ enerjisine sahip foton geldiğinde ($h\nu < E_g$); valans bandında bulunan bir hol veya iletim bandında bulunan bir elektron bu fotonu absorplayarak, aynı banttaki daha yüksek enerji seviyelerine geçer. Yarıiletkenlerdeki serbest yük taşıyıcılarının foton absorplayarak bu şekilde uyarılması, serbest yük taşıyıcılarının absorpsiyonu olarak tanımlanır.

2.6.2.3. Eksitonların absorpsiyonu

Aralarındaki elektriksel Coulomb etkileşmesiyle bağlı duruma geçen

elektron-hol çiftine eksiton denir. Eksitonların bulunduğu enerji seviyesi, iletim bandının hemen altında yer alır. Eksitonların absorpsiyonu olayının gerçekleşmesini sağlayan fotonun enerjisi,

$$h\nu = E_g - E_{\text{eks}} \quad (2.28)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada E_{eks} , eksitonların bağlanma enerjilerini gösterir.

2.6.2.4. Katkı atomlarının absorpsiyonu

Katkılı bir yarıiletkene yasak enerji aralığı E_g 'den daha küçük bir $h\nu$ enerjisine sahip foton geldiğinde ($h\nu < E_g$); donör veya akseptör atomları bu fotonu absorplar. Bu olay, katkı atomlarının absorpsiyonu olarak tanımlanır.

2.6.3. Yarıiletkenlerde gerçekleşen bant geçişleri

Yarıiletken materyal üzerine yasak enerji aralığı E_g 'den daha büyük bir $h\nu$ enerjisine sahip foton geldiğinde ($h\nu > E_g$); valans bandında bulunan bir elektron bu fotonu absorplayarak, iletkenlik bandına geçer. Bu geçiş direkt veya indirekt olmak üzere iki şekilde olabilir.

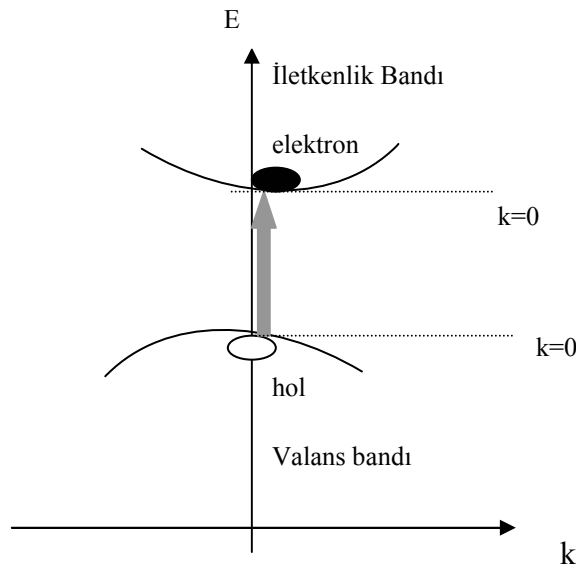
2.6.3.1. Direkt bant geçişi

Valans bandında bulunan bir elektronun dalga vektöründe ve momentumunda bir değişiklik olmaksızın; iletim bandına geçmesi durumu direkt bant geçişi olarak tanımlanır. Yarıiletkenlerdeki direkt bant geçişi Şekil 2.15. 'de gösterilmiştir. Yarıiletkenin iletim bandının minimumu ile valans bandının maksimumu; enerji momentum uzayında aynı \vec{k} değerinde iseler ($\Delta\vec{k} = \vec{0}$), bant geçişleri direkt olur. Direkt bant geçişlerinde elektronun dalga vektörü değişmez ve hem enerjisi hem de momentumu korunur. Momentumun korunumu,

(2.29)

$$\hbar\vec{k}_e + \hbar\vec{k}_h = \vec{0}$$

bağıntısıyla ifade edilir $\left(\hbar = \frac{h}{2\pi}\right)$. Burada \vec{k}_e ve \vec{k}_h sırasıyla elektrona ve hole eşlik eden dalga vektörlerini, $\hbar\vec{k}_e$ ve $\hbar\vec{k}_h$ ise; sırasıyla elektronların ve hollerin momentumlarını gösterir.



Şekil 2.15. Yarıiletkenlerde gerçekleşen direkt bant geçişinin şematik gösterimi.

Eksiton oluşumları ihmal edildiğinde; direkt bant geçişleri için yarıiletkene gelen fotonun $h\nu$ enerjisi ve yarıiletkenin α lineer absorpsiyon katsayısı ile ilgili olarak,

$$n_k \alpha h\nu \approx (h\nu - E_g)^m \quad (2.30)$$

bağıntısı verilir. Burada; α ve $h\nu$ dışında kalan n_k kırılma indisini, E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığını ifade eder. m ise, izinli geçişler için $1/2$, yasak geçişler için $3/2$ değerlerini alabilen bir sabittir.

2.6.3.2. İndirekt bant geçişi

İletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu; enerji momentum uzayında aynı \vec{k} değerinde değillerse ($\Delta\vec{k} \neq \vec{0}$), elektronların bant geçişleri indirekt olur. Bu durumda yarıiletkenin valans bandındaki bir elektronun momentumunun korunarak, iletkenlik bandına geçiş yapabilmesi için fonon soğurulması ya da fonon salınması gerekir. Fonon kristaldeki örgü noktalarının titreşimidir (Kittel, 1996; Erol, 2001). İndirekt geçişlerde momentumun korunumu,

$$\hbar\vec{k} = \hbar\vec{k}_c \pm \hbar\vec{k}_{fn} \quad (2.31)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada \vec{k} ve \vec{k}_{fn} sırasıyla fotona ve fonona eşlik eden dalga vektörlerini; \vec{k}_c de, k uzayında valans bandının maksimumuyla iletkenlik bandının minimumu arasındaki farkı gösterir (Kittel, 1996). İndirekt geçişlerde enerjinin korunumu,

$$E_{ft} \pm E_{fn} = E_g \quad (2.32)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada salınan ya da soğurulan fononun enerjisi E_{fn} ,

$$E_{fn} = h\nu_{fn} \quad (2.33)$$

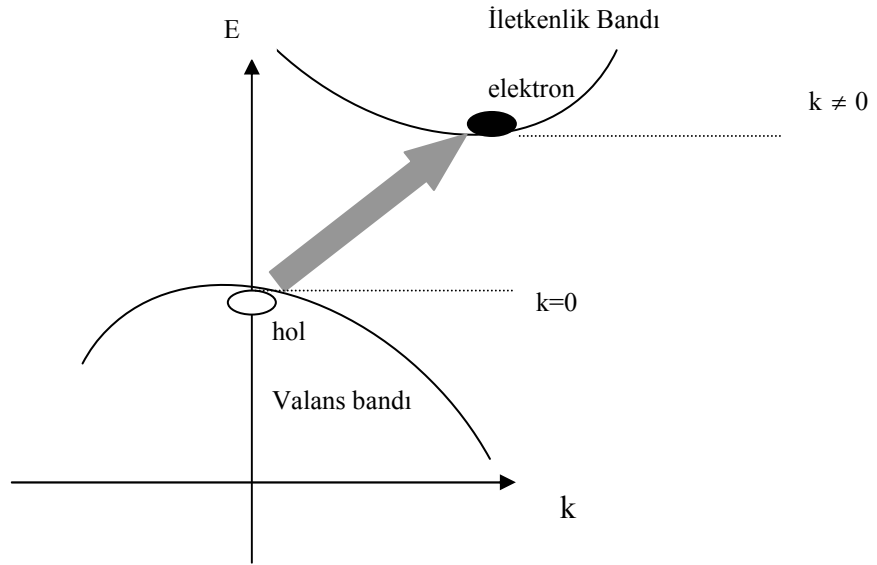
ve yarıiletkene gelen fotonun enerjisi E_{ft} ,

$$E_{ft} = h\nu \quad (2.34)$$

bağıntıları ile tanımlanırsa, indirekt bant geçişlerinde enerjinin korunumu bağıntısı,

$$E_{fn} = E_g \pm h\nu_{fn} \quad (2.35)$$

ile ifade edilir. (+) işareti fonon soğurularak, (-) işareti ise fonon salınarak yapılan geçişleri gösterir. Yarıiletkenlerdeki indirekt bant geçişi Şekil 2.16. 'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Yarıiletkenlerde gerçekleşen indirekt bant geçişinin şematik gösterimi.

Yarıiletkenlerde meydana gelen indirekt bant geçişleri için yarıiletkene gelen fotonun $h\nu$ enerjisi ve yarıiletkenin α lineer absorpsiyon katsayısı ile ilgili olarak,

$$n_k \alpha h\nu \approx \frac{(h\nu - E_g + h\nu_{fn})^m}{\exp(h\nu_{fn}/kT) - 1} + \frac{(h\nu - E_g - h\nu_{fn})^m}{1 - \exp(-h\nu_{fn}/kT)} \quad (2.36)$$

bağıntısı verilir. Toplama durumundaki ifadede ilk terim fonon soğurulmasını, ikinci terim fonon salınmasını göstermektedir. Buradaki m ise; izinli geçişler için 2, yasak geçişler için 3 değerlerini alan bir sabittir.

2.7. Yarıiletkenlerde Gerçekleşen Birleşme Olayları

Bir yarıiletken üzerine uygun dalga boyunda ışık düştüğünde; yarıiletkende elektron-hol çiftleri oluşarak, yük taşıyıcı konsantrasyonları artar. Yarıiletken üzerine gelen ışık kaldırıldığında; foton enerjisi etkisiyle oluşan elektron-hol çiftleri, birleşme (recombination) yoluyla ortadan kalkarlar. Birleşme olayı sonucu yük taşıyıcı konsantrasyonları, karanlıktaki denge durumlarına geri dönerler. Yarıiletkenlerde görülen 3 birleşme olayı aynı anda birlikte olabilir. Bunlar şöyle sıralanır:

1. Işığıcı birleşme: Işığıcı birleşme, absorpsiyonun (soğurma) tam tersidir. Bir elektronun bulunduğu enerji düzeyinden daha aşağıdaki bir enerji düzeyine, ışınım yayınlamaya dönmesi yoluyla gerçekleşen birleşme olayıdır (Engin, 1995).
2. Auger birleşmesi: Auger birleşmesinde bir elektron bir holle birleşerek; aşırı enerjisini, valans veya iletim bandındaki diğer bir elektrona ışınım vermeksizin aktarır. İkinci elektron da, ilk enerji düzeyine fononlar yayarak döner (Engin, 1995).
3. Tuzaklar yoluyla birleşme: Yarıiletkenlerdeki safsızlıklar ve bozukluklar, yasak enerji aralığında izinli enerji düzeylerinin oluşmasına sebep olurlar. Elektronlarla hollerin iki adımlı birleşmesinde çok etkili olan bu enerji düzeylerine tuzak denir. Tuzaklar yoluyla birleşmede; elektron önce iletim bandından yasak enerji aralığındaki bir tuzaka, buradan da valans bandına geçer. Valans bandına ulaştığında bir holle birleşir (Engin, 1995).

2.8 .Yarıiletken Alet Fiziğinde Kullanılan Temel Bağıntılar

Güneş pillerinin ideal özelliklerinin belirlenmesi için yarıiletken maddelerin özelliklerinden başka, yarıiletken alet fiziğinde kullanılan bazı temel bağıntılarının bilinmesi gerekir. Bu bağıntılar; güneş pilleri dahil, birçok yarıiletken aletin temel özelliklerinin ve çalışma ilkelerinin belirlenmesinde yardımcı olur. Yarıiletken alet fiziğinde kullanılan temel bağıntılar şunlardır:

2.8.1. Poisson bağıntısı

Herhangi bir yarıiletkenin sahip olduğu yük yoğunluğu ρ_q ve maddenin geçirgenliği ϵ ise, enerjisinin boyutlarına bağlı değişimi Poisson bağıntısından bulunabilir. Buna göre, bir boyutta poisson bağıntısı,

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho_q}{\epsilon} \quad (2.37)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada ρ_q yük yoğunluğu, ϵ kullanılan yarıiletken maddenin geçirgenliğidir (permittivity). Bir yarıiletkendeki yük yoğunluğu ρ_q ise,

$$\rho_q = q(p - n + N_D^+ + N_A^-) \quad (2.38)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Burada q elektronun yüküdür. Bundan başka, sırasıyla p , n , N_D^+ ve N_A^- , hol yoğunluğu, elektron yoğunluğu, donör atomları yoğunluğu ve akseptör atomları yoğunluğudur. Başka safsızlıklar ve bozukluklar da yük depolama merkezleri gibi hareket ettiklerinde, (2.38) bağıntısına katılırlar. Yine de sözü edilen bu yüklerin katkısı çok azdır. Bu durumda donör atomları ve akseptör atomlarının yoğunlukları için,

$$N_D^+ \approx N_D \quad (2.39)$$

$$N_A^- \approx N_A \quad (2.40)$$

bağıntıları yazılabilir (Engin, 1995).

2.8.2. Akım yoğunluğu bağıntıları

Yarıiletkenlerde meydana gelen akıma, elektronlar ve holler hem difüzyon hem de sürüklenme yoluyla katılırlar. Elektronlardan ve hollerden ileri gelen toplam akım

yoğunlukları (bir boyutta) sırasıyla,

$$J_e = q\mu_e nE + qD_e \frac{dn}{dx} \quad (2.41)$$

$$J_h = q\mu_h pE + qD_h \frac{dp}{dx} \quad (2.42)$$

bağıntılarıyla ifade edilir. Bu bağıntılarda, D_e ve D_h sırasıyla, elektronlar ve holler için difüzyon sabitleridir ve difüzyon sabitlerini veren Einstein eşitleri ile şu şekilde tanımlanırlar (Engin, 1995):

$$D_e = \frac{kT}{q} \mu_e \quad (2.43)$$

$$D_h = \frac{kT}{q} \mu_h \quad (2.44)$$

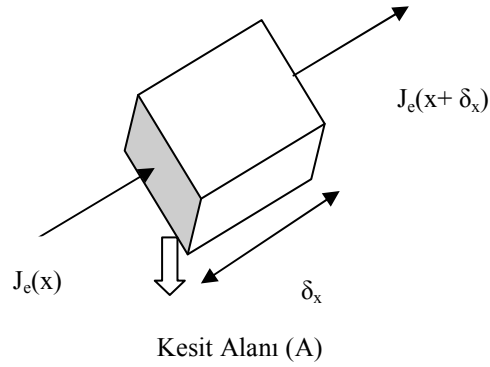
2.8.3. Süreklilik bağıntıları

Süreklilik bağıntıları, bir yarıiletkende elektron-hol çifti oluşum hızı ile birleşerek yok olma hızı arasında ilişki kurarak, bu yük taşıyıcılarının meydana getirdikleri akımların sürekliliğini açıklar.

Bir yarıiletkenden Şekil 2.17. 'de gösterildiği gibi δ_x uzunluğunda bir hacim elemanı alınır; bu hacim elemanının elektron konsantrasyonundaki birim zamanda meydana gelen değişim,

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= \frac{A}{q} [-J_e(x)] - \frac{A}{q} [-J_e(x + \delta_x)] + A\delta_x G - A\delta_x U \\ &= \frac{A}{q} \frac{dJ_e}{dx} \delta_x + A\delta_x (G - U) \end{aligned} \quad (2.45)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada A yarıiletkenin kesit alanı, G ışık gibi dış etkenler tarafından yük taşıyıcı yaratılma hızı, U ise yük taşıyıcılarının birleşerek yok olma hızıdır.



Şekil 2.17. Herhangi bir yarıiletkenin üzerinden alınmış δ_x uzunluğundaki hacim elemanının görünümü.

Kararlı durumda $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$ olduğu için (2.45) bağıntısı elektronlar için,

$$\frac{I}{q} \frac{dJ_e}{dx} = U - G \quad (2.46)$$

holler için,

$$\frac{I}{q} \frac{dJ_h}{dx} = U - G \quad (2.47)$$

şeklinde tanımlanan süreklilik bağıntıları yazılabilir (Engin, 1995).

3. FOTOVOLTAİK DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

3.1. Giriş

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmenin çevre dostu bir şekli olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu; uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuştur. Bu nedenle kamuoyunda hep laboratuarda kalan bir çalışma olarak varlığını sürdürmüştür. Ancak son yirmi yılda; dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamıştır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik uygulamalar konusundaki teknolojik gelişmeler, güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi; maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir.

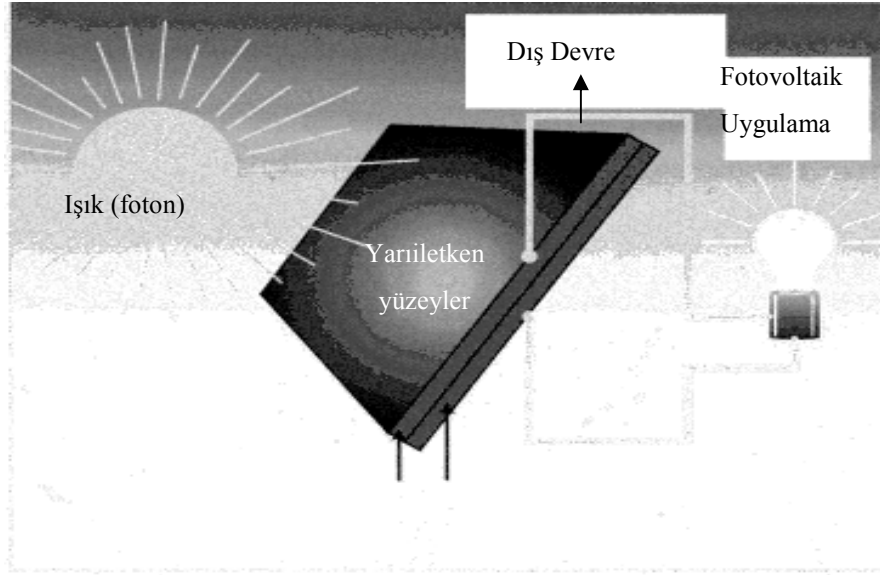
Yakın geçmişe kadar, alışlagelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında; çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik dönüşüm sistemleri, yakın gelecekte enerji üretimine büyük katkı sağlayacak sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek sosyal maliyet göz önüne alındığında; fotovoltaik sistemlerin fosile dayalı sistemlerden daha ekonomik olduğu söylenebilir (Oktik, 2001).

3.1. 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 ışınımının doğrudan elektrik enerjisine (DC) dönüştürebilen bir teknolojidir.

Şematik gösterimi Şekil 3.1. 'de yer alan fotovoltaik dönüşüm sistemleri için fotovoltaik piller ve güneş pilleri terimleri de kullanılmaktadır. Bununla birlikte her türlü ışık altında elektrik üretebilirler. Enerjinin korunumu yasasına uygun olarak, ışık

enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güneş pilleri; fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar. Yarıiletken maddeden yapılmış yüzeyleri üzerine ışık düştüğü zaman, uçları arasında potansiyel farkı oluşur. Bir dış devreye bağlanırlarsa devreden akım geçer.



Şekil 3.1. Fotovoltaik dönüşüm sisteminin şematik gösterimi.

Fotovoltaj olayı 1839 yılından beri bilinmesine rağmen, gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaj diyotları ilk kez 1954 yılında elde edilmiştir. Bu verime ulaşmak, p-n eklemi oluşturulması ile mümkün olmuştur. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerle oluşturulan ilk p-n ekleminde, CdS (Kadmiyum sülfür) ve Si (Silisyum) kullanılmıştır. Daha sonra Silisyum p-n eklemi kullanılarak %15 verim elde edilmiştir.

Fotovoltaj etki, ışık bir yarıiletken tarafından soğurulduğunda oluşur. Fotonların enerjisi, yarıiletkenin valans bandındaki elektronlara aktarılır. Valans bandındaki elektronların iletim bandına yükseltilmesi sonucunda elektron-hol çifti oluşur. Sadece yarıiletkenin yasak bant enerji aralığını aşan enerjilere sahip fotonlar bu olayda etkili olabilir. Yarıiletken bant aralığı küçükse; fotovoltaj sistemin uçları arasında oluşan potansiyel farkı küçük, dış devre akımı büyük olur (Serway, 1996).

Yalıtılmış yarıiletkende uyarılan elektron, esas olarak valans bandındaki holle birleşir ve fazla enerjisini foton (fotoemisyon) ya da fononlar (ısı) olarak yayımlar. Bundan dolayı kullanılabilir düzeyde bir elektrik enerjisi elde edilemez ve fotovoltaik pilin verimi düşük olur. Foton enerjisini kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürebilmek için fotovoltaik sistemde bir yük ayırıcı sistemin bulunması gerekir (Serway, 1996). Bu yüzden ışığı soğuran yarıiletken yüzeyler üzerinde p-n eklemleri oluşturulur.

3.3. p-n Eklemleri

p-n eklemleri, tüm yarı iletken düzeneklerin (diyot, transistor, FET, güneş pili vs.) temel yapısıdır. Güneş pillerinde oluşturulan p-n eklemlerinde, p-tipi ve n-tipi malzemelerin birleştiği yüzeyler büyük tutulmuştur. Bu arakesitlere düşen fotonların enerjilerinin bir kısmı, yarıiletkendeki serbest elektronları hareket ettirir. Bu sayede elektrik akımı üretilmiş olur (Batman, 2001).

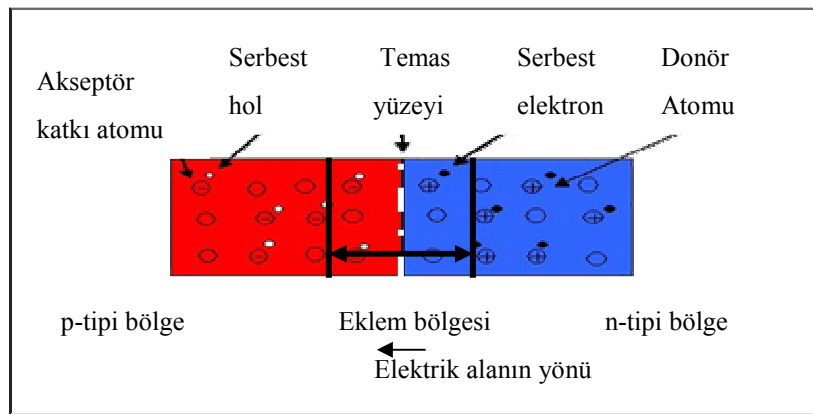
Saf yarıiletkenlerin; akseptör (alıcı) atomlarıyla katkılanması sonucu p-tipi yarıiletkenler, donör (verici) atomlarıyla katkılanması sonucu n-tipi yarıiletkenler elde edilir. p-n eklemi teorik olarak p-tipi bir yarıiletkenle n-tipi bir yarıiletkenin birleştirilmesinden oluşur. Fakat p-tipi ve n-tipi yarıiletken maddelerin ayrı ayrı üretilip, sonra bunların birbirine yapıştırılmasıyla elde edilemez. p-n eklemi, kristalin büyütülmesi sırasında p-tipi ve n-tipi bölgeleri arasında oluşturulur. Basit bir p-n eklemi, uygun şartlar altında n-tipi bir yarıiletken içerisinde oluşturulacak p-tipi bir bölgeyle veya p-tipi bir yarıiletken içerisinde oluşturulacak n-tipi bir bölgeyle elde edilir (Köse,1986).

p-n eklemi, bir yarıiletkenin iletkenliğinin bir tipten başka bir tipe değiştiği bölgedir (Oral, 1979). p-tipi bölge, n-tipi bölge ve bunların arasında yer alan p-n eklem bölgesi olmak üzere üç ayrı yarıiletken bölgesinden oluşur. p-n eklem bölgesinde hareketli yükler bulunmaz. Hareketli yük taşıyıcılarını azaltan bu bölgeye tüketim veya kıtlık (depletion region) bölgesi de denir.

p-n eklemine oluşturulmasından termal dengeye ulaşmaya kadar, eklem bölgesinde meydana gelen elektriksel olaylar p-n eklemine elektrostatikini oluşturur.

3.3.1. p-n eklemine elektrostatikini

p-n eklemine incelenirken, p-tipi bir yarıiletkenle n-tipi bir yarıiletkenin fiziksel olarak birbirine eklendiği düşünülür. p-n eklemine oluşturulduğunda; temas bölgesinin yakınındaki serbest yükler, yoğunluklarının küçük olduğu bölgeye doğru hareket ederler. n-tipi bölgesinin çoğunluk yük taşıyıcıları olan serbest elektronlar p-tipi bölgeye, p-tipi bölgesinin çoğunluk yük taşıyıcıları olan serbest holler n-tipi bölgeye geçerler. Bu geçişin sonucu olarak, eklemine her iki tarafındaki atomlar iyonlaşır. Eklemine p-tipi bölgesi negatif, n-tipi bölgesi pozitif yüklenir. Çoğunluk yük taşıyıcılarının yoğunluklarının az olduğu bölgeye doğru olan geçişleri, p-tipi ve n-tipi bölgeleri arasında termodinamik bir denge kuruluncaya kadar devam eder. Her iki bölgenin Fermi enerji seviyeleri aynı olduğunda yük geçişi durur ve eklem çevresinde bir elektrik alan oluşur. Bu elektrik alanın yönü, Şekil 3.2. 'de görüldüğü gibi n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru olurken, büyüklüğü kullanılan yarıiletkenlere ve bunların katkılanmalarına bağlı olarak değişir (Oktik, 2001).



Şekil 3.2. p-n eklemine elektrik alan oluşumunun gösterimi.

p-n eklemine oluşumu sırasında iyonlaşan donör ve akseptör atomları arasında kontak (temas veya difüzyon) potansiyeli denilen bir potansiyel farkı meydana gelir.

Kontak potansiyelini meydana getiren yükler sabit olduğu için kontak potansiyeli ortadan kaldırılamaz. Bu potansiyel farkı, p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye geçecek holler ve n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye geçecek elektronlar için bir potansiyel duvarı oluşturur. Bununla birlikte kontak potansiyel farkı, p-n eklemının her iki tarafındaki azınlık yük taşıyıcılarının karşı bölgeye geçmesini sağlar. Bu şekilde n-tipi bölgedeki holler p-tipi bölgeye, p-tipi bölgedeki elektronlar n-tipi bölgeye geçerek sürüklenme akımlarını oluştururlar.

p-n ekleminde çoğunluk yük taşıyıcılarının oluşturduğu difüzyon akımları, azınlık yük taşıyıcılarının oluşturduğu sürüklenme akımları ile dengelenir. p-n eklemindeki temas potansiyel farkı, bir voltaj kaynağı değildir. Bu yüzden p-n ekleminde bir akım geçmesini sağlayamaz. Eğer temas potansiyel farkı bir voltaj kaynağı olsaydı; p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye doğru bir akım geçerdi. Bunun için çoğunluk yük taşıyıcılarının bölgeler arasındaki potansiyel duvarını aşmaları gerekirdi. Fakat bu durumda p-n eklemının hiçbir zaman denge durumuna gelmemesi gerekirdi. Ayrıca herhangi bir akımın varlığında, p-n eklemi kısa devre yapıldığında; omik kontakın iç direncinden dolayı ısınması beklenir. Ne var ki yapılan deneylerde, omik kontakın ısınması sonucu devreden herhangi bir akımın geçmediği anlaşılmıştır. p-n eklemının kısa devre yapılması, yük taşıyıcılarına enerji sağlamaz; eklem dengede kalır ve p-n ekleminde herhangi bir akım geçmez (Oral, 1979; Kavcar, 2001).

Temas potansiyel farkı, enerji seviyelerinin n-tipi bölgede aşağıya doğru, p-tipi bölgede yukarıya doğru yer değiştirmelerine ve bunun sonucu olarak da, her iki bölgenin E_F Fermi enerji seviyelerinin eklem boyunca yatay ve sürekli olmalarına sebep olur. Termik denge durumundaki bir sistemde, Fermi enerji seviyeleri tüm sistem boyunca sabittir (Oral, 1979).

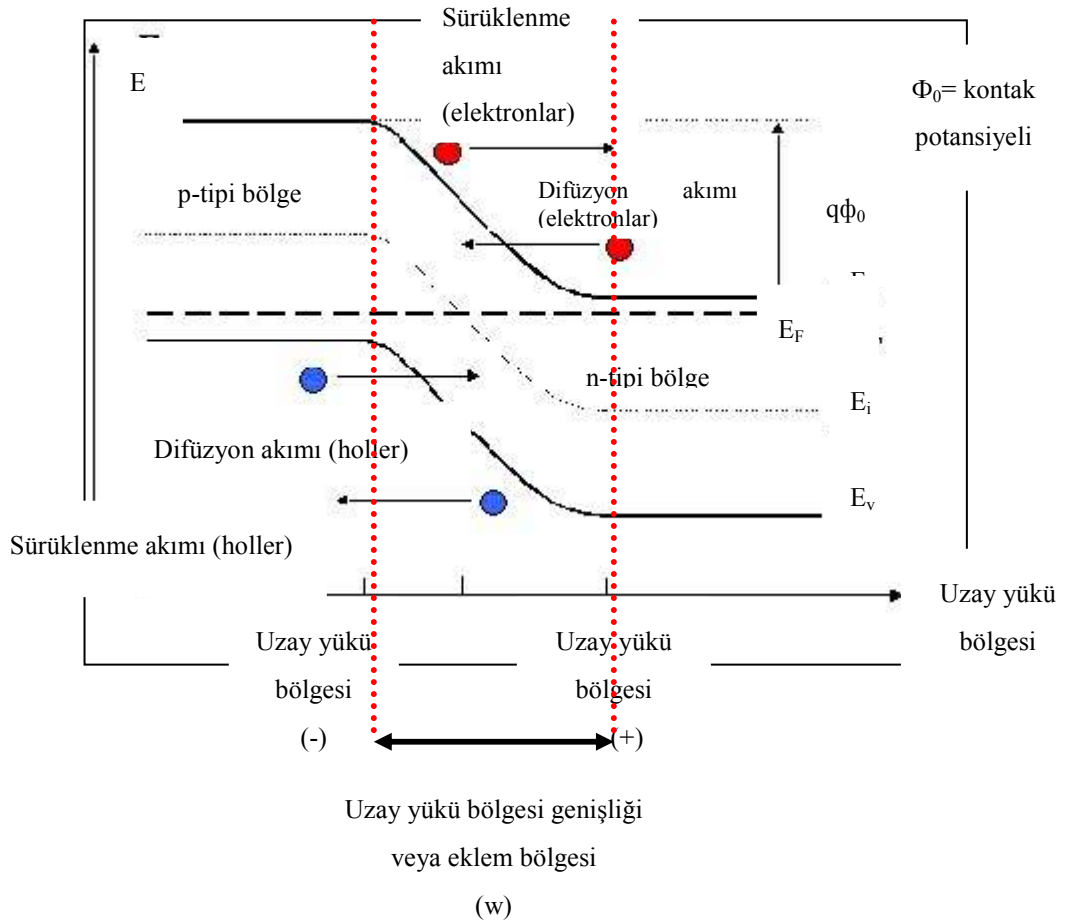
p-n eklemının n tarafındaki donör iyonları, difüzyon yoluyla p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye geçen hollerle, p tarafındaki akseptör iyonları da, difüzyon yoluyla n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye geçen elektronlarla birleşerek yok olurlar (Köse, 1986).

p-n eklemi termal dengeye ulaştığında, elektron ve hollerin oluşum akım yoğunlukları; birleşme akım yoğunluklarına eşit olur. Elektronların ve hollerin oluşum akım yoğunlukları J_{ng} ve J_{pg} , birleşme akım yoğunlukları J_{nr} ve J_{pr} ise bu eşitlikler,

$$J_{ng} = J_{nr} \quad (3.1)$$

$$J_{pg} = J_{pr} \quad (3.2)$$

bağıntıları ile ifade edilirler. J_{ng} akım yoğunluğu, p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye geçen elektronların sayısına; J_{pg} akım yoğunluğu da, n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye geçen hollerin sayısına bağlı olarak değişir. Termal denge durumundaki bir p-n eklemının enerji bant diyagramı Şekil 3.3. 'de gösterilmiştir. Burada $q\Phi_0$, eklemde oluşan potansiyel engelinin yüksekliğidir.



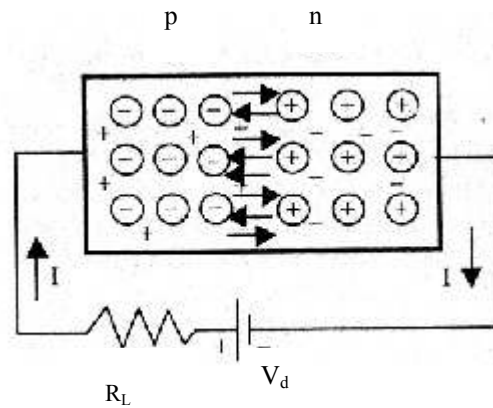
Şekil 3.3. Termal denge durumunda p-n eklemının enerji bant diyagramı.

3.3.2. p-n eklemelerinin iletkenliği

p-n eklemelerinin en belirgin özelliği, akımı yalnızca bir doğrultuda iletmesidir. Fakat çoğunluk yük taşıyıcılarının difüzyonu sonucu p-n eklem bölgesinde meydana gelen iç elektrik alan, hareketli yükler için bir potansiyel engeli oluşturur. Bu yüzden bir dış devre gerilimi uygulanarak, bu potansiyel engeli ortadan kaldırılır ve eklemelerden akım geçmesi sağlanır. p-n eklemelerine bir dış devre gerilimi uygulanması işlemine, p-n eklemelerinin beslenmesi ya da kutuplandırılması (polarizasyonu) denir. Bu işlem ileri yönde (doğru yönde) ve ters yönde olmak üzere iki şekilde yapılabilir.

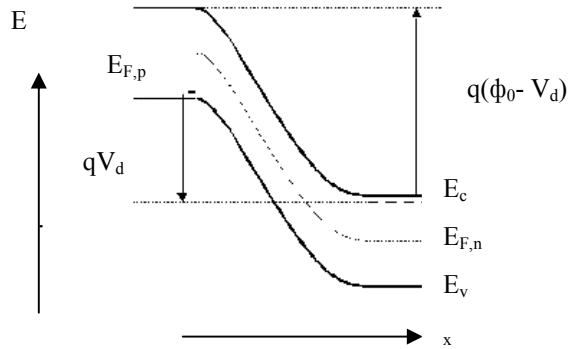
3.3.2.1. p-n eklemelerinin ileri yönde beslenmesi

p-n eklemelerinin ileri yönde beslenmesi, bir dış voltaj kaynağının pozitif kutbu eklemelerin p-bölgesine; negatif kutbu da n-bölgesine bağlanarak yapılır. Bu durumda dış voltaj kaynağının p-tipi bölgeye hol, n-tipi bölgeye elektron sağladığı düşünülür. Kaynak tarafından sağlanan bu yükler ile p-n eklem bölgesinde oluşan potansiyel engeli alçalır. Bunun sonucu olarak da, çoğunluk yük taşıyıcılarının difüzyonu kolaylaşır. Difüzyon akımıyla sürüklenme akım arasındaki denge bozulur. p-n eklemelerinden Şekil 3.4. 'de gösterilen yönde bir akım geçer.



Şekil 3.4. İleri yönde beslenen bir p-n eklemelerinin şematik gösterimi.

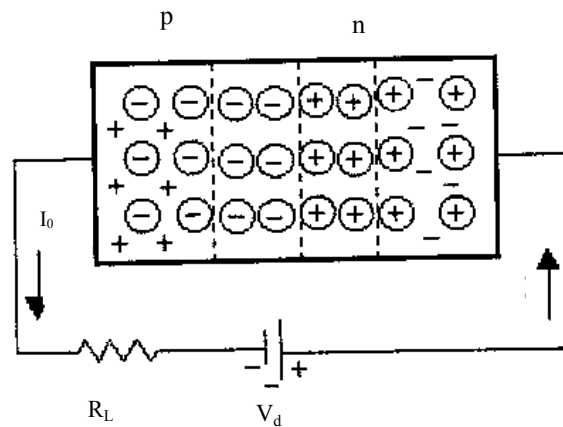
İleri doğru beslenen bir p-n ekleminin enerji bant diyagramı Şekil 3.5. 'de görüldüğü gibi olur. p-n ekleminin ileri doğru beslenmesi durumunda geçiş bölgesindeki potansiyel engeli, qV_d kadar azalır. Burada q elektronun yükü, V_d ise p-n eklemine bağlanan dış voltaj kaynağının uçları arasındaki potansiyel farkıdır.



Şekil 3.5. İleri yönde beslenen bir p-n ekleminin enerji bant diyagramı.

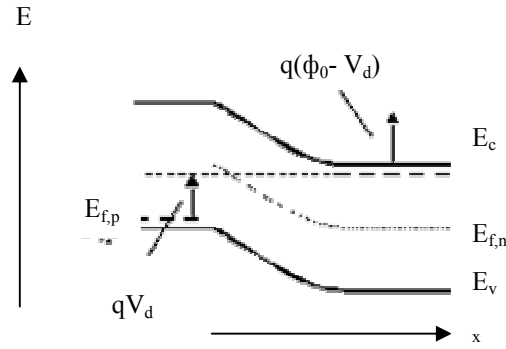
3.3.2.2. p-n ekleminin ters yönde beslenmesi

p-n ekleminin ters yönde beslenmesi Şekil 3.6. 'da gösterilen şekilde, bir dış voltaj kaynağının pozitif kutbu eklemin n-bölgesine; negatif kutbu da p-bölgesine bağlanarak yapılır.

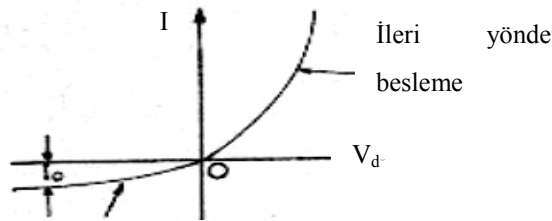


Şekil 3.6. Ters yönde beslenen bir p-n ekleminin şematik gösterimi.

Bu durumda geçiş bölgesindeki potansiyel engeli qV_d kadar artar. Çoğunluk yük taşıyıcılarının p-n ekleminden geçişi zorlaşırken, azınlık yük taşıyıcılarının geçişi kolaylaşır. Difüzyon akımıyla sürüklenme akımı arasındaki denge bozulur. Yarıiletken içindeki azınlık yük taşıyıcılarından dolayı, mikro amper seviyelerinde de olsa, bir akım geçer. Bu akıma ters akım ya da sızıntı akımı (leakage current) denir. I_0 ile gösterilir ve ters akım, p-n eklemine uygulanan ters besleme gerilimiyle ve sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişir. Ters yönde beslenen bir p-n eklemine enerji bant diyagramı Şekil 3.7. 'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.7. Ters yönde beslenen bir p-n eklemine enerji bant diyagramı.



Ters yönde besleme

Şekil 3.8. Ters yönde beslenen bir p-n eklemine I-V karakteristiği (Köse, 1986).

p-n eklem bölgesindeki potansiyel engeli; ters besleme durumunda çok yüksek, ileri yönde besleme durumunda ise çok küçük olur. Böyle bir sistemin akımı bir yöne doğru iletmesi daha kolay olur. Şu halde p-n eklemi diyot gibi davranır (Oral, 1979;

Kavcar,2001). Ters yönde beslenen bir p-n eklemine I-V karakteristiği Şekil 3.8. 'de görüldüğü gibi olur. Ters yönde beslenen p-n eklemine, bir V_d dış gerilimi uygulandığında p-n ekleminden geçen I akımı,

$$I = I_0 \left(e^{qV_d/kT} - 1 \right) \quad (3.3)$$

bağıntısı ile verilir. Burada I_0 ters akımın maksimum değeri (akımın doyma değeri); q elektron yükü, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

3.3.3. 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 fotovoltaj olayıdır. Uygun frekanstaki ışık altında kalan bir yarıiletkenin, iletkenliğinin ve elektriksel özelliklerinin değişmesine fotoiletkenlik olayı denir. Yarıiletken üzerine gelen ışığın foton enerjisi E_f , yarıiletkenin yasak bant genişliği E_g 'ye eşit veya ondan büyük olduğunda gözlenebilen bir olaydır. Buna göre, fotoiletkenliğin gerçekleşmesi için,

$$E_g \leq E_f = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.4)$$

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 (Köse, 1986). Işımların varlığını ortaya koymaya yarayan düzeneklerde (detektörlerde) fotoiletkenlikten yararlanılır (Oral, 1979; Kavcar, 2001).

p-n eklemde gözlenen optik olaylardan ikincisi fotovoltaj olayıdır. Işık herhangi bir yarıiletkende, foton enerjisi etkisiyle elektron-hol 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-hol çiftleri, tekrar birleşerek yok olurlar. Bu yüzden fotoakıma bir katkıları olmaz.

4. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PİLLERİ

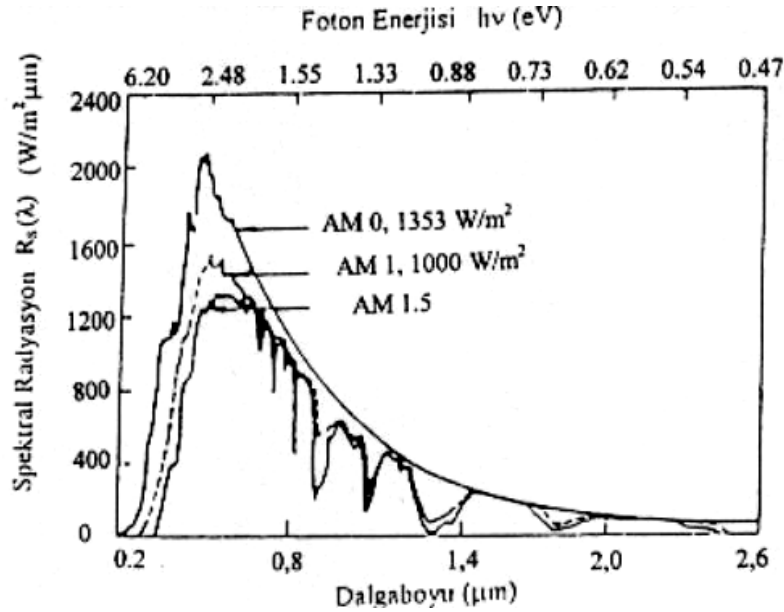
4.1. Giriş

Güneş, samanyolu galaksisinde yer alan orta büyüklükte bir yıldızdır. Küresel geometrideki bu yıldızın çapı yaklaşık 1.4 milyon km 'dir ve dünyadan 150 milyon km uzaklıkta bulunur. İç çevresinde çok yoğun gazlar vardır (Oktik, 2001). %75 Hidrojen 'den ve %24.9 Helyum 'dan oluşmaktadır (Bu oranlar kütleli oranlardır, atom sayılarına göre %92.1 hidrojen ve %7.8 helyum içerir. Geri kalan her şey (metaller), kütleli ancak %0.1 'ini oluşturur. Bu oran, çekirdekte hidrojenin helyuma dönüşmesi nedeniyle, zaman içinde helyumun çoğalması yönünde değişmektedir (Sökmen, 2003).

Dünya için sonsuz bir enerji kaynağı olarak kabul edilen güneşten bir yılda dünyaya aktarılan enerji, dünyadaki mevcut kömür rezervlerinin enerjisinin 150 katından fazladır. Bu temiz ve tükenmez enerji kaynağından olabildiğince yararlanma fikri; son yıllarda ülkemizin de içinde bulunduğu Güneş Kuşağı denilen ülkeler başta olmak üzere, bütün dünyada ilgi çekmiştir (Gümgüm, 1996).

4.2. Güneş ve Yapısı

Güneş ışığı, farklı frekanstaki elektromanyetik dalgaların bileşimidir. Güneş tarafından yayınlanan elektromanyetik spektrum; bir Angströmün kesirlerinden, yüzlerce metreye kadar uzanır (Oral, 1979; Kavcar, 2001). Güneş spektrumu üç ana bölgeden oluşur. 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 bölge görünür ışıktır. Görünür ışık, güneş ışınımı içinde %45 yer kaplar. Dalga boyu 0.7 μm 'den büyük olan infrared (kızılötesi) bölgenin payı ise %46 'dır ve güneşin ısıtma etkisi buradan kaynaklanır. Dünya atmosferi 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. Dünyanın yaşanabilir alanlarına gelen güneş enerjisi yere, zamana ve iklime bağlı olarak 3 ile 50 MJ/m².gün arasında değişir (Ültanır, 1996).



Şekil 4.1. Güneşten gelen ışınım enerjisinin, AM koşullarına göre spektral dağılımının gösterimi (Tercan, 2000).

Dünya yüzeyinin aldığı güneş enerjisinin miktarını atmosferik koşullar belirler. Atmosferik koşulların dünya yüzeyine ulaşan güneş ışığını etkileme oranı, Air Mass (AM) koşulu ile tanımlanır. Şekil 4.1. 'de, AM0 ve AM1 koşullarında güneşten yayınlanan enerjinin spektral dağılımını (birim yüzeye, birim dalgaboyunda güneşten ulaşan güç) gösteren eğriler görülmektedir. Üstteki eğri, dünya atmosferi dışındaki güneş ışığının (güneş sabitinin) spektral dağılımını gösterir. Bu AM0 koşulu olarak adlandırılır. Altındaki eğri ise güneş tam tepede iken dünya atmosferinden geçerek, yeryüzüne ulaşan güneş ışığının spektral dağılımını verir. Bu koşul ise AM1 koşulu olarak bilinir. Son olarak, güneşin dünyanın başucu (tepesi) ile 48⁰ 'lik açı yaptığı durumda yeryüzüne ulaşan güneş ışığının spektral dağılımı görülmektedir. Bu da AM1.5 koşuludur. 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 farklıdır (Tercan, 2000).

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

isimlendirilen yüklü parçacıkların bu akımı, güneşten çevreye saniyede 450 km hızla yayılır (Sökmen, 2003).

Güneş yaklaşık 4.5 milyar yaşındadır. Başlangıcından bu yana, çekirdeğindeki hidrojenin yarısını kullanmıştır. Rahatlıkla bir 5 milyar yıl daha enerji yaymaya devam edecektir. Bu süre içinde parlaklığı da iki kat artacaktır. Eninde sonunda hidrojen yakıtını tüketecek ve kendi boyutundaki her yıldız gibi, dünyayı da içine alacak bir kırmızı deve dönüşecektir. En sonunda ise kendi içine çökerek, bir beyaz cüce haline gelecektir (Sökmen, 2003).

4.3. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, ekolojik açıdan diğer bütün enerjilerin temelidir. Fosil yakıtlar, rüzgar, hidroelektrik, biyogaz, termik, dalga gibi diğer tüm enerji türleri Güneş enerjisinden türerler.

Güneş enerjisinin kaynağı güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlar sırasıyla,



tepkime denklemleriyle tanımlanır (Engin, 1995). Doğal bir füzyon reaktörü olan güneşte; her bir saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle karşılığı 386 milyon EJ (eksa joule) enerji açığa çıkmaktadır (Ültanır, 1996). Füzyon reaksiyonlarının gerçekleştiği çekirdek kısmında, sıcaklık yaklaşık 2×10^7 K olmakla birlikte, yüzey (fotosfer) sıcaklığı yaklaşık 6000 K 'dir. Bütün sıcak cisimler gibi güneş de, bir çok dalga boyunda elektromanyetik

ışınımlar yapar. Güneşin yayınladığı ışınlamaların spektrumu; yaklaşık 6000 K sıcaklığında bulunan bir kara cismin yayınladığı spektrum gibidir . Bu nedenle güneşin yayınladığı enerji, kara cisim ışımasını açıklamak için kullanılan fizik yasaları ile belirlenebilir (Engin, 1995).

4.3.1. Kara cisim ışıması ve güneşin yayınladığı enerji

Herhangi bir sıcaklıktaki cisim, termik radyasyon (ışınım) da denen bir radyasyon yayımlar. Bu radyasyonun özellikleri, cismin sıcaklığına ve özelliklerine bağlıdır. Termik radyasyon spektrumu; kızılötesi bölge, görünür bölge ve mor ötesi bölge dalga boylarının sürekli bir dağılımından oluşmuştur. Termik radyasyon spektrumu, kara cisim ışıması incelenerek açıklanmıştır. Çünkü tanım olarak kara cisim üzerine düşen tüm radyasyonu soğuran ideal bir sistemdir (Serway, 1996).

Kara cisim radyasyonu için farklı sıcaklıklardaki enerji dağılımının deneysel verileri incelenerek, yayımlanan enerjinin dalga boyu ve sıcaklıkla değiştiği bulunmuştur. Kara cismin sıcaklığı yükselince, yayınladığı toplam enerji miktarı da artar. Artan sıcaklıkla, dağılımın tepe noktası daha kısa dalga boylarına kayar. Bu kayma miktarı Wien Kayma Yasası adı verilen,

$$\lambda_{\max} T = 0,2898.10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (4.4)$$

bağıntısına uymaktadır. Burada; λ_{\max} yayımlanan radyasyonun dalga boyu için elde edilebilecek en büyük değerdir. T radyasyonu yayımlayan cismin sıcaklığıdır. Radyasyon spektrumunu açıklayabilmek için $d\lambda$ dalga boyu aralığında yayımlanan birim alan başına gücü, $I(\lambda, T) d\lambda$ şeklinde tanımlamak kolaylık sağlar. Kara cisim ışımasının klasik bir modeline göre yapılan hesabın sonucu,

$$I(\lambda, T) = \frac{2 \pi c k T}{\lambda^4} \quad (4.5)$$

bağıntısı ile ifade edilen Rayleigh-Jeans Yasası 'dır. Burada k, Boltzmann sabitini

göstermektedir. Rayleigh-Jeans Yasası uzun dalga boylarında başarılı olmakla birlikte, kısa dalga boyları için yapılan hesaplamalarda deneysel verilerle uyumlu değildir (Serway, 1996). Ayrıca Rayleigh-Jeans bağıntısına göre, tüm frekanslardaki radyasyon enerjileri toplamının sonsuz olması gerektiği gibi yanlış bir sonuç (“mor ötesi felaket” diye bilinir.) çıkmaktadır (Taylor ve Zafaritos, 1996). Fiziksel olarak, elektromanyetik alanda sonsuz bir enerji mümkün olmayan bir durumdur (Serway, 1996).

Max Planck, bu yanlışlığı düzeltebilmek için kara cisim ışımasının kuantalanmış olduğu varsayımını kullanarak,

$$I(\lambda, T) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)} \quad (4.6)$$

bağıntısına ulaşmıştır. Buradaki h değeri, Planck sabitidir ve değeri $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s ’dir. Tüm dalga boylarında yapılan hesaplamalarda, deneysel verilerle tam bir uyum içinde olan bu bağıntı Planck Yasası ’dır (Serway, 1996). Bunlardan başka, her sıcaklıkta kara cisim ışımasını açıklamak için bir de Stefan-Boltzmann Yasası kullanılır. Bu yasaya göre; her cisim, her sıcaklıkta, bütün doğrultularına ışınlar halinde enerji gönderir. Cismin birim yüzeyinden birim zamanda yayınlanan enerji,

$$I = \sigma_{sb} T^4 \quad (4.7)$$

bağıntısına eşit olur. Burada σ_{sb} , Stefan-Boltzmann sabitidir. Işınım yapan cismin yüzeyi matlaştıkça σ_{sb} değeri büyür.

Uygulama alanına göre gereken güneş enerjisini belirleyebilmek için kara cisim ışımasında kullanılan fizik yasaları kullanılır. Güneş ışınımının tamamı yer yüzeyine ulaşamaz. Yaklaşık %30 ’u dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılarak azaltılır. Bu azaltılmanın sebepleri; Rayleigh saçılımı (atmosfer moleküllerince saçılma), atmosferdeki yabancı maddelerce saçılma (toz gibi), atmosferi oluşturan gazlarca ve diğer yabancı maddelerce soğurmadır (Engin, 1995). Güneş enerjisinin kullanımında bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

4.4. Güneş Enerjisinin Kullanımı

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 (Engin, 1995).

Güneş ışınımı asırlardan beri yeryüzüne geldiği halde, bilinçli olarak kullanılması oldukça yenidir. Güneş enerjisinin önem kazanması daha çok 1973 'deki dünya enerji krizi ile olmuştur. Günümüzde, güneş enerjisinden birçok alanda yararlanılmakta ve her geçen gün bu alanların sayısı artmaktadır (Baykul, 1987). 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:

1. Konutlarda, işyerlerinde ve gündelik yaşam yapısının çeşitli kesimlerinde ısı ve elektriğe dayalı bir bölüm enerji ihtiyacının karşılanması.
2. Endüstriyel enerji ihtiyacının bir bölümünün, ısı ve elektriğin birlikte üretim teknolojisiyle karşılanması.
3. Kırsal yörelerde ve tarımsal teknolojide enerji ihtiyacının olabildiğince karşılanması.
4. Kara, deniz ve hava taşıtlarının bir bölümünde hareketi sağlayıcı kaynak olarak kullanılması.
5. İletişim araçlarında (radyo, TV, telefon), sinyalizasyon ve otomasyonda bir bölüm enerji ihtiyacının karşılanması.
6. Elektrik sektörünün birincil kaynakları arasına güneş enerjisinin de girmesi .
7. Askeri alanda ve uzay çalışmalarında enerji gereksiniminin karşılanması (İnan ve Ültanır, 1996).

4.5. Güneş Enerjisi Teknolojileri

Güneş enerjisinin yeterince kullanılabilmesi, uygun teknolojilerin geliştirilmesi ile mümkün olacaktır. Ancak birçok ülkede yaygınca kullanılmakta olan sıcak su üretim sistemleri bile, Türkiye 'de oldukça az kullanılmaktadır. Güneş santralleri için ön koşul sayılan yıllık en az 2 000 saat güneşli olma süresi; Türkiye 'de yaklaşık 2 600, özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi 'nde ise, 3 000 saatlik süre ile sağlanmaktadır (İnan ve Ültanır, 1996).

Güneş santralleri de dahil olmak üzere sıcak su üretim sistemleri, güneş ocakları, güneş pilleri, güneş soğutucuları kullanılarak güneş enerjisinden yararlanılabilir. Böylece her yıl 2 milyar dolarlık yatırım gerektiren enerji gereksinimimize, küçük de olsa bir katkı sağlanabilir. 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 çalışmaktadır (İnan ve Ültanır, 1996).

Güneş enerjisi teknolojileri; yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte, şu şekilde sınıflandırılabilir:

1. Isıl Güneş Teknolojileri,

- a. 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.
- b. Yoğunlaştırıcı sistemler: Parabolik oluk kolektörler, parabolik çanak sistemler, merkezi alıcı sistemlerdir.

2. Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri,

- a. Doğrusal yoğunlaştırıcılar.
- b. Noktasal yoğunlaştırıcılar.

Güneş enerjisi, kullanılacak alana göre uygun bir teknoloji ile başka bir enerji

türüne dönüştürülür. Günümüzde en çok ihtiyaç duyulan enerji türleri, ısı ve elektrik enerjisidir. Bu yüzden yapılan çalışmalar genellikle, güneş enerjisinin ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülmesine yöneliktir. Son zamanlarda hidrojen taşıma, ısıtma ve güç üretimindeki yüksek verimliliklerinden dolayı; nitelikli bir enerji kaynağı olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte güneş enerjisinden hidrojen elde etme çalışmaları yoğunlaşmıştır. Güneş enerjisinden ısı enerjisi elde etme, pasif ısıtma ve aktif ısıtma yöntemleriyle yapılmaktadır (Gürsoy, 1999).

Elektrik enerjisi üretimi açısından, güneşten gelen enerji başlıca iki sınıfa ayrılabilir. Bunlardan biri, kızılötesi dalga boylarını içeren ve ısı enerjisi olarak ortaya çıkan kısımdır. Diğer ise, görünür ve mor ötesi dalga boylarını kapsar (Batman, 2001).

Güneşin ısı enerjisini kullanan elektrik santrallerinde, güneş ışığı bilgisayar kontrollü aynalar tarafından bir kulede odaklanmaktadır. Burada, güneşten gelen ısı enerjisi bir akışkana aktarılmakta ve akışkan tarafından kuleden alınmaktadır. Daha sonra bu ısı enerjisi, bir türbo jeneratörü tahrik edecek buharı elde etmek için kullanılmaktadır. Bu tip bir santralin verimi %5 ile %6 arasında olmaktadır (Batman, 2001). Güneşten gelen fotonların enerjileri, güneş pilleri ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

4.6. Güneş Pilleri

Güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektronik cihazlara güneş pili veya ftopil (solar cell) denir. Güneş enerjisi üç ayrı cihazla elektrik enerjisine dönüştürülür. Bunlar fotoemissif selüller, fotorezistan selüller ve yarıiletken güneş pilleridir. İçlerinde en verimli ve en kullanışlı olanları yarıiletken güneş pilleridir (Köse, 1986). Yüzey ölçüleri genellikle 100 cm² kadar ve kalınlıkları 0.2-0.4 mm arasında olan güneş pillerinin yüzeyleri; kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilir (www.eie.gov.tr). Fotovoltaik güneş pili yapımında en çok kullanılan materyaller ise silisyum(Si), galyum arsenik (GaAs), kadmiyum sülfür (CdS) ve kadmiyum tellür (CdTe) 'dür (Köse, 1986).

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. Güneş enerjisi; güneş pilinin yapısına bağlı olarak, %5 ile %20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili bir birine paralel ya da seri bağlanarak, bir yüzey üzerine monte edilir. 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 kadar sistem oluşturulur (www.eie.gov.tr).

İlk güneş pili Schottky, Lange ve Grondahl tarafından, bakır oksit (CuO_2) ve selenyumdan (Se) yapılmıştır. 1954 yılında, RCA ve Bell Telephone Laboratuvarları 'ndaki araştırma grupları tarafından, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerden oluşan p-n eklemleri ile %6 oranında bir verim elde edilmiştir. Daha sonra p-n eklemleri 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, yeryüzü kullanımı uzay kullanımını geçmiştir. Dünyada 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 (Köse, 1986). Buna bağlı olarak fiyatlar da düşmüştür. 1980 'li yılların başında güneş pilleri için yeni üretim yöntemleri geliştirilerek küçük çapta üretilmeye başlanmıştır. Bu gelişmelerin, gelecekte fiyatları daha da düşüreceği tahmin edilmektedir (Engin, 1995).

Güneş pillerinin; son on yılda pazarını cep telefonlarından sonra, en hızlı büyüyen endüstriyel mallardan biri olduğu vurgulanmaktadır. Artan üretim hacmi ve düşen fiyatlar, güneş pillerini önceleri şebekenin 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 (Kuban, 2003).

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 pazar olmuştur. Güneş pillerinin Alman kentlerindeki mimari uygulamaları her geçen gün

artmaktadır. Devlet teşvikleri ile büyüyen üretim hacimleri, hemen tüm endüstriyel teknolojilerde rastlanan maliyet düşüşlerini, beraberinde getirmektedir (Kuban, 2003).

Güneş pilleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak; akümülatörler, invertörler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş pili sistemi (fotovoltaik sistem) oluştururlar. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür (İnan ve Ültanır, 1996).

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 düşük güçlü olması, yalnız gündüzleri çalışması ve ekonomik olmaması sayılabilir (Engin, 1995).

4.6.1. Yarıiletken güneş pillerinin çalışma ilkesi

Güneş pilleri (fotovoltaik diyotlar); levhaları üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. Bu enerji çevriminde, herhangi hareketli parça bulunmaz. Güneş pilleri ilke olarak, bugün hayatın her kesimine girmiş olan elektronik düzeneklerin içerisinde kullanılan ve çok küçük boyutlara sahip olan yarıiletken diyotların, geniş yüzey alanlara uygulanmış şeklidir. Kullanılan malzemeler, üretim şekilleri ve diyotların çalışma ilkeleri temel olarak bir birlerine benzemektedir (Oktik, 2001).

Güneş pillerinin çalışma ilkesi, fotovoltaik dönüşüm olayına dayanır. Fotovoltaik dönüşümde güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile uyumlu ve elektrik yüklerinin bir birinden ayrılabilmesine izin verebilecek özellikte bir yarıiletken olmalıdır (Oktik, 2001). Fotovoltaik olay, iki aşamada meydana gelir. Bunlar, birer taşıyıcı yük çifti olan elektron-hol çiftinin oluşturulması ve bu yük çiftlerinin birbirinden ayrılması olayıdır (Köse 1986; Baykul

1987).

En basit olarak bir güneş pili yapımı; herhangi bir yarıiletken n-tipi ve p-tipi bölgeler oluşturularak gerçekleştirilebilir. Oluşturulan bu n-tipi ve p-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki p-n eklemi kesiminde, doğal olarak bir elektrik alanı kurulur. Bu bölgede oluşan elektrik alan, yapısal elektrik alan (E_{yap}) olarak adlandırılır. Yarıiletken eklemının güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaj dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur. Önce eklem bölgesine ışık düşürülerek, elektron-hol çiftleri oluşturulur. Sonra bunlar, bölgedeki elektrik alan yardımıyla bir birlerinden ayrılır.

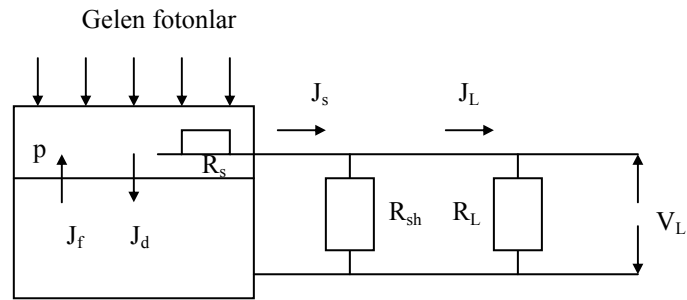
Yarıiletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bantlar valans bandı ve iletkenlik bandı adını alırlar. Yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton; yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans bandındaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece elektron-hol çifti oluşur. Bu olay p-n eklemli güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise, elektron-hol çiftleri buradaki elektrik alan tarafından bir birlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili; elektronları n-tipi bölgesine, holleri de p-tipi bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Bir birlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç, bir fotonun yeniden pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarıiletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-hol çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat bunlar, gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar (www.eie.gov.tr).

Güneş ışınları, eklem bölgesinde veya ekleme yakın yerlerde elektron-hol çiftleri oluşturduğunda; eklemde meydana gelen bu elektrik alan elektronların n-bölgesine, hollerin de p-tipi bölgesine geçmesini sağlar. Başlangıçta nötr olan n-tipi ve p-tipi bölgeleri sırasıyla, negatif ve pozitif yüklenmiş olur. Yarıiletkenin iki ucu bir dış devreye bağlandığında, bu yükler akarak elektrik akımı oluştururlar. Elde edilen bu akım doğru akımdır ve fotovoltaj akım (fotoakım) adını alır. Fotovoltaj akım, güneş ışınları pil üzerine düştüğü sürece yok olmaz (Engin, 1995).

4.6.2. Güneş pillerinin elektriksel özellikleri

Fotovoltaik güneş pilleri; absorplanmış fotonların meydana getirmiş olduğu akımı geçirecek yöndeki bir diyot üzerine paralel bağlanmış, sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Fotovoltaik güneş pilleri, ileri yönde beslenmiş bir p-n eklem diyotu gibi çalışırlar.

Şekil 4.2. 'de şematik olarak gösterilen p-n eklemli bir güneş pilinde foton absorplanması ile eklem her iki tarafında, taşıyıcı yük (elektron-hol) fazlalıkları meydana gelir. Eklem her iki yanındaki çoğunluk yük taşıyıcıları difüzyon yoluyla, azınlık yük taşıyıcıları ise eklem bölgesinde elektrik alanın sürüklemesiyle (ϵ) eklem bölgesini geçerek; fotoakım yoğunluğunu meydana getirirler (Köse, 1986).



Şekil 4.2. p-n eklemli güneş pilinin şematik gösterimi (Köse, 1986).

Fotoakım yoğunluğu (J_f), p-n eklemine ileri yönde kutuplar. 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 geçerler. Çoğunluk yük taşıyıcılarının oluşturduğu bu birleşim akım yoğunluğu J_f ; p-tipi bölgeyi negatif, n-tipi bölgeyi pozitif yükler. Bu yüklenmeden dolayı J_f fotoakım yoğunluğu, p-n eklemine ters yönde besler. Bu durumda Φ_0 potansiyel engelinin yüksekliği tekrar artacağından, çoğunluk yük taşıyıcılarının eklem bölgesini geçişleri engellenmiş olur. Bu anda tekrar bir foton absorplanır ve Φ_0 potansiyel engelini yüksekliği tekrar azalır. Böylece Φ_0 potansiyel engelini bir azalıp bir artması, güneş pili ışınların etkisinde kaldığı sürece devam eder (Köse, 1986; Baykul 1987).

Aydınlatılmış fotovoltaik bir güneş pilinin içerisinde geçen toplam akım yoğunluğu J , elektronların ve hollerin meydana getirdikleri akım yoğunluklarının toplamına eşittir. Herhangi bir x konumunda ve λ dalga boylu fotonların güneş pili içerisinde meydana getirmiş oldukları elektron ve hol akım yoğunlukları sırasıyla, $J_e(x, \lambda_f)$ ve $J_h(x, \lambda_f)$ ise J akım yoğunluğu,

$$J(\lambda) = J_e(x, \lambda_f) + J_h(x, \lambda_f) \quad (4.8)$$

bağıntısı ile verilir. J_e ve J_h akım yoğunlukları, gelen fotonların dalga boyuna bağlı olarak değişir. Bu akım yoğunlukları, süreklilik denklemleri ile verilir.

$$J_e(x, \lambda) = e \left[+ D_n \frac{dn(x, \lambda)}{dx} + \mu_e \varepsilon_p n(x, \lambda) \right] \quad (4.9)$$

$$+ \frac{1}{e} \frac{dJ_e(x, \lambda)}{dx} + g(x, \lambda) - \frac{n(x, \lambda) - n_0(x)}{\tau_n} = 0$$

$$J_h(x, \lambda) = e \left[- D_p \frac{dp(x, \lambda)}{dx} + \mu_h \varepsilon_n p(x, \lambda) \right] \quad (4.10)$$

$$- \frac{1}{e} \frac{dJ_h(x, \lambda)}{dx} + g(x, \lambda) - \frac{p(x, \lambda) - p_0(x)}{\tau_p} = 0$$

Burada ε_n ve ε_p , sabit olmayan katkı konsantrasyonlarından meydana gelen elektrik alanlardır. D_n , D_p , μ_e , μ_h , τ_n ve τ_p , sırasıyla elektronların ve hollerin difüzyon katsayılarını, mobilitelerini ve ömürlerini, $n(x, \lambda)$ ve $p(x, \lambda)$ azınlık taşıyıcı konsantrasyonlarını, $g(x, \lambda)$ elektron ve hollerin oluşum oranlarını gösterir. Bu süreklilik denklemleri düzenlendiğinde,

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \mu_e |\varepsilon_n| \frac{dn(x, \lambda)}{dx} - \frac{n(x, \lambda) - n_0(x)}{\tau_n} + g(x, \lambda) = 0 \quad (4.11)$$

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - \mu_h \left| \epsilon_p \right| \frac{dp(x, \lambda)}{dx} - \frac{p(x, \lambda) - p_0(x)}{\tau_p} + g(x, \lambda) = 0 \quad (4.12)$$

bağıntıları ile ifade edilen diferansiyel denklemler elde edilir. Güneş pili içerisindeki taşıyıcı yüklerinin ömürleri ve mobiliteleri, konumdan bağımsız kabul edilerek; (4.11) ve (4.12) bağıntılarındaki diferansiyel denklemleri aşağıdaki sınır koşulları için çözülebilir.

1. Ön yüzeyde $x=0$ için birleşme meydana gelir. Elektronların ön yüzeyde birleşme hızlarının akım yoğunluklarına bağlılığı,

$$J_e = eS_n (n - n_0) \quad (4.13)$$

bağıntısı ile verilir. Burada S_n elektronların yüzey birleşim hızını ifade etmektedir.

2. Eklem düzleminde keskin ve ince olan geçiş ihmal edilebilirse; $x=P$ sınır koşulu için elektron ve hollerin yoğunlukları sırasıyla,

$$n - n_0 = n_0 \left[e^{eV_d/kT} - 1 \right] \quad (4.14)$$

$$p - p_0 = p_0 \left[e^{eV_d/kT} - 1 \right] \quad (4.15)$$

bağıntıları ile verilir. V_d , p-n eklemine uygulanan gerilimdir.

3. Arka yüzeydeki $x=W_n+W_p$ için hollerin birleşmesi ile akım yoğunlukları arasındaki ilişki,

$$J_h = eS_p (p - p_0) \quad (4.16)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada S_p hollerin yüzey birleşim hızıdır. Bir güneş pilinin içerisinde geçen toplam akım $J(\lambda)$, (4.9) ve (4.10) bağıntılarındaki diferansiyel denklemlerin çözümünden elde edilen,

$$J(\lambda) = J_0(e^{eV_d/kT} - 1) - j_f(\lambda) \quad (4.17)$$

bağıntısıdır. Burada $e^{eV_d/kT}$ ifadesi, Maxwell-Boltzmann faktörüdür. $J_f = (\lambda)$, fotoakım yoğunluğunu ifade eder ve gelen fotonların dalga boyuna bağlıdır. Toplam fotoakım yoğunluğu J_f ,

$$j_f = \int_0^\lambda J_f(\lambda) d(\lambda) \quad (4.18)$$

bağıntısı ile verilir. Burada λ , güneş pili üzerine gelen fotonun dalga boyudur ve büyüklüğü,

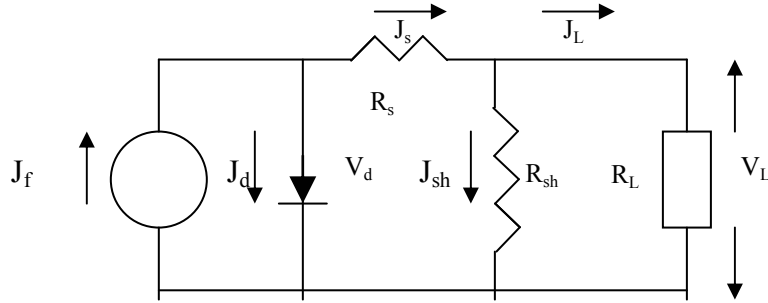
$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (4.19)$$

bağıntısıyla ifade edilir (Köse, 1986).

4.6.3. Bir güneş pilinin eşdeğer devresi

Bir güneş pili; fotonlar tarafından meydana getirilen akımı geçirecek durumda olan bir diyot üzerine paralel bağlı, sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Diyotun uçları arasında, potansiyel duvarının alçaldığı 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, germanyumdan yapılmış piller için yaklaşık 1 voltur (Oral, 1979).

Şekil 4.3. 'de, 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 eder (Köse, 1986).



Şekil 4.3. Bir güneş pilinin eş değer devresinin gösterimi (Köse, 1986).

Bir güneş pilinin açık devre gerilimi, pilden geçen akımın sıfır olması durumunda pil uçlarından ölçülen gerilimdir. Pilin kısa devre akımı ise, sıfır gerilimde ve aydınlatma altında pilden geçen akımdır. Seri direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda, ışıkla oluşan akıma eşit olup ışığa şiddetine bağlıdır (Çabuk, 1992). İdeal bir güneş pili için $R_s=0$ ve $R_{sh}=\infty$ kabul edilebilir.

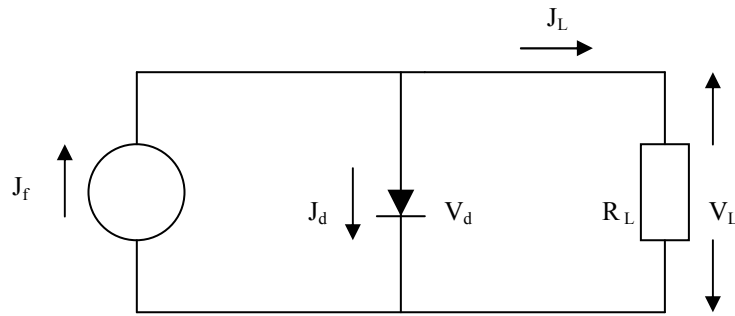
Bu durumda pilin kısa devre şartı altında, yani $V_d=0$ olması halinde; pilin kısa devre akım yoğunluğu J_{kd} , J_f fotoakım yoğunluğuna eşit olur. Bu durum,

$$J_{kd} = J_f \quad (4.20)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Açık devre şartı altında, yani $R_L=\infty$ için güneş pili içerisinde geçen toplam akım sıfır olacağından; (4.17) eşitliğinde $J(\lambda) = 0$ alındığında, açık devre gerilimi V_{ad} için,

$$V_{ad} = \left(\frac{A_0 k T}{e} \right) \ln \left(1 + \frac{j_f}{j_0} \right) \quad (4.21)$$

bağıntısı bulunur. Burada A_0 , p-n eklemının ideal olma faktörü, J_0 karanlık doyum akım yoğunluğudur. Düzgün olmayan eklem bölgesi, istenmeyen yabancı maddeler ve kristaldeki boşluklar, J_0 akım yoğunluğunun artmasına sebep olur (Oral, 1979; Kavcar, 2001). Güneş pilinin açık devre voltajı fotovoltaik elektromotor kuvvetine (e.m.k) eşittir (Köse, 1986). Fotovoltaik emk, yarıiletken materyalin yasak enerji aralığının ve şönt direncinin artması ile artar; J_0 akım yoğunluğunun ve sıcaklığın artması ile azalır. İdeal bir güneş pilinin eşdeğer devresi Şekil 4.4. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. İdeal bir güneş pilinin eşdeğer devresinin gösterimi (Köse, 1986).

4.7. Yük Taşıyıcılarının Ömrü ve Difüzyon Mesafesi

Bir yarıiletken malzeme veya alette, yük taşıyıcılarının ömrünü ve difüzyon mesafesini bilmek birçok yönden avantaj sağlar. Örneğin, yarıiletken aygıtlarda görülen yeniden birleşme akımının kontrol edilmesinde, yük taşıyıcılarının ömrü bilinmelidir (Yüksel, 1990).

Yarıiletkende meydana gelen yük taşıyıcıları sayısının ilk n değerinin, n/e değerine ($e=2.718$) düşmesi için geçen τ zamanına yük taşıyıcısının (azınlık) ömrü denir. τ ; meydana gelen azınlık yük taşıyıcılarının yeniden birleşerek, kayıp olma (rekombinasyon) zaman sabitidir. Azınlık yük taşıyıcılarının ömrü, yarıiletkenin önemli bir karakteristiğidir. Yarıiletkenin kullanılabilir olması için τ büyük olmalıdır. Kullanılmakta olan yarıiletkenler için τ 'nun değeri, 1/10 mikro saniyenin birkaç katı ile birkaç mili saniye arasındadır. Azınlık yük taşıyıcılarının ömrü, kristalin mükemmelliği ve saflığı ile artar. τ değeri; yarıiletkenin yapısına, hazırlanma şekline ve iletkenliğinin cinsini tayin eden yarıiletkenin cinsine bağlıdır (Oral, 1979).

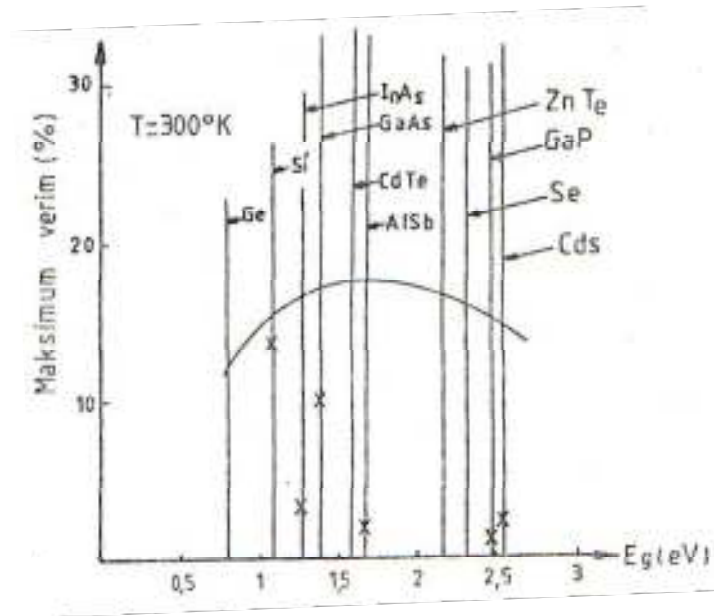
Yarıiletkende meydana getirilen azınlık yük taşıyıcısının ölçülen ömrü, iletkenliğine istenilen tipi vermek için katkılanan maddeyi dikkate alarak hesaplanan değerden daha küçüktür. Yarıiletkende; akseptör ve donör atomları tarafından meydana getirilen ve yük taşıyıcılarının yeniden birleşerek yok olmalarına yol açan merkezler vardır. Bunlardan en fazla rahatsız edici olanlar: germanyum içinde bakır, nikel, kalay; silisyum içinde ise demir ve manganezdır. Bu merkezler sayıca az olsalar da, τ değerini önemli ölçüde değiştirirler. Bu durum çok saf ve mükemmel mono kristallerin hazırlanmasını gerektirir. L difüzyon uzunluğu, yük taşıyıcılarının hareketliliği (mobiliteleri) ve ömrü ile artar. Bu değer germanyumda holler için 1-2 mm ve elektronlar için 1-3 mm iken, silisyumda holler için 0.2-0.4 mm ve elektronlar için 0.4-1 mm arasındadır (Oral, 1979; Kavcar, 2001).

Bu parametreleri ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu ölçümler kristal veya aygıt üzerinde yapılabilir. Yapımı tamamlanmış bir aygıtta yük taşıyıcılarının ömrünü ve dolaylı olarak, difüzyon mesafesini ölçmek için en çok tavsiye edilen yöntem, açık devre gerilimini azaltma yöntemidir. p-n eklemlili bir güneş pilinde, güneş ışığıyla uyarılmalar sonucu oluşan elektron-hol çiftleri, difüzyon mesafesi sonunda yeniden birleşerek yok olurlar. Dolayısıyla pilden elde edilmek istenen akıma katkıda bulunamazlar. Eğer difüzyon mesafesi bilinir ve pilin toplayıcı metal kafes aralığı, bu mesafeden dar tutulursa elektron-hol çiftleri yeniden birleşmeden akıma katkıda bulunurlar. Böylece yük taşıyıcılarının yeniden birleşmesinden kaynaklanan verim kayıpları önlenmiş olur (Yüksel, 1990).

4.8. Yarıiletken Güneş Pilleri İçin Materyal Seçimi

Güneş pilleri, pek çok farklı maddeden yararlanarak üretilebilir. Materyal seçimi; üretilen güneş pillerinin hem ekonomik, hem de yüksek verimli olması açısından büyük önem taşımaktadır. Silisyum, güneş pili üretiminde en yaygın kullanılan materyaldir. Güneş pili; tek-çok kristal blok veya tabakadan elde edilerek, dilimlenmiş kalın kristal malzemeden veya bir taşıyıcı üzerinde oluşturulmuş çok kristal veya amorf ince film tabakalardan üretilmektedir. Güneş pili üretiminde kullanılan başlıca malzemeler şunlardır:

1. Kalın kristal malzeme: Kristal silisyum, galyum arsenik (GaAs).
2. İnce film malzeme: Amorf silisyum, kadmiyum sülfür (CdS), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indium diselenid (CuInSe₂).
3. Optik yoğunlaştırıcı hücreler.



Şekil 4.5. Çeşitli yarıiletken materyallerin verimlerinin yasak bant aralıkları ile teorik olarak karşılaştırılmasının grafik üzerinde gösterimi.

Şekil 4.5. 'de çeşitli materyaller için ölçülen maksimum verimler, yasak bant aralığı üzerinde bir çapraz ile gösterilmiştir. Şekilde görülen eğri ise Loferski tarafından, atmosfer dışında bulunduğu düşünülen, ideal bir diyot için teorik hesaplara göre çizilmiştir (Kavcar, 2001). Teorik sonuçlara göre çizilen grafik, yasak bant genişliği 1.1 eV ile 2.3 eV arasında olan yarıiletken materyallerden yapılan güneş pilleri ile daha yüksek verim elde edildiğini göstermektedir. Yasak bant genişliği bu aralıkta bulunan materyaller: Silisyum (Si-1.21 eV), indium fosfor (InP-1.27 eV), galyum arsenik (GaAs-1.36 eV), alüminyum antimuan (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) (Köse, 1986; Kavcar, 2001).

Güneş pillerinde kullanılan yarıiletken materyalin yasak bant aralığı E_g arttıkça; J_0 karanlık doyum akım yoğunluğu azalır, V_{ad} açık devre gerilimi artar. Çünkü bu durumda pil tarafından absorplanan, yasak bant genişliğinden daha büyük enerjili ($h\nu > E_g$) fotonların sayısı azalır. Yasak bant aralığı E_g azaldıkça; J_0 karanlık doyum akım yoğunluğu artarken, J_f fotoakım yoğunluğu azalır. Çünkü bu durumda gelen fotonların tamamı güneş pili tarafından absorplanamaz. Yeterli miktarda elektron-hol çifti oluşturulamaz ve J_f fotoakım yoğunluğu azalarak pilin verimi düşer. Üretilen güneş pilinin yüksek verimli olabilmesi için kullanılacak yarıiletken malzemenin uygun yasak enerji aralığına sahip olması gerekir (Oral, 1979; Köse, 1986).

Güneş pili yapımında kullanılacak materyalin seçiminde, optik özelliklerine de dikkat edilmelidir. Direkt bant geçişine sahip materyallerde gelen ışınlar daha kısa mesafelerde absorplanmalarına rağmen, indirekt bant geçişli materyallerde daha derinlerde absorplanmaktadır. Bu sebeple direkt bant geçişli materyal kullanılarak yapılan güneş pilleri, indirekt bant geçişli materyal kullanılarak yapılanlara göre daha ince olarak ve daha az materyal kullanılarak üretilirler. Bu durumda indirekt bant geçişli materyallerde, yüzey birleşmeleri daha çok olur ve pilin çıkış gücü düşer. Diğer taraftan; direkt bant geçişli yarıiletkenlerin pratikte elde edilmesi hem zor, hem de pahalıdır (Köse, 1986).

Güneş pili yapımında kullanılacak yarıiletken materyal seçiminde diğer ölçüt, yarıiletken maddenin mikro yapısıdır. Yarıiletken malzemedeki kusurlar, taşıyıcıların iletilmesini önemli ölçüde etkileyecektir. Tek kristalli malzemelerde yapısal özellikler tüm maddede aynıdır. Oysa çok kristalli malzemedeki yapısal özellikleri bir birlerinden farklı olan ve damar adı verilen bölgeler vardır. Bir damardan diğerine geçerken karşılaşılan süreksizlik ve buna bağlı olarak mikro-yapıda oluşan kusurlar, elektriksel iletkenliği olumsuz yönde etkiler. Sonuçta tek kristalli malzemedeki çok kristalli malzemeye geçildiğinde; elde edilebilecek enerji dönüşümü verimi düşerken, çok kristalli malzemedeki damar büyüklükleri verimle doğru orantılıdır. Aynı yarıiletkeni p-tipi ve n-tipi katkılama ile elde edilen p-n eklem diyotların (homoeklem diyot) yanında, bir birinden farklı yarıiletken kullanmakla elde edilen heteroeklem diyotlar da, fotovoltaik teknolojisinde başarı ile uygulanmaktadır. Bu uygulamada; güneş ışınlarının büyük oranda soğurulmasını sağlayan bir yasak bant aralığına sahip yarıiletken

malzeme ile eklemın ışık alan tarafı oluşturulur. Eklemın diğerk tarafının oluşturulmasında seçilen yarıiletken materyalin, eklemden yüksek bir gerilim elde etmeyi sağlayacak yasak bant aralığına sahip olmasına dikkat edilir. Bu şekilde üretilmiş yapılar da eklem ara yüzeyleri de, taşıyıcıların yeniden birleşmesine neden olan kusurlar da; aşılması gereken yeni sorunlar olarak gündeme gelmektedir. Bu ölçütlerin yanında; seçilen malzemenin maliyeti, dünya üzerinde hangi bollukta bulunduğu ve çevre dostu olması büyük önem taşımaktadır (Oktik, 2001).

Yüksek verimlikte fotovoltaiik dönüşüm için yasak enerji aralığı en uygun malteryalin seçilmesi, malzemenin yapısal ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi ve heteroeklem seçiminde en uygun kombinasyonun kullanılması gerekmektedir. Ayrıca seçilen malzemenin büyük ölçeklerde ekonomik olarak üretilebilmesi; koşullardan birisi olarak karşımıza çıkarken, bu malzemenin kullanımında çevreye karşı olan duyarlılığın da gereken ağırlıkta olması arzulanmaktadır (Oktik, 2001).

5. YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLİ ÇEŞİTLERİ

5.1. Giriş

Güneş pillerinin uygulama alanlarının genişletilebilmesi ve kullanımlarının yaygınlaştırılabilmesi için tüm dünyada çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda bilim adamları, güneş pillerinin maliyetlerini düşürerek verimlerini arttırmayı planlamaktadırlar. Bu amaçla çalışma ilkeleri aynı olmak üzere, çeşitli maddeler ve yöntemler kullanarak güneş pilleri üretmektedirler. Çalışmalarının sonucunda çok çeşitli güneş pilleri ortaya çıkmaktadır.

Teknolojik olarak tek kristal, çok kristal (polikristal) ve ince film olarak üretilen güneş pilleri; genelde iki şekilde sınıflandırılırlar. Birincisi güneş pili üretiminde kullanılan kristalin cinsine göre, ikincisi ise eklem yapım türüne bağlı olarak yapılır.

5.2. Güneş Pillerinin Kristal Cinsine Bağlı Olarak Sınıflandırılması

Güneş pillerinin üretimlerinde kullanılan kristalin cinsine bağlı olarak yapılan sınıflandırmada, güneş pilleri üç ana grup altında toplanır. Bunlar:

1. p-n homoeklemlili güneş pilleri,
2. p-n heteroeklemlili güneş pilleri,
3. Amorf silisyum (a:Si) güneş pilleridir.

5.2.1. p-n homoeklemlili güneş pilleri

Homoeklemlili bir güneş pilinde, p-n eklemının her iki tarafı aynı kristal yapılı yarıiletken içermektedir. 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 (High-low emitter) güneş pilleri, ön yüzey alanlı güneş pilleri ve düşey homoeklemlili güneş pilleridir (Engin, 1995).

Tek kristalli veya çok kristalli (polikristal) olarak aynı cins yarı iletken materyal kullanılarak üretilirler. Polikristallerin elde edilmesi zor ve pahalıdır. 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 'dir (Köse, 1986).

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 kullanılarak elde edilen p-n eklemının açık devre gerilimi daha büyüktür. Silisyumun spektral cevabı, germanyumda olduğu gibi kızılötesi ışınlar kadar uzanamaz. Fakat bu sınırlama, ışık kaynağı olarak güneş kullanıldığı zaman ciddi bir sorun oluşturmaz. Çünkü güneş ışığında en yüksek enerjili ışınım, görünür bölgede yeşil ışınım 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 olanak verir (Oral, 1979; Köse, 1986; Kavcar, 2001).

5.2.1.1. Silisyum güneş pilleri

Elektronik sanayisinde çok önemli bir rol oynayan silisyum (Si), güneş pili üretiminde en çok kullanılan materyaldir. Silisyumun elektriksel, optiksel, yapısal özelliklerinin uzun süre değişmemesi ve silisyum üretim teknolojisinde elde edilen büyük başarılar; bu malzemenin en popüler malzeme olarak öne çıkmasını sağlamıştır (Oktik, 2001). Oksijenden sonra yer yüzünde en çok bulunan element olan silisyumun, doğada en yaygın bulunan biçimi kum (SiO_2) ve kuartzdır. Kumun saflık derecesi çok düşük olduğundan kullanılmaya uygun değildir. Ancak kuartzın %90 'ı silisyumdur. Kuartz işlenerek %99 silika elde edilir. Daha sonra silikadan metalürji kalitesinde silisyum elde edilir (Oktik, 2001).

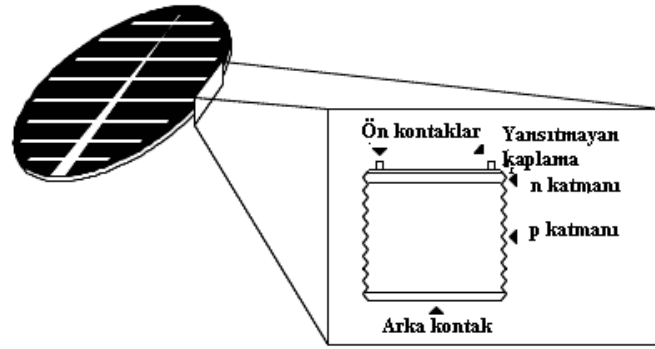
Silisyum, indirekt bant yapısına sahip bir materyaldir ve bu yüzden ışık soğurulmasında fonon yardımına ihtiyaç duyar. Bu ise, güneş tayfi boyunca silisyumun

oldukça düşük bir absorpsiyon katsayısı sergilemesine yol açar (Kavcar, 2001). Silisyumun yasak bant aralığı 0 K 'de 1.21 eV, oda sıcaklığında (300 K) 1.12 eV 'tur (Köse,1986).

Uzay araştırmalarında kullanılan güneş pillerinin çoğu silisyumdan yapılmıştır (Oral, 1979). Silisyum güneş pillerinde bulunan p-n eklemleri, kristalin büyütülmesi sırasında oluşturulur. Kristal büyütme işleminde kullanılan yöntemler kimyasal buharlaştırma, Czochralski, yzdzürme ve kesme yöntemleridir. Galyum (Ga), arsenik (Ar), boron (B), fosfor (P) ve alümiyum (Al) silisyum kristalinde katkı maddesi olarak kullanılan materyallerdir. Bunlardan boron (B) ve fosfor (P), Uzay uygulamalarındaki güneş pillerinde kullanılırlar (Köse,1986). Yarıiletken endüstrisinin çoğu tek kristal silisyuma dayandırılmış olduğundan, üretim sürecine ilişkin büyük bir teknoloji tabanı bulunmaktadır (Kavcar, 2001). Tek kristal silisyum, güneş pili üretiminde de yüksek verim için kullanılan malzemelerden biri olmakla birlikte; üretim maliyetinin yüksek olması, bu alanda değişik seçenek olarak çok kristalli (polikristal) malzemenin geniş ölçekte kullanılmasına neden olmuştur. 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 (Oktik, 2001).

Tek kristalli silisyum güneş pilinin rengi koyu mavi olup, ağırlığı 10 gram 'dan azdır. Şekil 5.1. 'de görüldüğü gibi pilin üst yüzeyinde, pil tarafından üretilen akımı toplayacak ve malzemesi genellikle bakır olan ön kontaklar vardır. Bunlar negatif kontaklardır. Kontakların altında 150 mm kalınlığında, yansıtıcı özelliği olmayan bir kaplama tabakası vardır. Bu tabaka olmazsa; silisyum, üzerine düşen ışınımın üçte birine yakın kısmını yansıtacaktır. 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 (Çıtıroğlu, 2000).

Üretilen piller, standart test koşullarında test edildikten sonra, tüketiciye sunulmaktadır. Ortam sıcaklığı 25 °C, ortalama ışınım şiddeti 1000 W/m² ve hava-kütle oranı 1.5 olarak test koşulları belirlenmiştir. 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 parametredir. Tipik bir silisyum güneş pili, 0.5 volt kadar elektrik üretebilir. Pilleri bir birine seri bağlayarak üretilen gerilim değerini arttırmak mümkündür (Çıtıroğlu, 2000).



Şekil 5.1. Güneş pili yapısının şematik gösterimi.

Çok kristalli malzemede, damarların kristal yapılarının bir birlerine göre yönelmeleri dışında; elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri özdeşdir. Damarların büyüklükleri, kristalin kalitesi ile doğru orantılıdır. Damarlar arasındaki süreksizlik, özellikle elektriksel yük taşıyıcılarının aktarılmasında önemli ölçüde engelleyici rol oynar. Çok kristalli malzemenin elektriksel özelliklerinin, küçülen damar büyüklüğü ile orantılı olarak bozulması; elde edilebilecek verimliliğin tek kristalle karşılaştırıldığında küçük olmasına neden olur. Ancak çok kristalli silisyum üretim teknolojileri daha az enerji gerektirir ve daha kolaydır. Sonuç olarak, çok kristalli silisyumun maliyeti önemli ölçüde düşüktür.

Çok kristalli silisyumun üretilmesinde en çok kullanılan yöntem dökme yöntemidir. Çok kristalli silisyumda başlangıç malzemesi, tek-kristalli silisyumda

olduğu gibi hazırlanır. Aranana saflık derecesi de benzer basamakta olmalıdır. Erimeş yarıiletken kalitesindeki silisyum, kalıplara dökülerek soğumaya bırakılır. Daha sonra elde edilen bloklar kare şeklinde kesilir. Bu teknoloji ile üretilen malzemelerden fabrika edilen güneş pillerinin verimleri ve maliyetleri düşük olmaktadır (Oktik, 2001). Bununla birlikte birkaç milimetre tanecik büyüklüğündeki polikristal silisyumdan, verimi %14 'ün üzerinde olan güneş pilleri yapılabilmektedir (Engin,1995).

Tek kristalli ya da çok kristalli silisyum güneş pilleri, verimlilikleri ve kararlılıkları ile 1950 'li yıllardan bu yana kendilerini ispatlamışlardır. Son yıllarda geliştirilen teknolojiler ile güneş-elektrik dönüşüm verimlilikleri, beklentilerin bile üzerinde seyretmektedir (Oktik, 2001). Tek kristal Silisyum bloklardan üretilen güneş pillerinde laboratuvar şartlarında %24, ticari modüllerde ise %15 'in üzerinde verim elde edilmektedir. Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen polikristal silisyum güneş pilleri ise daha ucuza üretilmekte, ancak verimleri daha düşük olmaktadır. Polikristal Silisyum güneş pillerinin verimi, laboratuvar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarındadır (www.eie.gov.tr).

5.2.1.2. 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 eklemine daha büyük bir açık devre gerilimi elde edilir. Bu yüzden güneş pili yapımında, silisyuma oranla daha az tercih edilen bir materyaldir (Kavcar, 2001). Galyum arsenik kristalinin yasak bant genişliği 300 K 'de 1.43 eV değerinde olup, bu enerjiye eşit ya da büyük enerjiye sahip fotonları soğurarak elektron-hol çifti oluşturur (Oktik, 2001). Direkt bant aralıklı bir yarıiletken olduğu için üzerine gelen ışınları daha kısa mesafede absorplayabilir. Bu yüzden GaAs güneş pilleri ince yapılı ve yapımında az materyal gerektirir (Engin, 1995).

GaAs güneş pilleri hem elektrik, hem de termal enerji elde etmek üzere iki amaç için kullanılır. Bu durum Fresnel merceklerinin arkasına uygun olarak yerleştirilmiş GaAs güneş pil panelleri ile sağlanır. Bu paneller su ile soğutularak 120 °C ve 140 °C arasında sıcak su buharı elde edilir ve klima cihazları çalıştırılır (Köse, 1986).

GaAs güneş pilleri ile ticari modüllerde %22, laboratuvar şartlarında %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcılı) verim elde edilmektedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemli GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir (Engin, 1995; www.eie.gov.tr). Fakat galyum elementi yeryüzünde az olduğundan; GaAs güneş pilleri, daha çok uzay uygulamaları için üretilen optik yoğunlaştırıcılı sistemlerde kullanılmaktadır (Engin, 1995). GaAs 'in uzay uygulamalarındaki güneş pillerinde kullanılmasının diğer sebebi, silisyuma göre sıcaklığa ve radyasyona karşı daha dayanıklı olmasıdır (Köse, 1986).

5.2.2. p-n heteroeklemli güneş pilleri

Son zamanlarda p-n homoeklemli güneş pillerine göre daha kolay ve daha ucuza elde edilebilmesi, birim ağırlık başına daha yüksek güç sağlanması, sıcaklığa ve radyasyona karşı daha fazla dayanıklılık göstermesi gibi üstün özelliklerinden dolayı; heteroeklem adı verilen ince film güneş pilleri kullanılmaya başlanmıştır (Oral, 1979). Bu üstün özelliklerine karşın, verimleri homoeklemli güneş pillerine göre düşüktür (Köse, 1986).

Heteroeklemli bir güneş pilinde p-n eklemının her iki tarafı farklı iki yarıiletkenden oluşur. p-n eklemının her iki yanının iş fonksiyonları (Fermi düzeyinden bir elektronu boşluk düzeyine geçirmek için gerekli enerji), elektron ilgileri (electron affinity, iletim bandı kenarında bulunan bir elektronu boşluk düzeyine geçirmek için gerekli enerji), bant aralıkları ve katkı konsantrasyonları farklıdır (Engin, 1995).

Termal dengede olan iki yarıiletken birleştirildiğinde, Fermi düzeyleri sistemin her yerinde aynı olur. Fakat sistemde iş fonksiyonlarının farkına eşit olan bir elektrostatik potansiyel enerji, dolayısıyla bir potansiyel engeli ortaya çıkar. Aynı zamanda p-n eklemının iletim bandı kenarında, kullanılan yarıiletkenlerin elektron ilgileri farkına eşit olan ve valans bandı kenarında, bant aralıkları farkına bağımlı olan süreksizlikler oluşur. Bantlarda oluşan bu süreksizlikler, fotovoltaik olay için istenmeyen özelliklerdir. Bu tür süreksizlikler, uygun katkılamanın yapılması ve uygun elektron ilgisi olan yarıiletkenlerin seçilmesiyle ortadan kaldırılabilir (Engin, 1995).

Heteroeklemlı bir güneş pilinde p-n eklemının her iki tarafını, tamamen aynı kristal yapıda yapmak imkansızdır. Bu uyumsuzluk (bozukluk), yasak bant aralığında izinli enerji durumlarının ortaya çıkmasına ve geçiş bölgesinde birleşme merkezlerinin oluşmasına sebep olur. Bu tuzaklar aynı zamanda, p-n ekleminde tünelleme olayının olmasını sağlar. Bu durumların her ikisi de, güneş pilinin işleyişini olumsuz yönde etkiler. Heteroeklemlı güneş pillerinde, eklemın iki yanındaki yarı iletkenlerin örgü sabitlerinin birbirine çok yakın olmasına çalışılır (Engin, 1995). Bundan başka heteroeklem güneş pili yapımında, soğurucu olarak kullanılacak materyalin 1-1.7 eV aralığı içinde, direkt bir yasak bant aralığına sahip olmasına dikkat edilmelidir. Soğurucu, yaklaşık 2.5 eV 'luk yasak bant aralığına sahip bir pencere katmanı içerisinden aydınlatılmalıdır. Pencere materyali fazlaca katkılanmış, soğurucu materyal ise orta derecede katkılanmış olmalıdır. Bundan başka, soğurucu materyal ile pencere materyalinin yarıiletkenlik tipleri karşıt tipte seçilmelidir (Oral, 1979; Kavcar, 2001).

İlk örneği kadmiyum sülfür-bakır sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) olan heteroeklem ince film düzeneklerinin, günümüzde en çok kullanılanları kadmiyum sülfür-bakır indium diselenit (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. Bunlardan başka I-III-VI₂ ve II-IV-V₂ kalkoprit (chalcopyrite) yapıları, heteroeklem güneş pillerinde kullanılmaları açısından pek çok uygun özelliğe sahip materyallerdir (Kavcar, 2001).

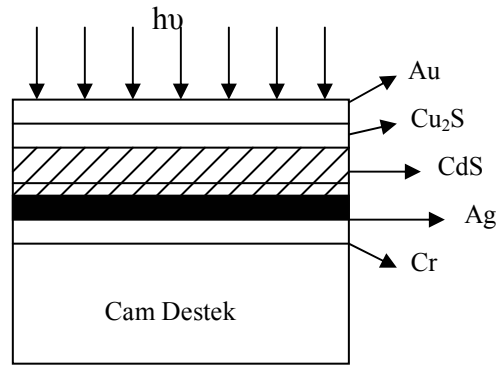
5.2.2.1. Kadmiyum sülfür-bakır sülfür güneş pilleri

Kadmiyum sülfür-bakır sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) pillerinin yapımı 1954 yılında, silisyum güneş pilleri ile aynı yılda olmuştur. Fakat ticari amaçlı bir üretim henüz yapılamamıştır. Bunun nedeni hem verimlerinin düşük olması, hem de uzun ömürlü olmalarını engelleyen bazı sorunların ortadan kaldırılamamış olmasıdır. Bu pillerin en büyük sorunu; Cu₂S bileşiğindeki bakırın, bulunduğu ortamdaki oksijen ile birleşerek oksitlenmesidir (Köse, 1986; Engin, 1995).

Bu güneş pillerinin üretilmesinde vakumda buharlaştırma veya püskürtme yöntemleri kullanılır. Elektriksel bağlantı; taban elemanı olan CdS için çinko, indium,

kalay; soğurucu katman olan Cu_2S için bakır veya altın kullanılarak yapılır (Oral, 1979). Bakırın absorpsiyon katsayısı daha büyük olduğu için ışığın absorplanması Cu_2S içerisinde gerçekleşir.

Şekil 5.2. 'de kesiti görülen bu pillerin Cu_2S soğurucu katmanı, Clevite işlemiyle oluşturulur. Bu işlemde önce CdS filmi; vakumda buharlaştırma ya da başka bir yöntem kullanılarak, kalınlığı yaklaşık 20 μm olacak şekilde, iletken bir madde ile kaplanmış cam üzerine depo edilir. CdS polikristal filminin tanecik büyüklüğü yaklaşık 5 μm 'dir. Daha sonra bu CdS filmi; 80 °C-100 °C 'de bulunan bakır (I) klorür çözeltisine 10-30 saniye daldırılarak, Cu_2S soğurucu katmanının oluşumu sağlanır (Clevite işlemi). Kadmiyum sülfür-bakır sülfür ($\text{n-CdS/p-Cu}_2\text{S}$) güneş pilinin p-bölgesini oluşturan bu soğurucu katmanın kalınlığı 0.1-0.3 μm 'dir (Engin, 1995).



Şekil 5.2. Kadmiyum sülfür-bakır sülfür ($\text{n-CdS/p-Cu}_2\text{S}$) pillerinin şematik kesit görünümü.

Heteroeklem oluşturulmadan önce CdS 'ün yasak bant genişliği 2.4 eV, Cu_2S 'ün ise 1.2 eV 'tur. Bu değerler heteroeklem oluşturulduktan sonra CdS için 2.31 eV ve Cu_2S için 1.21 eV olarak değişir (Köse, 1986). Bu pillerin verimleri teorik olarak %10 olmasına karşın, uygulamada %3 ile %8 arasında değişmektedir. Verimi arttırmak için temizleme işlemi daha saf bir madde ile yapılır. Cu_2S bileşiğindeki bakırın oksitlenmesini önlemek için pilin üst metal kafesi, buharlaştırma yerine temas yoluyla yapılır ve gelen ışınların yansımalarını önlemek için çoğunu absorplayan bir madde kullanılır (Köse, 1986).

5.2.2.2. Kadmiyum sülfür-bakır indium diselenit güneş pilleri

Uzay dışı fotovoltaiklerin araştırılmasında en büyük ilgi, bakır indium diselenit üzerinde toplanmıştır (Kavcar, 2001). Periyodik sistemin I., III. ve VI. grup elementlerinden elde edilen, tetragonal chalcopyrite adı verilen örgü yapısına sahip I–III–VI₂ yarıiletken bileşiklerinden biridir. 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 materyallerdir (Peker, 1999). Bakır indium ve selenyumdan yapılan üçlü bileşik yarıiletkenlerden yapılan güneş pilleri, kısaca CIS güneş pilleri olarak anılırlar (Oktik, 2001). Kadmiyum sülfür-bakır indium diselenit güneş pilleri (n-CdS/p-CuInSe₂), yaygın olarak üretilen CIS güneş pillerinden biridir.

Bakır indium diselenit, fotovoltaik düzeneklerde özellikle soğurucu katman için uygun olan belirli materyal davranışlarına sahiptir. Atmosferik ve mekanik etkilere karşı dayanıklılığı ve kararlılığı kusursuzdur. Bu bileşik yarıiletkenlerin soğurma katsayıları oldukça yüksek olup, yasak bant genişlikleri güneş spektrumunu 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 diselenit ince filmlerinin çok ince üretilmesine imkan tanır. Böylece üretim aşamasındaki materyal maliyeti ve bulunabilirliği konusundaki engeller kendiliğinden ortadan kalkar (Oktik, 2001; Kavcar, 2001).

Yüksek kalitede ve geniş yüzeyli CIS güneş pillerinin ekonomik olarak üretilmesi isteği, çeşitli ince film kaplama yöntemlerinin araştırılmasına sebep olmuştur. Bu yöntemlerden en önemlileri ısısal buharlaştırma, püskürtme, spreyleme, selenizasyon, elektro kaplama, elektroforetik kaplama, elementsel katmanların lazerle ışınlanması ya da ısısal tavlama gibi tekniklerdir. Bu tekniklerin çoğu, uzay dışı kullanım için gerekli düzgün film üretimini olanaklı kılarlar (Kavcar, 2001).

Bu çok kristalli pilde, laboratuvar şartlarında %17.7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip bir modülde ise %10.2 verim elde edilmiştir (www.eie.gov.tr). Bu gün 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 karmaşık duruma gelmektedir (Oktik, 2001).

5.2.2.3. Bakır sülfür-çinko kadmiyum sülfür güneş pilleri

n-CdS/p-Cu₂S pillerinin p-n eklemlerinde açık devre voltajı 500 mV 'dur. Bu pillerin kristal uyumsuzluklarını, (örgü uyumsuzlukları) 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. Böylece 800 mV açık devre voltajı elde edilerek, verim %10 değerinin üzerine çıkarılabilmektedir (Köse, 1986).

Zn_xCd_{1-x}S materyali içerisindeki Zn konsantrasyonu artırıldığı zaman, bu pilin elektrik ve optik özellikleri değişmektedir. Açık devre voltajı artarken, kısa devre akımı azalmaktadır (Köse, 1986).

5.2.2.4. Kadmiyum sülfür-silisyum güneş pilleri

En önemli heteroeklem güneş pillerinden biri olan 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 tabanı üzerine CdS kristali kaplanarak, p-n heteroeklemi oluşturulur. Yüksek bir verim elde etmek için omik kontak; silisyum için Au 'dan, CdS için In 'dan yapılmalıdır. Bu güneş pillerinin verimi yaklaşık %9 'dur (Köse, 1986).

5.2.2.5. Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür güneş pilleri

Periyodik tablonun ikinci gurubunda bulunan kadmiyum elementinin ve altıncı gurubunda bulunan tellür elementinin bir araya gelmesiyle oluşan II-VI yarıiletken bileşiği kadmiyum tellürün (CdTe), oda sıcaklığında yasak enerji aralığı (E_g) 1.5 eV 'tur. Bu değer, güneş spektrumundan maksimum dönüşümü elde etmek için gerekli olan değere oldukça yakındır. Yüksek soğurma katsayısı yanında; ince film büyütme teknolojisinin bir çoğu ile kolayca üretime olanak tanınması, geniş yüzey alanlı güneş pili üretiminde CdTe bileşik yarıiletkeninin öne çıkmasının sağlamıştır.

Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür (n-CdS/p-CdTe) güneş pili üretiminde; kadmiyum tellür (CdTe), kadmiyum sülfür (CdS) ile bir araya getirilerek heteroeklem diyot üretilir. Yasak enerji aralığı yaklaşık 2.4 eV olan CdS yarıiletkeni, çok ince bir tabaka olarak uygulanır. Güneş ışınımının çoğunu geçiren CdS, heteroeklemede pencere görevi yapar (Oktik, 2001).

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. Bu yöntemi kullanan ANTEK firması (Almanya), geniş ölçekli üretime geçmenin ön çalışmalarını Erfurt-Almanya 'da yapmaktadır. 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 denetimi CSS yönteminde olduğu kadar kolay değildir. BP solar firması, bu yöntemde dayalı pilot üretime başlamış olup; 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 (Oktik, 2001).

5.2.3. Amorf silisyum güneş pilleri

Hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) ilk olarak, 1955 yılında Sterling tarafından incelenmiş; fakat hidrojenin rolü üzerinde durulmamıştır. a-Si:H, amorf silisyumdan (a-Si 'dan) farklı bir çok özelliğe sahiptir. Fotoiletkenlik, a-Si filmlerde ihmal edilebilir olduğu halde, a-Si:H filmlerde büyük bir fotoiletkenlik olayı gözlenmektedir. Güneş pilleri için de önemli olan fotoiletkenliktir. 1977 yılında, Wronski ve Carlson tarafından ilk defa a-Si:H güneş pili yapılmış ve verimi %5.5 bulunmuştur (Köse, 1986).

Amorf silisyum malzemesini kristalli silisyumdan ayıran özellik; silisyum atomlarının malzeme içindeki düzenlerinin, birinci derece komşu atomların ötesinde

gelişi güzel olmasıdır. Amorf silisyum malzemedeki atomların, uzun mesafelerde etkili olabilen (uzun erimli) bir düzenlemesi yoktur. Silisyum atomlarının arasındaki bağların bazıları doymamış (dangling bonds) 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 fotovoltaiik 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 silane (SiH_4) gazı ve hidrojen karışımı, bir çift elektrot arasından geçirilerek; elektrotların işaretleri yüksek frekanslarda değiştirilir. Bunun sonucu olarak, SiH_4 parçalanarak kararsız SiH_3 radikalini oluşturur. İzleyen aşamada, kararsız SiH_3 elektrotlardan birine giderek bağlanır ve kararlı hale gelir. Ardından hidrojen, yüzeyden ayrılarak geride silisyumu bırakır. Böylece yüzey silisyumla kaplanmış olur. Elektrot üzerinde büyüyen silisyum gazının içerisine boron ya da fosfor katılarak, n-tipi ya da p-tipi yapılabilir (Engin, 1995; Oktik, 2001).

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 (Engin, 1995). Bu üstünlüklerinin yanında en büyük dezavantajları, üzerlerine düşen ışıkla verimlerinin azalmasıdır (Steabler-Wronsky etkisi). Güneş pilinin aydınlatılması sonucu, serbest yük taşıyıcıları (elektronlar ve holler) oluşur. Güneş pilinde meydana gelen bu elektron ve holleri bir birinden ayıracak, yapısal bir elektrik alan (E_{yap}) kurulmalıdır. Katkılanmış bölgelerdeki yüksek orandaki kusur yoğunluğu, taşıyıcı mobilitesini düşürür. Bunun için güneş pilindeki p-tipi ve n-tipi yarıiletken tabakaların arasına, düşük kusurlu katkısız bir tabaka (intrinsic “i”) tabaka eklenir. Bu tabaka optik olarak aktiftir ve görevi üzerine ışık düştüğünde, yapısal elektrik alan tarafından bir birinden ayrılacak serbest taşıyıcılar üretmektir. Böylece p-i-n eklem yapısına sahip a-Si:H güneş pilleri elde edilir (Tercan, 2000).

Kristal yapı özelliği göstermeyen bu amorf silisyum pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 mertebesindedir. Günümüzde saat, hesap makinesi ve oyuncak gibi küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılmaktadırlar. Amorf silisyum güneş pillerinin bir başka önemli uygulama sahasında, binalara entegre yarı saydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üretici olarak kullanılabilmesi tahmin edilmektedir (www.eie.gov.tr).

5.3. Güneş Pillerinin p-n Eklem Yapısına Göre Sınıflandırılması

p-n eklemlerinin yapısına bağlı olarak yapılan sınıflandırmada, güneş pilleri altı grup altında toplanır. Bunlar:

1. Tek eklem güneş pilleri,
2. Çok eklem güneş pilleri,
3. Metal-yarıiletken heteroeklem (MS) güneş pilleri,
4. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) heteroeklem güneş pilleri,
5. Yarı iletken-yalıtkan-yarıiletken (SIS) heteroeklem güneş pilleri,
6. Elektrolit pillerdir.

Güneş pillerinde fotovoltaik dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için p-n eklemi oluşturulup, ışığın p-n eklemi yakınına düşürülmesi gerekir. Yapısında bir tane p-n eklemi bulunduran güneş pillerine tek eklemli güneş pilleri, birden fazla p-n eklemi bulunduran güneş pillerine de çok eklemli güneş pilleri denir. Tek eklemli güneş pillerinde p-n eklemi, homoeklem ya da heteroeklem şeklinde olabilir. Güneş pillerinden elde edilen verimi arttırabilmek için başvurulan yöntemlerden birisi de, çok eklemli (birçok bant aralıklı) güneş pili üretimidir.

5.3.1. Çok eklemli güneş pilleri

Düşük enerjili fotonlar dar bant aralıklı yarıiletken üzerine, yüksek enerjili fotonlar geniş bant aralıklı yarıiletken üzerine düşürüldüğünde; daha verimli güneş pilleri oluşturulabilir. Böylece hem düşük enerjili fotonların, hem de yüksek enerjili

fotonların elektron-hol çiftleri oluşturması sağlanabilir. Spektrum yarılımı (spectrum splitting) ve ardışık (tandem) güneş pili yaklaşımıyla bu amaç gerçekleştirilir. Spektrum yarılımında güneş ışınimleri, 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 getirilirler. Ardışık güneş pillerinin yapımları daha karmaşık ve pahalı olduğundan, odaklayıcı sistemlerde kullanılması daha uygundur. Bu uygulamalarla söz konusu güneş pillerinin verimi arttırılabilir (Engin, 1995).

Güneş pillerinin eklem yapısına göre yapılan sınıflandırılmasında eklem sayısının tek ve çok olmasından başka; eklem bölgesinde kullanılan materyallerin iletken, yarıiletken ve yalıtkan olması göz önünde bulundurulur.

5.3.2. Metal-yarıiletken (MS) heteroeklem güneş pilleri

Bir metal ile bir yarıiletken birleştirildiğinde iş fonksiyonlarının farklı olmasından dolayı, eklem bölgesinde bir potansiyel engeli ve bir geçiş bölgesi oluşur. Geçiş bölgesi metal-yarıiletken yapıları Schottky diyotları olarak bilinir. Azınlık yük taşıyıcıların yarıiletkendeki durumu p-n eklemindeki gibidir. Fakat geçiş bölgesine oluşan potansiyel engeli, çoğunluk yük taşıyıcı akışına engel olur. Bu potansiyel engelinin yüksekliği, dışarıdan uygulanan gerilimle değiştirilebilir (Engin,1995). En büyük avantajları, diğer güneş pillerine göre yapımlarının kolay ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Dezavantajları ise fotonların metalden yansması ve giriş gücünü düşürmesidir (Tercan, 2000).

5.3.3. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) heteroeklem güneş pilleri

MS güneş pillerinde, metalle yarıiletken tabaka arasına yalıtkan bir tabaka koyulduğunda; MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) tipi güneş pilleri elde edilir. Bu tip güneş pillerinde, metal ile yarıiletken arasında çok büyük bir potansiyel engeli oluşur. Yalıtkan katmanı çok ince ($\sim 20 \text{ \AA}$) olduğundan, yük taşıyıcıları bu engeli tünelleme ile geçerler (Engin, 1995).

MIS güneş pillerinde açık devre gerilimi Schottky diyotlarına göre daha büyüktür. Yalıtkan tabakanın kalınlığı arttıkça; açık devre gerilimi artar, kısa devre akımı azalır. MIS heteroeklem güneş pillerindeki ve Schottky diyotlarındaki üst metal katman; hem elektriksel bağlantıyı sağlama, hem de potansiyel engeli oluşturma görevi görür. Üst metal katman oluşturmak için genellikle saydam metal ve kafes (grid) yaklaşımları kullanılır. Bunlardan başka üçüncü bir yaklaşım ise kalay oksit, indium oksit, çinko oksit, kadmiyum oksit gibi saydam iletken oksitler üst katman olarak kullanılırlar (Engin, 1995; Tercan, 2000). MIS güneş pillerinin başlıca üstünlüğü, yüksek sıcaklıkta, difüzyonla eklem oluşturma adımının olmaması nedeniyle açık devre gerilimi yüksektir. Bu nedenle difüzyonla yapılan güneş pillerine göre verim üstünlüğüne sahiptir. AM1 koşulunda, bir metal-SiO₂-Si sistemi için %18 değerine ulaşan verim elde edilmiştir (Tercan, 2000).

5.3.4. Yarıiletken-yalıtkan-yarıiletken (SIS) heteroeklem güneş pilleri

MIS güneş pillerinde kalay oksit, indium oksit, kadmiyum oksit gibi saydam oksitler üst katman olarak kullanılabilirler. Bu iletken oksitler çok fazla katkılı yarıiletkenler olduğundan, bu yapılara yarıiletken-yalıtkan-yarıiletken (SIS) heteroeklemlili güneş pilleri adı verilmektedir (Engin, 1995).

5.3.5. Elektrolitik güneş pilleri

Eklem yapısına göre yapılan sınıflandırmada güneş pilleri elektronik ya da elektrolitik karakterde olabilir. Elektronik karakterde olan güneş pilleri, fiziksel kontak sağlanmış katımlarla oluşturulurlar. Elektrolitik karakterde olanlar ise, uygun bir elektrolit içine batırılan iki elektrot ile elde edilirler. Ticari amaçlı ilk elektrolitik fotovoltajik pil, kurşun nitrat çözeltisi içine batırılan bakır oksit ve kurşun elektrotlarla oluşturulmuştur (Kavcar, 2001).

6. GÜNEŞ PİLLERİNİN VERİMİ

6.1. Giriş

Bir güneş pilinin verimi, onun kalitesinin göstergesi olarak çok önemlidir. Bir güneş pilinin verimi ne kadar yüksek olursa, pil o derece kaliteli olur (Köse,1986). Pilin kaliteli olması ise, kullanım alanlarının yaygınlığı ve kullanıcı kitlesinin fazlalığı ile doğru orantılıdır.

Güneş pillerinin çıkış güçleri; diğer dönüşüm sistemleri ile karşılaştırıldığında, daha düşüktür. Yüksek bir çıkış gücü elde edebilmek için güneş pilleri birbirlerine seri ve paralel bağlanarak, güneş pili panelleri ve modülleri ile güneş pili sistemleri kurulmaktadır. Bundan başka bilim adamları; güneş pillerinin verimini arttırmak amacıyla yaptıkları çalışmalarla, güneş pili teknolojisindeki gelişmelere her geçen gün bir yenisini eklemektedirler.

6.2. Güneş Pillerinin Verimi

Bir güneş pilinden sağlanan maksimum gücün, pil üzerine gelen maksimum güce oranına güneş pilinin verimi denir ve η simgesi ile gösterilir (Çabuk, 1992). Güneş pilinin maksimum güç çıkışı P_m ve optik giriş gücü (atmosfer dışında birim alana düşen güneş enerjisi şiddetidir) P_{in} olmak üzere güneş pilinin verimi,

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (6.1)$$

bağıntısı verilir (Demirci, 1996).

Fotovoltaik güneş pillerinin verimlerinin özetlendiği çizelgelerin geçerlilik süreleri, sürekli gelişimlerine bağlı olarak oldukça kısa olmaktadır (Oktik, 2001). Ancak karşılaştırmalı bir kaynak olması amacıyla bugüne kadar yapılmış bazı yüksek verimli güneş pillerinin verimleri ile yapıları Çizelge 6.1. 'de verilmiştir (Photovoltaics Special Research Centre, 1999).

Çizelge 6.1. Bazı güneş pillerinin verimlerinin çizelge üzerinde gösterilmesi.

(Global AM1.5 spektrumu, 1 000 Wm⁻², 25 °C) (Tercan, 2000).

PİLLER	$\eta(\%)$	Alan ^a (cm ²)	V _{ad} (V)	J _{kd} (mA/cm ²)	FF (%)	Test Merkezi ^b (ve Tarih)	Açıklama
Si (kristal)	24.4 ±0.5	4.00 (da)	0.696	42.0	83.6	Sandia (2.98)	UNSW PERL
Si (çoklukristal)	19.8 ±0.5	1.09 (a.p)	0.654	38.1	79.5	Sandia (2.98)	UNSW Eurosolare
GaAs (kristal)	25.1 ±0.8	3.91 (t)	1.022	28.2	87.1	NREL (3.97)	Kopin, GaAs Pencere
GaAs (incefilm)	23.3	4.00 (ap)	1.01127.6	27.6	83.8	NREL (4.90)	Kopin, 5 mm CLEFT
GaAs (çoklu kristal)	18.2 ±0.5	4.011 (t)	0.994	23.0	79.7	NREL (11.95)	RTI, Ge Altaş
InP (Kristal)	21.9 ±0.5	4.02 (t)	0.878	29.3	85.4	NREL (4.90)	Spire, Epitaksiyel
CdTe (polikristal ince film)	16.0 ±0.2	1.0 (ap)	0.840	26.1	73.1	JQA (3.97)	Matsushita 3.5 mm CSS
a-Si ^c	12.7 ±0.4	1.0 (da)	0.887	19.4	74.1	JQA (4.92)	Sanyo
GaIn/PGaAs (çok katlı)	30.3	4.0 (t)	2.448	14.22	85.6	JQA (4.96)	Japan Energy (monolithe)
GaAs/CIS (ince film)	25.8 ±1.3	4.00	-	-	-	NREL (11.89)	Kopin/Boing (4 terminal)

^a(ap):aktif alan; (t):toplam alan; (da):seçilmiş aydınlanma alanı; JQA:Japan Quality Assurance, NREL=National Renewable Laboratory.

6.3. Güneş Pillerinin Verim Hesaplamaları

Güneş pillerinin verimini belirleyen üç parametre vardır. Bunlar açık devre voltajı (V_{ad}), kısa devre akımı (I_{kd}) ve fill faktörüdür(FF). Fill faktörüne doluluk faktörü

de denir (Köse, 1986; Çabuk, 1992). Radyasyon kaybı katsayısı, uzay uygulamaları için geçerli olan dördüncü bir parametredir (Köse, 1986).

1. Açık Devre Voltajı (V_{ad}): Pilden geçen akımın sıfır olması durumunda, pil uçlarından ölçülen gerilime denir (Çabuk, 1992). Pilin dış devresine bağlanmış yük direncinin (R_L), devre direncinden çok daha büyük olduğu durumdaki gerilimdir. Yük direncinin büyük olmasından dolayı, devreden herhangi bir akım geçmez (Köse, 1986). V_{ad} veya V_{oc} ifadeleriyle gösterilir.
2. Kısa Devre Akımı (I_{kd}): Güneş pilinin uçları arasına uygulanan gerilim sıfır olduğunda, aydınlatma altında pilden geçen akımdır. Seri direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda; ışıkla oluşan akıma eşit olup, ışımaya şiddetine bağlıdır (Çabuk,1992). Bu akım devre direncinin, pilin dış devresine bağlanmış yük direncinden (R_L) büyük olduğu zaman, yük direncinden geçen akımdır (Köse, 1986). I_{kd} veya I_{sc} ifadeleriyle gösterilir.
3. Fill Faktörü (FF): Bir güneş pilinin maksimum çıkış gücünü, açık devre voltajı ve kısa devre akımına bağlı olarak tanımlamak için kullanılan bir parametredir. Fill faktörüne doluluk faktörü de denir ve FF ifadesiyle gösterilir (Çabuk, 1992). Güneş pilinin iç seri direncinden kaynaklanan bir niceliktir. Seri direnç arttıkça fill faktörü azalır (Tercan, 2000). Fill faktörü; pilin maksimum çıkış gücünün, açık devre voltajı ile kısa devre akımı çarpımına oranına eşittir (Köse, 1986; Çabuk, 1992). Buna göre fill faktörü,

$$FF = \frac{P_m}{V_{ad} I_{kd}} \quad (6.2)$$

bağıntısı ile tanımlanır. FF açık devre voltajının fonksiyonu olarak,

$$FF = \frac{V_{ad} - \ln(V_{ad} + 0,72)}{V_{ad} + 1} \quad (6.3)$$

bağıntısı ile verilir. Burada,

$$V_{ad}^1 = \frac{V_{ad}}{(kT/q)} \quad (6.4)$$

bağıntısı ile tanımlanır. (6.4) bağıntısındaki kT/q ifadesi termal gerilimdir ve oda sıcaklığında değeri 0.02559 V 'dur (Çabuk,1992). Fill faktörünün değeri, güneş pilinin idealliğinin bir ölçüsüdür. İdeal bir güneş pilinde fill faktörü 1 'e eşittir. Bu yüzden herhangi bir güneş pilinde fill faktörünün 1 'e yakın olması istenir. Fill faktörünün yüksek olması, güneş pilinin veriminin yüksek olduğunu gösterir. Fill faktörünün büyük olması için seri direncin (R_s), diyodun ideal olma faktörünün (A_o), ters doyum akım yoğunluğunun(J_0) ve sıcaklığın (T) küçük; yasak enerji aralığının (E_g) ve şönt direncinin büyük olması gerekir (R_{sh}) (Köse, 1986). Bir güneş pilinin açık devre voltajı (V_{ad}), kısa devre akımı (I_{kd}), fill faktörü(FF) ve pil üzerine gelen ışımaya şiddeti (P_{in}) bilindiğinde,

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \quad (6.5)$$

veya

$$\eta = \frac{(V_{ad} I_{kd}) FF}{P_{in}} \times 100(\%) \quad (6.6)$$

bağıntıları kullanılarak verimi hesaplanabilir (Çabuk, 1992).

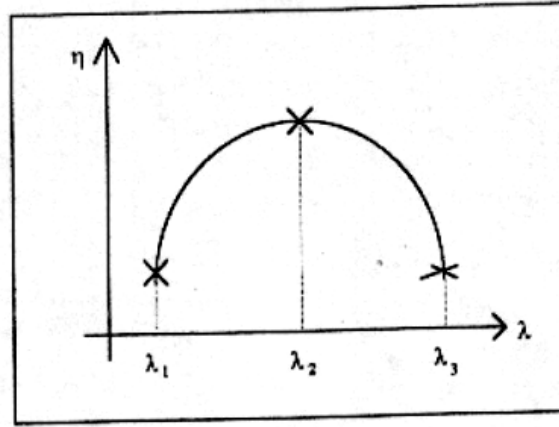
6.4. Kuantum Verimi

Güneş pilinin verimini etkileyen parametrelerden kısa devre akımı I_{kd} , pilin iç özelliklerine bağlıdır. Monokromatik bir aydınlatma altında fotoakım bağıntısı,

$$I_{kd} \approx I_L = qA_a \Gamma(h\nu \leq E_g)(1 - R)[1 - \exp(-\alpha x)]\eta_Q(\lambda) \quad (6.7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A_a pilin ışığı gören etkin alanı (cm^2), Γ pili aydınlatan

$h\nu \geq E_g$ enerjili foton akısı ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), R pil yüzeyinin yansıtma katsayısı, α pilde kullanılan malzemenin soğurma katsayısı (cm^{-1}), x soğurma ortamının kalınlığı ve η_Q kuantum verimidir. Kuantum verimi; herhangi bir aydınlatma altında, foton başına güneş pilinde oluşan elektron hol çifti sayısına denir.



Şekil 6.1. Kuantum veriminin dalgaboyuna bağlılığının gösterimi (Demirci, 1996).

Kuantum verimine toplama verimi ya da kuantum toplama verimi de denir. Kuantum veriminin dalgaboyuna bağlılığı, Şekil 6.1. 'de görülmektedir. Kuantum verimi; küçük dalga boyları için güneş pilinin p-tipi bölgesinde, büyük dalga boyları için ise n-tipi bölgesinde daha büyüktür. Yük taşıyıcılarının yeniden birleşerek yok olmaları, kuantum veriminin düşmesine yol açar. (6.7) bağıntısında $R \approx 0$ ve $\alpha x \gg 1$ olması durumunda kuantum verimi,

$$\eta_Q(\lambda) = \frac{I_{kd}(\lambda)}{qA_a \Gamma(\lambda)} \quad (6.8)$$

bağıntısı ile bulunabilir. Bu bağıntıdan yararlanarak, herhangi bir aydınlatma altındaki kısa devre akımı I_{kd} için,

$$I_{kd} = A_a q \int_{\lambda_g}^{\infty} n_Q(\lambda) \frac{d\Gamma}{d\lambda} d\lambda \quad (6.9)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada,

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \quad (6.10)$$

olmak üzere, $\lambda \gg \lambda_g$ olan dalga boyları göz önüne alınır (Yüksel, 1990; Demirci, 1996 Kittel, 1996;).

6.5. Güneş Pillerinin Verim Ölçümleri

Güneş pillerinin verim ölçümünde kabul edilen yöntem referans pil yöntemidir. Hava geçirmez şekilde hazırlanan referans pil, test pili ile aynı malzemeden yapılmalı ve aynı spektral tepkiyi vermelidir. Standart test koşullarının sağlanması için pil sıcaklığı 28 ± 2 °C ve piller üzerine gelen ışımaya şiddeti 100 W/m^2 olmalıdır. Ölçüm aletleri $\pm \%5$ 'den daha küçük hataları belirleyebilmelidir (Çabuk, 1992). Verim ölçümleri doğal güneş ışığında ya da güneş ışımaya denk ışımaya veren güneş simülatörleri ile yapılabilir. Yerel ölçümlerde kullanılan simülatörler için önerilen ışımaya kaynakları şunlardır:

- a. Dichroic, süzgeçli ELH tipi tungsten lamba,
- b. Kısa arklı Xenon lamba,
- c. Uzun arklı Xenon lamba.

Bu üç kaynaktan sağlanan ışınların spektrumu, güneş ışınlarının spektrumuna çok yakındır (Chopra and Das, 1983).

Bir güneş pilinin verim ölçümü yapılırken, uygun şartlar altında akım ve gerilim değerleri kaydedilir. Bu değerler kullanılarak güneş piline ait karakteristik akım-gerilim eğrisi (I-V eğrisi) çizilir. Elde edilen I-V eğrisinden güneş pilinin verimini belirleyen parametreler bulunarak, verim hesabı yapılır (Çabuk, 1992).

6.5.1. Bir güneş pilinin karakteristik akım-gerilim eğrisi

Bir güneş piline ait karakteristik akım-gerilim (I-V) eğrisi, üç ayrı yöntemle elde edilebilir.

1. Sabit bir ışık şiddeti altında, değişken bir direncin açık devre ve kısa devre durumları arasında değiştirilerek; pilin uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akımın ölçülmesi ile,
2. Güneş pilinin karanlıkta, bir dış DC besleme kaynak yardımıyla diyot gibi çalıştırılması ile,
3. Şiddeti değiştirilebilen bir ışık kaynağının aydınlatması altında V_{ad} ve I_{kd} değerlerinin ölçülmesi ile elde edilebilir.

Bu yöntemlerden en basit ve en yaygın kullanılanı birincisidir (Köse, 1986). I-V eğrisi elde etmek için ışık kaynağı dışında kullanılan genel aygıtlar şunlardır:

- a. Sabit yük dirençleri: Bu dirençler I-V eğrisi üzerinde sadece belirli noktaların elde edilmesini sağlarlar. Kısa devre akımı kaydedilirken, pil üzerindeki gerilim azalması 20 mV 'u aşmamalıdır. Açık devre gerilimi, iç direnci en az 20 k Ω /V olan bir voltmetre ile ölçülmelidir.
- b. Değişken güç kaynağı: Bu aygıt ile sürekli bir I-V eğrisi elde edilir. Aygıtta sinüzoidal bir işaret yüklenir. Akım gerilim dönüştürücüsü kullanılarak; pilden geçen akım, gerilim işaretine dönüştürülür. Bundan sonra pilin uçlarındaki gerilim ile pilden geçen akım, bir x-y kaydedicinin veya osiloskobun sırasıyla x ve y girişlerine verilir. Böylece osiloskop ekranında pilin akım gerilim (I-V) eğrisi gözlenir.
- c. Mikro işlem veri sistemi: Bu sistem ek bir güç kaynağı içerir. Sistem içerisinde güç yükselticileri, x-y kaydediciler, ekran, mikrobilgisayar ve ilgili elektronik aygıtlar yer almaktadır. Bu sistemde hem pillerin akım-gerilim değerleri ölçülmekte; hem de bu değerler bilgisayar yardımı ile değerlendirilerek, çıkış parametreleri belirlenmektedir. Bu sistem birçok pilin değerlendirilmesi gerektiğinde, seri üretim durumlarında oldukça

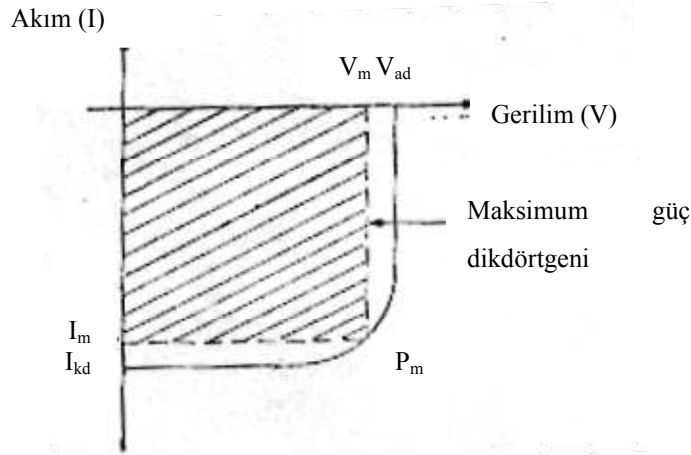
yararlıdır. Verilerin işlenmesinde çok büyük bir hız elde edilebilir (Çabuk, 1992).

6.5.2. Bir güneş pilinin I-V eğrisinden yararlanılarak veriminin bulunması

Bir güneş pilinin I-V eğrisi üzerindeki değişik noktalarda, akım gerilim çarpımlarının (IV) hesaplanması ve bu çarpımların maksimum olduğu noktanın belirlenmesi ile maksimum güç noktası (P_m) bulunmuş olur. Bu noktanın akım ve gerilim eksenleri üzerindeki izdüşüm değerleri ise sırasıyla pilin maksimum akım (I_m) ve maksimum gerilim (V_m) değerleri olarak bilinir. Pilden elde edilecek maksimum çıkış gücü,

$$P_m = I_m V_m \quad (6.11)$$

bağıntısından bulunabilir (Çabuk, 1992).



Şekil 6.2. Bir güneş pilinin karakteristik akım-gerilim (I-V) eğrisinin gösterimi

(Köse, 1986).

Pilden elde edilecek bu maksimum çıkış gücü, Şekil 6.2. 'de görüldüğü gibi pilin I-V eğrisi içine çizilebilecek maksimum alanlı dikdörtgen alanına eşittir (Köse, 1986; Tercan, 2000).

Pil üzerine gelen güç P_{in} bilindiğinde, güneş pilinin verimi (6.1) bağıntısı ile bulunabilir. Burada pilin maksimum çıkış gücü P_m , I-V eğrisinden bulunabilir. Bundan başka I-V eğrisinden yararlanılarak; güneş piline ait açık devre voltajı (V_{ad}), kısa devre akımı (I_{kd}) ve fill faktörü (FF) belirlenebilir. Bu parametreler (6.6) bağıntısında kullanılarak güneş pilinin verimi bulunabilir (Çabuk, 1992).

6.6. Güneş Pillerinin Verimini Sınırlayan Etkenler

Güneş pillerinin verimini sınırlayan etkenler: sıcaklık etkeni, yüzey parametresi etkeni, spektral etken ve foto açısal etkendir (Demirci, 1996).

6.6.1. Sıcaklık etkeni

Güneş pillerinin çalışma sıcaklığı, çeşitli kullanım alanlarına göre geniş bir aralıkta değişim gösterir. Bu yüzden sıcaklığın güneş pilinin verimi üzerine etkisinin bilinmesi gerekir. Güneş pilinin kısa devre akımı sıcaklığa pek fazla bağlı değildir. Sıcaklığın artmasıyla, kısa devre akımında az bir artma eğilimi gözlenir. Bunun nedeni, sıcaklık artmasıyla yarıiletken yasak bant aralığının azalması ve bunun sonucunda ışınım soğurulmasında çoğalmanın meydana gelmesidir. Diğer güneş pili parametreleri olan açık devre voltajı ve fill faktörü sıcaklık artışıyla azalır (Engin, 1995). Kısa devre akımı ile açık devre voltajı arasındaki ilişki,

$$I_{kd} = I_0 \left(e^{qV_{ad}/kT} - 1 \right) \quad (6.12)$$

bağıntısı ile gösterilir. Küçük olan negatif terim ihmal edilerek, bu bağıntı,

$$I_{kd} = AT^\gamma e^{-E_{g_0}/kT} e^{qV_{ad}/kT} \quad (6.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A sıcaklıktan bağımsız bir sabit, E_{g_0} güneş pilinin yapıldığı yarıiletkenin sıfır derece sıcaklıktaki yasak bant aralığıdır (bant aralığı lineer olarak sıfır derece sıcaklıktaki değerine yaklaştırılmaktadır). γ , I_0 'ı belirleyen parametrelerin

sıcaklığa olan bağımlılıklarını gösterir ve değeri genellikle 1 ile 4 arasında değişir. Sıfır derece sıcaklıkta, pilin uçları arasındaki potansiyel farkı V_{g_0} 'nın,

$$V_{g_0} = \frac{E_{g_0}}{q} \quad (6.14)$$

olduğu dikkate alınarak, (6.13) bağıntısının sıcaklığa göre türevi alınır,

$$\begin{aligned} \frac{dI_{kd}}{dT} &= A \gamma T^{\gamma-1} e^{(V_{ad}-V_{g_0})/kT} \\ &+ AT^\gamma \left(\frac{q}{kT} \right) \left[\frac{dV_{ad}}{dT} - \left(\frac{V_{ad} - V_{g_0}}{T} \right) \right] e^{(V_{ad}-V_{g_0})/kT} \end{aligned} \quad (6.15)$$

bağıntısı elde edilir. I_{kd} sıcaklıkla çok az değiştiğinden bu bağıntıda,

$$\frac{dI_{kd}}{dT} = 0 \quad (6.16)$$

olarak alınır, (6.15.) bağıntısından,

$$\frac{dV_{ad}}{dT} = - \frac{V_{g_0} - V_{ad} + \gamma(kT/q)}{T} \quad (6.17)$$

bağıntısı elde edilir. Bu sonuç; sıcaklığın artmasıyla, açık devre voltajı V_{ad} 'nin lineer bir şekilde azaldığının öngörmektedir (Engin, 1995; Demirci, 1996).

Fill faktörü, $V_{ad}/(kT/q)$ değerine bağlıdır. Sıcaklıktaki değişim, daha çok açık devre voltajını etkilediği için güneş pilinin çıkış gücü ve verimi sıcaklık arttıkça azalır (Demirci, 1996). Silisyumdan yapılmış bir güneş pilinin güç çıkışı, 1 °C 'lik sıcaklık artışında %4-%5 oranında azalır. Bu sıcaklık bağımlılığı, geniş bant aralıklı yarıiletkenlerde daha azdır (Engin, 1995).

Sıcaklığı düşük tutarak, yüksek verim elde etmek için uzayda kullanılan pillerin üzeri erimiş silikondan yapılmış, şeffaf bir örtü ile kaplanır. Bu örtü, çok katlı bir filtre özelliği göstererek, mor ötesi ışınları pil yüzeyinden yansıtır (Köse, 1986).

6.6.2. Yüzey parametresi etkeni

Güneş pili üzerine gelen ışınların bir kısmı, yarıiletken içine girmeden üst yüzey tarafından yansıtılır. Güneş pilinin üst yüzeyine gelen ışınları yansıtma miktarı, yapıldığı yarıiletken maddenin cinsine bağlı olarak değişir. Yansıtma miktarının ölçüsü olan yansıma katsayısı, ortamların kırıcılık indislerine ve yok olma katsayısına bağlı olarak,

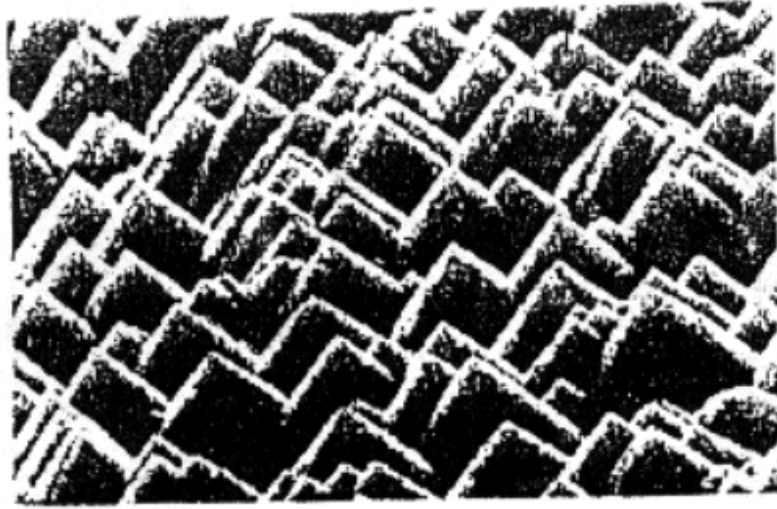
$$R = \frac{\left(n_{k_2} - n_{k_1} \right)^2 + k_{y_1}^2}{\left(n_{k_2} + n_{k_1} \right)^2 + k_{y_2}^2} \quad (6.18)$$

bağıntısı verilir (Demirci, 1996). Burada n_{k_1} ve n_{k_2} ışığın geçtiği ortamların kırıcılık indisleri, k_{y_1} ve k_{y_2} ise bu ortamlara ait yok olma katsayılarıdır.

Güneş pilinin üst yüzeyine gelen fotonların yansıması, pilin veriminde azalmaya sebep olur. Bu azalma miktarı, yansıma miktarıyla doğru orantılıdır. Güneş pili yüzeyine gelen ışınların yansımasını azaltmak için kullanılan yaklaşımlardan biri, özel yapılı yüzeyler oluşturmaktır. Bu yaklaşım altında, güneş pili yapımında yüzeyi desenli silisyum dilimleri kullanılmaktadır. Seçici dağlama yöntemi ile silisyum tabakalarının yüzeylerinde küçük piramitler elde edilmektedir. Bu piramitlerin yüzeylerinden yansıyan ışık, diğer piramitlerin de yüzeylerinden yansıyarak pilin içine girer. Taramalı elektron mikroskobu altında bu piramitlerin görünümü Şekil 6.3. 'de görüldüğü gibidir. Bu yapıya ek olarak yansıma önleyici kaplama da kullanılarak, güneş pilindeki yansıma kayıpları en aza indirilebilir (Engin, 1995; Demirci, 1996). Ne var ki bu kayıplar tamamen ortadan kaldırılamaz (Çetinkaya, 2001).

Güneş pilleri, normal olarak cam altında veya kırılma indisi cama yakın olan ($n_k \approx 1,5$) bir malzeme içinde gömülü olarak bulunur. Güneş pillerinde oluşturulacak yansıma önleyici kaplamada kullanılacak materyalin sahip olması gereken en uygun kırılma indisi 2.3 'dür. Bu materyalin optimum kırılma indisine sahip olması yanında, saydam olması da gereklidir. Bu kaplama genellikle amorf yapıda oluşturulup; buharlaştırma, oksidasyon, anodiz ve kimyasal yolla elde edilir. Bunun için kullanılan

en ucuz yöntemse püskürtme yöntemidir. En yüksek morötesi soğurmaya sahip olan kaplama, buharlaştırma yöntemi ile elde edilir. Tek katlı veya çok katlı kaplama ile yansımaya oranı, %3-%4 değerlerine düşürülebilmektedir. Seyreltik NaOH çözeltisi kullanılarak, silisyum güneş pilinin yüzeyi desenli hale getirilebilir. Böylece yansımaya önleyici kaplama oluşturulmadan, ışınların yansımaya oranı en aza indirilebilir (Engin, 1995).



Şekil 6.3. Taramalı elektron mikroskobu altında özel yapılı silisyum yüzeyin görünümü (Engin, 1995).

6.6.3. Spektral etken

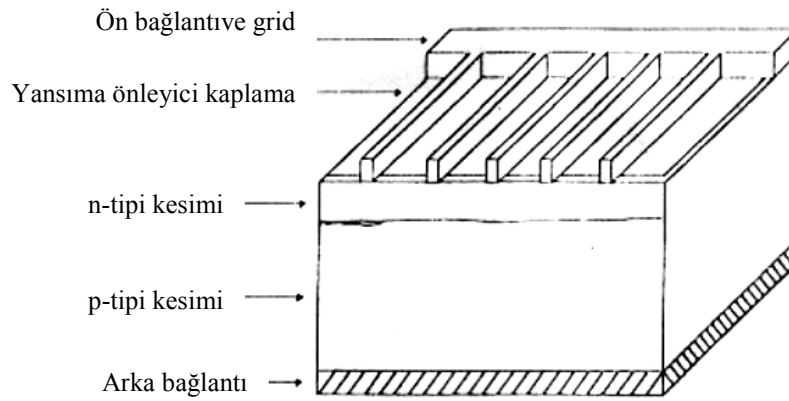
Yarıiletken üzerine gelen monokromatik ışık, yarıiletkende elektron-hol çiftlerinin oluşumuna sebep olur. Elektron hol çiftlerinin yaratılma hızının, yarıiletken yüzeyinden içine doğru olan değişimi,

$$G = (1 - R)\alpha N e^{-\alpha x} \quad (6.19)$$

bağıntısı ile verilir. Burada; N yarıiletken üzerine gelen ışığın foton akısı, R yansıtma katsayısı, α soğurma katsayısıdır (Engin, 1995).

Kısa dalga boylu ışınım için α çok büyük olduğundan, yarıiletkene gelen bu ışınım hemen soğurulur. Fakat kısa dalga boylu ışınım için kuantum verimliliği çok düşük olur. Kuantum verimliliği görünür dalga boylarında en yüksek değere ulaşırken, kızılötesi bölgelerde oldukça düşüktür (Demirci, 1996; Engin, 1995).

Güneş piline gelen ışığın dalga boyu arttıkça; monokromatik güç başına kısa devre çıkış akımı önce artar, sonra azalır (Engin, 1995). Bir güneş pilinin temel kesimleri, Şekil 6.4. 'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Bir güneş pilinin temel kesimlerinin şematik görünümü (Engin, 1995).

6.6.4. Foto açısal etken

Yarıiletken güneş piline gelen fotonlar yüzeye çarpınca; gelen ışığın bir kısmı yüzey tarafından yansıtılırken, ışığın geri kalan kısmı yarıiletken tarafından soğurulur veya malzemedan geçer (Demirci, 1996).

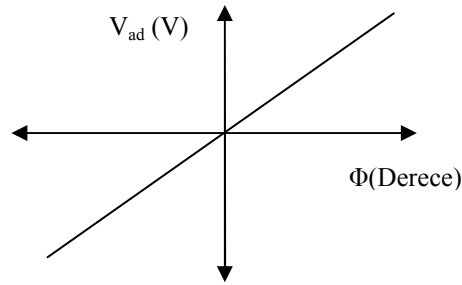
Işık pil yüzeyinin normali ile bir açı yaparak geldiğinde, bir kısmı yüzey tarafından yansıtılır. Yansıtma katsayısı, ortamların kırıcılık indislerine ve yok olma katsayısına bağlı olarak, (6.18.) bağıntısında verildiği gibidir. $h\nu$ enerjisi ile pile giren fotonların soğurulma katsayısı ise,

$$\alpha = \left(\frac{q^2 (2m_h^* m_e^* / m_h^* + m_e^*)^{3/2}}{nch^2 m_e^*} \right) \quad (6.20)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Güneş pili üzerine gelen ışığın bir kısmının yutulması ve yansıtılmasından sonra, bir kısmı da şiddeti zayıflayarak güneş pilinden geçer. Geçen kısım T_g ,

$$T_g = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha x}}{1 - R^2 e^{-2\alpha x}} \quad (6.21)$$

bağıntısına eşittir Bir güneş pilinin açık devre voltajının, güneş pili üzerine gelen ışığın açısıyla ilişkisi Şekil 6.5. 'de görüldüğü gibidir (Demirci, 1996).



Şekil 6.5. Açık devre voltajının (V_{ad}), pil üzerine gelen ışığın açısıyla (Φ) ilişkisinin şematik görünümü.

6.7. Güneş Pillerinin Verim Kayıpları

Güneş pillerinin güneş enerjisini elektrik enerjisine çevrim verimi, diğer enerji çevrim sistemlerine göre daha düşüktür (Köse, 1986). İdeal şartlarda bile, bir güneş pilinin üzerine gelen güneş enerjisinin yaklaşık %75 'lik bir kısmı enerji çevriminde kullanılamamaktadır (Tercan, 2000). Güneş pillerinde verim kaybına sebep olan birçok etken vardır. İlk çalışma anından başlayarak görülen kayıplar şu şekilde sıralanır:

- a. Işıksal kayıplar: Güneş ışığı fotonlarının soğurulamaması ve azınlık taşıyıcılarının üretilmemesinden doğan kayıplardır.

- b. Elektriksel kayıplar: Fotovoltaik diyotların optimum elektrik parametrelerini düşüren kayıplardır.
- c. Ara yüzey kayıpları: Güneş pilini meydana getiren yarıiletken tabakalar arasındaki yüzeylerde, hacim kayıplarına ek olarak ortaya çıkan kayıplardır.

Güneş pilinin verimi zamanla azalır. Bu ise tanımlanan hacim veya ara yüzey özelliklerindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır (Çetinkaya, 2001).

6.7.1. Işıksal kayıplar

Güneş pillerinde üretilen akım değeri, üretilen azınlık yük taşıyıcıları ve soğurulan foton sayısı ile belirlenir. Işıksal kayıplar, üretilen akım değerinde azalmalara yol açar. Bu kayıplar, her tabakada gerçekleşen yansıma kayıpları ile tabakalar veya ara yüzeylerde görülen dış soğurulma kayıpları olarak iki kısımda incelenebilir (Çetinkaya, 2001).

6.7.1.1. Işıksal yansıma kayıpları

Işıksal yansıma kayıpları; güneş ışınımının güneş piline ulaşmasından itibaren sırayla üst yüzeyde, yarıiletken tabakada ve omik kontakta gerçekleşebilir.

Güneş pilinin üst yüzeyinde yer alan saydam kaplamadan yansıma, ilk yansıma kaybını oluşturur. Saydam kontaklardaki kayıplar; kontak tipi, iletici cam veya metal ızgara (grid) ve bu kantağın gerektirdiği kapasitesine bağlı olarak önemli değişimler gösterir. Bir metal kontak kullanıldığında, yansıma kayıpları %5 ile %10 arasında değişir. Geniş alanlı cihazlarda, kabul edilebilir direnç kayıplarına ulaşmak amacıyla daha yüksek yansıma kayıpları hoş görülebilir (Çetinkaya, 2001).

Pilin üst yüzeyinde meydana gelen yansıma kayıpları, bu yüzey üzerinde desenler oluşturulması ve yüzeyin yansıma önleyici kaplama ile kaplanması gibi teknolojik yöntemlerle en aza indirilmektedir. %3-%4 düzeyine kadar düşürülebilen üst yüzey yansıma kayıpları, tamamen ortadan kaldırılamamaktadır (Engin, 1995; Demirci, 1996).

Güneş pilinde yansıma önleyici kaplama ile yarıiletken tabakanın ışıksal

sabitleri arasındaki farklılıklara bağlı olarak, yarıiletken tabakalardan bir miktar yansıma beklenebilir. Güneş pilinin bu kısmındaki yansımalar, yansıma önleyici kaplama ile yarıiletken tabakaların uygun işlemlerden geçirilmesi ve ışık tuzaklaması ile %5 'in altına düşürülebilir (Çetinkaya, 2001).

Güneş pilindeki omik kantağa, soğurucu-üretici yoluyla bir miktar ışığın sızması beklenebilir. İdeal bir durumda, bu ışık tekrar soğurucu-üreticiye yararlı bir şekilde soğurulmak üzere yansıtılabilir. Omik kontaktaki yansıma kayıpları, %2 'yi geçmemelidir. İyi tasarlanmış bir güneş pilinde, bu üç bölgede meydana gelen toplam ışıksal yansıma kayıpları %18 'e kadar çıkabilir. Bu oran uygun işlemlerle %5 'e kadar düşürülebilir (Çetinkaya, 2001).

6.7.1.2. Işıksal dış soğurulma kayıpları

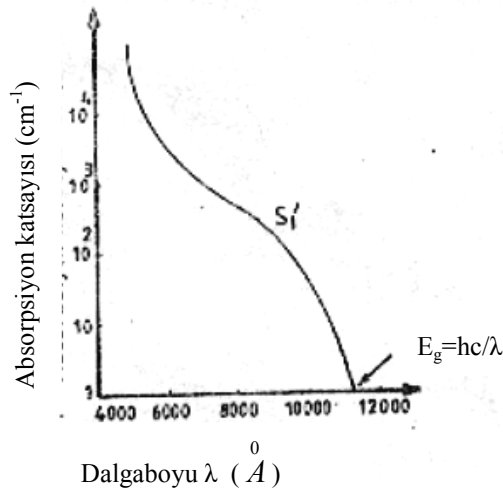
Fotonların azınlık taşıyıcısı üretiminin mümkün olmadığı tabakalar tarafından soğurulması üzerine ortaya çıkan kayıplar, bu tür kayıplardır. Dış soğurulma kayıpları için verilen oran %0-%10 arasında değişmektedir (Çetinkaya, 2001).

Fotovoltaik güneş pilleri, yasak enerji aralığına karşılık gelen dalga boylarına sahip ışınları ($h\nu \leq E_g$) absorplayabilirler. Yasak enerji aralığından daha küçük enerjili ışınları ($h\nu \leq E_g$) absorplayamazlar. Absorpsiyon katsayısının, yasak enerji aralığına yakın dalga boylarında değişimi daha hızlıdır. Soğurma katsayısı α 'nın küçük olması, fotonların derine nüfuz ettiğini ve yetersiz foton-elektron etkileşmesinden dolayı maddenin bir tarafından diğer tarafına geçtiğini ifade eder. Böyle bir geçişten doğan P_{gk} güç kaybı,

$$P_{gk} = \int_0^{\infty} P_{in}(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)d\lambda} \quad (6.22)$$

bağıntısı ile verilir. Burada $P_{in}(\lambda)$ gelen ışının güç yoğunluğunu, d yarıiletken tabakanın kalınlığını ve $e^{-\alpha(\lambda)d\lambda}$, absorplanmayan enerji kesrini gösterir. Absorplanmış fotonların büyük bir kısmı, elektron-hol çifti oluşumu için gerekli olan enerjiden daha fazla bir enerjiye sahiptir. Bir güneş pili yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip bir

foton soğurduğunda; fotonun $h\nu - E_g$ kadarlık fazla enerjisi, ısı enerjisine dönüşerek örgü titreşimlerine katkıda bulunur. Sözü edilen bu enerji farkı, güneş pilinden alınan güce bir katkı sağlamadığından verim kaybına sebep olur (Köse, 1986; Tercan, 2000). Şekil 6.6. 'da, yasak enerji aralığı E_g 'den sonra bir soğurulma olmadığı gözlenmektedir (Köse, 1986).



Şekil 6.6. Absorpsiyon katsayısının dalgaboyu ile değişiminin görünümü (Köse, 1986).

Dış soğurulma kayıplarını azaltmak için yasak enerji aralığında tuzak seviyeleri oluşturulur. Bundan başka, güneş pili yapımında heteroeklem yapılar ve daha gelişmiş, yasak enerji aralığı farklı materyallerle çok katlı tabakalar oluşturulur ((Köse, 1986; Tercan, 2000).

Güneş pilinin yeterince kalın olmaması, gelen fotonların soğurulmadan güneş pilini terk etmesine sebep olur. Bu etken, soğurulma kayıplarının azaltılabilmesi için güneş pilinin kalınlığında belirli ölçülere uyma zorunluluğu getirir. Foton soğurulması, indirekt bant aralığına sahip yarıiletkenlerde direkt bant aralığına sahip yarıiletkenlere göre daha azdır (Engin, 1995). İndirekt bant aralığına sahip yarıiletkenlerden yapılan güneş pilleri, direkt bant aralığına sahip yarıiletkenlerden yapılanlara göre daha kalın olmalıdır. Aksi takdirde, yüzeylerine gelen fotonların tümünü soğuramazlar ve ışıksal

soğurulma kaybı meydana gelir. Bu kaybı azaltmak için güneş pili yapımında direkt bant aralığına sahip yarıiletkenlerin kullanılması, hem daha uygun hem de daha ekonomiktir (Engin, 1995; Tercan, 2000).

6.7.2. Elektriksel kayıplar

Bir güneş pilinde elektriksel kayıpları tanımlamanın en kolay yolu, güneş piline ait akım-gerilim eğrisini kullanmaktır. Çünkü elektriksel kayıplar akım ve gerilim kayıplarından oluşur. Toplanıp çoğunluk yük taşıyıcılarına dönüştürülemeyen azınlık yük taşıyıcıları, akım kayıplarını belirler. Gerilim kayıpları, açık devre geriliminin beklenen değerin altına düşmesi olarak tanımlanır. Seri ve paralel (şönt direnci) direnç kayıpları ile zayıf diyot karakteristikleri, elde edilecek akım ve gerilim değerlerini düşürecektir (Çetinkaya, 2001).

6.7.2.1. Akım kayıpları

Bir güneş pilinde üretilen azınlık yük taşıyıcılarının kaybı; hacim içinde yeniden birleşme, yüzeyde yeniden birleşme ve kristal sınırlarının iç yüzeyler gibi davranması gibi birçok yolla gerçekleşebilir (Çetinkaya, 2001).

Güneş pilinin hacmi içinde meydana gelen yeniden birleşme kayıpları, fotonlarla uyarılan yük taşıyıcılarının sonlu ömürlerinden kaynaklanır (Çetinkaya, 2001). Pil içindeki donör ve akseptör atomlarının meydana getirdiği sabit birleşme merkezleri, yük taşıyıcılarının ömürlerini önemli ölçüde azaltır (Köse, 1986). p-n eklemli bir güneş pilinde güneş ışığıyla uyarmalar sonucu oluşan elektron-hol çiftleri, difüzyon mesafesi sonunda yeniden birleşerek yok olurlar. Dolayısıyla, pilden elde edilmek istenen akıma katkıda bulunamazlar (Yüksel, 1990). Bu nedenle ortaya çıkan akım kayıplarını, en aza indirmek için güneş pilinin ışıksal ve elektriksel gereksinimleri arasında bir uyum sağlanmalıdır. Akım kayıplarını azaltmak için fotonlar güneş pilinin p-n eklemine yakın bölgelerine düşürülerek, elektron-hol çiftleri eklem yakınlarında oluşturulabilir. Bundan başka pilin toplayıcı metal kafes aralığı, difüzyon mesafesinden daha dar tutularak elektron-hol çiftlerinin yeniden birleşmesi engellenebilir (Köse, 1986; Yüksel, 1990). Hacim içi yeniden birleşmeden kaynaklanan verim kayıpları, tamamen ortadan

kaldırılmaz. İyi tasarlanmış güneş pillerinde bu kayıpla %5 ile %20 arasında değişmektedir (Çetinkaya, 2001).

Yüzey yeniden birleşmesi, bir malzemedeki her kesintinin yeni elektronik koşullar yaratmasından kaynaklanır. Işınım ile üretilen ve yüzeye doğru yayılan yük taşıyıcıları; yüzey etkilerini önleyici özel önlemler alınmadığı ya da taşıyıcıların yüzeye ulaşmaları engellenmediği zaman; yüzeyde yeniden birleşerek, akıma katkıda bulunmadan yok olurlar. Yüzeyde bir oksit tabakanın oluşturulması, yüzey koşullarının etkisini ve bundan kaynaklanan taşıyıcı kaybını azaltır. Yüzey yakınlarına uygulanan homojen olmayan bir katkılama işlemi; bir iç elektrik alan oluşumuna yol açarak, azınlık yük taşıyıcılarının yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlar. Böylece yüzeyde yeniden birleşme sonucu oluşan akım kayıpları azaltılmış olur. Bu kayıplar en iyileştirilmiş durumdaki güneş pillerinde %0 ile %5 arasında değişir (Çetinkaya, 2001).

Bir güneş pilinin kristal sınırları iç yüzeyler gibi davranabildiğinden, serbest bir yüzey ölçüsünde azınlık yük taşıyıcılarının kaybına sebep olabilirler. Kristal sınırlarında pürüzler çok daha etkin olduğundan, yapılacak bir katkılama işlemi azınlık yük taşıyıcılarını kristal sınırlarından uzaklaştıracak ve bu bölgelerde oluşan akım kayıplarını azaltacaktır (Çetinkaya, 2001).

6.7.2.2. Açık devre gerilimi kayıpları

Homojen eklemler, heterojen eklemler ve Schottky diyotlarında açık devre gerilimi; ya hacim içi yeniden birleşme ömrü ya da ara yüzey yeniden birleşme hızları ile denetlenir. Açık devre gerilimini kontrol eden ve etkileyen diğer parametreler, yasak bant genişliği ile p-n eklemının her iki bölgesindeki katkılama seviyeleridir. Açık devre geriliminden kaynaklanan kayıplar %4 ile %50 arasında değişmektedir (Çetinkaya, 2001).

Bir güneş pilinin uçları arasında gerilimin oluşması, elektronların valans bandından iletim bandına yasak enerji aralığı boyunca uyarılmasıyla sağlanır. Bu uyarılma sonucu elektron-hol çiftleri oluşarak, yarıiletkenin p-tipi ve n-tipi bölgeleri arasında yasak bant genişliği (E_g / q) ile orantılı bir potansiyel farkı oluşmasına yol açarlar (Tercan, 2000). Elektron-hol çifti oluşumu için kullanılabilir enerji miktarı,

yasak enerji aralığının değerine eşittir. Kazanılan enerji miktarı, her zaman yasak enerji aralığından daha küçük olacaktır. Çünkü p-n eklemine uygulanabilir maksimum gerilim; eklem potansiyel engeli yüksekliğine ($e\Phi_0$) eşittir. Φ_0 , p-tipi ve n-tipi bölgeleri oluşturan yarıiletkenlerin Fermi enerji seviyeleri arasındaki farka eşittir. Bir yarıiletkende Fermi enerji seviyesi, iletim bandı ile valans bandı arasında yer alır. Bu nedenle eklem potansiyel engeli yüksekliği ($e\Phi_0$), yasak enerji aralığından (E_g) her zaman küçük olur ($e\Phi_0 < E_g$). Açık devre voltajından kaynaklanan verim kayıplarını belirlemek için voltaj faktörü kullanılır. Voltaj faktörü,

$$F_v = \frac{V_{ad}}{E_g} \quad (6.23)$$

bağıntısı ile verilir (Köse, 1986). Voltaj faktörü; güneş pilindeki p-tipi ve n-tipi bölgelerin Fermi enerji seviyeleri arasındaki farka, dolayısıyla bu bölgelerdeki katkı yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Silisyumdan yapılmış güneş pillerinde voltaj faktörünün değeri, 0.66 ile 0.55 arasında değişir. Voltaj faktörünün artırılması ile verim kaybının azaltılması mümkün görünse de, voltaj faktörünün bir üst limiti vardır. Bu limit katkı yoğunluğudur. Katkı yoğunluğunu arttırarak voltaj faktörünü arttırmak mümkündür. Ancak bu durumda, elektronların mobiliteleri azalacağından verim de azalır. Bu sebeple güneş pili yapımında kullanılacak yarıiletkenlerin katkı yoğunlukları, uygun değerlerde seçilmelidir (Tercan, 2000).

6.7.2.3. Direnc kavıpları

Güneş pilini oluşturan yarıiletkenin direnci, metal bağlantıların direnci ve metal bağlantılar ile yarıiletken arasında oluşan direnc; pilin bir seri dirence sahip olmasına sebep olur. Güneş pilinin eklem bölgesindeki safsızlıklar, kristal bozuklukları ve p-n eklemının kenarlarındaki kaçaklar da düşük şönt direncinin oluşmasına neden olan etkenlerdir (Engin, 1995). Güneş pillerinin yapımında metal kontakların yüzeye kaplanması sırasında kullanılan metal, güneş pilinin yüzeyindeki çizik ve çatlakları kısmen veya tamamen doldurur. Bu ise düşük şönt direncine sebep olur (Tercan, 2000). Seri direncin çok büyük değerleri ile şönt direncinin çok küçük değerleri, sırasıyla kısa

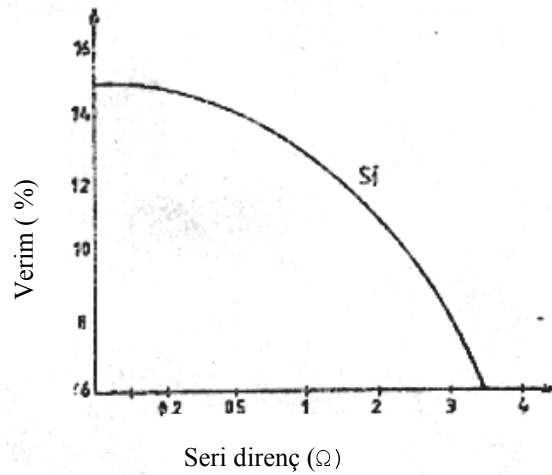
devre akımı (I_{kd}) ve açık devre gerilimini (V_{ad}) değerlerini azaltır. Seri direncin yüksek olması ve şönt direncinin de düşük olması, fill faktörünü azaltarak verimin düşmesine sebep olur (Engin, 1995). Bu dirençler, güneş pilinin akım-gerilim (I-V) eğrisinden hesaplanabilir. Buna göre bir güneş pilinin seri direnci R_s ,

$$\frac{1}{R_s} \approx \left(\frac{dI_d}{dV} \right)_{I_d=0} \quad (6.24)$$

bağıntısı ile ve şönt direnci R_{sh} ise,

$$\frac{1}{R_{sh}} \approx \left(\frac{dI_d}{dV} \right)_{V_d=0} \quad (6.25)$$

bağıntısı ile verilir. Şekil 6.7. 'de silisyumdan yapılmış bir güneş pilinin iç seri direnci ve verimi arasındaki ilişki grafik üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Bir güneş pilinin seri direnciyle verimi arasındaki ilişkinin gösterimi

(Köse, 1986).

Güneş pillerindeki seri dirençten kaynaklanan verim kayıpları, aygıt boyunca akımı toplamak için p-tipi ve n-tipi bölgelerinin üzerine kaplanan metal kontaklardan

kaynaklanan kayıplardır. Özellikle ışığın düştüğü yüzey üzerinde, kontak yüzey alanı küçük tutulmalıdır. Bu durumda oluşan akım için yol uzunluğu ve buna bağlı olarak güneş pilinin seri direnci artar. Bundan başka, bir güneş pilinin karakterizasyonu sırasında akım ölçmek için kullanılan bağlantı kabloları veya iletkenler, güneş pili için seri direnç oluştururlar. Yüksek güçler elde etmek için güneş pilleri arasında bağlantı kurulması, seri direnç kayıplarını arttıracak bir etki oluşturabilir. Bu sebeple piller arasındaki bağlantıların iyi iletkenlerle yapılması ve olabildiğince kısa tutulması gerekir (Tercan, 2000).

Güneş pilinin kenarlarındaki kaçakların önlenmesi, kontak sinterlemesi sırasında metal yarıiletken arasında difüzyonun engellenmesi ve kenar pasifizasyonu ile şönt direnci büyütülerek, düşük şönt direncinden kaynaklanan verim kayıpları azaltılır (Tercan, 2000).

Bir güneş pilinde seri dirençten ve şönt direncinden kaynaklanan verim kayıpları %10 değerine kadar ulaşabilmektedir (Çetinkaya, 2001). Bu kayıplar, pil teknolojisindeki gelişmelerle azaltılmaktadır. İdeal bir güneş pilinde seri direnç sıfır, şönt direnci sonsuz (∞) olmalıdır.

6.7.2.4. Fill faktörü (FF) kayıpları

Fill faktörü (FF), açık devre gerilimi ile kısa devre akımı çarpımının ($V_{ad}I_{kd}$), pilden alınan maksimum güç değerinden (P_m) ne kadar saptığının bir ölçüsüdür ve değeri,

$$FF = \frac{P_m}{V_{ad}I_{kd}} = \frac{V_m I_m}{V_{ad}I_{kd}} \quad (6.26)$$

bağıntısı ile bulunur (Tercan, 2000). Seri direncin çok büyük değerleri ile şönt direncinin çok küçük değerleri sırasıyla, kısa devre akımı (I_{kd}) ve açık devre gerilimini (V_{ad}) değerlerini azaltır. Seri direncin büyük, şönt direncinin küçük olması; fill faktörünü azaltarak verimin düşmesine sebep olur. Seri direncin ve şönt direncinin fill faktörü üzerine olan etkisinin büyüklüğü, bu dirençler güneş pili belirtgin direnci ile

karşılaştırarak bulunabilir. Güneş pili belirtgin direnci R_{ch} ,

$$R_{ch} = \frac{V_{ad}}{I_{kd}} \quad (6.27)$$

bağıntısı ile verilir. Seri direncin değeri; güneş pili belirtgin direncinden çok küçük olduğu durumda ($R_s \ll R_{ch}$) ve şönt direncin güneş pili belirtgin direncinden çok büyük olduğu durumda ($R_{sh} \gg R_{ch}$), bu dirençlerin fill faktörü üzerine etkisi çok az olur. Seri direncin güneş pili belirtgin direncine oranı r_s ,

$$r_s = R_s / R_{ch} \quad (6.28)$$

bağıntısı ile tanımlandığında fill faktörü yaklaşık,

$$FF = FF_0 (1 - r_s) \quad (6.29)$$

bağıntısına eşit olur. Bu bağıntı, $V_{ad} > 10$ ve $r_s < 0,4$ için yaklaşık iki anlamlı rakama dek doğrudur. Burada FF_0 , seri direnç ve şönt direnç olmadığı durumda güneş pilinin fill faktörüdür ve değeri,

$$FF_0 = \frac{V_{ad} - \ln(V_{ad} + 0,72)}{V_{ad} + 1} \quad (6.30)$$

bağıntısı ile bulunur. Buna benzer şekilde şönt direncin güneş pili belirtgin direncine oranı r_{sh} ,

$$r_{sh} = R_{sh} / R_{ch} \quad (6.31)$$

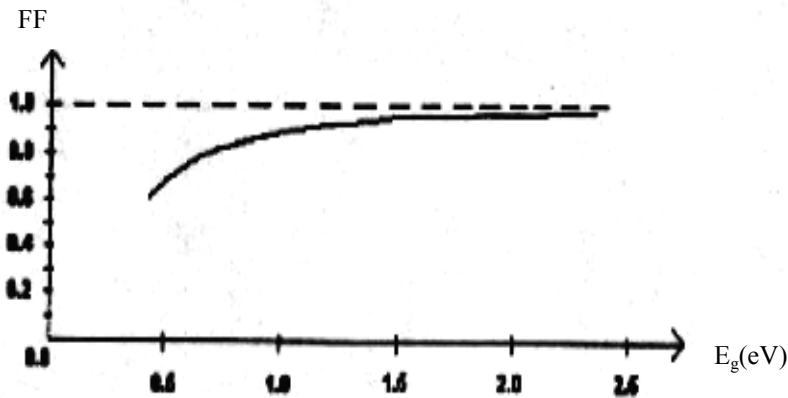
şeklinde tanımlanarak (6.4) bağıntısı göz önüne alındığında, fill faktörü yaklaşık,

$$FF = FF_0 \left\{ 1 - \left(\frac{V_{ad} + 0,72}{V_{ad}} \right) \frac{FF_0}{r_{sh}} \right\} \quad (6.32)$$

bağıntısına eşit olur. Bu bağıntı, $V_{ad} > 10$ ve $r_{sh} < 2,5$ için yaklaşık iki anlamlı rakama dek doğrudur. Hem seri direncin, hem de şönt direncin değeri önemli olduğunda; (6.32) bağıntısındaki FF_0 yerine (6.29) bağıntısındaki FF kullanılarak fill faktörü için,

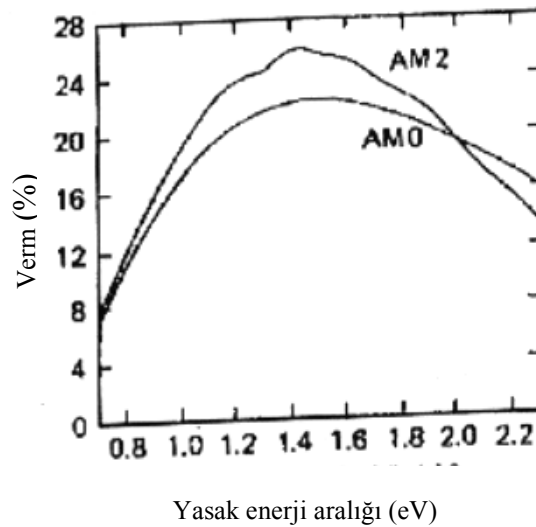
$$FF = FF_0(1 - r_s) \left\{ 1 - \left(\frac{V_{ad} + 0,72}{V_{ad}} \right) \frac{FF_0(1 - r_s)}{r_{sh}} \right\} \quad (6.33)$$

şeklinde yaklaşık bir bağıntı bulunur (Engin, 1995). Bir güneş pilinin fill faktörü seri ve şönt direncinden başka, güneş pilinin yapımında kullanılan yarıiletkenin yasak bant aralığı E_g değerine bağlıdır.



Şekil 6.8. Fill faktörü ile yasak bant aralığı arasındaki ilişkinin gösterimi (Tercan, 2000).

Fill faktörü ile yasak bant aralığı arasındaki ilişki, Şekil 6.8. 'de görüldüğü gibidir (Köse, 1986). Yasak bant aralığı arttıkça, fill faktörü ideal değeri olan 1 'e yaklaşmaktadır. Fill faktörü açısından, maksimum verim elde etmek için güneş pili yapımında olabildiğince büyük yasak bant aralığına sahip yarıiletkenler kullanılmalıdır.



Şekil 6.9. İdeal verimin yasak bant aralığına bağlı değişiminin gösterimi (Tercan, 2000).

Başka bir açıdan bakıldığında, kullanılan yarıiletkenin yasak bant aralığı arttıkça, güneş pili tarafından soğurulan foton sayısı azalır. Bu yüzden, güneş pilinde elde edilen akım değerinin yüksek olması için kullanılan yarıiletkenin yasak bant aralığı küçük olmalıdır. Bu şekilde, kullanılacak yarıiletkenin yasak bant aralığı için en uygun değeri bulma gereği ortaya çıkar. Bunun için ideal verimin yasak bant aralığı ile değişimine bakılır. Şekil 6.9. 'da görüldüğü gibi bir güneş pilinin en yüksek verime sahip olabilmesi için, yapımında kullanılan yarıiletkenin 1.4 eV ile 1.6 eV değerinde yasak bant aralığına sahip olması gerekir (Tercan, 2000).

6.7.3. Ara yüzeyde yeniden birleşme

Heteroeklem yapısına sahip bir güneş pilinde; p-n eklemının iki yanında bulunan materyallerin örgü uyumsuzluğu, ara yüzey konum yoğunluğunun artmasına yol açar. Ara yüzey konum yoğunluğunun artması; yük taşıyıcılarının ara yüzeyde yeniden birleşerek, yok olma hızını artırır. Bu ise güneş pilinde verim kaybının artmasına neden olur. Kadmiyum sülfür-bakır sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) güneş pillerindeki ara yüzey uyumsuzluğu %4 iken, ara yüzey yeniden birleşme hızının yaklaşık 10⁵ cm/s olduğu tespit edilmiştir. Uygun tasarım yöntemleri kullanılarak, kadmiyum sülfür-bakır sülfür

(n-CdS/p-Cu₂S) güneş pillerinin ara yüzeyindeki net kayıp, %5 'in altına indirilebilir (Çetinkaya, 2001).

6.7.4. Verim kaybı süreçleri

Güneş pillerinin maliyetinin düşürülerek kullanımlarının arttırılması, ancak pil ömrünün uzun olması ile sağlanabilir. Fakat günümüzde güneş pillerinin ömrüne ilişkin belirsizlikler vardır. Güneş pilleri için 20 yıllık bir kullanım süresi içinde, %10 ile %20 arasında bir verim azalması hedeflenmektedir. Güneş pillerinin zamanla verimlerinin azalmasına neden olan verim kaybı süreçleri, belirleyici öz süreçler ve çevreden kaynaklanan, etkileri geçici süreçler olarak ikiye ayrılır (Çetinkaya, 2001).

6.7.4.1. Belirleyici öz süreçler

Bir p-n homoeklemine sahip güneş pilinde eklem kontakları ve katkılama malzemeleri belirleyici öz süreçleri belirlerken; heteroekleme sahip güneş pilinde ve Schottky diyotlarında kimyasal elemanları içeren yayılım süreci önem kazanır. Yayılım süreçleri ısı olarak başlatıldığından; belli bir parametrelerdeki verim düşme hızlarını belirlemek amacıyla, yükseltilmiş sıcaklıklarda hızlandırılmış ömür deneyleri yapılır. Çok kristalli güneş pillerinde kristal sınırları, yayılımı sağlayan bir pompa işlevine sahip olabilir. Bu nedenle ölçümlerin gerçek pillerde yapılması, modelleme çalışmalarının çok kristalli malzemelerle yürütülmesi önerilmektedir (Çetinkaya, 2001).

6.7.4.2. Çevreden kaynaklanan, etkileri geçici süreçler

En önemli çevre etkilerinden biri, kaplamanın yetersiz olduğu koşullarda, yarıiletken tabakanın oksitlenmesidir. Diğer dış etkiler arasında pilin dış yüzeyinde güneş ışınımının gelişini engelleyen toz ve pisliklerin birikmesi, kontak malzemelerinin çürümesi, özellikle rutubetli bölgelerde yansıma önleyici kaplamanın çürümesi, morötesi ışınlar veya meteorolojik etkiler nedeniyle kaplama malzemesinin kararması sayılabilir. Bunlardan başka hızlı soğuma ve ısınmanın olduğu bölgelerde sıcaklık dönüşümlerinden kaynaklanan verim kaybı olabilir (Çetinkaya, 2001).

6.8. 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:

1. Yoğunlaştırıcı güneş pili sistemleri,
2. Çok katlı (birçok bant aralıklı) güneş pili sistemleri,
3. İnce film güneş pili teknolojisi.

6.8.1. Yoğunlaştırıcı güneş pili sistemleri

Güneş pillerinden elde edilen elektrik enerjisini daha ucuza mal edebilmek için kullanılan sistemlerden biridir. Bu uygulamalarda güneş ışınları; yansıtıcı veya ışın kırıcı yüzeyler yardımı ile doğrusal ya da noktasal olarak yoğunlaştırılarak, daha küçük alanlı güneş pilleri kullanılır. Güneş ışınlarının yoğunlaştırılması, doğrusal ve noktasal olmak üzere iki şekilde yapılır. Doğrusal yoğunlaştırmada iki boyutlu doğrusal yoğunlaştırıcılar; noktasal yoğunlaştırmada, üç boyutlu parabolik çanak yoğunlaştırıcılar ve merkezi alıcı sistemler kullanılır (www.eie.gov.tr). Yoğunlaştırıcılar, duran fakat periyodik olarak ayarlanabilen veya sürekli güneşi kovalayan yapıda tasarlanırlar (Engin, 1995).

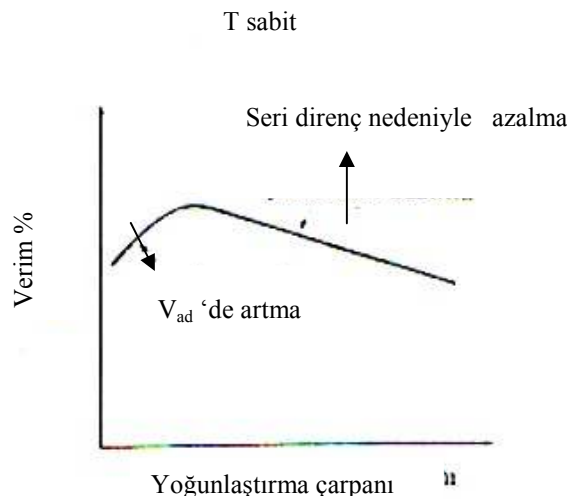
Yoğunlaştırıcı sistemlerde en önemli kavramlardan biri, yoğunlaştırma çarpanıdır. Yoğunlaştırma çarpanı (C); yoğunlaştırıcı sistemin güneşi gören alanının, soğurucu alanına oranı şeklinde tanımlanır (Engin, 1995). Yoğunlaştırma çarpanının maksimum değeri C_m , iki boyutlu doğrusal yoğunlaştırıcılar için,

$$C_{m(2D)} = \frac{1}{\sin(\theta_m/2)} \quad (6.34.)$$

bağıntısı ile ve üç boyutlu parabolik çanak yoğunlaştırıcılar için,

$$C_{m(3D)} = \frac{1}{\sin^2(\theta_m/2)} \quad (6.35.)$$

bağıntısı ile verilir. Bu eşitliklerdeki θ_m ; dünyadan güneşin görüldüğü minimum açı olup, yaklaşık 0.5° 'dir. Bu eşitliklerle hesaplanan değerlere, optik kayıplar sebebiyle pratik uygulamalarda ulaşılamamaktadır (Engin,1995). Yoğunlaştırma çarpanının maksimum değeri C_m ; iki boyutlu doğrusal yoğunlaştırıcılar için 300, üç boyutlu yoğunlaştırıcılardan parabolik çanak yoğunlaştırıcılar için 40 000 mertebesindedir (www.eie.gov.tr). Şekil 6.10. 'da, yoğunlaştırıcı bir güneş pilinin verimi ile yoğunlaştırma çarpanı arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 6.10. Yoğunlaştırıcı bir güneş pilinde, verimin yoğunlaştırma çarpanı ile değişiminin gösterimi (Engin, 1995).

Sabit sıcaklıkta tutulan yoğunlaştırıcı bir güneş pilinin verimi; yoğunlaştırma çarpanının artışıyla artar. Bunun nedeni, ışınım şiddetinin artışıyla kısa devre akımının lineer olarak, açık devre geriliminin logaritmik olarak artmasıdır. Işınım şiddeti arttıkça, açık devre gerilimine bağlı olarak fill faktörü de artar. Bununla birlikte büyük akım yoğunluklarında seri direnç kayıpları önemli olmaya başlar. Güneş pili seri direncini en az düzeye indirmek için düşük dirençli taban kullanma, üst katman direncini azaltma, uygun üst düzey tasarımı kullanma gibi işlemler yapılabilir.

Verim önce yoğunlaştırma çarpanının artışıyla artar. Bunun sebebi, akım yoğunluğunun artışıyla açık devre geriliminin logaritmik olarak artmasıdır. Yoğunlaştırma çarpanının belli bir değerinden sonra, güneş pilinin verimi

yoğunlaştırma çarpanının artışıyla azalır. Bunun sebebi ise, akım yoğunluğunun artışıyla pildeki seri direnç kayıplarının artmasından ileri gelir. Yoğunlaştırıcı sistemlerle Si güneş pillerinin verimi yaklaşık %25 'in üzerine, GaAs güneş pillerinin verimi ise, yaklaşık %30 'un üzerine çıkarılabilmektedir (Engin, 1995).

6.8.2. Çok katlı (birçok bant aralıklı ya da çok eklemli) güneş pili sistemleri

Çok katlı sistemler kullanılarak, verimi %29 'un üzerinde olan piller elde etmek mümkündür (Tercan, 2000). Şekil 6.11. 'de bu sistemlere bir örnek olarak; %29.5 oranında bir verime sahip olan, GaInP₂/GaAs çok katlı güneş pilinin şematik kesiti görülmektedir.

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 6.11. %29.5 oranında bir verime sahip olan GaInP₂/GaAs çok katlı güneş pil kesitinin görünümü x(µm) (Tercan, 2000).

Çok katlı güneş pillerinin yapımları daha karmaşık ve pahalı olduğundan, yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılması daha uygundur. Çok katlı pillerin kullanım alanlarının genişlemesi, maliyetinin düşürülmesi ile gerçekleşebilecektir (Engin, 1995; Tercan, 2000).

Çok katlı güneş pilleri, azalan bant aralıklarına göre üst üste büyütülmüş p-n eklem dizileridir. Aydınlatma, en büyük bant aralıklı tabaka tarafındadır (Tercan, 2000). Düşük enerjili fotonlar dar bant aralıklı yarıiletken üzerine, yüksek enerjili fotonlar geniş bant aralıklı yarıiletken üzerine düşürüldüğünde; daha verimli güneş pilleri oluşturulabilir. Böylece hem düşük enerjili fotonların, hem de yüksek enerjili fotonların elektron-hol çiftleri oluşturması sağlanabilir. Spektrum yarılımı (spectrum splitting) ve ardışık (tandem) güneş pili yaklaşımıyla bu amaç gerçekleştirilir. Spektrum yarılımında, güneş ışınımı 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 getirilirler. Bu uygulamalarla, söz konusu güneş pillerinin verimi arttırılabilir (Engin, 1995).

6.8.3. İnce film teknolojisi

Güneş pillerinde kullanılan malzemenin ve işçiliğin azaltılması, teknolojinin basitleştirilerek maliyetlerinin düşürülmesi yönünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları sonunda; yarıiletken malzemenin geniş yüzeyler üzerine ince film şeklinde kaplanması yöntemi çekici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, güneş pili üretiminde kullanılabilecek bir çok yarıiletken malzemenin; düşük maliyetlerde cam, metal ya da plastik folyo gibi tabakalar üzerinde geniş yüzeylere kaplanabileceğini göstermiştir. İnce film fotovoltaiik malzemeler genellikle çok kristalli yapıya sahiptir. Başka bir deyişle ince film yarıiletken malzemeler; büyüklükleri bir milimetrenin binde birinden, milyonda birine kadar değişen damarlardan oluşmaktadır.

Yarıiletken malzemenin elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri; her damar içerisinde fotovoltaiik uygulamalar için çok uygun olsa da, damarlar arası sınırlarda yer

alan mikro düzeydeki yapısal kusurlar, çok kristalli malzemede karşılaşılan en önemli problemdir. Optiksel özellikleri uygun seçilen bir yarıiletken malzemede; milimetrenin binde biri kadar bir kalınlık içerisinde, güneş ışınlarının tümüne yakın bir kısmı soğurulabilir. Uzun bir süredir araştırma geliştirme çalışmalarının konusu olan ince film güneş pilleri, öngörülen üretim hedeflerinin gerisinde kalmıştır. Bu gün laboratuvar verimlilikleri %18 'e kadar çıkmıştır. Fakat uzun dönem kararlılıklarının arzulanan düzeylere ulaşamamış olması, üretici firmaların kararlılıklarını etkilemektedir. Ancak ulaşılan düzeyde bile ince film güneş pilleri için Siemens, BP Solar, Conan gibi firmalar pilot üretim denemelerini sürdürmektedirler (Oktik, 2001).

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 bir aralığı olan bakır indium-diselenid ($CuInSe_2$) bileşik yarıiletkenidir (Oktik, 2001).

7. GÜNEŞ PİLİ UYGULAMALARINDA DÜN-BUGÜN-YARIN

7.1. Giriş

Fotovoltaik uygulamalar, dünyada kullanılmakta olan yenilenebilir enerji kaynakları arasında en umut verici olanlarından biridir. Sanayileşme ve konfor gereksinimlerinin artışına paralel olarak, elektrik enerjisi ihtiyacı da artmıştır. Bunun sonucu olarak güneş pilleri, alternatif ve güvenilir bir enerji üretim sistemi olarak çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaya başlanmıştır (Çıtıroğlu, 2000).

Güneş pilleri, güneş ışığını doğru akım olarak elektrik enerjisine çevirirler. Elde edilen elektrik doğru akım olarak kullanılabilirdiği gibi, alternatif akıma dönüştürülerek de kullanılabilir veya daha sonra kullanılmak amacıyla depolanabilir.

7.2. Güneş Pili Uygulamaları

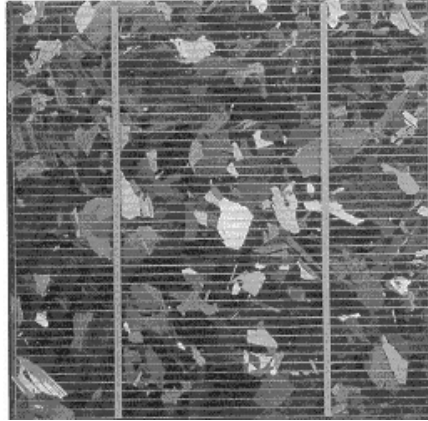
Fotovoltaik etki 1839 'dan beri bilinmesine rağmen; ilk güneş pili 1954 yılında, ABD 'deki Bell Laboratuvarları 'nda geliştirilmiştir. Bir çok üstünlüğe sahip olmalarına karşılık; diğer sistemlere oranla maliyetlerinin yüksek olması, güneş pillerinin uzun yıllar boyunca laboratuvar çalışması olarak kalmasına neden olmuştur. İlk yıllarda daha çok uzay çalışmalarında, uyduların güç gereksinimlerini karşılamak için kullanılmışlardır (Çıtıroğlu, 2000). Güneş pillerinin 1955 yılındaki telefon amplifikatör devrelerindeki ilk kullanımından sonra, uzay uygulamalarındaki kullanımı ilk defa 1956 yılında, Vanquard-I uydusunda olmuştur. Bu uydunun verici anteninin 5 megawatt 'lık enerji ihtiyacını karşılamak için 6 adet güneş pili kullanılmıştır. Bu uygulamadan sonra, Apollo Projesi ile uzaya gönderilecek araçların enerji ihtiyacını karşılamak için güneş pillerinin kullanılması kararlaştırılmıştır (Köse, 1986).

Güneş pilleri; uzay programlarının gelişimiyle birlikte hızlı bir gelişim göstermişlerdir. Güneş pillerinin alternatif ve güvenilir bir enerji üretim sistemi olarak görülmeye başlanması, 1970 'li yılların başında ortaya çıkan petrol krizi sayesinde gerçekleşmiştir. Gelişen performanslarının yanında maliyetlerinin azalması ve güvenilirliklerinin artması, elektrik üretiminde seçenek olarak öne çıkmalarını sağlamıştır. Günümüzde Amerika, Avrupa ve Japonya 'da binlerce şirket ve kişi, günlük

yaşamlarında ve araştırma projelerinde enerji ihtiyaçlarını güneş pillerinden sağlamaktadırlar. Almanya, İtalya ve Yunanistan gibi Avrupa ülkeleri de, elektrik üretimi için güneş pillerini kullanmaktadırlar. Ayrıca güçlü ve gelişmiş elektrik santrallerine sahip olmayan, gelişmekte olan ve az gelişmiş toplumlar; elektrik ihtiyaçlarını fotovoltaik sistemlerle karşılamaktadırlar (İstanbulluoğlu, 1998). Yine de uygulamada güneş pillerinin klasik kullanımı, elektrik dağıtımının erişemediği yerler ile sınırlıdır. Çünkü güneş pili üretimi, ileri düzeyde teknolojik yöntemler gerektirmekte ve pahalıya mal olmaktadır. Ancak gelişen teknolojik yöntemlerle birlikte, yüksek maliyetler geçmişte çok hızlı bir düşme göstermiştir ve bu düşme eğilimi, günümüzde de devam etmektedir. Bu alanda yapılacak Ar-Ge yatırımları, devletlerin bu alanda yapılacak çalışmalarını desteklemeleri ile geliştirilecek teknikler sonucu fiyatların daha da düşeceği kesindir (www.tubitak.gov.tr). Bugün için düz plaka sistemleri ve yoğunlaştırıcı sistemler kullanmak, güneş pili tasarımında maliyeti düşürmek için kullanılan iki temel yöntemdir.

Temel olarak güneş pili; yakıtı güneş ışığı olan, hareketli parçaları olmayan ve çevreye zararlı atıklar içermeyen bir elektrik üretim düzeneğidir. Güneş ışığından her yerde yararlanılabilir. Ayrıca bu sistemler kolay taşınıp, monte edilebilme özelliğine sahiptir. Elektrik çıkış güçlerine göre kol saati, hesap makinesi gibi küçük güçlü yerlerden; elektrik üretim santralleri gibi büyük güçlü yerlere kadar elektrik enerjisinin gerektiği her yerde kullanılabilirler (Çıtıroğlu, 2000).

Güneş pili uygulamalarında kullanılan en küçük pil birimine hücre denir. Bir güneş pili hücresinden elde edilebilecek gerilim değeri 0.5 V ile 1 V arasındadır. Bu değer çok küçük olduğu için güneş pilleri birbirine seri ya da paralel bağlanarak, istenilen gerilime sahip güneş pili modülleri oluşturulur. Güneş pilleri ticari olarak yaklaşık 50 cm x 100 cm alana ve 3 cm kalınlığa sahip modüller halinde pazarlanmaktadırlar. Genelde 36 adet seri bağlı kristal tip silisyum hücrelerden oluşan bir modülden, gündüz saatlerinde yaklaşık 3 amperlik bir akım ve 16 V 'dan fazla bir gerilim elde edilir (www.tubitak.gov.tr). Şekil 7.1. 'de bir güneş pili hücresinin fotoğrafı görülmektedir.



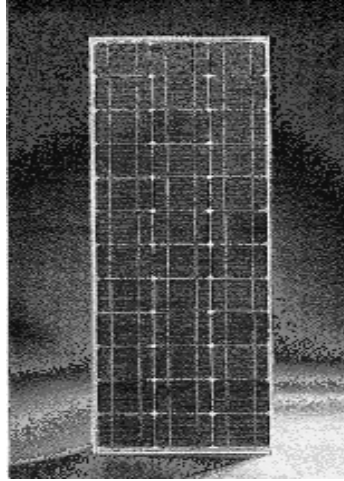
Şekil 7.1. Güneş pili hücrenin fotoğrafı (www.eie.gov.tr).

7.3. Güneş Pili Modülleri

Bir güneş pilinden elde edilebilecek güç 1-2 watt 'tır. Kullanılabilecek düzeyde yüksek güçler elde etmek için, güneş pillerinin bir düzen içinde birbirlerine bağlanmaları gerekir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak, bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak; modüller bir birlerine seri ya da paralel bağlanarak, güç çıkışı bir kaç watt 'tan megawatt 'lara kadar olan fotovoltaik sistemler elde edilebilir (www.eie.gov.tr). Fotovoltaik modül tasarımında; güneş pilleri seri bağlanarak sistemin çıkış gerilimi, paralel bağlanarak ise çıkış akımı arttırılır. 12 V 'luk bir aküyü yüklemek için elde edilecek bir güneş pili modülü, güneşli geçen zaman süresince aküyü dolduracak gerilimi sağlayacak şekilde tasarlanır. Modülün çıkış akımı, yüzeyi üzerine gelen güneş ışınımını şiddetiyle doğru orantılıdır. Bu yüzden modül tasarımı, modül çıkış akımıyla çok yakın ilişkilidir. Bunlardan başka, modülün camı üzerinde biriken tozun, %5 ile %10 arasında bir verim azalmasına sebep olacağı, modül tasarımında göz önüne alınmalıdır (Engin, 1995).

Modülleri daha verimli hale getirebilmek için, güneşin hareketine göre yönlendirmek gereklidir (Çetinkaya, 2001). Kuzey yarımkürede kullanılacak modüller güneşe bakacak şekilde, güney yarımkürede kullanılacak modüller kuzeye bakacak şekilde konumlandırılırlar. Yıl boyunca maksimum çıkış gücü elde etmek için modüllerin yatayla yaptığı açı, genelde buldukları yerin enlem açısına eşit alınır.

Kışın maksimum güç elde etmek için ise modüllerin yatayla yaptığı açı, buldukları yerin enlem açısından 15 °C kadar büyük seçilir (Engin, 1995). Şekil 7.2. 'de bir güneş pili modülünün fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 7.2. Bir güneş pili modülünün fotoğrafı (www.eie.gov.tr).

Güneş pillerinin bir birine bağlanmasıyla modüller, modüllerin bir birine bağlanması ile örgüler oluşur. En basit sistem, bir modül ve buna bağlı bir akü veya elektrik motorundan oluşmuş bir sistemdir. Her modül; paralel veya seri bağlanabilmesine olanak verecek şekilde, bağlantı kutusuyla birlikte tasarlanır. Modüllerin fiziksel ve elektriksel olarak bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya panel adı verilir. Bir modülden elde edilen gücü arttırmak için başvurulan bir yapılanma biçimidir. Bu şekilde çıkış gücünü 12 V, 24 V, 48 V veya daha yüksek değerlere çıkarmak mümkündür. Birden fazla panelin kullanıldığı bir sistemde, paneller kontrol cihazına veya akü grubuna birlikte bağlanabilecekleri gibi, her panel tek olarak da bağlanabilir. Bu durumda sistemin bakımı daha kolay olacaktır. Sistemde kullanılan fotovoltaiik üreteçlerin tümünün oluşturduğu yapıya ise örgü yada ağ denilmektedir. Örgünün çok büyük olduğu uygulamalarda daha kolay yerleştirme ve çıkış kontrolü için sistem, alt-örgü gruplarına ayrılabilir. Örgü bir modülden oluşabileceği gibi, 100 000 veya daha fazla modülden de oluşabilir (Çıtıroğlu, 2000). Güneş pillerini bir birine bağlamak için kullanılan kurallar, modüllerin ve panellerin bir birlerine

bağlanmalarında da geçerlidir (Tercan, 2000). Güneş pillerinin bu şekilde yapılandırılmasıyla elde edilen güç megawatt mertebelerine kadar çıkabilir.

Fotovoltaik bir örgüde bir birine bağlanan güneş pilleri ya da güneş pili modülleri arasında, elektriksel ve termal dengesizlikler oluşabilir. Bu dengesizliklerin sebebi fotovoltaik örgüyü oluşturan güneş pillerinin veya modüllerin her birinin, farklı karakteristik özelliklere sahip olmasıdır. Gerçekte, güneş pillerinin elektriksel karakteristiklerinin ortalama bir değerden saptığı sıklıkla görülür. Bu durum güneş pili üretiminde yapılan teknik işlemlerden kaynaklanabileceği gibi, kullanılan yarıiletken malzemeden de kaynaklanabilir. Aynı zamanda tozlanma ve gölgelenme de (kısmi ya da tamamen) elektriksel dengesizliklere yol açar. Bu dengesizlikler engellenmediği zaman; örgüdeki bir veya daha fazla modülün istem dışı çalışmasına yol açarak, örgüye zarar verebilir. Örgüdeki modüllerden biri veya daha fazlası bir yük gibi davranmaya başlayarak, örgüdeki diğer modüllerin ürettiği enerjiyi tüketir duruma gelebilir. Pillerin veya modüllerin yanmasına sebep olabilir. Örgüyü oluşturan birimlerden biri veya birden fazlası, yüksek güçlerde (kw mertebesinde) zarar görerek kullanılmaz duruma gelebilir. Yüksek güçlere ulaşıldığında, fotovoltaik örgüyü oluşturan birimleri korumak için maliyeti fazla arttırmayacak ve üretilen enerjinin azalmasına yol açmayacak koruyucu elemanlar sisteme eklenmeli ve uyarlanmalıdır (Tercan, 2000).

Güneş pilleri ve modüller yalnızca elektriği üretirler. Üretilen bu enerjinin depolanması, elektriksel yükü uyuşacak şekilde iletilmesi ve düzenlenmesi gereklidir. Bunun için modüllere dengeleyici bileşenler eklenerek güneş pili sistemleri (fotovoltaik sistemler) meydana getirilir (Çetinkaya, 2001).

7.4. Güneş Pili Sistemleri (Fotovoltaik Sistemler)

Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak akümülatörler, invertörler (dönüştürücüler), akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş pili sistemi (fotovoltaik sistem) oluştururlar. Bu sistemler üç ayrı grupta toplanırlar:

1. Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren grup: Güneş pili hücreleri, modülleri grubu.

2. Enerjiyi kullanan grup: Makineler, elektrikle çalışan tüm ekipmanlar.
3. Enerji üretimiyle tüketimi arasında kalan ve sistemi dengeleyen araçlar (BOS araçları): Akü şarj kontrolörleri, aküler, invertörler (alternatif akım ihtiyacı olan yükler için), kablolar, kablo kanalları, bir topraklama devresi, sigortalar, kesiciler, çıkışlar, modülleri destekleyecek metal yapılar ve fotovoltaik sistemin parçası olan diğer bileşenlerdir (Çetinkaya, 2001).

Günümüzde kullanılan fotovoltaik 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 (fotovoltaik santraller) kadar uzanabilmektedir. Bu sistemler, şebekeden bağımsız (stand-alone) ve şebekeye bağımlı olmak üzere iki grupta ele alınabilir (www.tubitak.gov.tr).

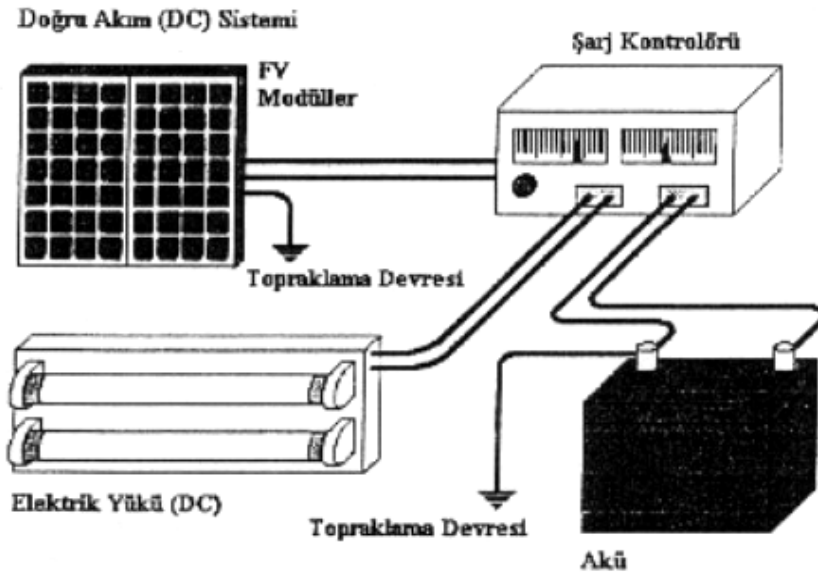
7.4.1. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler

Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Bunun dışında dizel 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 (www.eie.gov.tr). Fotovoltaik sistemler, derin-çevrim akülere ihtiyaç duyarlar. Bu aküler genellikle kurşun-asit tipleridir. Yavaş yavaş deşarj olurlar ve yüzlerce kez kendi kapasitelerinin %80 'i oranında şarj olabilirler. Deşarj olurken patlayıcı hidrojen gazı çıkaran kurşun-asit tipi ve ıslak hücreli aküler; sistemin diğer elektriksel bileşenlerinden ve oturma alanlarından uzak, iyi havalandırılan alanlara yerleştirilmelidir. Akülere düzenli bakım yapılmalıdır. Sistemde tükenen akü, yenisiyle değiştirilmelidir. Otomotiv aküleri, sığ-çevrim aküleridir ve fotovoltaik sistemlerde kullanılmamalıdır. Bir fotovoltaik sistemin, birkaç bulutlu gün boyunca talep edilen

gücü karşılması için akülerde yeterli güç depolayacak biçimde boyutlandırılması gerekir. Bu, özerklik günleri olarak bilinir (Çetinkaya, 2001).

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 birimine şarj kontrolörü de 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 artırır (Çetinkaya, 2001).

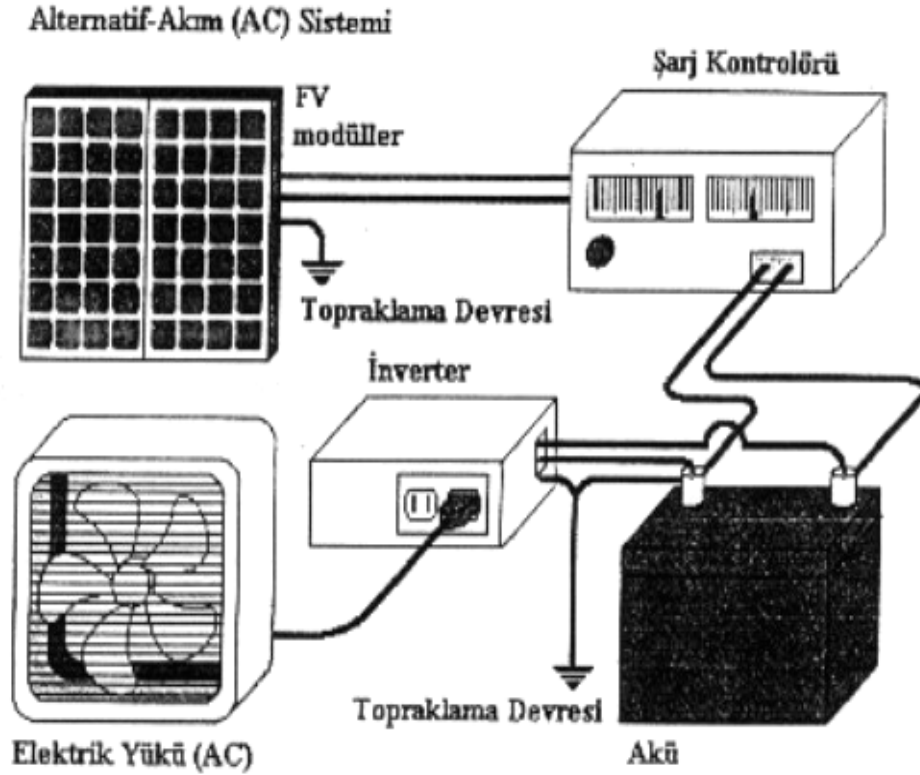


Şekil 7.3. Doğru akım (DC) elde edilen bir fotovoltaik sistemin yapısal görünümü

(Çetinkaya, 2001).

Bir güneş pili modülü üzerine düşen güneş ışığına bağlı olarak, doğru akım üretir. Doğru akım (DC) ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanmış bir fotovoltaik sistemin yapısı Şekil 7.3. 'deki gibi olmalıdır.

Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda sisteme bir invertör eklenerek; akümülatördeki DC gerilim 220 V, 50 Hz 'lik sinüs dalgasına dönüştürülür (www.eie.gov.tr). Değişik tipte invertörler, değişik kalitede elektrik üretirler. Örneğin lambalar, televizyonlar ve güç aletleri düşük kalitede elektrikle çalışabilirler. Ama bilgisayarlar, lazer yazıcılar ve diğer gelişmiş elektronik aletler yüksek kalitede elektriğe ihtiyaç duyarlar (Çetinkaya, 2001). Alternatif akım (AC) ihtiyacını karşılamak için tasarlanmış bir fotovoltaik sistemin yapısı Şekil 7.4. 'deki gibi olmalıdır.



Şekil 7.4. Alternatif akım (AC) elde edilen bir fotovoltaik sistemin yapısal

görünümü (Çetinkaya, 2001).

Şebekeden bağımsız sistemlerin tasarımında, kullanım alanına göre çeşitli destek elektronik devreler sisteme katılabilir. Bazı sistemlerde, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan, maksimum güç noktası izleyici cihazı bulunur.

7.4.2. 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 (www.eie.gov.tr). 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 (Çetinkaya, 2001). Şebekeye bağımlı fotovoltaik sistemler iki başlık altında ele alınabilir: Bunlardan birincisi, şebekeye bağımlı fotovoltaik güç santralleridir. İkincisi ise, şebekeye bağımlı dağıtılmış fotovoltaik güç santralleridir.

7.4.2.1. 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 çekici olabilmektedir (Oktik, 2001).

Fotovoltaik santral olarak adlandırılan yüksek güçteki güneş pili jeneratörleri (fotovoltaik jeneratörler); akü yedekli, dizel ve/veya rüzgar jeneratörü yedekli veya şebekeye bağımlı olarak çalıştırılırlar (www.tubitak.gov.tr). Bir güneş pili jeneratörünün gücünü belirlemek için kullanım gücünün belirlenmesi, akü kapasitesinin belirlenmesi, modül eğiminin seçilmesi, modül büyüklüğünün alt ve üst sınırlarının hesaplanması gerekir. Bazı durumlarda kullanıcı gücü sabit olmakla birlikte (röle istasyonları gibi), bazı durumlarda değişebilmektedir.

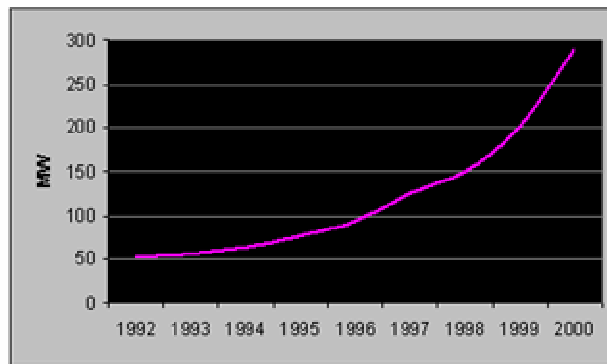
Güneş enerjisi verilerinin bulunmadığı durumlarda; benzer bölgelerin güneş enerjisi verilerinden, kullanım bölgesinin güneş enerjisi verileri çıkarılabilir (Engin, 1995).

7.4.2.2. 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 (Oktik, 2001). Avrupa 'da bu tür uygulamaların yaygınlaştırılması, devlet desteği ile sağlanmaktadır (www.tubitak.gov.tr).

7.4.3. Güneş pili sistemlerinin kullanımı

Fotovoltaik sistemler, standart enerji kaynakları karşısında güç kazanmaktadır. Dünyada güneş pili sistemlerinin kullanımı, hızla yaygınlaşmaktadır. Günümüzde, dünyadaki güneş piliyle elektrik üretim kapasitesinin yıllık 50-100 megawatt arasında olduğu tahmin edilmektedir.

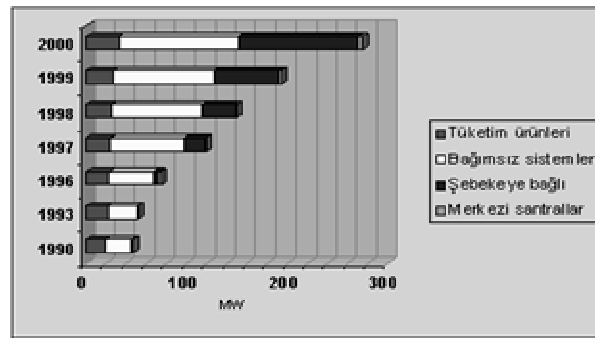


Şekil 7.5. 1992-2000 yılları arasında tüm dünyadaki güneş pilinden elde edilen enerji satışlarının grafik üzerinde gösterimi (www.eie.gov.tr).

Şekil 7.5. 'de 1992-2000 yılları arasındaki güneş pilinden elde edilen enerji satışları grafik üzerinde gösterilmiştir (Enerji birimi olarak MW kullanılmıştır). Kişi başına düşen yıllık enerji ihtiyacı 18 ile 24 kilowatt arasında olduğu göz önüne alındığında, bu kapasitenin çok küçük olduğu düşünülebilir (Çıtıroğlu, 2000; www.tubitak.gov.tr). Ancak bu alandaki teknolojik gelişmeler, kullanım alanlarındaki

çeşitliliğin artması; güneş pili kapasitesinde hızlı gelişmelerin beklenmesine sebep olmaktadır (www.tubitak.gov.tr).

Son yirmi yılda güneş pili teknolojilerindeki gelişmelere ve fotovoltaik pazarının büyümesine koşut olarak, güneş pillerinin maliyetleri sürekli bir düşüş eğilimindedir (Oktik, 2001). Yatırım maliyetleri yüksek olsa da, işletme ve bakım maliyetlerinin düşük olması (yok denecek kadar az) nedeniyle; cazip duruma gelen fotovoltaik sistemlerin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Dünyada kurulu güneş pili sistemlerinin kullanım alanlarına göre dağılımının grafik üzerinde gösterimi Şekil 7.6. 'da yer almaktadır.



Şekil 7.6. Dünyada kurulu güneş pili sistemlerinin kullanım alanlarına göre dağılımının grafik üzerinde gösterimi (www.eie.gov.tr).

Güneş pili sistemlerinin maliyetleri temel olarak iki kısımda incelenebilir. Bunlardan birincisi, güneş pili modüllerinin maliyetidir. İkinci kısımda ise, depolama, elektronik denetim aygıtları, invertörler, kablolama, arazi, altyapı hazırlama gibi sistem destek elemanlarının maliyetleri yer almaktadır. Genelde güneş pillerinin maliyeti, toplam sistem maliyetinin yarısı kadardır. Güneş pili sistemleriyle ilgili maliyet karşılaştırmalarında çevre etkileri dikkate alınmamaktadır. Ulusal enerji kaynaklarının yetersizliği konu olduğunda, şebekeye bağımlı dağıtılmış fotovoltaik sistemlerin önemli bir tasarruf potansiyeli oluşturduğu anlaşılmaktadır. Örneğin Almanya 'da yapılan bir çalışmada; bireysel tüketicilerin çatılarına koydukları güneş pilleri ile ürettikleri elektriğin üçte birini kendilerinin tükettikleri, geri kalan üçte ikilik kısmını ise enterkonnekte sisteme vererek ulusal elektrik enerjisi üretimine katkıda buldukları ve tasarruf sağladıkları saptanmıştır (www. tubitak.gov.tr).

Fotovoltaik modül üretiminin çoğunluğu ABD (%44), Japonya(%20) ve Avrupa (%27) arasında bölüşürken; %9 kadarlık bir bölümü de diğer ülkelere gerçekleştirilmektedir (Oktik, 2001). Avrupa Birliği 'nin 2010 yılına kadar bir milyon küçük fotovoltaik sistem kuracağı açıklanmıştır. Hollanda, fotovoltaik sistemlerini çatıda kur-işlet-sahip ol programını başlatmıştır (Oktik, 2001).

Sonuç olarak güneş pili teknolojileri hızlı bir gelişme eğilimindedir. Bu gelişmelerle her geçen gün; güneş pili verimlilikleri artırılarak, maliyetleri düşürülmektedir. Böylece fotovoltaik sistemlerin kullanım alanları ve pazarları sürekli artan bir hızda büyümektedir.

7.5. Güneş Pillerinin Kullanım Alanları

Güneş enerjisinin kullanımı gündelik yaşam yapısından ve konutlardan başlamakta; haberleşmeye, tarıma, endüstri kesimine, elektrik santrallerine, askeri hizmetlere ve uzaya kadar uzanmaktadır. Güneş pilleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir (Çetinkaya, 2001).

Güneş pilleri ilk defa telefon amplifikatörlerinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Uzay uygulamalarındaki ilk kullanımı 1956 yılında Vanquard-I uydusunda olmuştur. Güneş pili ile çalışan ilk uçak, 1979 yılında Larry Mauro adında bir şahıs tarafından yapılmıştır. Enerjisi kanatlarına yerleştirilmiş silisyum güneş pilleriyle sağlanan bu uçak, 40 km/saat 'lik bir hızla ve 12 m 'lik bir yükseklikte uçmuştur. 1985 yılında, Avrupa 'da güneş pilleriyle çalışan bir otomobil yarışı yapılmıştır. Avustralya 'da ve İsrail 'de deneme amacıyla birer otomobil çalıştırılmıştır (Köse, 1986; Oral, 1979).

Güneş pilleriyle yapılan uygulamalar arasında bir rölenin çalıştırılması, yangın alarm sistemlerinin çalıştırılması, güneş batınca sokak ve vitrin lambalarının yakılması, küçük otomobillerin çalıştırılması ve gemi ambarında çıkan yangınların ihbar edilmesi sayılabilir (Köse, 1986). Günümüzdeki en önemli uygulama yeri, uydularda haberleşmeyi sağlamak için gerekli elektrik enerjisinin güneş enerjisinden elde edilmesidir. Güneş pilleri, yeryüzünde az güç gerektiren uygulama yerlerinde veya ulaşılması zor olan bölgelerde kullanılırlar. Bunlardan başka, luxmetre ve fotoğraf

makinelerinin pozometrelerinde kullanım alanı bulurlar (Oral, 1979). Bu alanlara hesap makineleri, radyo,televizyon ve uydu alıcılar, radar ve meteoroloji istasyonları, mobil evler ve hastaneler, su pompaları, cellular ve PMR istasyonlar, mobil telefonlar, havaalanı ve helikopter pist ışıklandırmaları, denizcilik uygulamaları, karavanlar, sokak ve bahçe aydınlatmaları ilave edilebilir (İstanbuluoğlu, 1998; Çetinkaya, 2001).

Günümüzde Japonya 'daki birçok deniz feneri güneş pili ile donatılmıştır. ABD 'de orman gözetleme kulelerinin enerji ihtiyacını karşılamak için güneş pilleri kullanılmaktadır. Pakistan 'da kurulmuş 600 watt 'lık santral ile bir su pompası, deniz feneri ve buradaki personel lojmanının enerji ihtiyacı güneş pilleri ile sağlanmaktadır (Köse, 1986; Oral, 1979).

Uygulamada hücre, modül, panel şeklinde kullanılabilen güneş pilleri ile şebekeden bağımsız ve şebekeye bağımlı fotovoltaik sistemler kurulabilir. Güneş pili sistemlerinin şebekeden bağımsız (stand-alone) olarak kullanıldığı tipik uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

1. Haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri;
2. Petrol boru hatlarının katodik koruması;
3. Metal yapıların (köprüler, kuleler vb) korozyondan koruması;
4. Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler, hava gözlem istasyonları;
5. Bina içi ya da dışı aydınlatma;
6. Dağ evleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde TV, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması;
7. Tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompajı;
8. Deniz fenerleri;
9. İlk yardım, alarm ve güvenlik sistemleri;
10. Deprem ve hava gözlem istasyonları;

11. İlaç ve aşı soğutma (www.eie.gov.tr).

Avusturya, İspanya gibi ülkelerin her birine şebekeden bağımsız olarak kurulmuş fotovoltaik sistemlerin iletişim, denizcilik, gözetleme kuleleri, su pompaları, kara-deniz-hava yolları ile ilgili sinyaller, petrol ve gaz hatlarında korozyondan korunma, vb. uygulamaları gün geçtikçe artmaktadır (Oktik, 2001).

Şebekeye bağımlı fotovoltaik sistemlerin uygulamada iki çeşidi vardır. Santraller şeklinde tasarlanan birinci çeşidinde, büyük güçler elde edilerek bir yerleşim yerinin elektrik ihtiyacı karşılanabilir. ABD 'nin Arizona eyaletinde bulunan Schuchuli kasabasının elektrik enerjisi ihtiyacı, 3.5 watt 'lık bir güneş pili santraliyle sağlanmaktadır. Bu tesis, 1978 yılında NASA tarafından desteklenerek hizmete açılmıştır (Köse, 1986). 1982 yılında California 'da, 1 megawatt 'lık Edison Lugo Fotovoltaik Santrali kurulmuş ve bunu Los Angeles-San Francisco arasında kurulan 6.5 megawatt 'lık Carissa Plains Fotovoltaik Santrali izlemiştir. Amerika dışındaki ülkelerde de fotovoltaik santraller bulunmakla birlikte, toplam kurulu güçleri güneş termik santrallerinin %10 'unu geçmemektedir (www.tubitak.gov.tr). Şebekeye bağımlı fotovoltaik sistemlerin ikinci uygulama türünde, evlerin çatıları güneş pilleriyle kaplanmaktadır. Artı enerjili binalar denilen bu yapılar, enerji ihtiyaçlarını çatılarında ürettikleri elektrikle karşılamaktadırlar. Bu binalarda üretilen fazla enerji, çift yönlü sayaçlar sayesinde elektrik şebekesine satılırken, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınmaktadır (www.tubitak.gov.tr).

Uygulamadaki enerji ihtiyacına göre, tüketim ürünleri ve sistemler şeklinde tasarlanan güneş pillerinin kullanımı, özellikle son yirmi yılda büyük bir artış göstermiştir. Güneş pillerinin daha yaygın kullanılmasındaki tek engel, maliyetlerinin yüksek olduğu düşüncesidir. Fakat yapılan çalışmalarla güneş pillerinin maliyetleri hızla düşmektedir. Bu alandaki gelişmeler, önümüzdeki günlerde güneş pillerinin kullanımının büyük bir hızla yaygınlaşacağını göstermektedir. Güneş pillerinin çok yakın bir gelecekte ışıklı reklam panoları, trafik ve karayolu-demiryolu ikaz ve işaretleri, sokak-park-bahçe aydınlatması, karavanlar, tatil evleri, gözetleme istasyonları, haberleşme istasyonları gibi birçok sahada; işletmesi ve bakımı çok daha pahalı olan akü ve jeneratörlerin yerini alacağı tahmin edilmektedir (İstanbuluoğlu,

1998).

7.6. Güneş Pillerinin Uygulama Örnekleri

Güneş pillerinin en yaygın karşılaşılan kullanımları, aydınlatma birimlerinde, trafik sistemlerinde ve su pompalama sistemlerindeki uygulamaları ile şebeke bağlantılı güneş pili sistemlerindeki uygulamalarıdır.

7.6.1. Güneş pillerinin aydınlatma birimlerindeki uygulamaları

Güneş pillerinin aydınlatma birimlerindeki uygulamalarına örnek olarak; Şekil 7.7. 'de sokak aydınlatmasında kullanımının fotoğrafı, Şekil 7.8.' de ise bahçe aydınlatmasında kullanımının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil.7.7. Güneş pillerinin sokak aydınlatmasında kullanımının fotoğrafı

(www.eie.gov.tr).

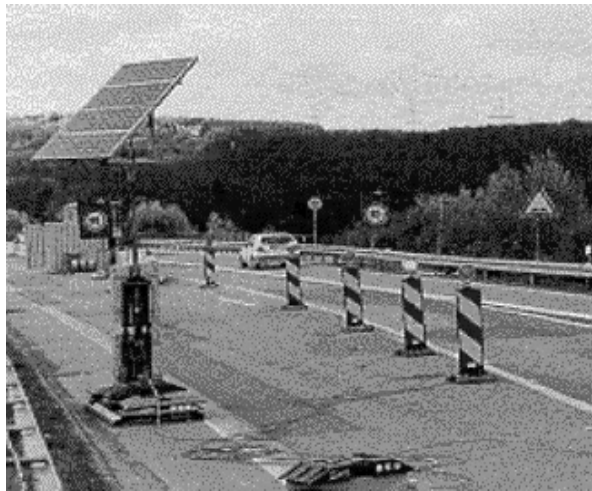


Şekil 7.8. Güneş pillerinin bahçe aydınlatmasında kullanımının fotoğrafı

(www.eie.gov.tr).

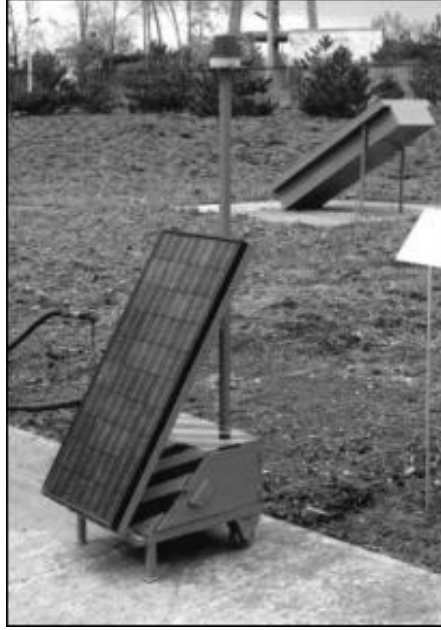
7.6.2. Güneş pillerinin trafik sistemlerindeki uygulamaları

Güneş pillerinin trafik sistemlerindeki kullanımına örnek olarak; Şekil 7.9. 'da karayollarında kullanımının fotoğrafı, Şekil 7.10. 'da trafik ikaz sistemlerine kullanımının fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 7.9. Güneş pillerinin karayollarında kullanımının fotoğrafı

(www.eie.gov.tr).



Şekil 7.10. Güneş pillerinin trafik ikaz sistemlerindeki kullanımının fotoğrafı

(www.eie.gov.tr).

7.6.3. Güneş pillerinin su pompalama sistemlerindeki uygulamaları

Güneş pillerinin su pompalama sistemlerindeki kullanımına örnek fotoğraf Şekil 7.11. 'de yer almaktadır.



Şekil 7.11. Güneş pillerinin su pompalama sisteminde kullanımının fotoğrafı

(www.eie.gov.tr).

7.6.4. Şebeke bağlantılı güneş pili sistemi uygulamaları

Şebeke bağlantılı güneş pili uygulamalarına örnek olarak; Şekil 7.12. 'de şebekeye elektrik veren bir güneş santralının fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 7.12. Şebekeye elektrik veren bir güneş pili santralının fotoğrafı

(www.eie.gov.tr).

Artı enerjili bina adı verilen, çatısı güneş pilleriyle kaplı binalar da, şebeke bağlantılı güneş pili uygulamalarındandır. Bu tür bir binanın fotoğrafı, Şekil 7.13. 'de yer almaktadır.



Şekil 7.13. Çatısı güneş pilleriyle kaplı artı enerjili bir binanın fotoğrafı

(www.eie.gov.tr) .

7.7. Güneş Pili Uygulamalarının Türkiye 'deki Durumu

Ülkemiz coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından, birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Türkiye 'nin güneş enerjisi potansiyeli göz önüne alındığında; güneş pili sistemleri bir çok farklı uygulamalarda çekici bir seçenek olmasına rağmen, ülkemizde yeterince desteklenmemektedir. Bunun sebebi, bu sistemlerin devlet otoritelerine ve toplumumuza geniş ölçüde sağlıklı verilerle tanıtılmamış olmasıdır (Oktik, 2001).

Güneş pillerinin Türkiye 'deki kullanımı; ancak elektrik şebekesinin olmadığı, yerleşim merkezlerinden uzak yerlerde ekonomik yönden uygun olmaktadır. Bu nedenle genellikle sinyalizasyon, kırsal elektrik ihtiyacının karşılanması vb. gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ülkemizde halen Telekom istasyonları, Orman Genel Müdürlüğü yangın gözetleme istasyonları, deniz fenerleri ve otoyol aydınlatmasında kullanılan güneş pili kurulu gücü 300 kW civarındadır (www.eie.gov.tr).

Ülkemizde aydınlatma birimi olarak kullanılan güneş pili sistemlerinden iki tanesi Ankara AOÇ Atatürk Evi önünde, iki tanesi Didim Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi 'nde, bir tanesi Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) Genel Müdürlük Binası girişinde çalışmaktadır. Ayrıca Didim 'de güneş pilleriyle oluşturulan bir sistem ile çevre aydınlatması yapılmaktadır. EİE Didim Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi 'ne 4.8 kW gücünde şebeke bağlantılı güneş pili sistemi kurulmuştur. Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından, EİE Yenilenebilir Enerji Parkı oluşturulmuştur. Çeşitli alanlarla kullanılan güneş pili sistemleri, sergi amacıyla bu parkta kurulmuştur (www.eie.gov.tr). Ayrıca Akdeniz 'deki Zeytin Adası 'nda, bir GSM şebekesinin enerji ihtiyacı güneş pili sistemiyle karşılanmaktadır. Çok hızlı şekilde olmasa bile, ülkemizdeki fotovoltaik uygulamalar gün geçtikçe artmaktadır.

7.8. Güneş Pillerinin Geleceği

Dünya genelinde bugün bile, 2 milyar insan elektrik enerjisinden yoksundur (Oktik, 2001). Nüfus yoğunluğunun küçük olduğu bölgelerde fotovoltaik enerji, bugünkü fiyatlarla bile çekici görünmektedir. Tasarım, alt yapı, aküler, çevirici ve bütün gerekli bağlantılar hesaba katıldığında oluşturulacak sistemin maliyeti; birkaç kilowatt

güç gereken bir noktaya, 500 m öteden güç bağlamanın maliyetinden daha ucuzdur. Yeni ve yenilenebilir enerjilere giderek artan ilgiye bağlı olarak, fotovoltaik güç sistemleri için geçerli olan fiyatlarının çok yüksek olması yönündeki inanış, yerini fiyat farkının çok büyük olmadığı şeklindeki bir söyleme bırakmıştır. Fotovoltaik modüllerin ömür sürelerinin 20 yıl olduğu düşünülürse, yapılan yatırımın kaç yılda geri alınabileceği sorusuna literatürde verilen cevap; güneş kuşağındaki bölgelerde tek kristalliler için yaklaşık 5 yıl, çok kristalliler için yaklaşık 2.5 yıl biçimindedir. Üretim kapasitesinin artışı ve teknolojik gelişmelerle birlikte, bu değerlerin yakın gelecekte bir yılın altına ineceği tahmin edilmektedir (Oktik, 2001).

Güneş pillerinin ticarileşmesi yirmi yıldan daha kısa bir sürede gerçekleşmiştir. Güneş pili teknolojileri genç teknolojilerdir ve gelişme eğilimi göstermektedirler. Önümüzdeki yirmi yıl içinde olabilecek gelişmeleri tahmin etmek zor olsa da, bu gelişmeleri yönlendirecek faktörler belirlenebilir. Malzeme kullanımı, teknoloji geliştikçe önemini arttıracak bir faktördür. Son maliyet limitinin, malzeme maliyeti ile ilgili olacağı tahmin edilmektedir. Bu durumda az malzeme kullanılarak üretilen ince film güneş pillerinin, gelecekte öne çıkacağı düşünülmektedir. Ticari alanda daha iyi kurulduğunda, amorf silisyumun fotovoltaik pazarında baskın bir duruma geleceği tasarlanmaktadır. Bu arada CIS ve CdTe ince filmleri; verimlilik ve kararlılık açısından yüksek performans göstererek, amorf silisyuma yakın veya ondan daha düşük maliyete sahip olacaklarının sinyallerini vermektedirler. Gerçek anlamda ucuz olan fotovoltaikler için elde edilmek istenen değerler, modül ömrü için 30 yıl ve verimlilik için %15 'dir. İnce filmler bu amaçlara ulaşmak için uygun kapasiteye sahip görünmektedirler (Çetinkaya, 2001).

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemler temel güç ihtiyacı için kullanılmadan önce, bu sistemlerde elektriğin depolanmasında önemli gelişmelerin sağlanması gerekir. Fotovoltaik sistemler, gün ışığının olduğu zamanda 24 saatte ihtiyaç duyulan tüm gücü üretmek zorundadırlar. Bu da çok büyük miktardaki enerjinin, boylama ve mevsime bağlı olarak 12-16 saat gibi uzun bir süre için depolanması gerektiği anlamına gelir. Sudan elektrik akımı geçirilerek elde edilen hidrojen yakıtının, gelecekte fotovoltaik enerjinin depolanmasında orta ölçekli en iyi depolamayı sağlayacağı düşünülmektedir (Çetinkaya, 2001).

Gelecek için yeryüzü güneş santrallerinden başka, uzaya yerleştirilecek toplaç uydusu ve dünya bağlantılı güneş santralleri kurulması amaçlanmaktadır. Dünyadan 36 000 km uzaklıkta ve 10 000 MW güçlü bir uzay santralinden üretilen elektrik enerjisi, santralin 1 km çaplı anteninden mikrodalgalarla dünyaya iletilecek, dünyadaki 7 km çaplı bir anten bu enerjiyi %55-75 verimle alıp, doğru akım verebilecektir. Bu proje Amerikan Apollo uzay programında yer almıştır (İnan ve Ültanır, 1996).

Fotovoltaik sistemlerin kullanımını yaygınlaştırmak için güneş pillerinin maliyetinin düşürülmesi ve verimliliklerinin artırılması gerekmektedir. Üretim arttıkça, uluslar arası pazarlar genişledikçe ve teknoloji geliştikçe; daha yüksek verime ve daha düşük maliyete sahip piller üretilenilecektir. Fotovoltaik gelişmeler aynı zamanda; son kullanıcı ihtiyaçları ve sistem tasarımcılarının yaratıcılıkları, ev ve diğer sistemler için genişleyen uygulama alanları ile beslenecektir. Fotovoltaik sistemlerin hızla gelişerek, gelecekteki enerji ihtiyacını karşılama konusunda insanoğluna büyük bir katkı sağlayacağı çok açıktır (Çetinkaya, 2001).

TARTIŞMA VE SONUÇ

Sanayileşme süreciyle birlikte hızla artan enerji ihtiyacının karşılanması için geliştirilen ve uygulanan yeni teknolojiler, birçok problemi de beraberinde getirmiştir. Dünya ekolojisinin zarar görmesi bakımından büyük önem taşıyan, enerji ve çevre etkileşiminde ortaya çıkabilecek çevresel bozulmaların en az düzeyde tutulabilmesi bu problemlerin en büyüğüdür. Günümüzde kullanılmakta olan enerji kaynaklarının, çevre üzerindeki olumsuz etkileri bilinmekte ve bu etkilerin ortadan kaldırılmasına çalışılmaktadır. Çevre dostu alternatif enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, dünyanın geleceği bakımından çok önemli bir adım olacaktır. Alternatif enerji kaynakları grubundan olan güneş enerjisinin çevreye verdiği zarar, günümüz enerji sistemleriyle karşılaştırılmayacak kadar azdır (Çetinkaya, 2001).

Güneş pilleri ile elektrik üretimi, güneş enerjisi kullanımının bir uygulama alanıdır. Elektrik üreten diğer sistemlerle karşılaştırıldığında, güneş pillerinden oluşan bir sistem kullanmanın yararları şöyle sıralanabilir:

1. Mevcut sistemlerden farklı olarak en büyük yararı; herhangi bir fosil yakıt veya bağlantı gerektirmeden, bağımsız olarak elektrik üretilebilmesidir.
2. Yakıtı güneş ışığıdır, her yerde ve bedava bulmak mümkündür. Yakıtını taşıma ve depolama gibi sorunları yoktur.
3. Sistemde kullanılan hareketli parçalar çok az olduğundan sessiz çalışırlar ve çok az bakım gerektirirler. Elektrik üretiminde kullanılan diğer sistemler (jeneratörler, rüzgar veya hidro-elektrik türbinleri vs.) düzenli olarak bakıma gerek duyarlar.
4. Diğer elektrik üretim sistemleriyle karşılaştırıldıklarında, belki de en büyük yararları güvenilir olmalarıdır. Hareketli parçaları çok azdır ya da yoktur. Şimşekler, güçlü rüzgarlar, kum fırtınaları, nem ve ısı, kar veya buz gibi doğa olaylarına dayanıklıdırlar.

5. Enerjiyi, kullanılmak istendiği yerde üretmek olasıdır. Böylece enerjiyi taşımak gerekmez. Şebekenin ulaşmadığı (örneğin, GSM vericilerinin yerleştirildiği yerlerde) bu sistemi kullanmak olasıdır.
6. Enerji kaynağı ile kullanım yeri arasında, uzun kablolar ve bağlantı elemanları olmadığından; arada oluşabilecek güç kaybından kaçınılmış olur. Güneş pili sistemlerinde, çok sayıda tüketim noktası beslenmek istendiği zaman bile, yerel kayıplar yok denecek kadar azdır.
7. Modüler bir sistem olduğu için güç çıkışı kolaylıkla arttırılabilir. Mevcut modüllere yenilerinin eklenmesi ile sistem, artan güç gereksinimini karşılayabilecek duruma getirilebilir.
8. Ömürleri uzundur (20-30 yıl) (Çıtıroğlu, 2000).

Güneş pillerinin kullanımını sınırlayan iki konudan biri, maliyetlerinin yüksek olduğu düşüncesidir. Diğeri ise, yalnızca güneş varken elektrik üretebildiklerinden, enerjinin depolanması için bir düzeneğe ihtiyaç duymalarıdır (Oral, 1979). Günümüzde üretim ve tasarım maliyetleri gittikçe düşen güneş pilleri, elektrik üretiminde uygun bir seçenek durumuna gelmişlerdir. İlk kuruluş maliyeti diğer sistemlere göre biraz yüksek olsa bile, sistem bir süre sonra kendi maliyetini karşılamaktadır. Sistemin en önemli özelliği, elektrik üretimi için hiçbir yakıtı veya bağlantıya gerek duymamasıdır (Çıtıroğlu, 2000).

Teknolojik gelişmelerle güneş pillerinin maliyeti düşürülerek verimleri arttırılmıştır. Bunun sonucunda kullanım alanları artan fotovoltaik sistemler, enerji piyasasında büyük bir atak yapmıştır. Fotovoltaik etki 1839 yılından beri biliniyor olmasına karşılık, güneş pillerinin ticari gelişmeleri son yirmi yılda gerçekleşmiştir. Dünya bu gelişimi 1970 'li yıllarda yaşanan enerji krizine borçludur. Güneş pili uygulamalarından alınan olumlu sonuçlar, bu konudaki araştırma ve geliştirme çalışmalarını hızlandırmaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarla, fotovoltaik sistem uygulamalarında birçok gelişme sağlanmıştır. Bugün gelinen noktadan ileriye bakıldığında, 21. yüzyılın güneş pilleri açısından parlak geçeceği tahmin edilmektedir.

ÖNERİLER

Önümüzdeki elli yılda dünya genelindeki enerji ihtiyacının, bu günkü değerinin iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir. Bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını kaçınılmaz duruma getirmektedir. Güneşten bir günde dünyaya gelen ışık enerjisi miktarı, dünyada tüketilen enerjinin on-on beş bin katıdır. İnsanoğlu güneş pillerini kullanarak, bu enerjiyi en düşük maliyet ve en yüksek verimlilikle elektriğe çevirmek için çalışmaktadır.

Dünyadaki bir çok ülkede fotovoltaik sistem uygulamaları, devlet tarafından düzenlenip desteklenmektedir. Ülkemizde de, güneş pili uygulamalarının çoğaltılması gerektiği görüşü yaygınlaşmakta ve bu amaca yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar; şu anda tanıtım ve eğitim düzeyinde olup, uygulama düzeyindeki çalışmalar henüz çok azdır.

Yakın gelecekte, fotovoltaik sistemlerin dünya enerji dengelerine küçümsenmeyecek katkılarının olacağı; herkes tarafından kabul görmektedir. Bu gelişmelere ayak uydurmak için güneş pili teknolojileri ve fotovoltaik sistemler ile ilgili bilgi-beceri birikiminin ülkemize taşınması gereklidir. Bunun için fotovoltaik uygulamalarla ilgili bilimsel ve teknolojik projelerin üretilmesi, devlet ve özel girişimce özendirilmelidir. Ayrıca fotovoltaik sistemlerin mimari entegrasyonu ve çift yönlü sayaç kullanımı konusunda yasal düzenlemeler yapılmalıdır. Bu tür uygulamalar; öncelikle kamuya ait yeni projelerde, üniversite yerleşke planlamalarında, otoyol inşaatlarında ve diğer yapılarda kullanılmalıdır. Fotovoltaik uygulamalar konusunda, toplumsal eğitime önem verilmelidir. Öncelikle orta öğretim kurumları ve üniversiteler hedef gurup olarak seçilip, sağlıklı tanıtım kampanyaları ile güneş pilleri ve fotovoltaik sistemler abartısız anlatılmalıdır (Oktik, 2001).

Bugün güneş pilleri konusunda pek çok ülkede devlet desteği ile gerçekleştirilen uygulamalar, Türkiye 'de de yapılmalıdır. Bu uygulamalar, enterkonnekte sistemin erişemediği gözetleme istasyonu, fener kulesi, petrol boru hattı ve benzeri alışılmış fotovoltaik enerji sistemlerinin dışında; balık çiftlikleri, otel ve lokantalar, şebekeye bağlı ev ve sanayi tesisleri ile başlangıçta küçük çaplı güneş pili santrallerini kapsamalıdır. Devlet bunun tanıtımını yapmalı, bireysel katılımcıları özendirmeli,

fotovoltaik enerji ticaretini ve üretimini teşvik etmelidir. Vatandaşın kendi elektriğini üretilip fazlasını devlete satmasını sağlayacak yasa zaman kaybetmeden düzenlenmelidir. Güneş pillerinin tanıtımı ve eğitimiyle ilgili olan bu yasal ve kurumsal düzenlemelerin dışında, bir de uygulama ile ilgili düzenlemelerin yapılması gerekir. Bununla ilgili olarak elektrik üretim ve dağıtım şirketlerine (TEAŞ/TEDAŞ) görev düşmektedir. Çatıya veya başka bir serbest alana monte edilecek fotovoltaik modüllerin bina statüsü veya dış görünüm gibi konulara uygunluk sağlayıp sağlamadığı belediyelerce; güneş pilleri ile üretilen ve şebekeye verilen enerjinin frekans ve harmonik yönleriyle uyumu, kurulan tesisin ilgili yönetmeliklere uygunluğu TEAŞ/TEDAŞ tarafından proje üzerinde kontrol edilmeli ve buna göre uygulanmasına izin verilmelidir (www.tubitak.gov.tr).

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akyüz, İ., 2000, Püskürtme Tekniği İle Elde Edilen $Zn_{1-x}Cd_xS$ Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 67s.

Altın, V, 2002, Güneş, Bilim ve Teknik Dergisi, 446, Enerji Eki, 17-19s.

Backus, C. E., 1976, Solar Cells, IEEE Press, 504p.

Batman, A., 2001, Elektrik Üretimi İçin Güneş Pillerinin Kullanımında Verimi Arttırıcı Yeni Bir Yöntem, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 104s.

Baykul, M. C., 1987, Güneş Enerjisinin Depolanması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 177s.

Chopra, K. L and Das S. R., 1983, Thin Film Solar Cells, Plenum Pres, 607p.

Çabuk, S., 1992, İnce Film SNO_2/CuO_2 Güneş Pilleri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı, 46s.

Çetinkaya, H. B., 2001, Güneş Enerjisinden Elektrik Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 154s.

Çıtıroğlu, A., 2000, Güneş Enerjisinden Yararlanarak Elektrik Üretimi, <http://www.mmo.org.tr/muhendis/makine/arsiv/2000/gunes.htm>.

Demirci, F.,1996, Fotovoltaik Güneş Pillerinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 58 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Dickinson , W.C. and Cheremisinoff, P.N., 1980, Solar Cell Technology Handbook, Marcell Dekker, 517-560p.

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

Erol, M., 2001, Katı Hal Fiziği Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü, (yayımlanmamış).

Gümgüm,B., 1996, GüneşEnerjisi,

<http://www.dicle.edu.tr/merkez/dugem/turkce/faaliyet.htm>.

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

<http://www.alternatifenerji.com>.

<http://www.eie.gov.tr>.

<http://www.ekocerceve.com>.

<http://www.mmo.org.tr>.

<http://www.tubitak.gov.tr>.

<http://www.tusiad.org.tr>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

<http://www.youthfor.hab.org.tr>.

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

İstanbulluoğlu, S., 1998, Güneş; Elektrik Kaynağı, Elektrik Mühendisliği Dergisi, TMMOB-EMO, 39, 403, 35-36s.

Kavcar, N., 2001, Uygulamalı Fizik II Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü, 130s., (yayımlanmamış).

Kılıç, A ve Öztürk, A., 1980, Güneş Enerjisi, Kipaş Dağıtım, 331s.

Kittel, C., 1996, Katıhal Fizikine Giriş, (Çeviren: Bekir Karaoğlu), Güven Kitap Yayın Dağıtım Ltd.Şti, 434s.

Kızıroğlu, İ., 2005, Alternatif Enerji Kaynakları İnsanlığı Kurtaracak, Popüler Bilim Dergisi, 12, 50-54s.

Köse, S., 1986, Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 78s.

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

Kul, M, 1996, Cd(In₂S₃)S Yarıiletken Filmlerinin Bazı Özellikleri, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 169s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Küçükşahin, F, 1996, İngilizce-Türkçe Ansiklopedik Teknik Sözlük, İnkılap Kitapevi, 620s.
- Mukund, R.P and Boca, R., 1999, Wind and Solar Power Systems, CRC Press, 351p.
- Neville, R.C., 1995, Solar Energy Conversion:The Solar Cell, Elsevier Scientific Publication, 426p.
- Oktik, Ş., 2001, Güneş Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri, Ankara Temiz enerji Vakfı Yayınları, 40s.
- Oral, M., 1979, Güneş Pilleri, İzmir İlker Matbaası, 59s.
- Ökten, 1994, Fizik Terimleri Sözlüğü, Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü, 107s., (yayımlanmamış).
- Peker, D., 1999, $CuAl_xIn_{1-x}S_2$ Yarıiletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 169s.
- Serway, R. A., 1996, Fen ve Mühendislik İçin Fizik (Modern Fizik İlaveli), (Çeviri Editörü: Kemal Çolakoğlu), Palme Yayıncılık, Cilt:3, 344s.
- Sökmen, K., 2003, Gökyüzüne Merhaba, <http://www.catamaranvega.com/astro>.
- Sılay, İ., 2000, Atom ve Molekül Fiziği Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü, (yayımlanmamış).
- Sze, S. M., 1981, Physics of Semiconductor Devices, A Wiley-Interscience Pub., 868p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Taylor, J.R. ve Zafaritos, C., 1996, Fizik ve Mühendislikte Modern Fizik, (Çeviri:Bekir Karaoğlu), Güven Kitap Yayın Dağıtım Ltd.Şti, 434s.
- Tercan, M.B., 2000, Güneş Pili Karakterizasyon Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 129s.
- Uyar, T.S., 2004, Yenilenebilir Enerji İçin Politik Deklarasyon, <http://www.bugday.org.tr> .
- Uyarel, A. Y. ve Öz, E. S, 1987, Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi, 239s.
- Ültanır, M.Ö., 1996, Güneş Enerjisi, Bilim ve Teknik Dergisi, 340, 50-56s.
- Williams, J.,R., 1987, Solar Energy Technology and Applications, Ann Arbor Science, 176p.
- Wille, J., 2004, Geleceğin Enerji Kaynakları, Deutschland T, 2, 42-65s.
- Yüksel, Ö. F., 1990, p-n Eklem Güneş Pillerinin Verim Parametreleri ve Bunları Ölçme Yöntemi, Yüksek Lisan Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 65s.