

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL  
KARAKTERİSTİKLERİ VE ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elektrik Müh. Engin ORUÇ**

**Programı: ENERJİ BİLİM VE TEKNOLOJİ**

**Haziran 2007**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL  
KARAKTERİSTİKLERİ VE ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elektrik Müh. Engin ORUÇ  
(301041036)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07 Mayıs 2007  
Tezin Savunulduğu Tarih: 11 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İ. Necmi KAPTAN  
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Altuğ Şişman  
Yrd.Doç. Dr. Önder GÜLER**

**HAZİRAN 2007**

## **ÖNSÖZ**

Güneşten yayılan enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, güneş enerjisi çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir.

Bu çalışmada güneş pillerinden daha yüksek verim elde edebilmek için yapılması gerekenler incelenmiştir.

Bu tez çalışması sırasındaki manevi desteklerinden ötürü Sayın Ufuk Timer'e, tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. İ.Necmi Kaptan'a teşekkürü bir borç bilirim. Yüksek Lisans çalışmam boyunca bana her konuda destek olan aileme minnettarım.

HAZİRAN 2007

Engin ORUÇ

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>vii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
<b>2. IŞIĞIN YAPISI ve İLK GÜNEŞ PİLLERİ</b>	<b>3</b>
2.1. Işık ve Özellikleri	3
2.1.1. Işığın Yapısı	3
2.2. Foton Enerjisi	4
2.2.1. Foton Akısı ve Güç Yoğunluğu	5
2.2.2. Spektral Işınım	6
2.2.3. Toplam Güç Yoğunluğu	7
2.3. Enerji Kaynağı Olarak Güneş	7
2.3.1. Atmosfer Etkileri	7
2.4. Hava Kütlesi (Air Mass)	8
2.5. Güneş Işınımı Ölçmeleri	9
2.6. İlk Fotovoltaik Cihazlar	10
<b>3. YARI İLETKEN MALZEME ÖZELLİKLERİ</b>	<b>14</b>
3.1. Giriş	14
3.1.1. Öz Taşıyıcı konsantrasyonu	16
3.2. Enerji Düzeyleri	17
3.3. Katkılı Malzemeler	18
3.3.1. N-Tipi Malzeme	19
3.3.2. P-Tipi Malzeme	20
3.4. Üretim	23
3.4.1. Soğurulma Katsayısı: $\alpha$	23
3.4.2. Soğurulma Derinliği	23
3.4.3. Üretim Miktarı	25
3.4.4. Rekombinasyon	28
3.4.4.1 Shockley-Hall-Read Rekombinasyonu	28
3.4.4.2. Işınımsal Rekombinasyon	28
3.4.4.3 Auger Rekombinasyonu	28
3.4.5. Taşıyıcı Ömrü ve Difüzyon Mesafesi	28

<b>4. GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ</b>	<b>29</b>
4.1. Güneş Hücrelerinde Enerji Dönüşümü	29
4.1.1 İdeal Güneş Pili	29
4.2. Kısa Devre Akımı	31
4.2.1. Foto Akım ve Kısa Devre Akımı	32
4.3 Açık Devre Gerilimi	32
4.4 Doldurma Faktörü (FF)	32
4.5 Verim	34
4.6 Güneş Pillerinde Verimi Etkileyen Faktörler	36
4.6.1. Dirençlerin Etkileri	36
4.6.1.1 Karakteristik Direnç	36
4.6.1.2 Seri Direnç Etkisi	36
4.6.1.3 Paralel Direnç Etkisi	38
4.6.2. Sıcaklığın ve Işık Yoğunluğunun Etkisi	39
<b>5. KRİSTAL SİLİSYUM GÜNEŞ PİLİ TASARIMI</b>	<b>43</b>
5.1. Optik Özellikler	44
5.1.1. Optik Kayıplar	44
5.1.1.1 Yansımayı Engelleyecek Tabaka (ARC)	45
5.1.1.2 Yüzey Dalgalandırılması (Surface Texturing)	47
5.1.1.3 Materyal Kalınlığı	49
5.2. Rekombinasyonun Azaltılması	50
5.3. Üst Kontakların Tasarımı	52
5.3.1. Gövde Direnci	53
5.3.2. Tabaka Özdirenci	54
5.3.3. Emiter Direnci	55
5.3.4. Kontak Direnci	57
5.4. Kol direnci	57
5.5. Güneş Pili Tasarımına Genel Bakış	58
5.5.1. Temel Kayıplar	58
5.5.2. Teknolojik Kayıplar	58
5.6. Teorik Üst Kontak Tasarımı	62
5.7. PC1D ile Simülasyon	64
<b>6. SİLİSYUM GÜNEŞ PİLİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ</b>	<b>67</b>
6.1. Silisyum Saflaştırma Metotları	67
6.1.1. Saf Silisyumun Elde Edilmesi ve Türleri	67
6.2. Silisyum Külçeleri Elde Etme Metotları	68
6.2.1. Czochralski Prosesi	68
6.2.2. Yüzer Bölge (Float Zone) Prosesi	69
6.2.3. Çoklu Kristal Silisyum	69
6.3. Endüstriyel Güneş Pilleri	70
6.4. Endüstriyel Güneş Pilleri Teknolojileri	71
6.4.1. Ekran Baskısı (Screen Printing) Metodu	72

6.4.2. Gmlm Kontaklı Güneş Pilleri (BCSC)	73
6.4.3. Metal İzolatörlü Yarıiletken (MIS-IL) Güneş Pilleri	74
6.4.4. EFG Silikon Levhalar zerinde Güneş Pilleri	75
6.5. Ticari İnce-Film Kristal Silisyum Güneş Pilleri	76
6.6. Ekran Baskısı ve Gmlm Kontaklı Güneş Pillerinin Karşılaştırılması	77
<b>7. TEST , KALİBRASYON ve DİĞER MALZEMELER</b>	<b>79</b>
7.1. Giriş	79
7.2. Verim lm	79
7.3. Modül Kalite Testleri	81
7.3.1. Termal Döngü Testi	82
7.3.2. Nemli Sıcaklık Döngüsü	82
7.3.3. Morötesi Ia Maruz Bırakma	82
7.4. Güvenilirlik Testi	82
7.5. Modül Sertifikasyonu ve Ticari Hizmetler	82
7.6. Diğ er Malzeme eitleri	83
7.6.1. Galyum Arsenid	83
7.6.2. Amorf Silisyum	83
7.6.3. Kadmiyum Tellürid	83
7.6.4. Bakır İndiyum Diselenid	84
<b>8. TİCARİ PV MODÜLLERİN MALİYETİ VE UYGULAMALARI</b>	<b>85</b>
8.1. PV Sistemin ebeke Sistemiyle Ekonomik Kıyası	87
8.2. Jeneratör ve PV Modülü Karşılaştırılması	88
8.3. Alçak Gerilimde Dağıtım	89
8.3.1. Tablo Yardımıyla Minimum Kablo Kesiti Seğ imi	89
8.3.2. Denklemlerle Minimum Kablo Kesiti Seğ imi	90
8.4. Ak Seğ imi	91
8.4.1. Ak zellikleri	91
8.5. Fotovoltaik Uygulamalar	92
8.5.1. Binalarda Yapılan Uygulamalar	92
8.5.1.1 Müstakil Bir Ev İçin Fotovoltaik Sistem Dizaynı	93
8.5.1.2 Fotovoltaik Sistem Dizayn Edilirken Dikkat Edilmesi Gerekenler	97
8.5.2. Kırsal Kesimlerde Yapılan Uygulamalar	97
8.5.3. Su Pompaları ve Sulama Alanlarında	97
8.5.3.1 Güneş Enerjisi İle Su Pompalama Sistemi Uygulaması	98
8.5.4. Haberleşme Alanında	99
8.6. Diğ er Uygulamalar	99
<b>9. GÜNEŞ PİLLERİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ</b>	<b>100</b>
9.1. Giriş	100
9.2. Harici Maliyetler	101
9.3. Güneş Pillerinin Çevresel Maliyetleri	102
<b>10. SONUÇLAR</b>	<b>105</b>

<b>KAYNAKLAR</b>	<b>107</b>
<b>EKLER</b>	<b>112</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>116</b>

## KISALTMALAR

<b>PV</b>	: Fotovoltaik
<b>a-Si</b>	: Amorf Silisyum
<b>AM</b>	: Hava Kütlesi (Air Mass)
<b>SHR</b>	: Shockley-Hall-Read Rekombinasyonu
<b>ARC</b>	: Yansımayı engelleyecek tabaka (Anti Reflection Coating)
<b>BSF</b>	: Arka yüzey pasivizasyonu (Back Surface Field)
<b>CZ</b>	: Czochralski
<b>FZ</b>	: Yüzer Bölge (Float Zone)
<b>BCSC</b>	: Gömülmüş Kontaklı Güneş Pilleri (Buried Contact Solar Cell)
<b>MIS</b>	: Metal İzolatörlü Yarıiletken
<b>APCVD</b>	: Atmosfer Basıncında Kimyasal Buhar Çökmesi
<b>PECVD</b>	: Güçlendirilmiş plazma buhar çökeltisi
<b>EFG</b>	: Kenar tanımlı film beslemeli büyütme
<b>EVA</b>	: Etil vinil asetat
<b>IEC</b>	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
<b>UV</b>	: Morötesi



## TABLO LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
<b>Tablo 3.1.</b> Özdirenç değerleri .....	15
<b>Tablo 4.1.</b> En yüksek verim değerleri .....	35
<b>Tablo 5.1.</b> ARC kalınlık ve renkleri .....	46
<b>Tablo 5.2.</b> S'in iki farklı değeri için güç kaybı.....	56
<b>Tablo 5.3.</b> Tipik bir silisyum güneş pili için kısmi güç kaybı .....	56
<b>Tablo 6.1</b> Ekran baskısı proses adımları.....	72
<b>Tablo 6.2.</b> BSCS Metodunun proses adımları.....	74
<b>Tablo 6.3.</b> MIS işlem sırası.....	75
<b>Tablo 8.1</b> Maliyet Ayrıntıları.....	86
<b>Tablo 8.2</b> Maliyetler Karşılaştırması.....	87
<b>Tablo 8.3</b> Standart Kablo Ölçüleri.....	89
<b>Tablo 8.4</b> 12 V 'luk sistemde %5'lik gerilim düşümüne göre değişik güçlerdeki kablo uzunlukları.....	90
<b>Tablo 8.5</b> 24 V 'luk sistemde %5'lik gerilim düşümüne göre değişik güçlerdeki kablo uzunlukları.....	90
<b>Tablo 8.6</b> Kullanılan panelin elektriksel özellikleri.....	94
<b>Tablo 8.7</b> Toplam sistem maliyeti.....	96
<b>Tablo 8.8</b> Su pompalama sistemleri maliyet tablosu.....	98
<b>Tablo 9.1</b> Fotovoltaik malzeme üretimde CO <sub>2</sub> emisyonu.....	103
<b>Tablo 9.2</b> Fotovoltaik malzemelerin tehlikeli emisyonları .....	104

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Güneş pilleri malzeme pazar payları.....	2
Şekil 2.1 : Spektrum .....	3
Şekil 2.2 : Görülebilir ışık ve dalgaboyuna bağlı enerjileri.....	5
Şekil 2.3 : Spektral Işınımlar .....	6
Şekil 2.4 : Atmosfer Etkisi.....	8
Şekil 2.5 : Hava Kütlesi (Air Mass).....	8
Şekil 2.6 : İlk PV Cihazı .....	10
Şekil 2.7 : Adams ve Day tarafından kullanılan düzenek .....	11
Şekil 2.8 : İlk ince film .....	11
Şekil 2.9 : Bakır-Bakır oksit geçiş bölgesi ilk hücreler .....	11
Şekil 2.10 : İlk Fotovoltaik cihazlar .....	12
Şekil 3.1 : Malzeme Kesiti.....	14
Şekil 3.2 : Üç boyutlu elmas yapı .....	15
Şekil 3.3 : Silisyum'da elektron paylaşımı.....	16
Şekil 3.4a : Enerji düzeyleri .....	17
Şekil 3.4b : Enerji aralıkları .....	18
Şekil 3.5 : N-tipi malzeme.....	19
Şekil 3.6 : Katkılamamanın etkisi .....	20
Şekil 3.7 : P-tipi malzeme .....	21
Şekil 3.8 : Akış yönleri .....	21
Şekil 3.9 : N tipi ve P tipi malzeme.....	22
Şekil 3.10 : PN eklem bölgesi .....	22
Şekil 3.11 : Bazı güneş pili materyalleri için soğurma katsayıları.....	23
Şekil 3.12a : Dalga boylarına göre soğurulma derinlikleri.....	24
Şekil 3.12b : Si Soğurulma derinliği.....	24
Şekil 3.12c : GaAs Soğurulma Derinliği.....	25
Şekil 3.12d : Ge soğurulma Derinliği .....	25
Şekil 3.13a : Silisyum için kızıl ötesi ışığın dalga boyu için üretim miktarı.....	26
Şekil 3.13b : Silisyum için kırmızı ışığın dalga boyu için üretim miktarı.....	27
Şekil 3.14 : Pil derinliğinin üretim oranına etkisi.....	27
Şekil 4.1 : Foton enerjisi ile elektriksel akım elde edilmesi.....	29
Şekil 4.2 : Güneş pilinin eşdeğer elektrik şeması.....	30
Şekil 4.3 : Işığın yarıiletken üzerindeki etkisi.....	30
Şekil 4.4 : Akım – Gerilim (I-V) karakteristiği.....	31
Şekil 4.5 : Yüksek verimli bir güneş hücresinde FF.....	33
Şekil 4.6 : Verim değerleri .....	35
Şekil 4.7 : Karakteristik Direnç.....	36
Şekil 4.8 : Seri direnç etkisi.....	37
Şekil 4.9 : Paralel direnç etkisi .....	38
Şekil 4.10 : I-V eğri ve değerleri.....	40
Şekil 4.11 : Güneş pilinin akım, gerilim ve gücünün sıcaklıkla değişimi.....	40

Şekil 4.12	: Pil gücünün ve geriliminin ışık yoğunluğuyla değişimi.....	41
Şekil 4.13	: Pil gücünün sıcaklık ve ışık yoğunluğuyla değişimi.....	42
Şekil 5.1	: Yıllara göre pil verimi .....	43
Şekil 5.2	: Güneş pilindeki yansımalar.....	44
Şekil 5.3	: Yansımayı engelleyecek tabaka kalınlığı.....	45
Şekil 5.4	: Yansıtma oranları.....	46
Şekil 5.5	: Dalgalandırma işleminin etkisi .....	47
Şekil 5.6	: Dalgalandırılmış yüzey görüntüsü.....	47
Şekil 5.7	: Ters piramit görünümü.....	48
Şekil 5.8	: Fotolitografi sonrası görüntü.....	48
Şekil 5.9	: Kalın materyal kullanımının akım ve gerilime etkisi.....	49
Şekil 5.10	: İnce materyal kullanımının akım ve gerilime etkisi.....	49
Şekil 5.11	: Arka yüzey dalgalandırılması.....	50
Şekil 5.12	: Katkılamanın difüzyon mesafesi ve Voc'ye etkileri.....	51
Şekil 5.13	: Rekombinasyonu azaltmak için yapılabilecekler.....	52
Şekil 5.14	: Seri dirençler .....	52
Şekil 5.15	: Bara ve kollar.....	53
Şekil 5.16	: Tabaka öz direnci ölçümü.....	54
Şekil 5.17	: Emiter direnci ölçmek için gerekli mesafeler.....	55
Şekil 5.18	: Kol direnci için gerekli mesafeler.....	57
Şekil 5.19	: Optimum verim için yapılabilecek işlemler ve etkileri.....	61
Şekil 5.20	: Tipik bir pil yüzeyinin ölçüleri.....	62
Şekil 5.20a	: 6 Bölmeli güneş pili.....	63
Şekil 5.20b	: 12 Bölmeli güneş pili.....	63
Şekil 5.21	: Yansıma oranı ve kısa devre akımı.....	64
Şekil 5.22	: Malzeme kalınlığının pil gücüne ve akımına etkisi.....	65
Şekil 5.23	: Katkılamanın güç, gerilim ve akıma etkisi.....	66
Şekil 5.24	: Katkılamanın rekombinasyona etkisi.....	66
Şekil 5.25	: Pil çalışma sıcaklığının güç, gerilim ve akıma etkisi.....	66
Şekil 6.1	: Tek kristalli silisyum.....	68
Şekil 6.2	: Czochralski prosesi.....	69
Şekil 6.3	: Yüzer bölge prosesi.....	69
Şekil 6.4	: Çoklu kristal külçe büyütme prosesi.....	70
Şekil 6.5	: Ekran baskılı güneş pili kesiti.....	73
Şekil 6.6	: BSCS güneş pili kesiti.....	73
Şekil 6.7	: Metal İzolatörlü Yarıiletken Güneş Pilleri.....	75
Şekil 6.8	: Si-Film solar hücresi kesiti.....	76
Şekil 6.9	: Ekran Baskısı ve BCSC metotlarının akım gerilim eğrileri.....	78
Şekil 7.1	: Test Düzenegi.....	80
Şekil 7.2	: Yansıtıcı Tungsten lamba.....	80
Şekil 7.3	: Dört proplu ölçüm düzenegi.....	81
Şekil 8.1	: Pil ve Modül.....	85
Şekil 8.2	: PV modülünün kesiti.....	86
Şekil 8.3	: Bina uygulaması .....	93
Şekil 8.4	: Kullanılan modüllerin akım gerilim değerleri.....	93
Şekil 8.5	: Güneşlenme süreleri.....	95
Şekil 8.6	: Sistem bağlantı şeması.....	96
Şekil 8.7	: Haberleşme İstasyonu Uygulaması.....	99
Şekil 8.8	: Bazı Mobil Uygulamalar.....	99

## SEMBOL LİSTESİ

<b>A</b>	: Alan
<b>c</b>	: Boşluktaki ışık hızı
<b>d<sub>1</sub></b>	: ARC kalınlığı
<b>D<sub>n</sub></b>	: Elektronlar için difüzyon katsayısı
<b>d<sub>min</sub></b>	: Minimum kablo kesiti
<b>E, E<sub>ph</sub></b>	: Foton enerjisi
<b>E<sub>g</sub></b>	: Enerji aralığı
<b>F</b>	: Spektral ışınım
<b>G</b>	: Üretim oranı
<b>GF</b>	: Geometrik faktör
<b>H</b>	: Güç yoğunluğu
<b>I<sub>0</sub></b>	: Diyot doyma akımı
<b>I<sub>ph</sub></b>	: Fotoakım
<b>I<sub>sc</sub></b>	: Kısa devre akımı
<b>J</b>	: Akım yoğunluğu
<b>k</b>	: Boltzman Sabiti
<b>l</b>	: Uzunluk
<b>n</b>	: İdeallik Faktörü
<b>n<sub>1</sub></b>	: Kırılma indeksi
<b>n<sub>i</sub></b>	: Öz taşıyıcı konsantrasyonu
<b>M<sub>0</sub>, M<sub>0</sub>'</b>	: Plağın pozitif ve negatif limit momentleri
<b>λ</b>	: Dalga boyu
<b>P</b>	: Güç
<b>R</b>	: Direnç
<b>R<sub>ch</sub></b>	: Karakteristik direnç
<b>R<sub>e</sub>, R<sub>b</sub>, R<sub>c</sub></b>	: Emiter, gövde (taban), kontak seri dirençleri
<b>S</b>	: Kollar arası mesafe
<b>T</b>	: Referans çalışma sıcaklığı
<b>V<sub>oc</sub></b>	: Açık devre gerilimi
<b>v<sub>oc</sub></b>	: Açık devre gerilimin normali
<b>V<sub>dr</sub></b>	: İzin verilebilir gerilim düşümü
<b>α</b>	: Soğurulma Katsayısı
<b>α<sup>-1</sup></b>	: Soğurulma Derinliği
<b>λ</b>	: Dalga boyu
<b>ρ</b>	: Özdirenç
<b>ρ<sub>A</sub></b>	: Tabaka özdirenci
<b>Φ</b>	: Foton akısı
<b>q</b>	: Elektron yükü

# SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİ VE ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

## ÖZET

Sanayi devriminin başlamasıyla birlikte dünya üzerinde gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyaçları da artmaya başlamıştır. Fosil yakıtlar olarak kullanılan yakıtların her geçen gün giderek azalması ve yapılan araştırmalara göre yakın bir gelecekte tükenecek olmaları araştırmacıları yeni kaynaklar bulmaya sevk etmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi büyük enerji krizlerinde anlaşılmıştır.

Güneş pilleri 1839 yılında ilk kez Becquerel tarafından bulunan, fotovoltajik etkiyi kullanarak çalışırlar. 1954 yılında ki P-N malzemelerde ki gelişmelerle birlikte güneş pillerinde de ilerlemeler kaydedildi. İlk uygulamalar küçük ölçekliydi ve güneş pilleri ilk etkisini uzay keşif çalışmaları esnasında kullanılmasıyla gösterdi.

Bu tez çalışmasında dünya Fotovoltajik modül pazarının %85'ini oluşturduğu için silisyum güneş pillerine ağırlık verilmiştir.

Güneş pilleri yada fotovoltajik piller diye anılan cihazların, yarıiletkenlerin fotovoltajik etki özelliğini kullanarak, güneş ışığından elektrik enerjisi üretmeleri incelenmiştir.

Güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri anlatılmış, daha yüksek verim elde edebilmek için yapım ve tasarım aşamasında yapılabilecek işlemler hakkında bilgi verilmiştir. Üst yüzey tasarımının etkisini göstermek için iki desen elektriksel ve optik kayıplar açısından karşılaştırılmıştır.

Kristal silisyum pillerin yapım teknolojileri yakından incelenmiş ve yapım tekniklerinin pil verimine etkileri analiz edilmiştir. Güneş pillerinin çalışma prensipleri ve malzeme parametrelerinin etkilerinin anlaşılabilmesi için PC1D bilgisayar programı kullanılmıştır.

Güneş pillerinin ekonomik açıdan incelenmiş, uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir.

Modül test ve standartları ve fotovoltajiklerin çevresel etkileri hakkında bilgi verilmiştir.

# **SILICON SOLAR CELL'S ELECTRICAL CHARACTERISTICS and PRODUCTION TECHNOLOGIES**

## **SUMMARY**

Beginning with industrial age, energy demand of development countries have been increased rapidly. Every day the amount of fossil fuels in the nature becoming less. Obviously, in near future fossil fuel resources will be run out. So, alternative energy sources are becoming more attractive as the energy crisis become severe.

Solar Cells use photovoltaic effect for their operation, which was discovered in 1839 by Becquerel. Technological development began with the development of a diffused silicon P-N junction in 1954. The initial applications were on a small scale, and the first real impact of solar cells was only realized with the advent of space exploration.

In this study particular attention is paid in this paper to crystalline silicon solar cells, since bulk silicon solar-cell modules comprise approximately 85% of all worldwide PV module shipments.

Information given about how can, solar cells, also referred to as photovoltaic cells, use the photovoltaic effect of semiconductors to generate electricity directly from sunlight.

Because of their importance especially silicon solar cell's electrical characteristics and their design and production technics was investigated. Two different top contact pattern comprasion to optical and electrical losess for proving the top contact design effect.

PC1D computer program that use to understanding solar cells operation, and material parameters effects.

Solar cell fabrication technologies was investigated and their effects on the efficiency was discussed.

Also solar cell's applications costs compared with other power generation methods.

Tests and PV modul performance measurements their environmental impacts was investigated.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Uygarlığın doğuşu ve insanlığın gelişimi ile kişi başına enerji kullanımı arasında orantılı bir artış vardır. Tarih başlangıcından 19. yüzyıla kadar, insanlığın kullandığı toplam enerjinin nüfus artışı ile hemen hemen orantılı olduğu görülmektedir. Ancak, 20. yüzyılda enerji kullanımı hızlı bir artış göstermiştir. Dünya, bilinen fosil yakıt kaynaklarından % 0,1 kadarını bile kullanıyor olsa, hesaplar sonucu elde edilen kullanma değerleri ile karşılaştırıldığında, bilinen tüm kaynakların 100 yıldan daha az sürede tükenmesi beklenmektedir [1].

Belirtilen tüm bu sebepler ile günden güne artan sanayileşme ve bunun sonucunda ortaya çıkan makineleşme, gittikçe artan bir enerji gereksinimi doğurmaktadır. Özellikle 1950'lerden önce, kömür, enerji üretim ve önemli bir yer tutarken bu yıllardan sonra, Ortadoğu ve Güney Amerika'da bulunan zengin petrol yatakları sayesinde, petrol ön plana geçmiştir. 1950-1973 yılları arasında, neredeyse sabit seyreden petrol fiyatları nedeniyle, enerji gereksinimi petrolden karşılanmıştır. Petrolle rekabet edilememesi nedeniyle, Batı Avrupa ve ABD'de pek çok kömür madeni kapanmıştır. Ancak, 1972 yılında varili 2,5 \$ olan petrol, 1974 yılında 11 \$'a çıkmış ve politik bir baskı unsuru olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1973 Arap-İsrail savaşı sonrasında Arap ülkelerinin petrol ihracatını kısıp, fiyatları arttırmaları dünyada bir krize yol açmıştır. Bu tarihten sonra petroldeki fiyat artışı devam etmiştir. Her geçen yıl sürekli artan petrol fiyatlarının yanı sıra, dünya nüfusu da sürekli olarak artmakta, bu da enerji gereksinimini artırmaktadır. 1975 yılında 4 milyar olan dünya nüfusu, bugün 6 milyarı geçmiştir. Daha hızlı kalkınma isteği ve buna paralel olarak artan enerji gereksiniminin yanı sıra, kullanılan fosil yakıt atıklarının çevreye onarılamaz zararlar vermesi, alternatif yakıt arayışlarını arttırmıştır.

Bu arayışların bir sonucu da güneş enerjisidir. Ülkemizde daha çok binalarda ısıtma, soğutma ve sıcak su elde etmek için kullanılmaktadır. Sıcak su elde etmek amacıyla kullanım, ülkemizde ve dünyada en yaygın olan kullanım biçimidir.

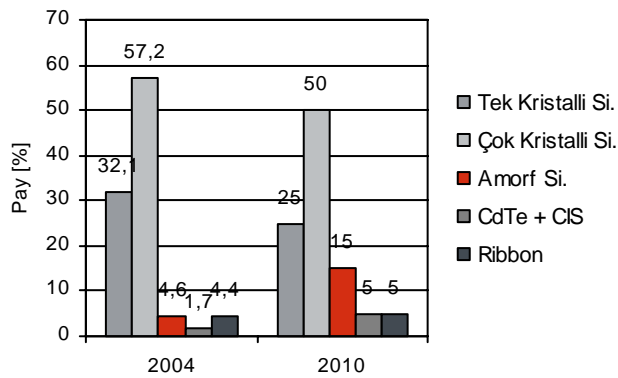
Isıtma amacıyla kullanım, ısıyı depolama tekniklerinin gelişimiyle daha verimli kullanılır hale gelecektir. Soğutma ise yıllık güneşlenme zamanının uzun olduğu bölgelerde verimli olmaktadır.

Yapılan ölçümlere göre, ülkemizin %63 'ünde 10 ay, %17'sinde ise 1 yıl boyunca güneş enerjisinden yararlanmak mümkündür. Özellikle güney bölgelerimizde, su ısıtmak amacıyla kullanılan güneş kolektörleri gün geçtikçe artmaktadır [1].

Güneş enerjisini kullanmanın ikinci bir uygulaması ise güneş pilleri olarak isimlendirilen fotovoltaik (PV) uygulamalardır. Üzerlerine düşen güneş ışınımını direkt olarak elektrik enerjisine çeviren güneş pilleri, doğru akım üretirler. Bu piller, seri veya paralel bağlanarak, ürettikleri akım veya gerilim değerleri yükseltilebilir.

Güneş pilleri imalatı sırasında farklı malzemeler ve farklı yapım teknikleri kullanılabilir. Bu tez çalışmasında Şekil 1.1'de verilen değerlerde göz önüne alınarak en çok kullanılan güneş pili olan silisyum güneş pillerinin üretiminden ve tasarımdan kaynaklanan elektriksel ve optik kayıpların minimize edilerek verimin optimum noktaya ulaşması için yapılan işlemler incelenmiştir [2]. Güneş pili üretim teknolojilerinin verim üzerindeki etkileri araştırılmış sonuçları analiz edilmiştir.

Halihazırda yapılan güneş pili uygulamaların maliyetleri de göz önüne alınarak farklı enerji kaynaklarıyla kıyaslamaları yapılmıştır.



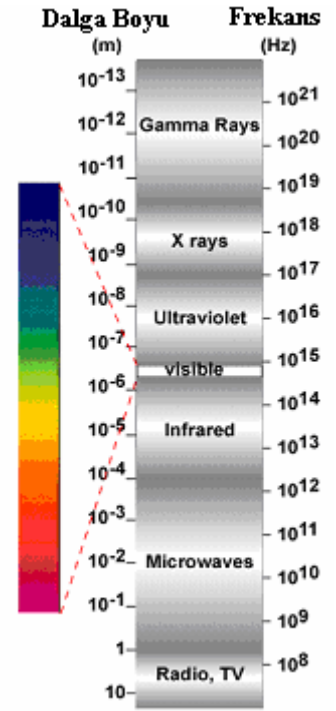
Şekil 1.1: Güneş pilleri malzeme pazar payları



## 2. IŞIĞIN YAPISI ve İLK GÜNEŞ PİLLERİ

### 2.1 Işık ve Özellikleri

Dünya her saniye yıllık enerji ihtiyacının birkaç kat fazlasını karşılayacak kadar güneş ışığı alır. Bizim görebildiğimiz ışık güneşten dünyaya gelen enerjisinin sadece bir kısmıdır. Şekil 2.1’de elektro magnetik spektrumda görebildiğimiz ışığın (400-780 nm dalgaboylu) bu enerjinin küçük bir parçası olduğu görülüyor.



Şekil 2.1: Spektrum

#### 2.1.1 Işığın Yapısı

Newton ile Huygens daha 1680’de, bu konu hakkında görüş ayrılığına düşmüştü. Huygens ışığın dalgayla ilişkin yorumu üzerinde dururken, Newton ışıktaki parçacıklardan oluşmuş bir demet görüyordu. Newton’un ünü, terazinin dengesini kendi lehine çevirdi ve 1800 yılına kadar onun modeli ağır bastı.

O dönemde, önce Thomas Young, sonra Augustin Fresnel, ışık girişimlerini gerçekleştirdiler, bir lambadan gelen ve ince, paralel ve birbirine çok yakın iki yarıktan geçen ışığı bir ekran üzerine gönderdiklerinde, sırasıyla karanlık ve aydınlık

saçaklardan oluşmuş bir sistem gözlemlendi. Bu olay, bir dalganın en emin «imzası» olduğundan, ışık bir dalgadır sonucuna varıldı.

Bu düzenek, çeşitli renklere ait dalgaboylarını da hesaplamayı sağlıyordu ve her şey 1905 yılına kadar gayet iyi gitmişti; ta ki Einstein'ın fotoelektrik olay hakkında bir açıklama yayımladığı tarihe kadar. Elektrikçe yüklenmiş bir çinko plakası, mor ışıkla (ne kadar zayıf olursa olsun) aydınlatıldığında, elektronlar yayımlıyordu; ve bu ışık ne kadar güçlü olursa olsun, kırmızıyla aydınlatıldığında hiçbir şey yayımlamıyordu. Bunu dalga kuramıyla açıklamak mümkün değildi. Ama Einstein ışığın fotonlardan, « enerji taneleri»nden oluştuğunu, bir fotonun enerjisinin mor ışık için kırmızıya göre daha fazla olduğunu belirleyerek olayı açıklamayı başardı. Bir elektron her seferinde yalnız bir foton alabilirdi ve çinko plakasını terk etmek için gerekli olan enerji, « kırmızı foton » ile « mor foton » enerjilerinin arasında yer alıyordu [3].

Işık, parçacıklardan yani fotonlardan oluşuyordu. Ama ışık, girişimler yaptığına göre, bir dalgaydı. Cevap belirsizdi. 1924 yılında Louis de Broglie'nin kanıtladığı ve kuantum fiziğinin o tarihten sonra kabul ettiği gibi, ışık birbiriyle uyuşmayan her iki yapıyı da bünyesinde taşımaktaydı. Işığın bu detaylı özellikleri PV sistemlerde nadiren gereklidir. Solar enerjinin PV cihazlarla ve diğer cisimlerle nasıl etkileştiğini belirlemek için birkaç önemli anahtar karakteristik vardır [4]. Bunlar;

- Gelen ışığın spektral içeriği.
- Güneşten gelen ışığın güç yoğunluğu
- Gelen ışığın fotovoltajik cihaza vuruş açısı ve
- Seçilmiş bir yüzeye güneş ışığının yıllık yada günlük gelişi

## 2.2 Foton Enerjisi

Foton ,bir dalga boyu ( $\lambda$ ) veya eşdeğer enerji ile gösterilebilir. Enerji (E) ve dalga boyu arasında ters orantı vardır. Şekil 2.2 de görülebilir ışık ve dalga boyuna bağlı enerjileri gösterilmiştir [5].

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

h: Planck Sabiti ( $6.626 \times 10^{-34}$  joule·s)

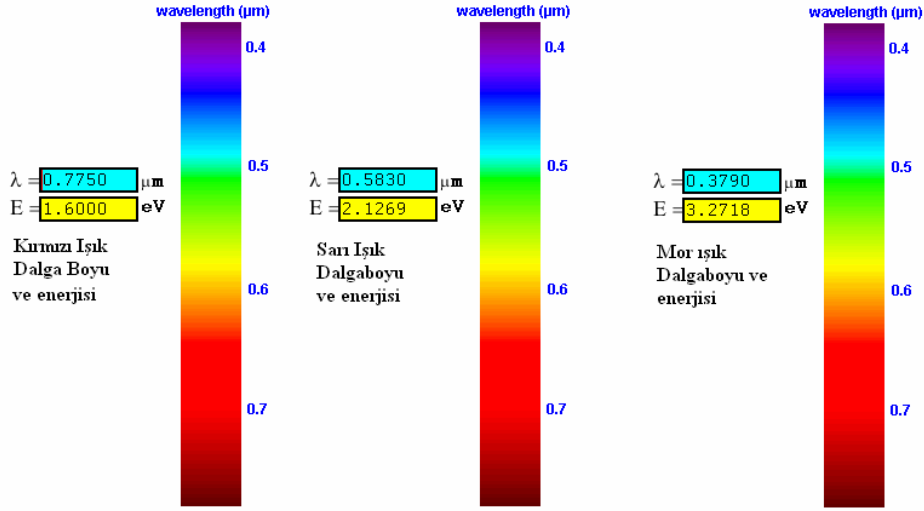
c: Boşluktaki ışık hızı ( $2.998 \times 10^8$  m/s)

Foton ve elektron gibi taneciklerle uğraşıldığında enerji birimi olarak genellikle joule (J) yerine elektron-volt (eV) kullanılır.

Elektron volt ; elektronun bir voltluk potansiyel farkıyla yaratılmış elektrik alanı içinde hızlanmasından kazanacağı kinetik enerji miktarına denk gelir.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ (J)}$$

$$E \text{ (eV)} = \frac{1,24}{\lambda \text{ (\mu m)}} \quad (2.2)$$



**Şekil 2.2:** Görülebilir ışık ve dalga boyuna bağlı enerjileri

### 2.2.1 Foton Akısı ve Güç Yoğunluğu

Foton akısı ( $\Phi$ ) birim zamanda birim alandaki foton sayısı olarak tanımlanabilir.

$$\Phi = \frac{\text{Foton Sayısı}}{\text{s m}^2} \quad (2.3)$$

Foton akısı, oluşturulan elektronların sayısını belirlemekte önemlidir, çünkü elektron sayısı bize bir güneş pilinden üretilen akımı verir. Foton akısı, fotonlardan enerjileri yada dalga boyları hakkında bilgi vermez. Işık kaynağındaki fotonların enerjisi veya dalga boyları ayrıca saptanmalıdır. Bir başka ifadeyle foton akısı dalga boyunada bağlıdır. Foton akısı bize birim zamanda birim yüzeye vuran foton sayısını verdiği için foton akısını kullanarak güç yoğunluğunu (H) bulmakta mümkündür.

Güç yoğunluğunu  $\text{W/m}^2$  birimiyle ifade edebilmemiz için fotonların enerji birimi Joule olmalıdır.

$$H\left(\frac{W}{m^2}\right) = \Phi(\lambda) \times \frac{hc}{\lambda} (J) = q \Phi(\lambda) \frac{1,24}{\lambda (\mu m)} \quad (2.4)$$

Aynı güç yoğunluğu için kısa dalga boyulu foton sayısı daha az olacaktır.

### 2.2.2 Spektral Işınım

Spektral ışınım foton dalga boyunun bir fonksiyonu olarak F ile gösterilir. Işık kaynağının özelliklerini belirlemekte en çok kullanılan karakteristiktir. Birimi  $Wm^{-2}\mu m^{-1}$  dir.  $m^{-2}$  ışık yayan yüzey alanıyla,  $\mu m^{-1}$  ilgilenilen dalga boyuyla ilgili terimlerdir.

Güneş pillerinin analizinde foton akısına spektral ışınımı hesaplayabilmek için ek olarak ihtiyaç duyulur. Spektral ışınım foton akısının verilen dalga boyunda  $W/m^{-2}$ 'e çevrilmesiyle hesaplanabilir.

Aşağıdaki denklemde verildiği gibi sonuç verilen dalga boyuna bölünür.

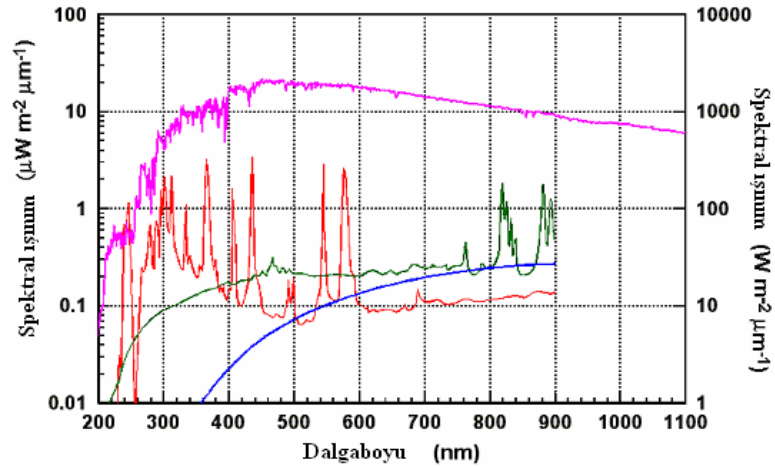
$$F\left(\frac{W}{m^2\mu m}\right) = q\phi(\lambda) E (eV) \frac{1}{\lambda(\mu m)} = q\phi(\lambda) \frac{1,24}{\lambda^2(\mu m)} = q\phi(\lambda) \frac{E(eV)}{1,24} \quad (2.5)$$

F: spektral ışınım  $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ ;

$\Phi$ : foton akısı , foton sayısı  $m^{-2}sec^{-1}$ ;

E ve  $\lambda$  fotonun enerji ve dalga boyu eV ve  $\mu m$  birimlerinde;

q, h ve c sabitler.



**Şekil 2.3:** Spektral Işınım Tablosu (Kırmızı -civa -, yeşil -xenon- ve mavi -halojen- lambaların -sol eksen- güneş ışığıyla karşılaştırılması tablosu. Güneş ışığı pembe ve sağdaki eksen)

### 2.2.3 Toplam Güç Yoğunluğu

Işık kaynağından yayılan toplam güç yoğunluğu spektral ışınımın tüm dalga boyları için integralinin alınmasıyla hesaplanabilir. Ancak ışık kaynaklarının spektral ışınımalarını belirten kapalı denklemleri genellikle yoktur.

Bunun yerine dalga boyu ölçülerek tüm dalga boyları için toplam ışık kaynağından yayılan güç yoğunluğu aşağıdaki denklemle hesaplanabilir.

$$H = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^{\infty} F(\lambda_i) \Delta\lambda \quad (2.6)$$

H: Işık kaynağından yayılan toplam güç yoğunluğu ( $Wm^{-2}$ )

$F(\lambda)$  :  $Wm^{-2}\mu m^{-1}$  birimli spektral ışınım

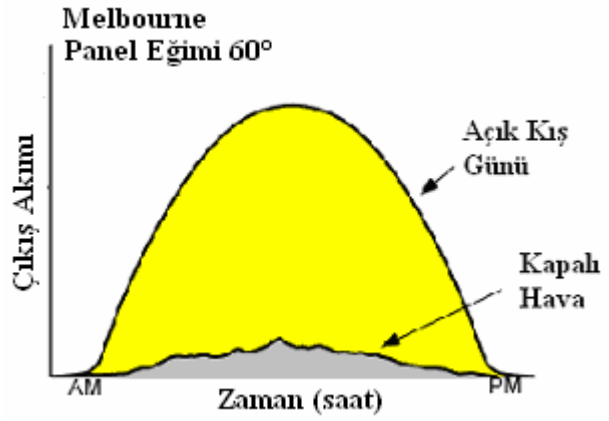
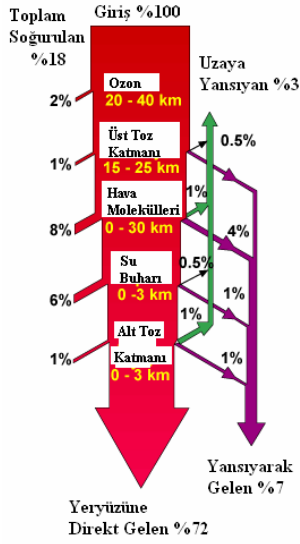
$d\lambda$  : Dalga boyu

### 2.3 Enerji Kaynağı Olarak Güneş

Yeryüzünden 151.106 km uzaklıkta bulunan güneş, nükleer yakıtlar dışında, dünyada kullanılan tüm yakıtların ana kaynağıdır. İçinde, sürekli olarak hidrojenin helyuma dönüştüğü füzyon reaksiyonları gerçekleşmektedir ve oluşan kütle farkı ısı enerjisine dönüşerek uzaya yayılmaktadır. Ancak, bu enerjinin çok küçük bir kısmı yeryüzüne ulaşmaktadır. Güneşten yeryüzüne ulaşan birim zamandaki enerji  $1367 W/m^2$  dir.

#### 2.3.1 Atmosfer Etkileri

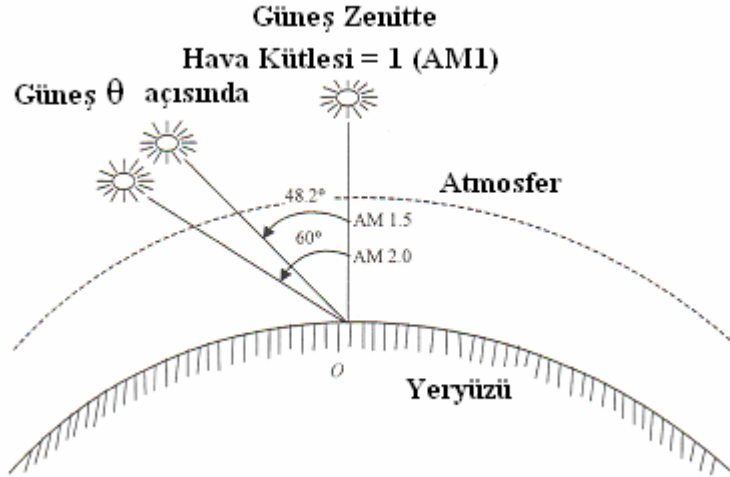
Yeryüzüne ulaşabilen ışınımın değerinin bu kadar düşük olmasının nedeni, atmosferdeki  $CO_2$ , su buharı ve ozon gibi gazların ışınımı absorbe etmelerinin yanı sıra kat etmesi gereken yolun uzunluğudur. Dış yüzey sıcaklığı 6000 K olarak kabul edilen ve bilinen en büyük siyah cisim olan güneşin yaydığı ışınımın yeryüzüne ulaşabilen miktarı %70 kadardır. Bu eksilmeler ortaya çıkmadan önce, atmosferin dışında ışınım değeri  $1367 W/m^2$  dir ve bu değer güneş sabiti olarak alınır. Pratik olarak, yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı değeri  $1000 W/m^2$  olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.4'de bu etkiler gösterilmiştir [6].



Şekil 2.4: Atmosfer Etkisi

## 2.4 Hava Kütleli (Air Mass)

Hava Kütleli (Air Mass) direkt güneş ışınımının atmosfer boyunca aldığı yoldur. Güneş tam Zenith'te olduğu anda ışığın yol alacağı mesafe en kısadır ve bu durum AM 1.0 kabul edilir. Şekil 2.5'te Air Mass gösterilmiştir. Air Mass Denklem 2.7'ye göre hesaplanır [7].



Şekil 2.5: Hava Kütleli

$$\text{Hava Kütleli} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.7)$$

## 2.5 Güneş Işınımı Ölçmeleri

Meteoroloji istasyonlarında genellikle yatay düzleme gelen tüm güneş ışınımı ölçülür. Piranometre adı verilen bu tür ışınım ölçerlere solarimetre, aktinometre veya ölçülen ışınımı kaydetme imkanı varsa, piranograf, solarigraf veya aktinograf isimleri kullanılmaktadır. Direkt güneş ışınımı ölçülen aletlerde pirheliometre denilmektedir.

Işınım ölçerler, ısı duyarlı veya ışık duyarlı olarak geliştirilmişlerdir. Piranometrelerin çoğu, yüzeylerin ışınım yutma ve yansıtma özeliği esas alınarak geliştirilmiştir. Işınımın düştüğü kısımda biri siyah diğeri beyaz iki yüzey bulunmakta, siyah yüzeyin sıcaklığı yutulan ışınım sebebiyle artmakta ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ölçülmektedir. Amerika birleşik Devletleri'nde Eppley piranometreleri, Avrupa'da ise Kipp solarimetreleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Türkiye'de Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü istasyonlarında Robitzsch tipi bimetalik aktinograflar kullanılmaktadır. Metallerin farklı genişlemeleri esas alınan bu tür ışınım ölçerlerde, siyaha boyalı çubuğun serbest ucu güneş ışınımının etkisiyle kıvrılır ve bu değişim bir kağıt üzerine çizgi olarak kaydedilir. Bimetalik aktinograflar çevre şartlarından çok etkilenir, Çevre sıcaklığının değişmesiyle duyarlılığı değişir Tepki süreleri çok geçtir ve 10-15 dakikayı geçmektedir. Diğer piranometrelere göre hatası çok fazladır. Robitzsch tipi bimetalik aktinograflarla yapılan ölçmelerde % 15-25 hata yapıldığı belirtilmektedir. Çalışması için elektriğe ihtiyaç duyulmaması ve kendi kendine kayıt yapması sebebiyle çok kullanılmaktadır.

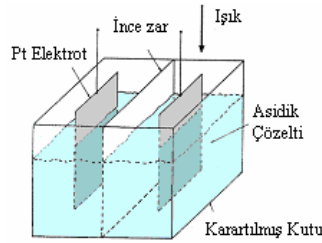
Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından ölçülen tüm güneş ışınımı değerlerinin hatalı olduğu belirtilmektedir. Komşu ülkelerde ölçülen tüm güneş ışınımı değerleri, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü istasyonlarında ölçülen tüm güneş ışınımı değerlerinden yaklaşık % 30 daha büyüktür. Ayrıca, Dünya Meteoroloji Örgütü'nün bimetalik aktinograflarla yapılan ölçmeleri esas almadığını da belirtmek gerekir.

Güneşlenme süresi helyograflarla kaydedilir. En çok kullanılanı Campbell-Stokes helyograflarıdır. Güneş ışınımı bir kağıt üzerine yoğunlaştırılır, kağıdın yanması sebebiyle bıraktığı iz ölçülerek güneşlenme süresi tespit edilir. Campbell—stokes helyografları, Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından standart ölçü olarak kabul edilmiştir. Birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de güneşlenme süresi ölçmeleri

Campbell-stokes helyograflarla yapılmaktadır. Komşu ülkelerde ölçülen güneşlenme süresi değerleriyle Türkiye’de ölçülen güneşlenme süresi değerleri arasında tam bir uyum mevcuttur [8].

## 2.6 İlk Fotovoltaik Cihazlar

Edmond Becquerel, fotovoltaik etkiyi ilk keşfeden olarak bilinir. On dokuz yaşında babasının laboratuvarında çalışırken, Şekil 2.6’ta ki cihazla güneş ışığından faydalanıp bir elektrotu aydınlatarak elektriği oluşturdu. Elektrotlar AgCl veya AgBr gibi hafif hassas malzemeye kaplandığı zaman en iyi sonuçlar, mavi veya morötesi ışıkla elde edildi [9]. Genellikle, platin elektrotlarını kullanmasına rağmen, gümüş elektrotların cevaplarını da gözledi. Daha sonra, fotovoltaik etkiyi kullanabilmek için aktinografi geliştirdi. Aktinograf ısıtılmış yüzeylerin sıcaklıklarını yaydıkları ışık yoğunluğundan belirleyip kaydeden cihaz olarak kullanıyordu.

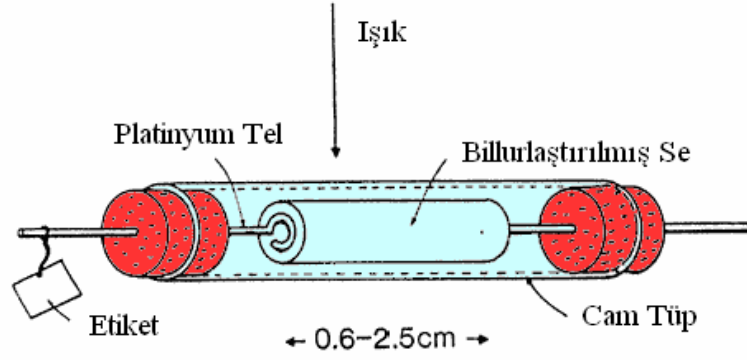


Şekil 2.6: İlk PV cihazı

Sonraki önemli fotovoltaik gelişme, selenyumda bulunan fotokondaktif etkiye olan ilgiden ortaya çıktı. Adams ve Day (1877), bu etkiyi araştırırken, fark ettikleri bir anormalliğin dahili voltaj üretimini açıklayabileceğini düşündüler. Şekil 2.7 de gösterilen numuneyi kullanarak bu anormalliği dikkatlice araştırdılar. Isıtılmış platin temasları, camsı selenyumun küçük silindirlerinin içine yerleştirildi. Adams ve Day tarafından yürütülen bu deneyin konusu, “sadece ışığın hareketi ile selenyumda bir akımın oluşmasının mümkün olacak olup olmadığı” görmektir. [10]

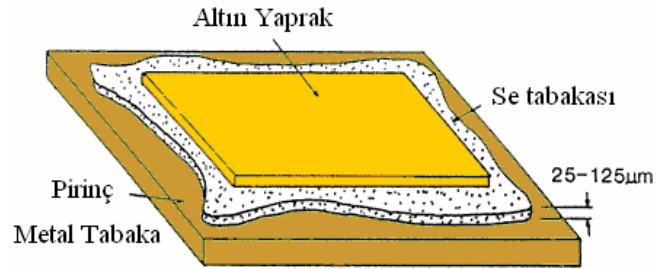
Bu, bütünüyle katı bir sistemde fotovoltaik etkinin ilk kez görülmesiydi. Adams ve Day bu akımın dış katmandaki selenyum barının billurlaştırılmasından kaynaklandığını düşündüler. Bu olayın anlaşılması için gerekli kavramlar ancak fizik biliminin birkaç 10 yıl sonraki gelişmesiyle mümkün oldu.





**Şekil 2.7:** Adams ve Day tarafından kullanılan düzenek.

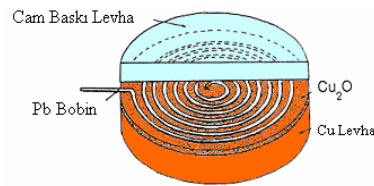
Bir sonraki önemli gelişme 7 yıl sonra oldu (1883). İki farklı metalden yapılmış tabakaların arasına erimiş selenyum sıkıştırdı. Fritts iki tabakadan sadece birine yapışan ince Se film yapmayı başarmıştı. Altın yaprağına bastırarak suretiyle, selenyumunu ışığa çıkardı ve böylece ilk “ince-film” fotovoltaik cihazı yapmış oldu. Şekil 2.8 gösterilen bu ilk ince-film cihaz 30 cm<sup>2</sup> büyüklüğündeydi.



**Şekil 2.8:** İlk ince film

Fritts, fotovoltaik muazzam potansiyelini ortaya çıkaran ilk kişiydi. Cihazların, çok düşük fiyatta üretilebildiği ve akımın, akülerde depolanabileceğini belirtmişti [11].

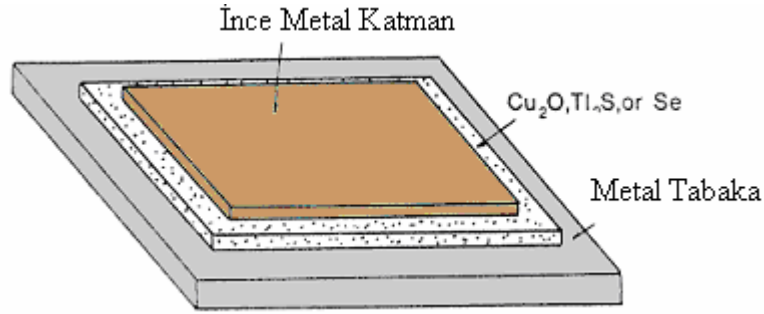
Aradan geçen yaklaşık 50 yıldan sonra bu konuda yine önemli gelişmeler olmaya başladı. Bakır üzerinde büyüyen bakırlı oksit katmanlarının fotokondaktif etkilerini incelerken, bakır oksitin doğrultucu etkisi keşfedildi. Şekil 2.9 Bakır-Bakır oksit geçiş bölgesi ilk hücreleri göstermektedir.



**Şekil 2.9:** Bakır-Bakır oksit geçiş bölgesi ilk hücreler

Bu aktiviteler selenyum ve fotovoltaiik cihazlara olan ilgiyi yeniden uyandırdı. Özellikle, Bergmann, 1931'de geliştirilen selenyum cihazlarının Bakır-Bakır oksitlerden daha kaliteli olduğunu ispatladı ve ticari olarak baskın ürün oldu. 1939'da, benzer performansın bir thallos-sülfid hücresi gösterildiği Nix tarafından rapor edildi [12].

Fotovoltaiik cihazları Şekil 2.10 teki şekli aldılar.



**Şekil 2.10:** İlk Fotovoltaiik cihazlar

1930'lu yıllarda selenyum hücrelerinde gelişme devam ederken, silikon doğrultuculardaki kullanımı ile dikkat çekiyordu. Radyonun ilk günlerinde genellikle alıcı olarak kristal doğrultucular kullanılıyordu ancak thermionic tüplerde ki gelişmelerden sonra kristal doğrultucular, neredeyse tamamen, çok yüksek frekanslı uygulamalarda değiştirildi.

Tungsten uçlar silisyumla temas için en uygun malzeme kabul edildi. Silisyumun saflığının araştırılmasıyla, özellikleri daha iyi anlaşılmaya başlandı.

Sonraki yıllarda silisyumun saflaştırılması için çalışmalar yapıldı. 1954 yılında Bell Laboratuvarları %6 verimle çalışan güneş hücresi yaptığını açıkladı [13].

1958 yılında Hoffman Electronics Company %14 verimle çalışan güneş hücreleri üretti. Bell Telephone Company kırsal bölgelerde ki telefon yayınları için Güneş hücrelerini test etti.

Bu süre zarfında performans olarak yeterli olmalarına rağmen, ekonomik açıdan rekabet edemedikleri için PV sistemler pratikte geniş uygulama alanları bulamadı.

1958'de uzaya gönderilen Vanguard uydusunun radyo vericisi için kullanıldı ve başarılı performansından ötürü PV'ler için uzay birinci öncelikli çalışma konusu haline geldi.

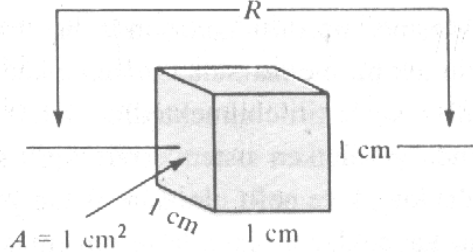
Uzay programları için yapılan çalışmaların getirdikleri ve yarı-iletken malzemelerdeki gelişmelere, 1970'te enerji krizi eklenince PV sistemlerin günlük uygulamalarda kullanılması çalışmaları tekrar canlanarak günümüze kadar ilgi devam etti.[14].

### 3. YARI İLETKEN MALZEME ÖZELLİKLERİ

#### 3.1 Giriş

Güneş hücrelerinde enerji dönüşümü işleminin nasıl gerçekleştiğini daha iyi anlamak için yarıiletken malzeme karakteristiklerine bakmak gereklidir.

Yarıiletken adının kendisi, karakteristikleri konusunda bazı ipuçları veriyor. Yarı öneki, genelde iki sınır arasında kalan bir şey için kullanılır. İletken terimi ise sınırlı miktarda dış basınç uygulanması sonucu rahat bir yük akışına izin veren herhangi bir madde için kullanılır. Bu nedenle bir yarıiletken, bir izolatör (çok düşük iletkenlik) ile bakır gibi yüksek bir iletkenliğe sahip bir iletkenin sınırları arasında kalan bir iletkenlik düzeyine sahiptir. Bir maddenin, yük akışına veya akıma karşı direnci iletkenliği ile ters orantılıdır. Yani, iletkenlik düzeyi ne kadar yüksekse, direnç düzeyi o kadar düşüktür. Tablolarda öz direnç ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) ( $\rho$ , Yunan alfabesindeki ro) terimi, maddelerin direnç düzeyleri kıyaslanırken sık sık kullanılır. Bir maddenin öz direnci Şekil 3.1’de gösterildiği gibi 1 cm uzunluğunda ve 1 cm kesite sahip bir malzeme örneğinin direnci esas alınarak incelenebilir. Bir maddenin direncine ilişkin denklem (belli bir sıcaklıkta)  $R = \rho l / A$  ile ifade edilir. Burada  $R$ , ölçülen omik direnci,  $l$  malzeme örneğinin uzunluğunu,  $A$  kesitini ve  $\rho$  da öz direnci göstermektedir.  $l = 1 \text{ cm}$  ve  $A = 1 \text{ cm}^2$  olursa yukarıda gösterildiği gibi  $R = \rho$  olur. Bu nedenle  $1 \text{ cm}^3$ ’lük numunenin direnci, öz direnç tarafından belirlenir [15].



Şekil 3.1: Malzeme Kesiti

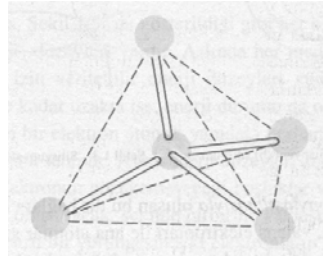
Tablo 3.1’de üç genel madde kategorisi için tipik özdirenç değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Özdirenç değerleri

İLETKEN	YARIİLETKEN	YALITKAN
$\rho \approx 10^{-6} \Omega.cm$ (Bakır)	$\rho \approx 50 \Omega.cm$ (Germanyum) $\rho \approx 50 \times 10^3 \Omega.cm$ (Silisyum)	$\rho \approx 10^{12} \Omega.cm$ (Mika)

Germanyum ve silisyumun en önemli yarı iletken malzemeler olarak görülme sebeplerinden bir tanesi bunların çok yüksek bir saflık düzeyinde üretilebilmesidir. Gerçekten de, son gelişmeler saf maddedeki katkılı dizaynı 10 milyarda 1’e (1:10,000,000,000) düşürmüştür. İnsanın aklına böylesi düşük yabancı madde düzeylerinin gerekli olup olmadığı sorusu gelebilir. Silisyum maddesinin bir pulunda, milyon başına bir adet katkı maddesi eklenmesinin maddeyi nispeten kötü bir iletkeniden iyi bir elektrik iletkenine dönüştürülebildiği göz önüne alınırsa bunun gerekli olduğu görülür. Yarıiletkenler alanına girdiğimizde karşılaştırma düzeylerinin yepyeni bir tanımıyla karşı karşıyayız. “Katkılama” denen bir işlem ile maddenin tipik özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilme imkanı, Ge ve Si’nin bu kadar yoğun ilgi toplamasının bir başka nedenidir. Diğer nedenler ise bu maddelerin karakteristiklerinin ısı ve ışık uygulanarak önemli ölçüde değiştirebilmesine dayanır; bu, ısı ve ışığa karşı duyarlı aygıtların geliştirilmesinde önemli bir varsayımdır.

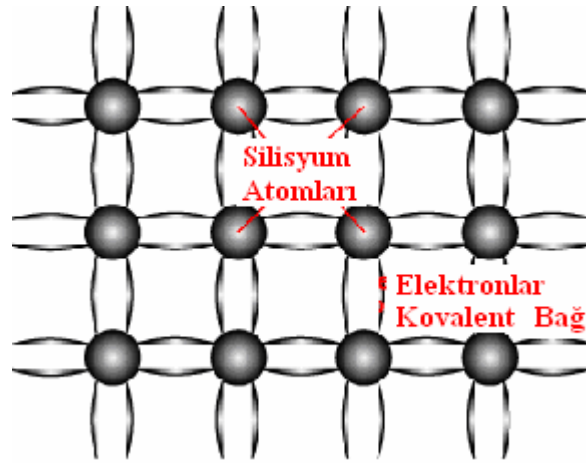
Ge ve Si’nin yukarıda anılan bazı eşsiz nitelikleri, atomik yapılarına dayanmaktadır. Her iki maddenin atomları yapısal olarak periyodik (yani sürekli kendini tekrarlayan) özelliklerle çok belirli bir yapı oluşturur. Komple bir yapıya kristal, ve atomların periyodik düzenine de örgü adı verilir. Ge ve Si kristali, Şekil 3 .2’te gösterilen üç boyutlu elmas yapısına sahiptir.



**Şekil 3.2:** Üç boyutlu elmas yapısı

Yalnızca sürekli tekrarlanan aynı tipte kristal yapılardan oluşan herhangi bir maddeye tek-kristalli yapı denir. Elektronik alanında pratik uygulama bulan yarıiletken maddelerde bu tek-kristalli yapı görülür ve buna ek olarak yapının periyodikliği, katkılama sürecinde önemli ölçüde değişmez.

En çok bilinen iki yarıiletken maddelerden germanyum ve silisyumun valans bandında 4 elektron vardır. Bu dört valans elektronlarından herhangi birini uzaklaştırmak için gerekli olan potansiyel (iyonizasyon potansiyeli) yapıdaki herhangi başka bir elektronu uzaklaştırmak için gerekenden daha azdır. Saf bir germanyum veya silisyum kristalinde bu dört valans elektron, Şekil 3.3'de silisyum için gösterildiği gibi 4 komşu atoma bağlıdır. Hem Ge hem de Si dört valans elektrona sahip olduğu için tetravalans atomlar olarak anılırlar. Bu elektronların paylaşılmasıyla oluşan bağlara kovalent bağ denir.



Şekil 3.3: Silisyum'da elektron paylaşımı

### 3.1.1 Öz Taşıyıcı Konsantrasyonu

Her ne kadar kovalent bağı, valans elektronları ile ana atomlar arasında daha sağlam bir bağlaşımaya yol açsa da, valans elektronlarının doğal sebeplerle yeteri kadar kinetik enerji alıp kovalent bağdan koparak serbest duruma geçmesi mümkündür. Bu doğal sebepler, foton şeklinde ışık enerjisi ve çevreleyen ortamdaki ısı enerjisi sayılabilir. Oda sıcaklığında (300 K), bir santimetre küp öz silisyum maddesinde yaklaşık  $1,01 \times 10^{10}$  (Sproul, 1991) serbest taşıyıcı vardır.

Öz madde, katkıları çok düşük bir düzeye düşürmek amacıyla modern teknoloji ile mümkün olan en yüksek saflık için özenle rafine edilmiş yarıiletkendir. Maddenin

içinde yalnızca doğal sebeplerden dolayı bulunan elektronlara, öz taşıyıcılar (Intrinsic Carrier) denmektedir.

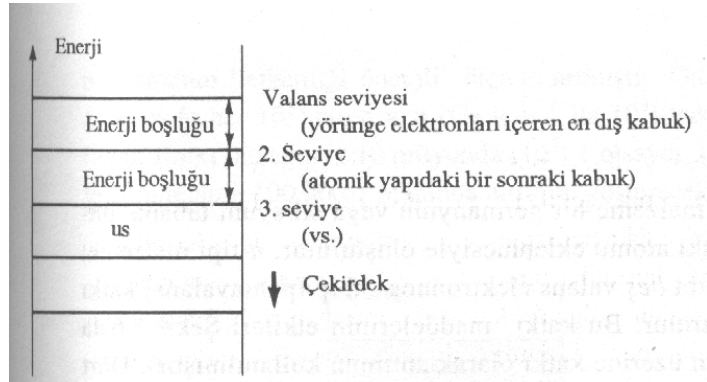
Elektronların termal olarak uyarılmasıyla serbest taşıyıcı sayısı artar ve bu taşıyıcıların yoğunluğuna, öz taşıyıcı konsantrasyonu adı verilir ve  $n_i$  ile gösterilir.

275 K ile 375 K arasındaki sıcaklıklarda öz taşıyıcı konsantrasyonu aşağıdaki denklemlerle ampirik olarak hesaplanır.

$$n_i = 9,38 \times 10^{19} \left( \frac{T}{300} \right)^2 \exp\left( \frac{-6884}{T} \right) \quad (3.1)$$

### 3.2 Enerji Düzeyleri

Yalıtılmış atomik yapıda, Şekil 3.4a'da gösterildiği gibi her bir yörünge elektronuyla ilgili ayrı (farklı) enerji düzeyleri vardır. Aslında her madde, atomik yapısındaki elektronları için kendi izin verilebilir enerji düzeyleri kümesine sahip olacaktır.

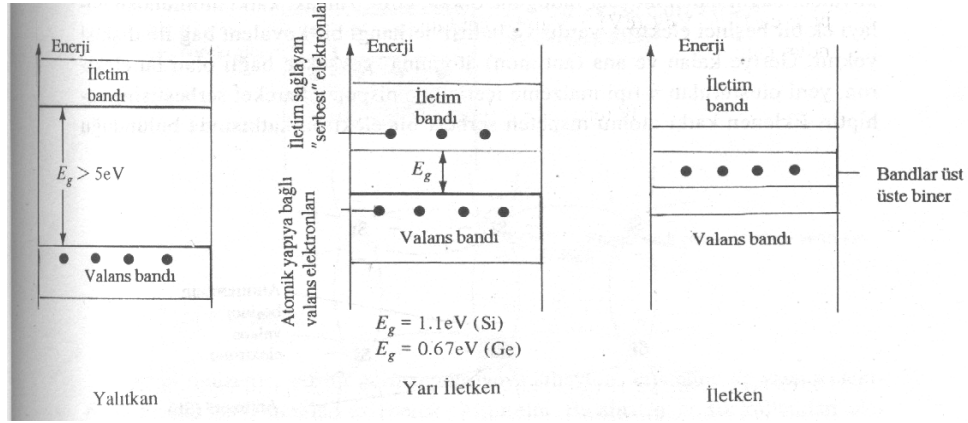


Şekil 3.4a : Enerji düzeyleri

Elektron, çekirdekten ne kadar uzakta ise, enerji durumu da o kadar yüksektir ve ana atomundan ayrılmış olan bir elektron atomik yapıdaki herhangi bir elektrondan daha yüksek bir enerji durumuna sahiptir. Ayrı enerji düzeyleri arasında, yalıtılmış atomik yapı içerisinde, hiçbir elektronun gözükemeyeceği boşluklar vardır. Maddenin atomları kristal örgü yapısını oluşturacak şekilde birbirine yaklaştıkça atomlar arasındaki etkileşim, bir atomun belirli bir yörüngesindeki elektronların komşu bir atomun aynı yörüngesindeki elektronlarından biraz daha farklı enerji düzeylerine sahip olması sonucuna yol açar. Toplam sonuç, valans elektronları için mümkün olan enerji durumlarına ilişkin ayrı düzeylerinin, Şekil 3.4b'de gösterildiği gibi, bantlara yayılmasıdır. Yine de atomik örgüdeki herhangi bir elektronun

bulunabileceği sınır düzeyleri, maksimum enerji durumları ve valans bandıyla, iyonizasyon düzeyi arasında yasak bir bölge kalır. İyonizasyonun, bir elektronun atomik yapıdan kopup, iletim bandındaki “serbest” taşıyıcılara katılabileceği kadar enerjilendirilmesini sağlayan mekanizmadır.

0°K veya mutlak sıfırda, yarıiletken malzemelerin tüm valans elektronları valans bandında bulunurlar. Ancak, oda sıcaklığında (300°K) çok sayıda elektron iletim bandına girmeye, yani silisyumda 1.1 eV’luk, germanyumda 0.67 eV’luk enerji aralığını ( $E_g$ ) atlamaya yetecek enerji miktarını almış olacaktır. Germanyum için belirgin olarak daha düşük olan  $E_g$ , oda sıcaklığındaki silisyum ile karşılaştırıldığında bu malzemedeki fazla taşıyıcı sayısının nedenidir. Yalıtkanlar için enerji aralığı tipik olarak 5eV’dir. Çok az elektron oda sıcaklığında gerekli enerjiyi alabildiğinden, malzeme bir yalıtkan olarak kalmaktadır.



**Şekil 3.4b : Enerji aralıkları**

Bölüm 3.1’de, belirtildiği gibi öz yarıiletken malzemelere bazı katkı yapıldığında, yasak bantta izin verilebilir enerji durumları ve her iki yarıiletken malzeme için  $E_g$ ’de net bir azalma doğacak, sonuçta oda sıcaklığında iletim bandında artan bir taşıyıcı yoğunluğu olacaktır.

### 3.3 Katkılı Malzemeler

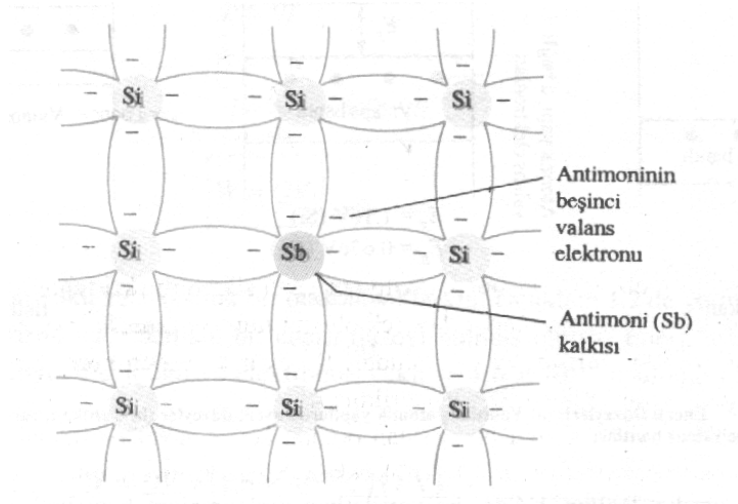
Yarıiletken malzemelerin karakteristikleri, nispeten saf yarıiletken malzemeye bazı katkı atomları eklenerek önemli ölçüde değiştirilebilir. Bu katkılar, ancak 10 milyonda 1 oranında ekleniyor olmasına karşın bant yapısını, malzemenin elektriksel özelliklerini tümüyle değiştirmeye yetecek ölçüde değiştirebilir. Bu katkılama



işlemine tabi tutulan yarıiletken malzemeye, katkılı malzeme denir. Yarıiletken eleman üretiminde paha biçilmez önemde iki katkılı malzeme vardır: n-tipi ve p-tipi. Bunların her biri, aşağıda ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

### 3.3.1 N-Tipi Malzeme

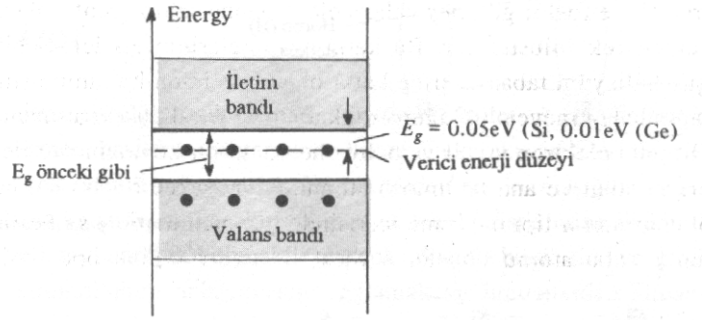
Hem N hem de P tipi malzeme bir germanyum veya silisyum tabana, önceden belirlenmiş sayıda katkı atomu eklenmesiyle oluşturulur. n-tipi malzeme, antimon, arsenik ve fosfor gibi beş valans elektronuna sahip (pentavalans) katkı maddeleri eklenerek oluşturulur. Bu katkı maddelerinin etkileri Şekil 3.5’de gösterilmiştir (silisyum taban üzerine katkı olarak antimon kullanılmıştır). Dört kovalent bağın halen mevcut olmasının yanı sıra, katkı atomundan dolayı ek bir beşinci elektron vardır ve belirli herhangi bir kovalent bağ ile ilişkisi yoktur. Geriye kalan ve ana (antimon) atomuna gevşekçe bağlı olan bu elektron, yeni oluşturulan N-tipi malzeme içerisinde nispeten hareket serbestisine sahiptir. Eklenen katkı atomu nispeten serbest bir elektron katkısında bulunduğu için beş elektrona sahip katkı maddelerine katkı atomları veya donör atomları denir. N-tipi malzemede çok sayıda serbest” taşıyıcılar oluşmasına rağmen malzemenin atom çekirdeğindeki pozitif yüklü protonların sayısı ideal yapıda serbest olan ve yörüngede bulunan negatif yüklü elektronların sayısına eşit olduğundan, elektriksel olarak nötr durumundadır.



Şekil 3.5: N-tipi malzeme

Bu katkılama işleminin nisbi iletkenlik üzerindeki etkisi en iyi Şekil 3.6’daki enerji bandı diyagramı ile tanımlanabilir.

Yasak bantta  $E_g$ 'si öz malzemeden önemli ölçüde düşük olan ayrık bir enerji düzeyi (donör düzeyi olarak adlandırılır) ortaya çıkar. Eklenen katkıdan gelen bu serbest elektronlar, bu enerji düzeyinde kalır ve yeterli ölçüde ısı enerjisi olarak oda sıcaklığında iletim bandına geçmek için hiç zorluk çekmezler. Bunun sonucunda oda sıcaklığında, iletkenlik düzeyinde çok sayıda taşıyıcı (elektron) vardır ve malzemenin iletkenliği önemli ölçüde artmıştır.



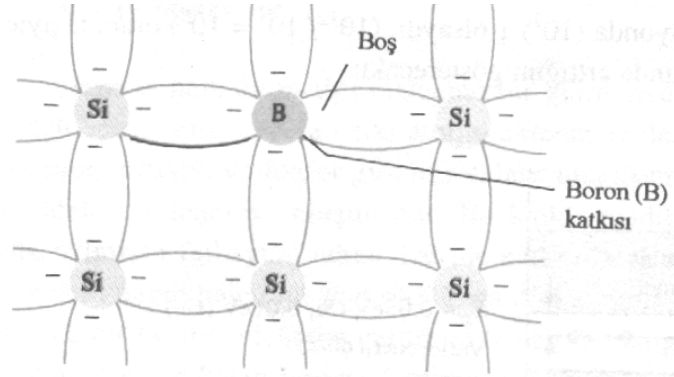
**Şekil 3.6:** Katkılamamanın etkisi

### 3.3.2 P-Tipi Malzeme

P-tipi malzeme, saf bir germanyum veya silisyum kristaline üç valans elektronuna sahip katkı atomları eklenerek oluşturulur. Bu amaçla en sık kullanılan elementler Boron, Galyum ve İndiyumdur. Bu elementlerden Boron'un silisyum taban üzerindeki etkisi Şekil 3.7 gösterilmiştir.

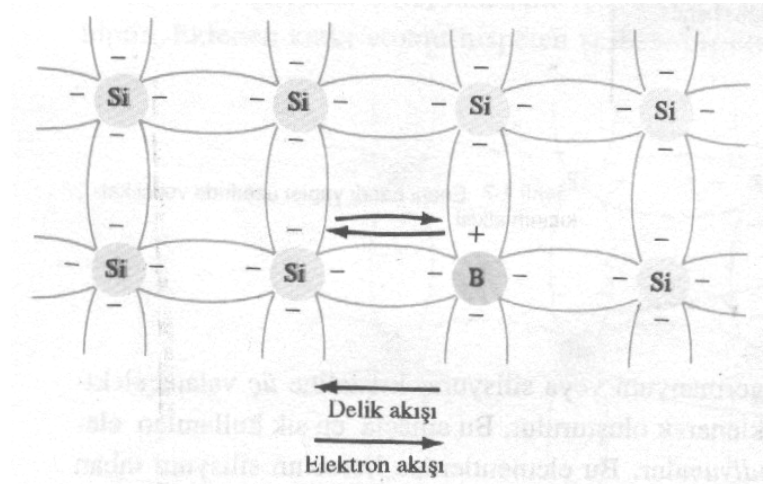
Yeni oluşturulan örgüde kovalent bağları tamamlamak için yeterli sayıda elektron olmadığı için meydana bu boşluğa delik denir ve negatif yük olmaması nedeniyle küçük bir daire veya matematiksel artı işareti ile gösterilir. Ortaya çıkan boşluklar serbest elektronları almaya hazır olduğundan, eklenen katkılara alıcı (akseptör) atomlar denir. Oluşan P-tipi malzeme, N tipi malzeme için geçerli olan nedenlerden dolayı, elektriksel olarak nötr durumdadır.

Delik'in iletkenlik üzerindeki etkisi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Eğer bir valans elektronu kovalent bağını koparmaya yetecek kinetik enerjiyi alır ve delik yarattığı boşluğu doldurursa, bu durumda elektronu bırakan kovalent bağda bir delik veya boşluk oluşur. Bundan dolayı Şekil 3.8'de de görüldüğü gibi deliklerin hareketi sağdan sola, elektronlarınki ise soldan sağa doğrudur [15].



**Şekil 3.7:** P-tipi malzeme

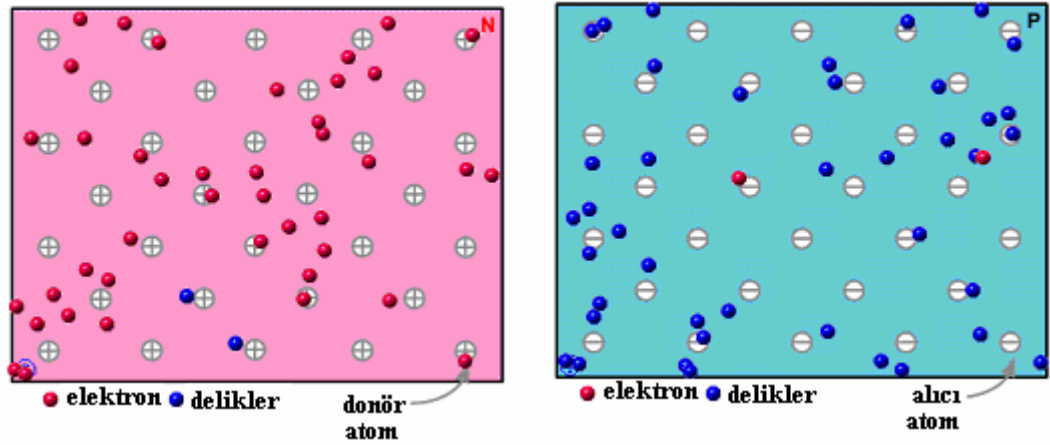
Saf halde, Ge veya Si'deki serbest elektron sayısı sadece valans bandında bulunan ve ısı veya ışık kaynaklarından kovalent bağı koparmaya yetecek enerji alan veya tam safsızlaştırılmamaktan kaynaklanan az sayıdaki elektrondan oluşur. Kovalent bağ yapısında geride kalan boşluklar çok sınırlı delik kaynağı durumundadır.



**Şekil 3.8:** Akış yönleri

Katkılama işlemi sonrasında n-tipi malzemede elektronların sayısı, p-tipi malzemede ise delik sayısı çok fazladır.

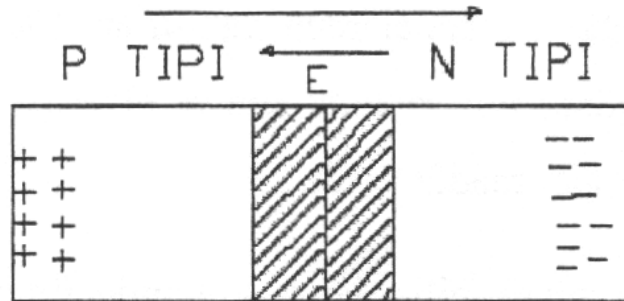
Dolayısıyla n-tipi malzemede elektrona çoğunluk taşıyıcısı deliğe de azınlık taşıyıcısı adı verilir. Şekil 3.9'da p-tipi için bu durumun tersinin geçerli olduğu gösterilmiştir.



Şekil 3.9: N tipi ve P tipi malzeme

Tipik bir yarıiletkende  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  çoğunluk taşıyıcısı varken azınlık taşıyıcı sayısı  $10^6 \text{ cm}^{-3}$  çoğunluk taşıyıcısı vardır. Bir başka ifadeyle azınlık taşıyıcıların , çoğunluk taşıyıcılara oranı , bir kişinin tüm dünya nüfusuna oranından daha azdır. Azınlık taşıyıcıları termal olarak veya gelen fotonlar tarafından oluşturulur. Şekil 3.10'daki PN eklem bölgesi oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, P tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir.

Bu eklem bölgesine “geçiş bölgesi” yada “yükten arındırılmış bölge” denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan “yapısal elektrik alan” olarak adlandırılır. Yarıiletken eklemine güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaj dönüşümün sağlanması gerekir [16].



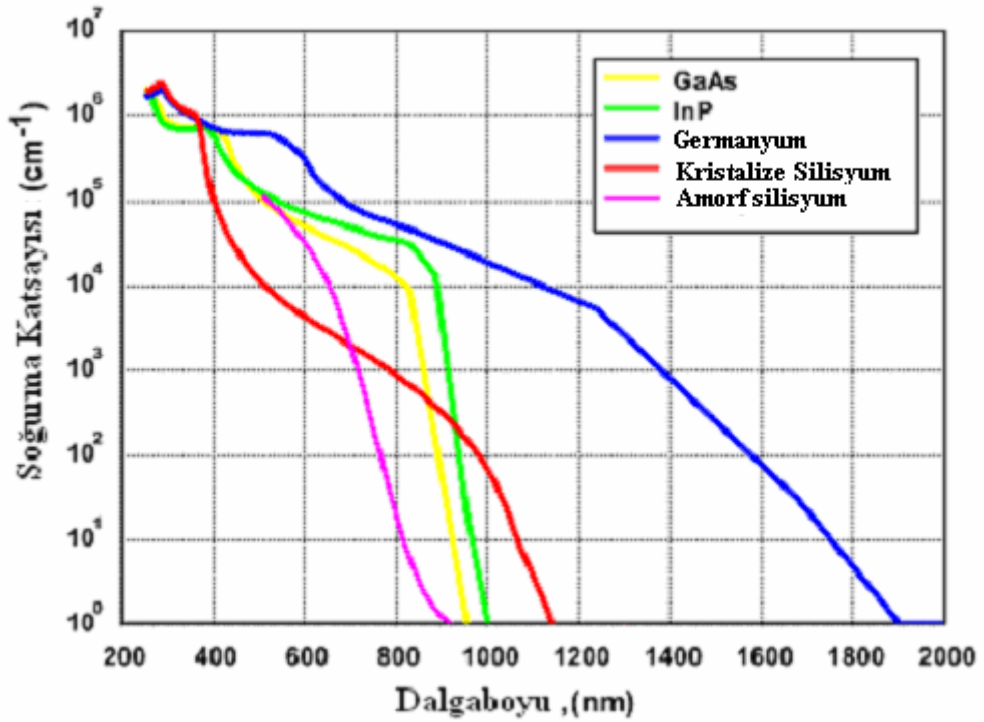
Şekil 3.10: PN eklem bölgesi

### 3.4 Üretim

#### 3.4.1 Soğurulma Katsayısı: $\alpha$

Herhangi bir dalga boyundaki ışığın hücre içerisinden soğurulmadan ne kadar ilerleyebileceğini belirleyen katsayıdır.

Absorbsiyon katsayısı malzemenin özelliğine ve gelen ışığın dalga boyuna göre değişir. Şekil 3.11 de bazı güneş pili materyalleri için soğurma katsayıları gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Bazı güneş pili materyalleri için soğurma katsayıları

Fotonların soğurulabilmesi için elektronlarla etkileşime girmesi gerekir. Bu sebeple enerji seviyesi  $E_g$  den büyük olan fotonlar soğurulur.

#### 3.4.2 Soğurulma Derinliği

Soğurma katsayısının dalga boyuna bağlı olmasından ötürü yarıiletken giren ışığın tamamı soğurulmadan önce yarıiletken içinde değişik mesafeler kateder.

Soğurulma derinliği, soğurulma katsayısının tersi olarak veya  $\alpha^{-1}$  olarak verilir.

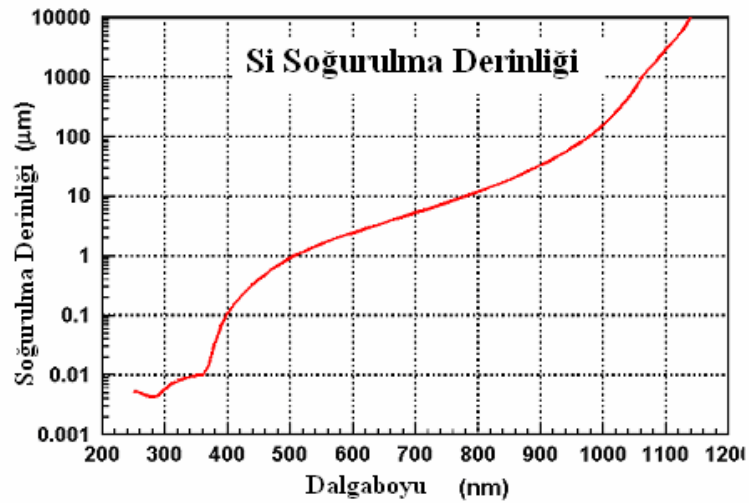
Işığın orijinal yoğunluğunun %36'sına düşmesine kadar yarıiletken içinde aldığı mesafenin ölçüsünü belirlediği için soğurma derinliği önemli bir parametredir.

Yüksek enerjili fotonların soğurulma katsayıları yüksek, soğurulma derinlikleri ise

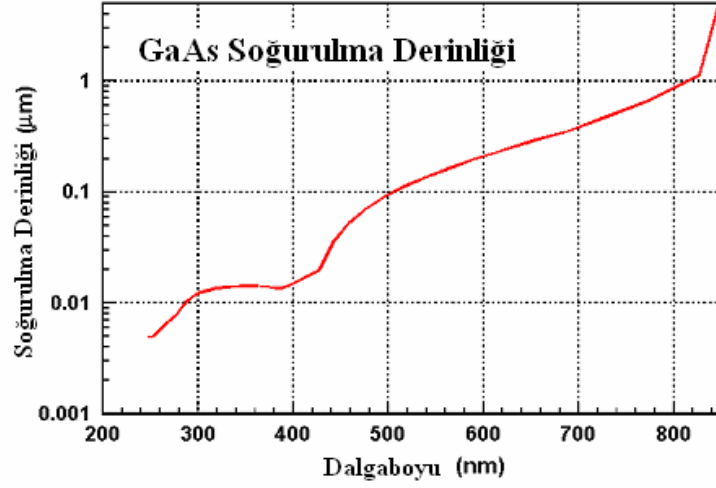
kısa dır. (Silisyum Güneş Pilleri için birkaç mikron). Enerjisi düşük olan kırmızı ışık ise birkaç yüz mikrona bile tam olarak soğulamaz. Şekil 3.12'a,b,c,d de dalga boylarına ve malzemelere göre soğurulma derinlikleri gösterilmiştir [17].



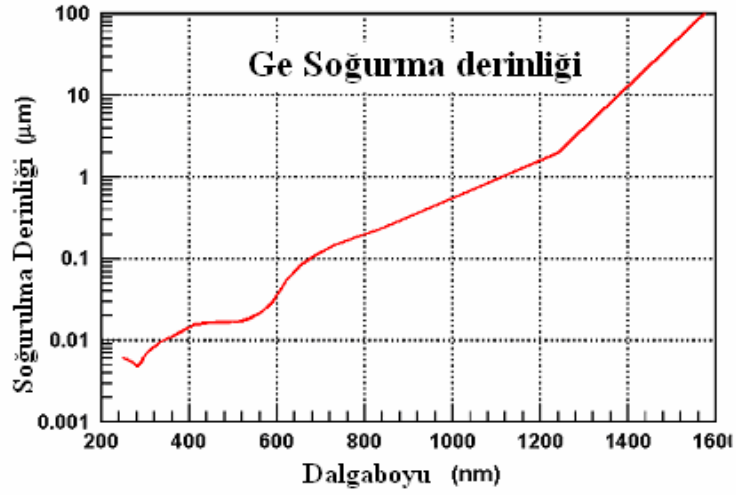
Şekil 3.12a: Dalga boylarına göre soğurulma derinlikleri



Şekil 3.12b: Silisyum soğurulma derinliği



Şekil 3.12c: GaAs soğurulma derinliği



Şekil 3.12d: Ge soğurulma derinliği

### 3.4.3 Üretim Miktarı

Verilmiş bir foton enerjisi için herhangi bir noktadaki üretim miktarı, o noktadaki foton akısına bağlıdır. Foton akısı soğurulma esnasında fotonların yok olmasıyla azalır. Üretim miktarının matematiksel ifadesi Denklem 3.2’de verilmiştir.

$$G = \alpha_{eh} \Phi \quad (3.2)$$

( $\alpha_{eh}$ , soğurulma katsayısı ve dalga boyuna bağlı katsayı)

( $\Phi$ , foton akısı)

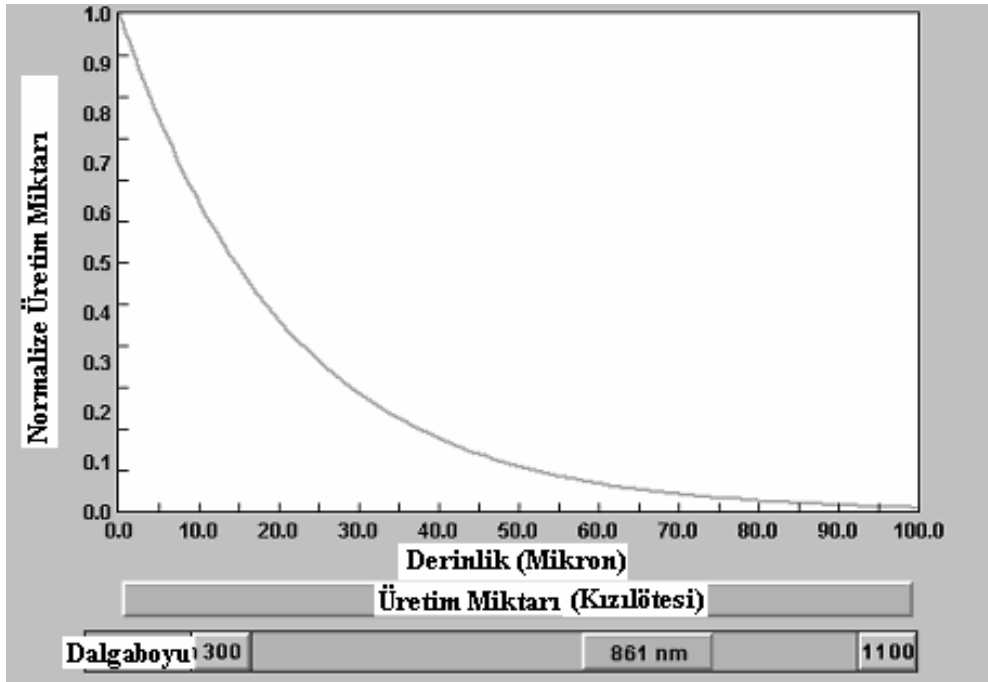
Denklem 3.2 güneş pili içerisinde üretilecek elektron-delik çifti sayısını belirlemekte kullanılır. Gelen ışık yoğunluğunun azalması (yani soğurulan foton sayısının) üretilecek elektron-delik sayısını direkt olarak etkiler.

Üretim miktarı gelen ışığın dalga boyuna bağlıdır. Bu nedenle Denklem 3.2, aşağıdaki gibi yazılır:

$$G = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \alpha_{eh}(\lambda) N_{pt}(\lambda) d\lambda \quad (3.3)$$

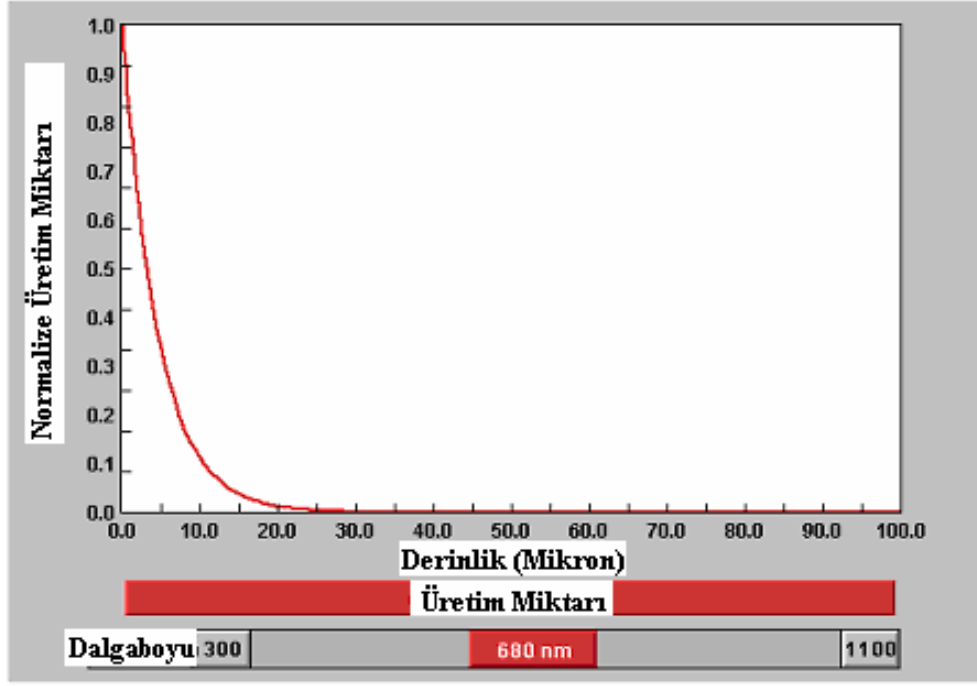
$N_{pt}$  = Spektral dağılımdaki foton akısı, (foton sayısı / birim alan / saniye/dalga boyu)

Fotovoltaik uygulamalarda gelen ışık farklı dalga boylarının kombinasyonundan oluştuğu için her dalga boyundaki üretim miktarı farklıdır. Şekil 3.13a ve b'de Silisyum için iki değişik dalga boyu için üretim miktarı gösterilmiştir. Farklı dalga boylarının toplam üretimi hesaplamak için her dalga boyundaki net üretimi toplamak gerekir. Üretim miktarının ,malzeme derinliğine bağlı olduğunu ve yüzeyde üretim miktarının eksponansiyel arttığını Şekil 3.14'te görülmektedir. Bunun sebebi yüksek enerjili mavi ışınların yüzeyde soğurulmasıdır [18].

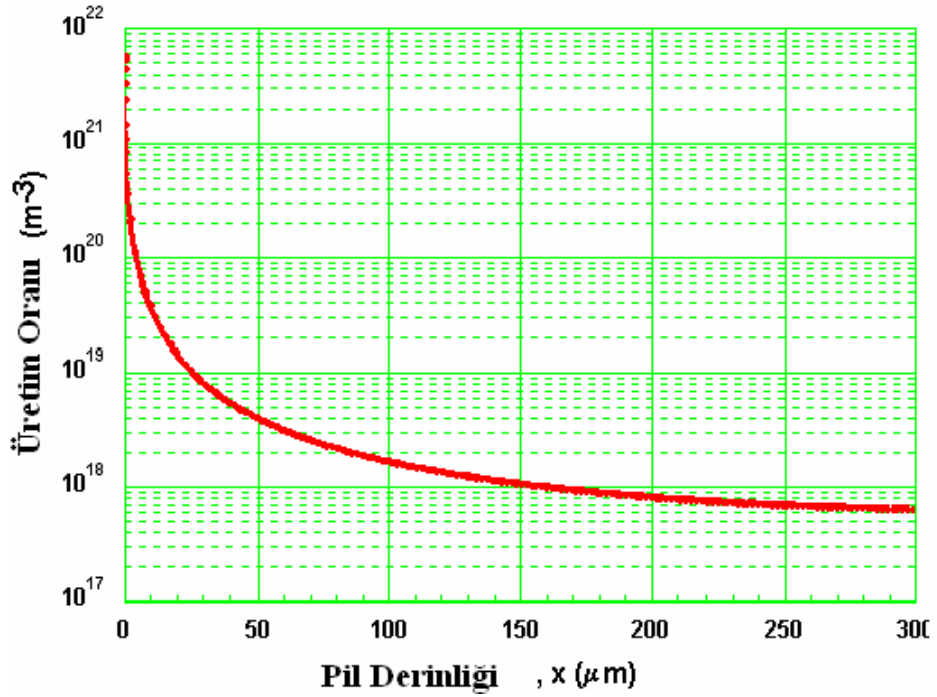


Şekil 3.13a : Silisyum için kızıl ötesi ışığın dalga boyu için üretim miktarı





Şekil 3.13 b: Silisyum için kırmızı ışığın dalga boyu için üretim miktarı



Şekil 3.14: Pil derinliğinin üretim oranına etkisi

### **3.4.4 Rekombinasyon**

İletim bandındaki yarı-kararlı elektronun enerji seviyesi azalınca Valans bandına düşerek bir deliği ortadan kaldırmasına rekombinasyon denir. Rekombinasyon temelde 3 şekilde gerçekleşir.

#### **3.4.4.1 Shockley-Hall-Read Rekombinasyonu (SHR)**

Yarıiletken malzemenin kristal yapısının yeterince saf olmaması durumunda elektron yada delik yasak bölgeye gidebilir ve fazla enerjisini, titreşim veya termal yolla atar.

#### **3.4.4.2 Işınımsal Rekombinasyon**

Elektron ve deliğin yasak bölgede birleşerek enerjilerini foton olarak tüketmeleri sonucunda ortaya çıkar. Ledlerde ve lazerlerde görülür.

#### **3.4.4.3 Auger Rekombinasyonu**

Bu durum üç taşıyıcı kapsamaktadır. Bir elektron delikle birleştiğinde, enerjisini, ısı yada foton olarak yerine üçüncü bir taşıyıcıya (iletim bandındaki bir elektrona) verirler. Auger rekombinasyonu aşırı katkılı ve uyarılmış maddelerde çok önemlidir [19].

### **3.4.5 Taşıyıcı Ömrü ve Difüzyon Mesafesi**

Azınlık taşıyıcısı ömrü taşıyıcıların rekombinasyona uğramadan kalabilecekleri süreyi belirler.

Taşıyıcının rekombinasyona uğramadan önce malzeme içinde alabileceği mesafeye difüzyon mesafesi denir.

Taşıyıcı ömrü ve difüzyon mesafesi rekombinasyon çeşidine bağlıdır. Pek çok güneş pilinde SHR rekombinasyonu baskındır. Rekombinasyon oranı malzemedeki hatalarla orantılıdır ve katkılama işlemi bu hataları artırır.

Güneş pilini üretim tekniği de difüzyon mesafesini etkileyen önemli bir etkidir. Silisyumda, taşıyıcı ömrü en fazla 1ms olur. Tek kristalli silisyum güneş pillerinde difüzyon mesafesi genellikle 100-300 µm dir. Bu iki parametre malzemenin güneş pili olarak kullanılabilirliğini belirler [17].

## 4. GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

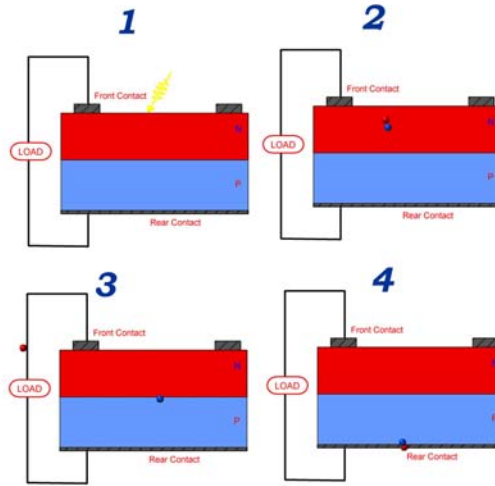
### 4.1.Güneş Hücrelerinde Enerji Dönüşümü

Güneş hücrelerinde enerji dönüşümü iki anahtar prosese bağlıdır. Birinci proseste fotonların soğurulmasıyla elektron – delik (electron – hole) çifti oluşur.

Fotonların soğurabilmesi için gelen fotonun enerjisi ( $E_{ph}$ ),  $E_g$ 'den büyük yada eşit olmalıdır [15].

İkinci proseste ise güneş hücresinin yapısından ötürü elektron-hole çifti ayrılır elektronlar negatif uca, delikler pozitif uca gider – ve böylece elektriksel güç üretilmiş olur.

Taşıyıcıların ideal hareketi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Foton Enerjisi ile elektriksel akım elde edilmesi

#### 4.1.1 İdeal Güneş Pili

İdeal güneş pili akım kaynağına paralel bağlanmış diyotla gösterilebilir. Eşdeğer elektrik şeması Şekil 4.2'te gösterilmiştir. Akım gerilim (I-V) karakteristiği Shockley güneş pili denklemiyle tanımlanır.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{nk_b T}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

$q$  : Elektron yükü. ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  Coulomb)

$k$  : Boltzmann sabiti. ( $1.380 \times 10^{-23}$  joule/K)

$T$  : Referans çalışma sıcaklığı.

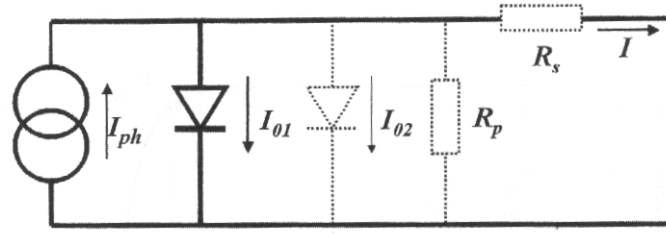
$V$ : Hücre terminalleri (uçları) arasındaki gerilim.

$n$ : ideallik faktörü

$I_0$ : Diyot doyma akımı.

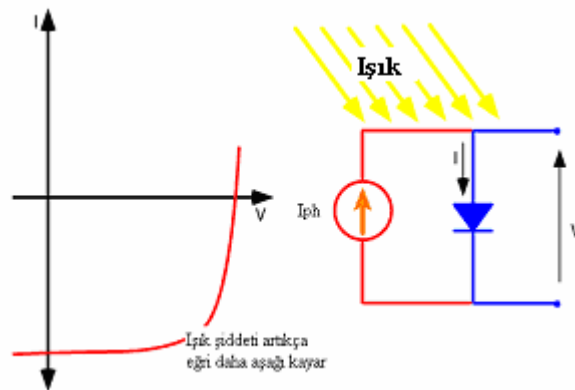
$I_{ph}$ : Fotoakım (Photogenerated current)

Fotoakım  $I_{ph}$  gelen fotonların yoğunluğuna ve ışık dalga boyuna bağlıdır.



Şekil 4.2: Güneş pilinin eşdeğer elektrik şeması

Güneş pillerinin özellikleri belirlenirken birkaç önemli Akım-Gerilim (I-V) eğrisinden değerleri belirlenen parametre kullanılır [5]. Bu parametreler Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), Açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ), Verim ve Doldurma Faktörüdür. Şekil 4.3 Işığın yarıiletken malzeme üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Işığın yarıiletken malzeme üzerindeki etkisi

## 4.2 Kısa Devre Akımı

Güneş pilinin uçları arasında gerilim sıfırken, bir başka ifadeyle uçlar kısa devre edilmişken, güneş pilinden alınabilecek maksimum akım değeridir. Kısa devre akımı aşağıda belirtilen faktörlerden etkilenir.

**Güneş Pilinin Alanı:** Bu özellik genellikle akım yoğunluğu olarak verilir. ( $J_{sc}$  mA/cm<sup>2</sup>)

**Foton Sayısı:**  $I_{sc}$  doğrudan gelen ışığın yoğunluğuna bağlıdır.

**Gelen Işığın Spektrumu:** Çoğu güneş pili ölçümleri için spektrum AM 1.5 olarak standart hale getirilmiştir.

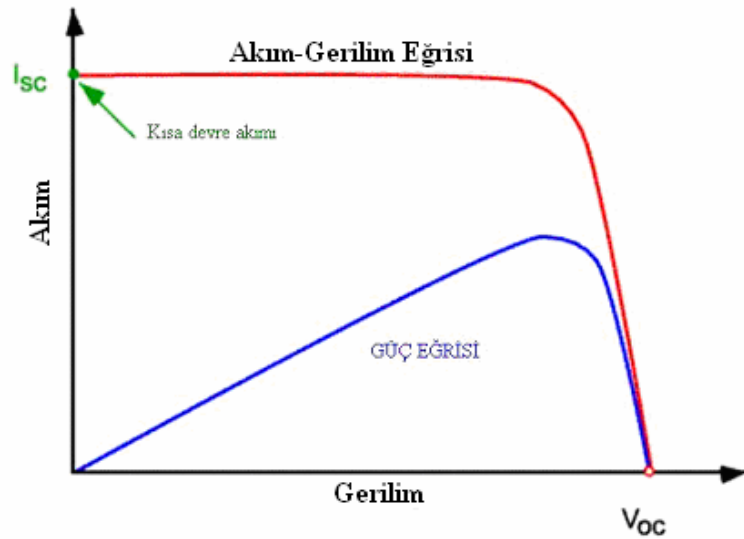
**Optik Özellikler :** Soğurma ve yansımaya bağlı özellikler.

**Tutma Olasılığı (Collection Probability) :** Azınlık taşıyıcı ömrüne ve yüzey pasivizasyonuna bağlıdır. Aynı malzemedен yapılmış iki güneş pilini karşılaştırırken iki kritik parametre vardır bunlar Difüzyon mesafesi ve yüzey pasivizasyonudur.

AM 1.5 spektrumu altında silisyum güneş pillerinden elde edilebilecek en büyük akım 46 mA/cm<sup>2</sup> dir [17].

Laboratuarlarda kullanılan yüksek verimli güneş pillerinde bu değer 42 mA/cm<sup>2</sup> olsa da genellikle güneş pillerinde 28 mA/cm<sup>2</sup> dir [17].

**Quantum Etkisi:** Kullanılan spektruma bağlı olarak güneş hücresinin dışına çarpan her bir fotonun ortaya çıkardığı elektronlar olarak tanımlanır.



Şekil 4.4: Akım – Gerilim (I-V) karakteristiği.

#### 4.2.1 Fotoakım ve Kısa Devre Akımı

Fotoakım ( $I_{ph}$ ) güneş pilinin içinde üretilen akımın değerini verir ve güneş pili denklemlerinde kullanılır. Kısa devre durumunda harici devreden ölçülen akım kısa devre akımıdır ve çoğu zaman fotoakımla aynı değerdedir.

$I_{sc}$  nin  $I_{ph}$  a eşit olduğu durumlarda denklemlerin basitleştirilmesi için  $I_{ph}$  yerine  $I_{sc}$  yazılmasında bir sakınca yoktur. Ancak seri direnç değerinin büyük olduğu durumlarda ( $> 10 \text{ ohm cm}^2$ )  $I_{sc}$  değeri  $I_{ph}$  dan küçüktür [5].

#### 4.3 Açık Devre Gerilimi

Açık devre gerilimi,  $V_{oc}$ , devreden akım geçmezken güneş pilinden alınabilecek en büyük gerilim değeridir.

Denklem 4.1 den net akım 0 a eşitlenerek  $V_{oc}$  bulunabilir. Buna göre;

$$V_{oc} = \frac{n k_b T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (4.2)$$

Yukarıdaki denklem  $V_{oc}$  nin doyma akımı ve fotoakıma bağlı olduğunu gösteriyor. Eğer  $I_{sc}$  tipik olarak küçük değişimler gösterirse anahtar parametre doyma akımı olur. Doyma akımı güneş pilindeki rekombinasyona bağlıdır. Bu sebeple açık devre gerilimi pil içinde ki toplam rekombinasyon ölçümüdür. Laboratuvarlarda kullanılan pillerde bir güneş AM 1.5 şartları altında  $V_{oc}$  720 mV, ticari ürünlerde ise 600 mV un altındadır [5].

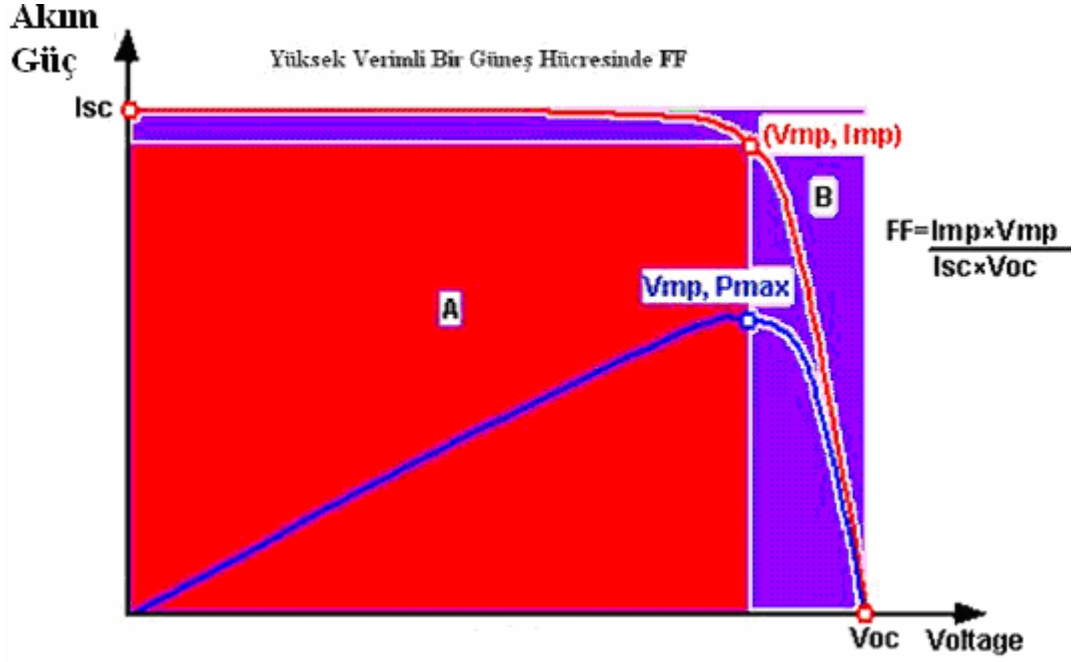
#### 4.4 Doldurma Faktörü (Fill Factor)

Güneş pilinden elde edilen maksimum akım  $I_{sc}$  ve maksimum gerilim  $V_{oc}$  dir fakat bu noktalarda güneş pilinden elde edilen güç sıfırdır.

Doldurma faktörü FF kısaltmasıyla bilinir ve  $I_{sc}$  ile  $V_{oc}$  değerlerini birbirine bağlayan parametredir.

FF bir güneş pilinden alınabilecek maksimum gücün üretilen  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  çarpımına oranı olarak tanımlanır.  $V_{mp}$  maksimum güç noktasında gerilim değeri ve  $I_{mp}$  maksimum güç noktasında akım değeridir.

Şekil 4.5'te FF grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Yüksek verimli bir güneş hücresinde FF

FF'in maksimum teorik değerini bulabilmek için gücün gerilime göre türevini alarak sıfıra eşitlememiz gerekir.

$d(IV) / dV = 0$  buradan elde edeceğimiz denklem;

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{n k_b T}{q} \ln \left( \frac{V_{mp}}{\frac{k_b T}{q}} + 1 \right) \quad (4.3)$$

Ancak Deklem 4.3 basitlik sağlamadığı için bunun yerine çok doğru sonuç veren şu ampirik formül kullanılır [18].

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} \quad (4.4)$$

$v_{oc}$  açık devre geriliminin ( $V_{oc}$ ) normalizesi olarak tanımlanır.

$$v_{oc} = \frac{q}{n k_b T} V_{oc} \quad (4.5)$$

Daha yüksek FF için daha yüksek Voc gerektiği yukarıdaki denklemlerden anlaşılmaktadır. Örneğin , bir güneş altında, laboratuarlarda kullanılan silisyum güneş piliyle, tipik ticari bir güneş pilinin Voc leri arasındaki fark 120 mV'tur. Bu iki pilin FF'ları sırasıyla 0,85 ve 0,83'tür.

FF'teki asıl belirgin değişim güneş pilinin yapıldığı malzemeye bağlıdır. GaAs güneş pillerinde FF 0,892 a yaklaşır [5].

**İdeallik Faktörü:** Yukarıdaki denklemler ideallik faktörünün önemini açıkça göstermektedir. İdeallik Faktörü jonksiyon bölgesi niteliklerinin ve güneş pili içerisindeki rekombinasyon türünün ölçümüdür.

Rekombinasyon değerine göre n 1 yada 2 değerini alır. (SRH için 2, Auger için 3/2) İdeallik faktörünün yüksek değerleri FF ve  $v_{oc}$  de azalmaya sebep olur.

Denklem 4.4'ten hesaplanacak FF pratiktekinden rezistans kayıpları nedeniyle daha yüksek çıkacaktır.

Bu sebeple FF genellikle I-V eğrisinden aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (6)$$

#### 4.5 Verim

Verim iki güneş pilinin karşılaştırılması esnasında en sık kullanılan parametrelerden biridir. Verim güneş pilinden elde edilen enerjinin, güneş pilinin güneşten aldığı enerjiye oranıdır. Güneş pillerinde verim spektrum ve gelen ışığın yoğunluğu ve güneş pilinin sıcaklığına bağlıdır. Bu sebeple karşılaştırma yapılırken ölçüm koşullarının dikkatlice kontrol edilmesi gerekir.

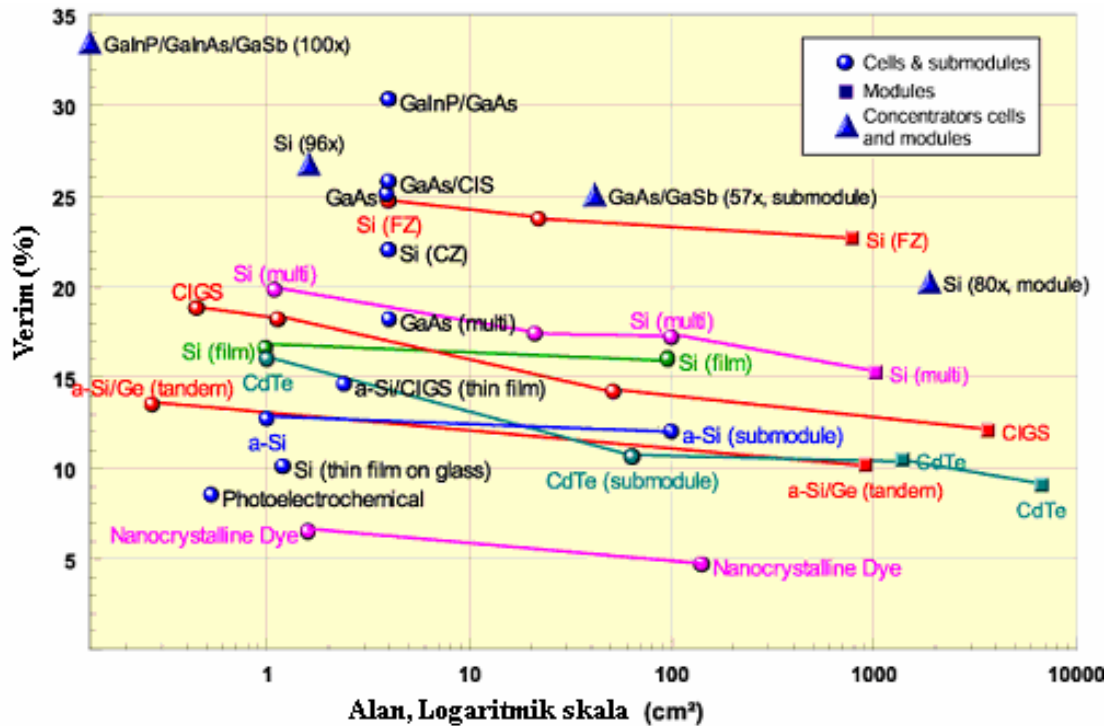
Dünyada kullanılan güneş pillerin testleri AM 1.5 ve 25 °C şartlarında yapılır. Tablo 4.1 de ve Şekil 4.6'da en yüksek verim değerleri verilmiştir. [20]



**Tablo 4.1:** En yüksek verim değerleri

Sınıflandırma	Verim	Cihaz Tanımı	Alan (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
Pil (yoğunlaştırıcı)	40.7 %	Spectrolab, 240x	0.26685			
Pill (bir güneş altında)	32.0 %	Spectrolab GaInP/GaAs/Ge (monolithic)	3.989 (t)	2.622	14.37	85
Silicon cell (bir güneş)	24.7 %	UNSW PERL	4.00 (da)	0.706	42.2	82.8
Module (yoğunlaştırıcı)	27	Entech	34 (ap)			
Module (bir güneş)	22.7 %	UNSW PERL	778 (da)	5.6	3.93*	80.3
Modül (ürün)	19.3 %**	Sunpower	16307	54.7	6.14*	79.3

\*Isc (A) modül için \*\* Kesin olarak kanıtlanmamış



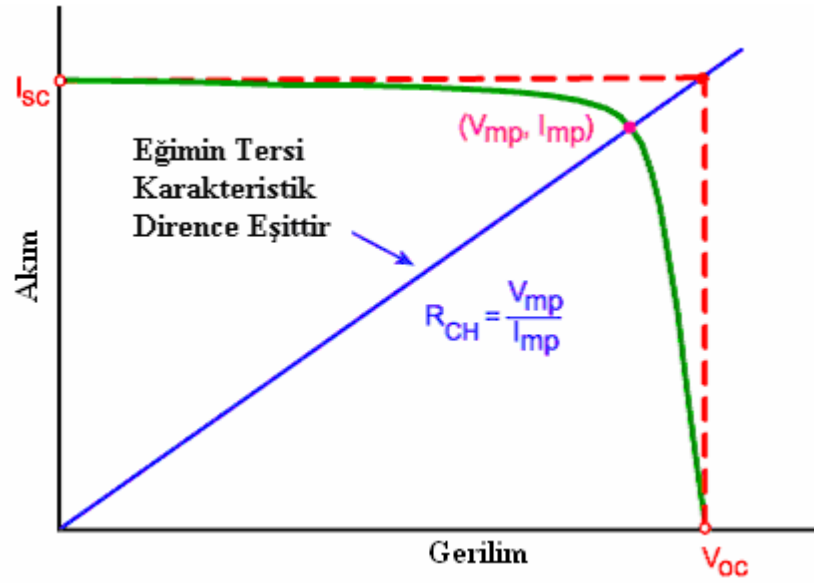
**Şekil 4.6:** Çeşitli güneş pillerinin verim değerleri

## 4.6 Güneş Pillerinde Verimi Etkileyen Faktörler

### 4.6.1 Dirençlerin Etkileri

#### 4.6.1.1 Karakteristik Direnç

Karakteristik direnç ( $R_{CH}$ ), güneş pilinin maksimum güç noktasındaki çıkış direncidir. Eğer yük değeri karakteristik direnç değerine eşitse güneş pili maksimum güç noktasında çalışmaktadır. Güneş pillerinin parazitik direnç kayıpları analiz edilirken karakteristik direnç faydalı bir parametredir. Şekil 4.7’de karakteristik direnç gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Karakteristik Direnç

$$R_{CH} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (4.7)$$

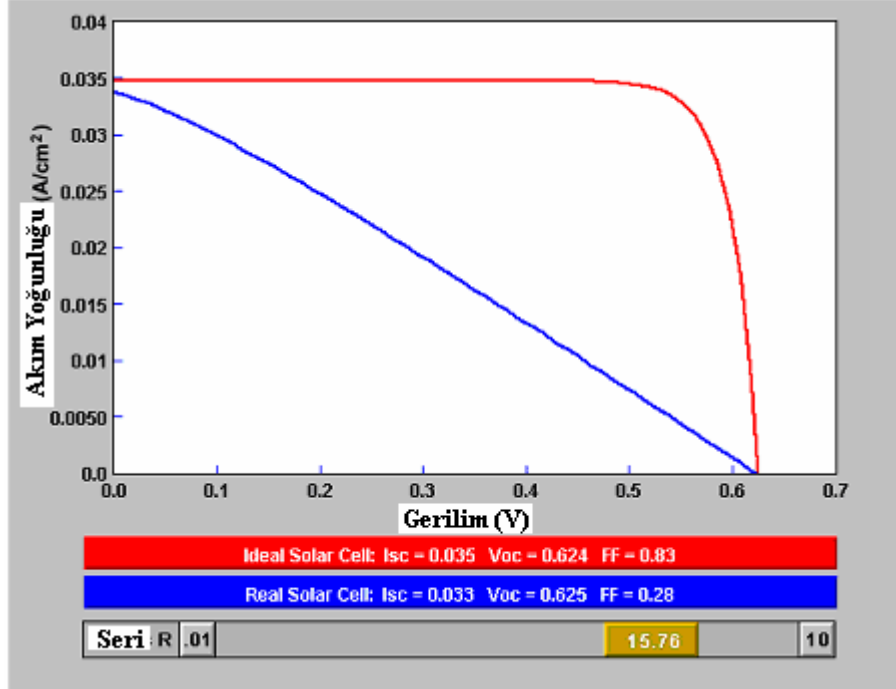
Karakteristik direnç alternatif olarak şu şekilde de yazılabilir:

$$R_{CH} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (4.8)$$

#### 4.6.1.2 Seri Direnç Etkisi

Güneş pillerinde seri dirençlerin oluşmasının 3 nedeni vardır. Birincisi emiterden ve gövdeden geçen akımların etkisi, ikincisi metal kontaklarla silisyum arasındaki temas direnci, ve üçüncüsü üst ve alt tabakalardaki metal kontaklardan ötürü meydana

gelen dirençlerdir. Seri dirençler FF'yi düşürürler, eğer değerleri çok yüksek olursa kısa devre akımının da düşmesine neden olurlar. Seri dirençlerin etkisi Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Seri direnç etkisi

Seri direnci göz önüne aldığımızda maksimum güç formülü aşağıdaki gibi olur.

$$P'_{mp} \approx V_{mp} I_{mp} - I_{mp}^2 R_s \quad (4.9)$$

$$= V_{mp} I_{mp} \left( 1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right) = P_{mp} \left( 1 - \frac{I_{sc}}{V_{oc}} R_s \right) \Rightarrow P'_{mp} = P_{mp} \left( 1 - \frac{R_s}{R_{CH}} \right) \quad (4.10)$$

$$r_S = \frac{R_s}{R_{CH}} \Rightarrow P'_{mp} = P_{mp} (1 - r_S) \quad (4.11)$$

4.11 numaralı denklemdeki güç terimini daha açık halde yazarsak;

$$P'_{mp} = P_{mp} (1 - r_S)$$

$$V'_{oc} I'_{sc} FF' = V_{oc} I_{sc} FF (1 - r_S) \quad (4.12)$$

$I_{sc}$  ve  $V_{oc}$ 'nin seri dirençlerden etkilenmediği kabul edilerek, seri dirençlerden etkilenmeyen FF ile gösterilir, seri dirençler nedeniyle oluşacak doldurma faktörü değeri de  $FF_S$  ile gösterildiğinde, aşağıdaki ampirik formülle  $r_s < 0,4$   $v_{oc} > 10$  iken çok doğru sonuçlar elde edilir. Laboratuvarlarda kullanılan güneş pillerinde  $r_s$  0,5, ticari modellerde ise yaklaşık olarak  $1,3 \Omega cm^2$  dir [5].

$$FF_S = FF(1 - 1.1 r_s) + \frac{r_s^2}{5.4} \quad (4.13)$$

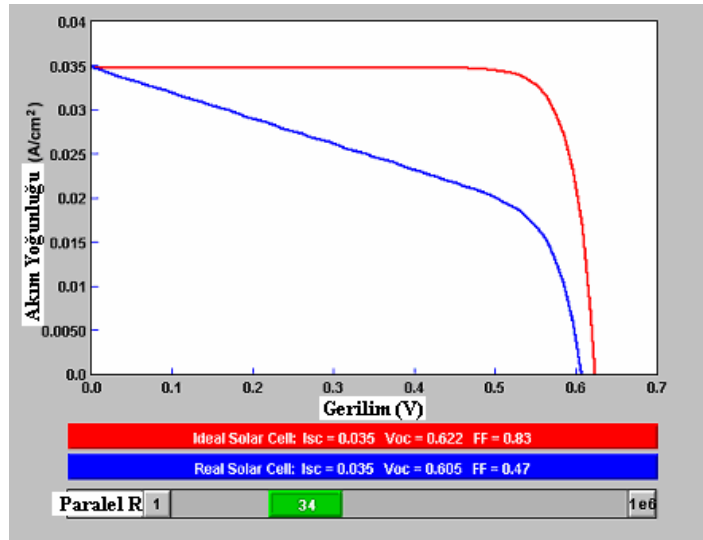
#### 4.6.1.3 Paralel Direnç Etkisi

Güneş pillerinde paralel dirençten ( $R_{SH}$ ) kaynaklanan önemli güç kayıpları olur. Paralel dirençten ötürü meydana gelen kayıpların sebebi dizayndan ziyade üretimdeki hatalardan kaynaklanır. Düşük paralel direnç değeri fotoakım için alternatif yollar oluşturur. Düşük paralel direncin etkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

$$P'_{mp} \approx V_{mp} I_{mp} - \frac{V_{mp}^2}{R_{sh}} \quad (4.14)$$

$$= P_{mp} \left( 1 - \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \frac{1}{R_{sh}} \right) = P_{mp} \left( 1 - \frac{R_{CH}}{R_{sh}} \right) \quad (4.15)$$

$$r_{sh} = \frac{R_{sh}}{R_{CH}} \Rightarrow P'_{mp} = P_{mp} \left( 1 - \frac{1}{r_{sh}} \right) \Rightarrow FF_{SH} = FF \left( 1 - \frac{1}{r_{sh}} \right) \quad (4.16)$$



Şekil 4.9: Paralel direnç etkisi

Paralel dirençlerden etkilenmeyen Doldurma Faktörü (FF) ile gösterilir, seri dirençler nedeniyle oluşacak Doldurma Faktörü değeri de  $FF_{SH}$  ile gösterildiğinde,  $r_{sh} > 0,4$  iken aşağıdaki ampirik formülle  $FF_{SH}$  elde edilir.  $r_{sh}$  tipik güneş pillerinde  $M\Omega cm^2$  mertebesindedir.

$$FF_{SH} = FF \left\{ 1 - \frac{V_{oc} + 0.7 FF}{V_{oc} r_{sh}} \right\} \quad (4.17)$$

Hem seri , hem paralel direncin etkisi göz önüne alındığında güneş pilinden elde edilecek akım 4.18 denkleminle hesaplanır.

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{nk_B T} \right] \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4.18)$$

4.13 ve 4.17 numaralı denklemlerin yeniden düzenlenmesiyle  $FF_{SH}$  için Denklem 4.19 bulunur.

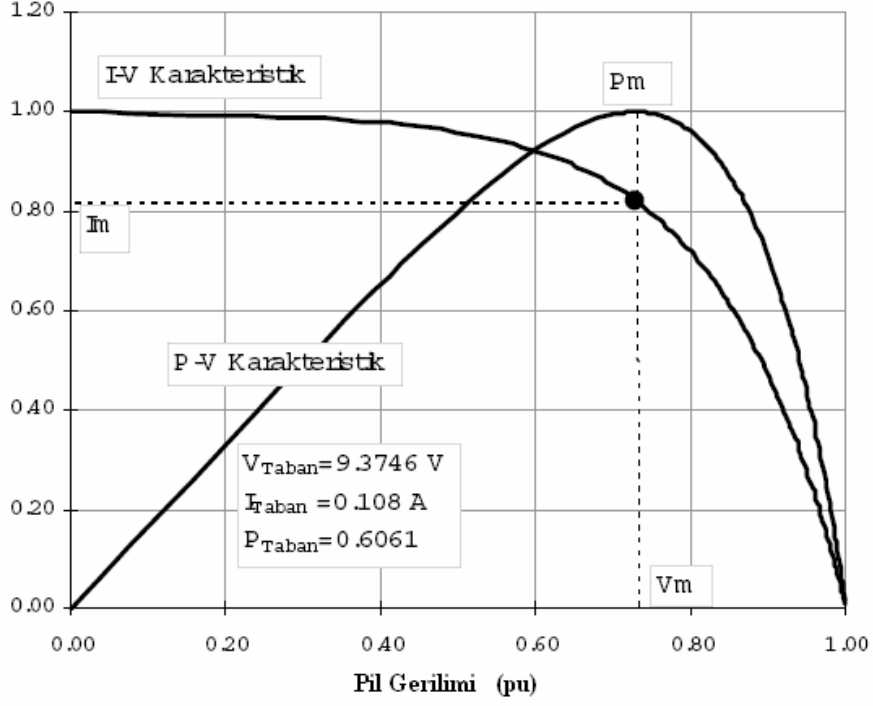
$$FF_{SH} = FF \left\{ (1 - 1.1 r_s) + \frac{r_s^2}{5.4} \right\} \left\{ 1 - \frac{V_{oc} + 0.7 FF}{V_{oc} r_{sh}} \left( (1 - 1.1 r_s) + \frac{r_s^2}{5.4} \right) \right\} \quad (4.19)$$

#### 4.6.2 Sıcaklığın ve Işık Yoğunluğunun Etkisi

Güneş pilinin maksimum çıkış gücü, üzerine düşen ışık yoğunluğu ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişir. Şekil 4.10 da verilen I-V ve P-V karakteristikleri 20 °C lik çalışma sıcaklığı ve 80 mW/cm<sup>2</sup> lik ışık yoğunluğunda (gün ışığı şiddeti) (güneş radyasyonu seviyesi) elde edilen karakteristiklerdir. Çalışma sıcaklığı yada günışığı şiddeti değiştikçe bu karakteristiklerin biçimleri aynı kalacak şekilde akım, gerilim ve dolayısıyla güç değerleri de değişir [22].

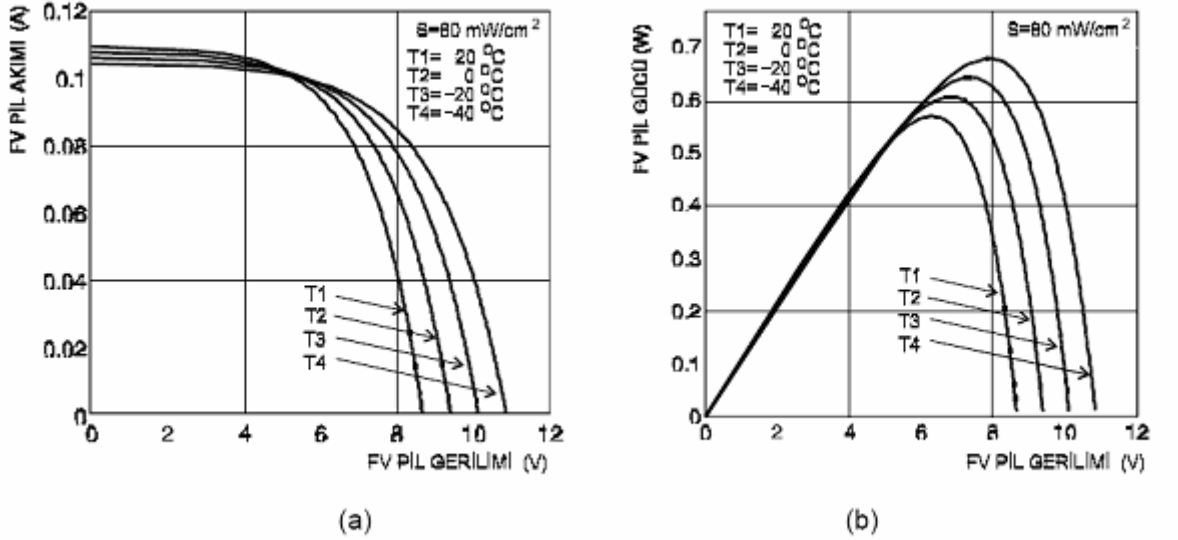
Çalışma sıcaklığındaki değişimlerin I-V ve P-V karakteristikleri nasıl etkiledikleri Şekil 4.11 (a) ve (b) de, günışığı şiddetindeki değişimlerin I-V ve P-V karakteristikleri nasıl etkiledikleri ise Şekil 4.12 (a) ve (b) de verilmiştir. Şekil 4.11 (a) dan görüleceği gibi, çalışma sıcaklığının artması fotovoltajik pilin çıkış gerilimini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklığın artmasından akım da etkilenmektedir. Ancak sıcaklıktaki değişimin asıl etkisi pilin çıkış gerilimi üzerinde görülmektedir. Ortam sıcaklığının yüksek olması, pilin çalışma sıcaklığını da yükselteceğinden,

güneş enerjisinin termik uygulamalarının aksine, fotovoltaik piller için soğuk ortamlar daha uygundur [22].



Şekil 4.10: I-V eğri ve değerleri

Benzer etki, Şekil 4.11 (b) de, FV pilin çıkış gücünde de görülmektedir. Gerilimdeki azalma doğrudan doğruya güce yansdığından, çalışma sıcaklığındaki artış çıkış gücünü de olumsuz yönde etkiler.

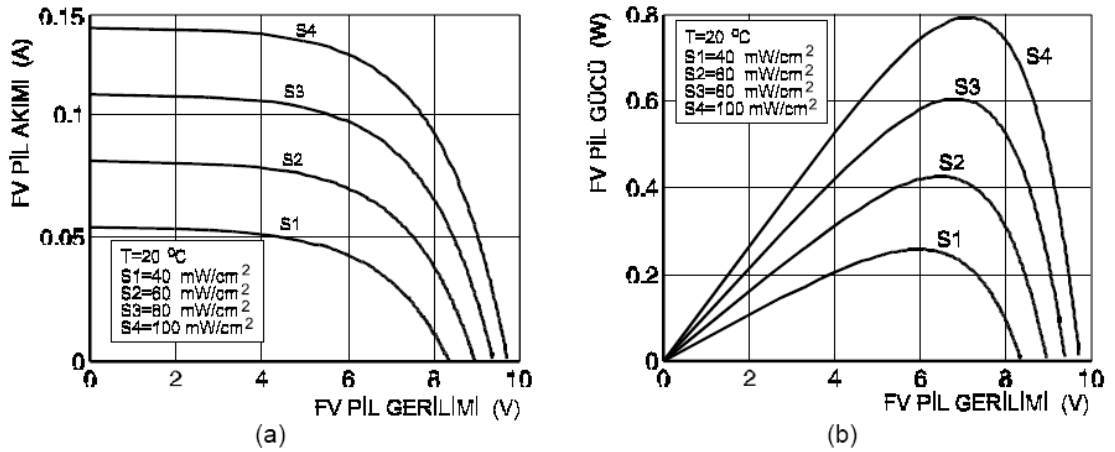


Şekil 4.11: Güneş pilinin akım, gerilim ve gücünün sıcaklıkla değişimi.

Güneş ışığı şiddetinde meydana gelen artışlar, Şekil 4.11 (a) da verildiği gibi FV pilin çıkış akımını olumlu yönde etkilemektedir. Işık şiddetinin akımda meydana getirdiği bu artış, sıcaklığın meydana getirdiği artışa göre oldukça yüksektir. Işık şiddetindeki artış hem pil çıkış akımında hem de pil çıkış geriliminde bir artışa neden olmaktadır. Ancak gerilimdeki artış, akımdaki artışa göre daha küçüktür. Şekil 4.11 (b) den de görüleceği gibi, ışık şiddeti arttıkça FV pilin çıkış gücü de artmaktadır. Güçteki bu artışın kaynağı, anlaşılacağı gibi hem akımdaki hem de gerilimdeki artıştan kaynaklanmaktadır.

Güneş pillerinin performansı, ışık şiddeti yüksek, sıcaklığı düşük ortamlarda daha iyidir. Bu sonuç Şekil 4.12 de verilen grafiklerden açıkça anlaşılmaktadır. Bu şekilde verilen grafikler, güneş pili çıkış gücünün farklı çalışma sıcaklığı ve güneş ışığı şiddetleri için elde edilen maksimum değerleri ile bu maksimum güce karşılık gelen akım ve gerilim değerlerini temsil etmektedirler. Çalışma sıcaklığı arttıkça güneş pilinin maksimum çıkış gücü ve P-V karakteristiğinde bu güce karşılık düşen gerilimi azaltmaktadır.

Benzer şekilde, ışık şiddeti, yada güneş radyasyonu seviyesi arttıkça güneş pilinin maksimum çıkış gücü de artmaktadır. Ancak ışık şiddeti arttıkça, maksimum çıkış gücünün yanı sıra, hem bu güce karşılık gelen pil akımı hem de pil gerilimi artar.

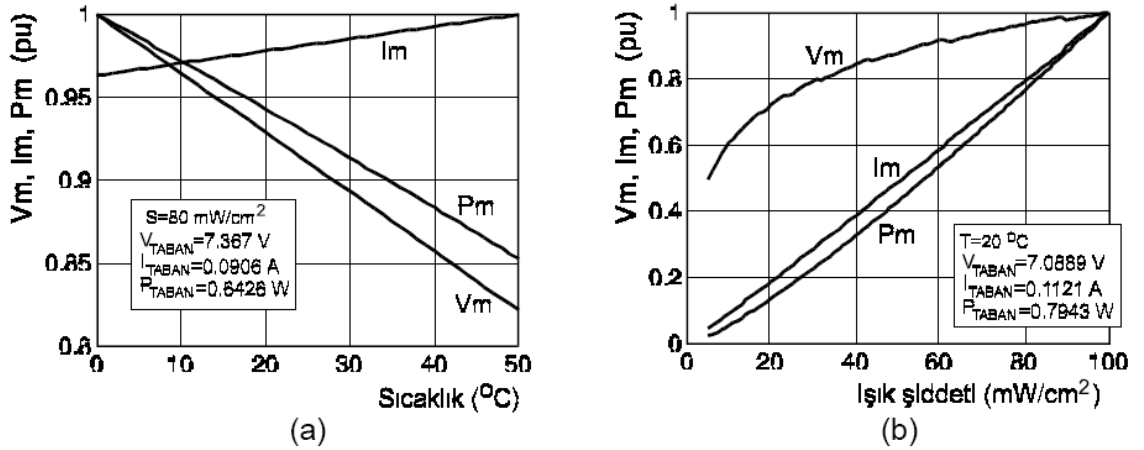


**Şekil 4.12:** Güneş pilinin akım, gerilim ve gücünün ışık şiddetiyle değişimi.

Şekil 4.12 (a) ve (b) de güneş pilinin maksimum gücüne karşılık gelen akım değerlerinin sıcaklık ve ışık şiddetiyle arttığı görülmektedir. Sıcaklığın akımda meydana getirdiği bu artış oldukça az iken, ışık şiddetinin meydana getirdiği artış daha belirgindir.

Maksimum çıkış gücü  $P_m$  ve bu güce karşılık gelen gerilim  $V_m$  ile akım  $I_m$ , Şekil 4.12 de birim değerler (per units - pu) türünden verilmiştir. Gerçek gerilim, akım ve güç değerleri, ilgili taban değerlere bölünerek bu birim değerler elde edilmişlerdir. Söz konusu taban değerler şekil üzerinde her bir büyüklük için ayrı ayrı verilmektedir. Bu birim değerleri gerçek değerlerine dönüştürmek için verilen ilgili taban değer ile çarpmak gerekir.

Verilen bu eğriler fotovoltaik pilin imalatında kullanılan yarıiletken malzemenin türüne, sıcaklık ve ışık şiddetindeki değişimlerin miktarına göre biraz değişebilirler. Ancak genel anlamda I-V ve P-V karakteristikler Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13 de verilen özelliklere sahiptirler ve pil karakteristiklerinde, pil çıkış gerilimi artan sıcaklıklarda daha küçüktür. Bunun nedeni, sıcaklığın pil kayıplarını artırmasıdır [22]. Sıcaklık arttıkça P-N birleşim noktası kayıpları da artar. Bu kayıplar pilde ısıya dönüştürülerek harcanır. Bu nedenle fotovoltaik piller modellenirken, eşdeğer devrelerine seri-parallel dirençler eklenir [22].



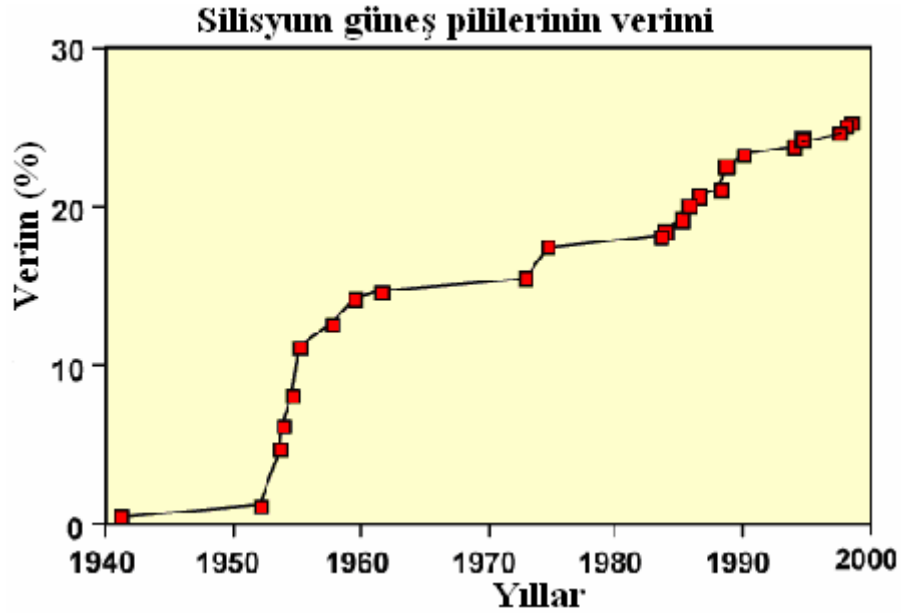
Şekil 4.13: Güneş pilinin maksimum çıkış gücü ve bu güce karşılık gelen gerilim ve akımının;(a). Sıcaklıkla, (b). Işık şiddetiyle değişimi.



## 5. KRİSTAL SİLİSYUM GÜNEŞ PİLİ TASARIMI

Güneş pili tasarımı, verimliliği azami dereceye çıkarmak için güneş pilinin parametrelerini belirlemeyi kapsar. Bu parametrelerin güneş pilinin kullanılacağı yerle de ilişkisi vardır. Örneğin ticari kaygılar söz konusu olduğunda güneş pilinin maliyetini mümkün olduğunca aşağıda tutmak birinci hedefken, laboratuvar tipi denilen yüksek verimli güneş pillerinde yüksek verim, fiyattan daha önemlidir.

Şekil 5.1 de güneş pillerinin yıllara göre verim oranları verilmiştir.



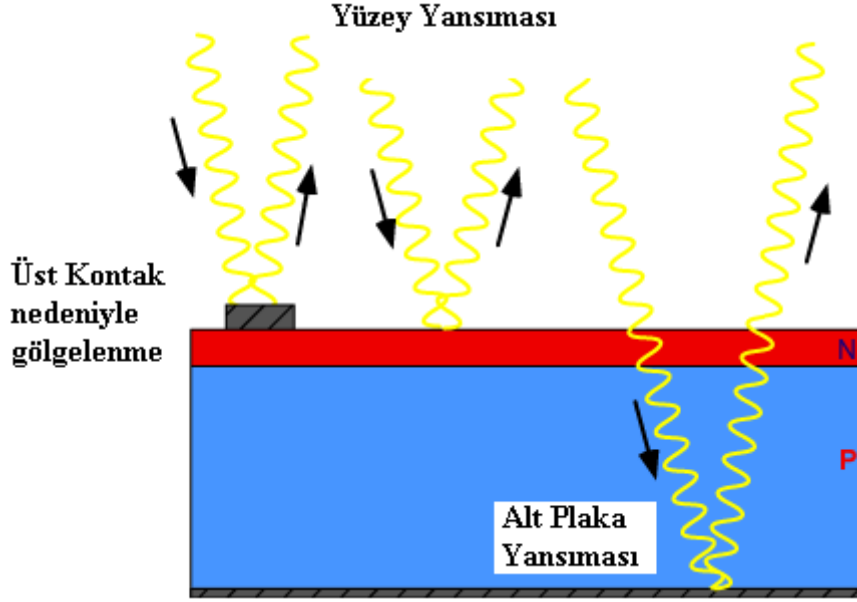
Şekil 5.1: Yıllara göre güneş pili verimi

Fotovoltaik dönüşüm için teorik verimlilik, %90'dan fazladır. Ancak bunun için yapılan bazı kabuller en azından şu andaki teknoloji ile neredeyse imkansızdır. Silisyum güneş pilleri için, bir güneş çalışmasının altında verimlilik oranları, %26-28 civarındadır. Günümüzde AM 1.5 altında silisyum güneş pillerinden alınan maksimum verim 24,7'dir. Teorik hesaplama yapılırken gelen fotonların tümünün soğurulduğu ve foton enerjilerinin  $E_g$  ye eşit olduğu kabul edilir.

## 5.1 Optik Özellikler

### 5.1.1 Optik Kayıplar

Optik kayıplar güneş pillerinde kısa devre akımını düşürerek güç kaybına başlıca etkenlerdendir.



Şekil 5.2: Güneş pilindeki yansımalar

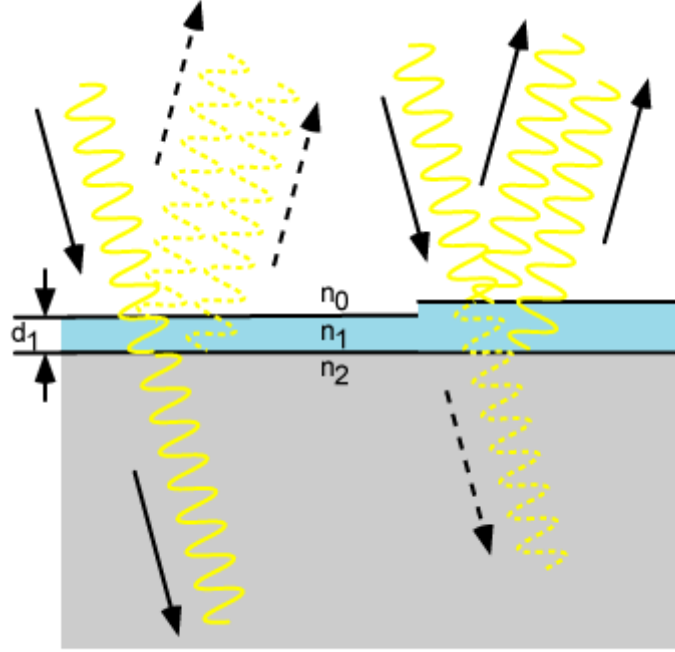
Optik kayıplar elektron-delik çifti üretebilecek enerjiye sahip olmasına rağmen, bunu gerçekleştirmeyen fotonlardan kaynaklanır, bunun nedenleri fotonlar yüzeyden yansıması, pil içinde soğurulamamasıdır. Teoride görülebilir ışıkların tümü pil içerisinde soğurulabilir.

Optik kayıpları azaltmak için ;

- Yüzeyde yansımayı engelleyecek bir tabaka (Anti Reflection Coating, ARC) kullanılmalıdır.
- Yüzeyde elektriki bağlantıyı sağlayan elemanların alanları minimize edilmelidir.
- Yüzey dalgalı hale getirilerek (texturing) yansıma azaltılmalıdır.
- Güneş pili biraz daha kalınlaştırılabilir.

### 5.1.1.1 Yansımaya Engelleyecek Tabaka (ARC)

Güneş pillerinde kullanılan ARC'ler kamera lenslerinde kullanılan malzemeye benzer. Dielektrik malzemeden ince tabakalar halinde belirli kalınlıklarda kullanılarak yüzey yansımalarını engellerler.



**Tüm Işık Yarı İletkende Işık Yüzeyden Yansır**

**Şekil 5.3: Yansımaya azaltacak tabaka kalınlığı**

Şekil 5.3'te gösterilen  $d_1$  tabaka kalınlığının yansımaya minimize edebilecek optimum kalınlığı için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$d_1 = \frac{\lambda}{4 n_1} \quad (5.1)$$

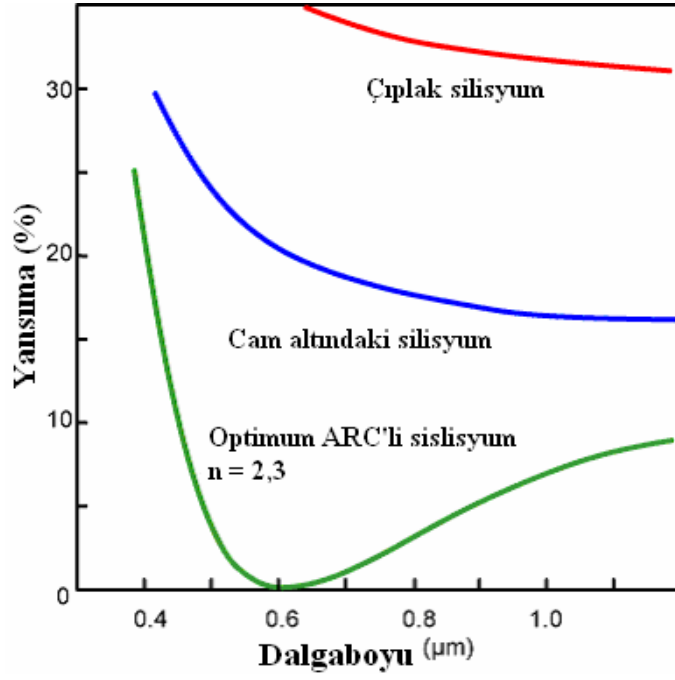
$d_1$ : ARC kalınlığı

$n_1$ : Kırılma indeksi

$n_1$  kırılma indeksi komşu tabakaların kırılma indekslerinin geometrik ortalamasına eşittir. Bu tabakalar, yarıiletken-hava veya yarıiletken-cam olabilir.

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (5.2)$$

Şekil 5.4'te ARC kullanılan ve kullanılmayan güneş pillerinin ışık yansıtma özellikleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.4: Yansıtma oranları

ARC'lerin kalınlığı ölçmenin en kolay yollarından biri flüoresan ışığı altında renklerine bakmaktır. Aşağıdaki tabloda ARC'lerin bazı renklerine göre kalınlıkları verilmiştir [5].

Tablo 5.1: ARC kalınlık ve renkleri

Kalınlık (μm)	Renk
0,05	Sarımsı Kahverengi
0,39	Sarı
0,50	Mavi Yeşil
0,6	Karanfil Pembesi
1,06	Menekşe
1,40	Turuncu

### 5.1.1.2 Yüzey Dalgalandırılması (Surface Texturing)

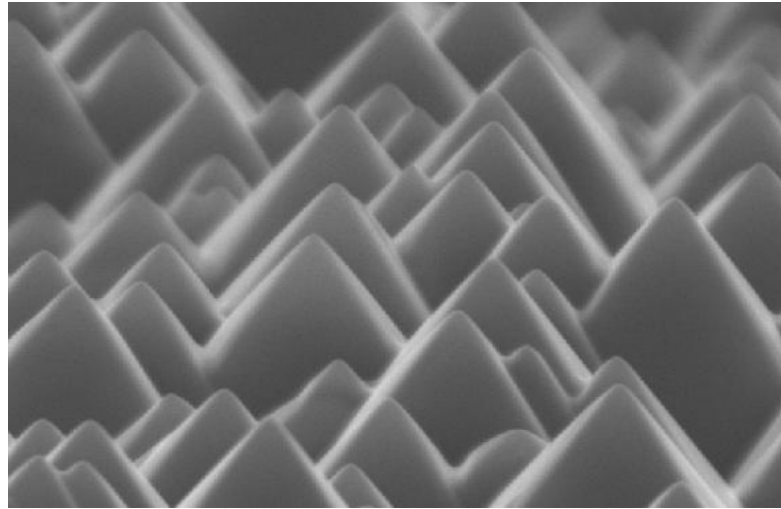
Yüzey dalgalandırılması ARC'lerle veya sadece kendi başlarına yansımayı azaltırlar. Yüzeydeki "pürüzlülüğü" artırmak yansımayı azalttığı gibi yansıyan ışığın yüzeyin başka bir noktasına gitme şansını da artırır.

Şekil 5.5'te yüzey dalgalandırılması yapılmış olan yarıiletken malzemeyle , yüzeyi düz olan malzemede oluşacak yansımalar gösterilmiştir.



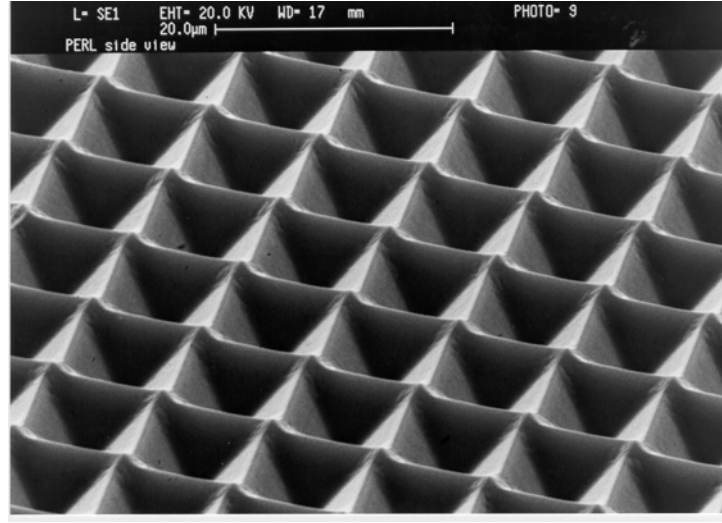
Şekil 5.5: Dalgalandırma işleminin etkisi

Yüzey dalgalandırılması birkaç yolla yapılabilir. Bunlardan bir tanesi kristal yapının asitle yakılmasıdır. Bu işlem genellikle tek kristalli güneş pillerinde kullanılır ve işlem sonunda Şekil 5.6'taki elektron mikroskobu görüntüsü elde edilir.



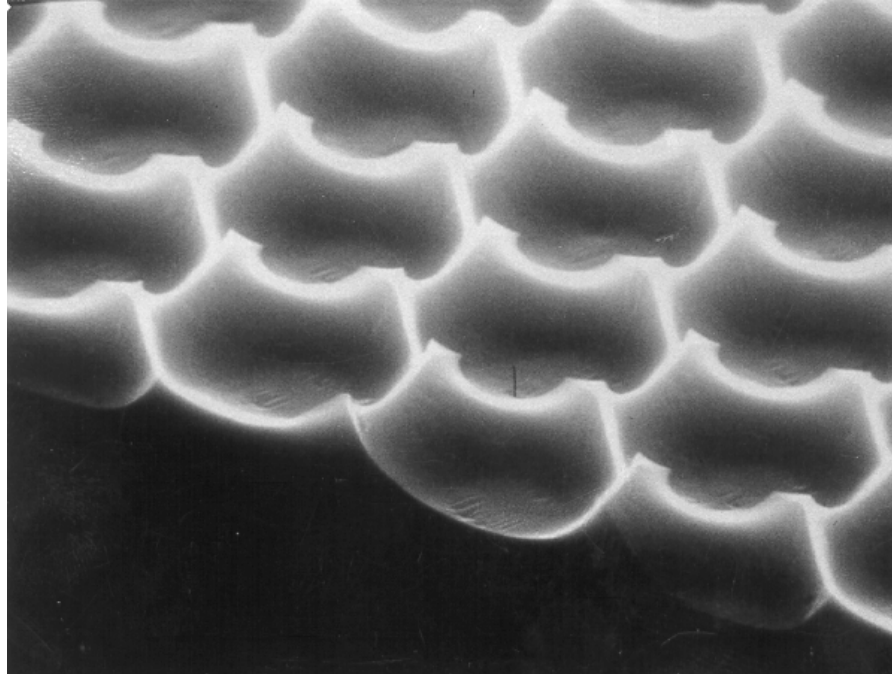
Şekil 5.6: Dalgalandırılmış yüzey görüntüsü

Bir başka yöntem ise Ters Piramit adıyla bilinen yüzey dalgalandırma yöntemidir. Şekil 5.7’de Ters Piramit yöntemi sonucunda elde edilen görüntü vardır.



**Şekil 5.7:** Ters piramit görünümü

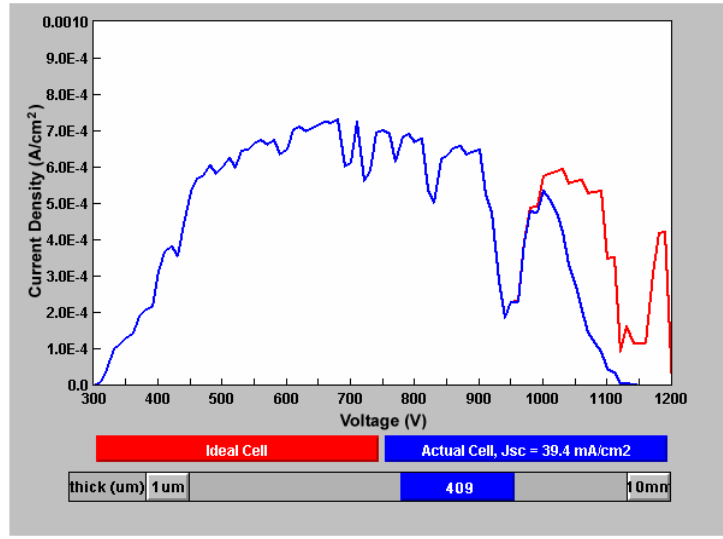
Çok kristalli güneş pillerinin yapısı yukarıda anlatılan yöntemler için uygun olmadığından çok kristalli silisyum piller için fotolitografi yöntemleri kullanılır. Bu yöntemle ortaya çıkan görüntü Şekil 5.8’de dir.



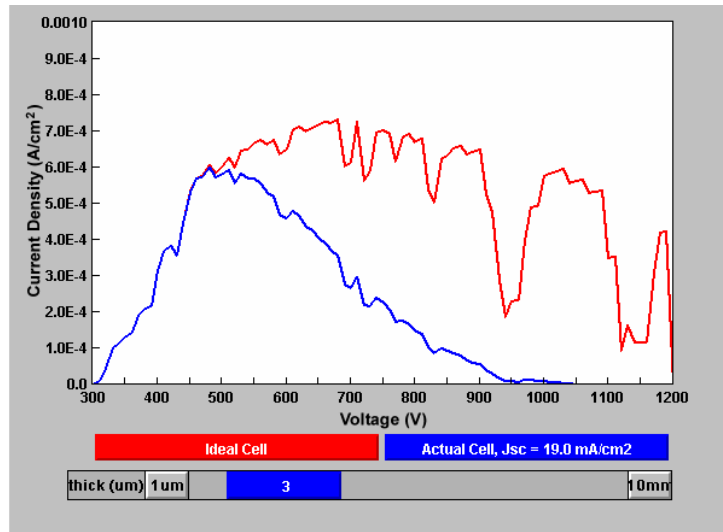
**Şekil 5.8:** Fotolitografi sonrası görüntü

### 5.1.1.3 Materyal Kalınlığı

Güneş pillerinde verimin artırılması için yansımamın azaltılması ne kadar gerekiyse, gelen ışığın tümünün soğurulması da aynı derecede önemlidir. Gelen ışığın soğurulması , soğurulma katsayısına ve güneş pili içindeki optik yol mesafesine bağlıdır. Şekil 5.9 ve 5.10’da foton soğurulmasının materyal kalınlığına olan bağılılığı gösterilmiştir. Bu grafikler, güneş pilinden herhangi bir yansımaya olmadığı ve yarıiletken malzemenin elektronik özelliklerinin ideal kabul edilmesiyle elde edilmiş değerleri içermektedir.



Şekil 5.9: Kalın materyal kullanımının akım ve gerilime etkisi



Şekil 5.10: İnce materyal kullanımının akım ve gerilime etkisi

Materyal kalınlığın artırmak gelen ışınların soğurulmasını sağlamasına rağmen 5.2 de anlatılacağı gibi Rekombinasyona yol ağtığı için ışığın materyal içerisinde daha fazla yol alması için Şekil 5.11'teki dőzenek kullanılır.



Şekil 5.11: Arka yőzey dalgalandırılması

## 5.2 Rekombinasyonun Azaltılması

Fotonun gőneŐ pili iğerinde elektron-delik çiftini oluşturduğu nokta P-N eklem bėlgesine yakın değilse ũretilen elektron ve delik çiftleri Rekombinasyona uğrar. Rekombinasyon genellikle gerđekeŐtiđi bėlgenin adını (yőzey rekombinasyonu ve gėvde rekombinasyonu gibi) alır.

Silisyum gőneŐ pillerinde rekombinasyon nedeniyle akım kaybı olmaması için iki koŐulun yerine getirilmesi gereklidir. Bunlardan bir tanesi taşıyıcının rekombinasyona uğramaması için jonksiyon bėlgesinin difőzyon mesafesi iğerinde ũretilmesidir.

İkincisi ise çeşitli sebeplerle rekombinasyon bėlgeleri oluştuğunda, oluşturulacak taşıyıcılar jonksiyon bėlgesine, rekombinasyon bėlgesinden daha yakın olmalıdırlar. Rekombinasyon diyot doyma akımını artırdığı için açık-devre gerilimde de dőŐuŐe neden olur.

Açık devre gerilimin etkilendiği parametreler Şunlardır;

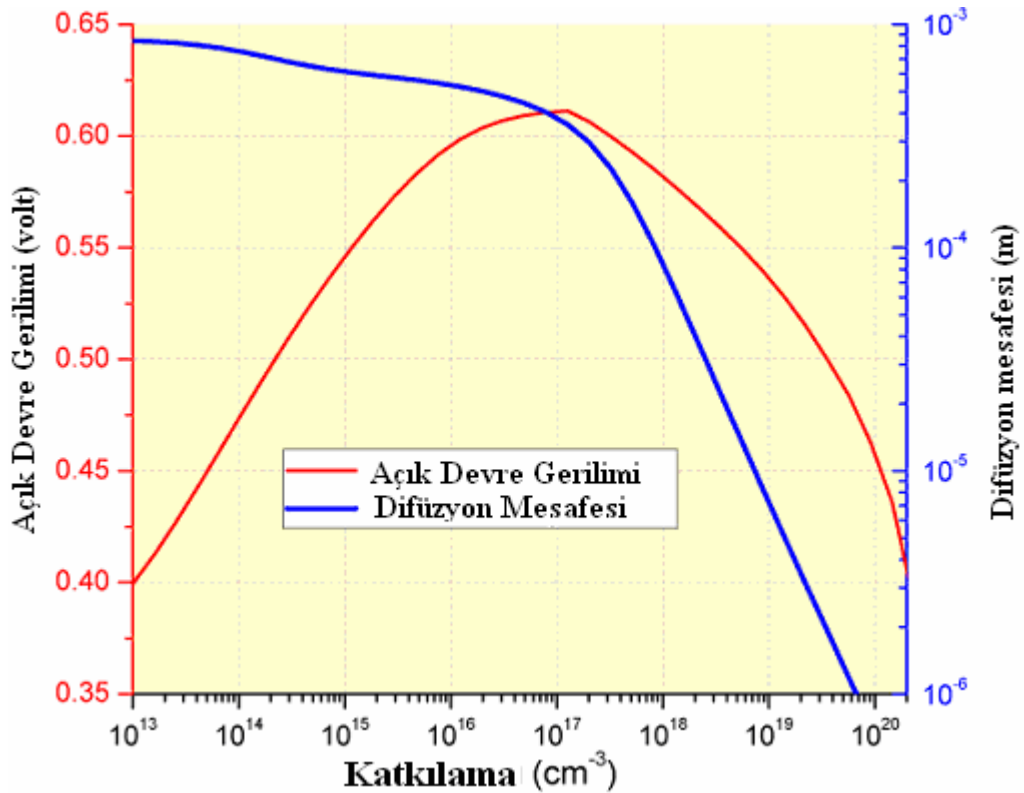
Azınlık taşıyıcısı sayısı. Azınlık taşıyıcısı konsantrasyonunu dőŐőrmek rekombinasyonu da dőŐőreceđi iğer katkılama işlemi yapılır.



Yüksek açık devre gerilimi için yüksek difüzyon mesafesi gereklidir. Difüzyon mesafesi, güneş pilinin malzemesine, yapım şekline ve katkılama işlemine bağlıdır.

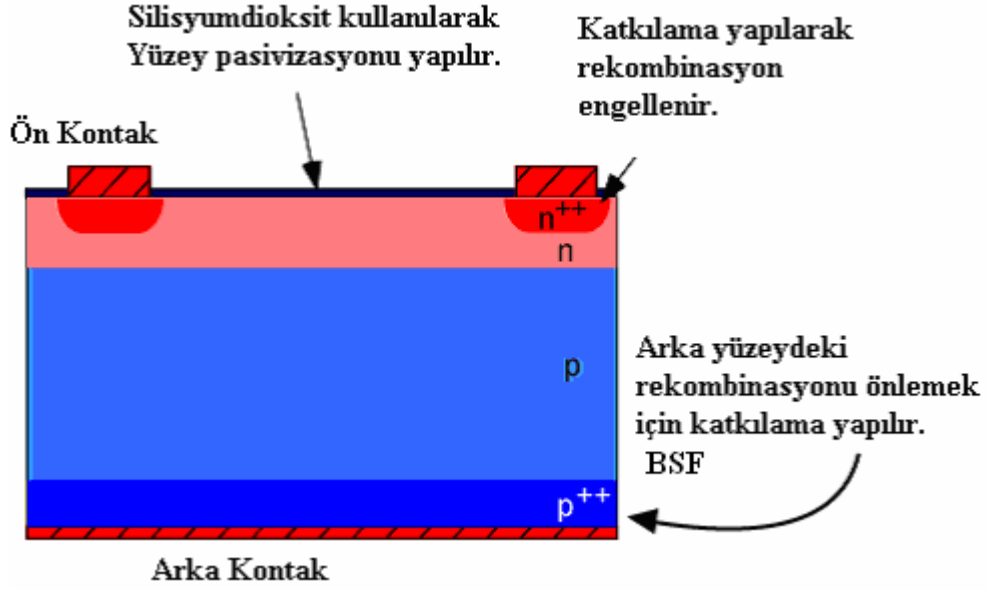
Güneş pili içinde rekombinasyon bölgeleri oluşması (genlikle yüzeyde oluşur, yüzey rekombinasyonu) rekombinasyonun artmasına sebep olur. Azınlık taşıyıcıların yüzeye ulaşmasını engellemek için yüzey pasivizasyonu yapılır.

Katkılama işleminin , difüzyon mesafesi ve açık devre gerilimi üzerindeki etkisi şekil 5.12 de gösterilmiştir.



Şekil 5.12: Katkılamamanın difüzyon mesafesi ve  $V_{oc}$ 'ye etkileri

Şekil 5.13'te rekombinasyon azaltılması için yapılanlar gösterilmiştir. Aşırı katkılama yapılan bölgeler P-N bölgesi gibi davranır ve katkılama yapılmış yüzeyle , aşırı katkılama yapılmış bölge arasında geçiş bölgesi oluşturularak azınlık taşıyıcıların o bölgelere geçişi engellenir.



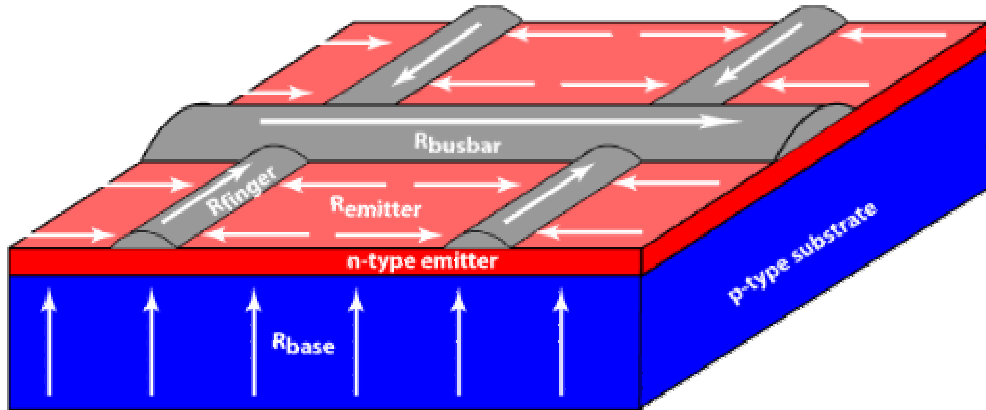
Şekil 5.13: Rekombinasyonu azaltmak için yapılabilecekler

### 5.3 Üst Kontaktların Tasarımı

Optik kayıpları ve rekombinasyonu en aza indirdikten sonra verimi artırmak için direnç kayıplarının da minimize edilmesi şarttır.

Seri ve paralel dirençlerin FF üzerindeki etkileri 4. bölümde anlatılmıştı. Paralel direnç değerinin tasarıma bağlı olmamasından ötürü bu bölümde seri direnç kayıplarının minimize edilebilmesi için tasarım esnasında yapılması gereken anlatılmıştır.

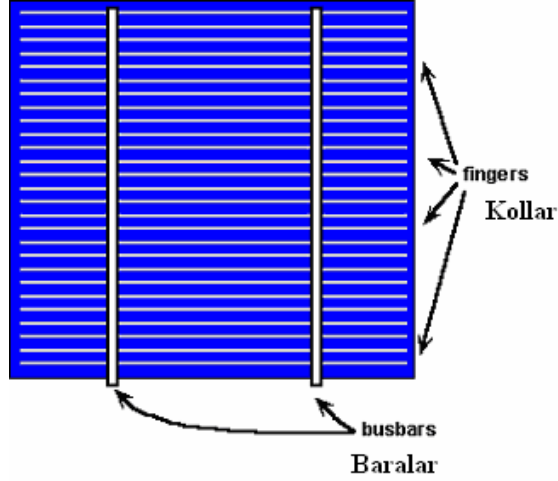
Şekil 5.14'te bir güneş pilinde oluşan seri dirençler gösterilmiştir.



Şekil 5.14: Seri dirençler

Akımın, yüke iletilmesi için üst yüzeyde metalik kontaktların olması gereklidir. Baralar harici yüke doğrudan bağlıdır, kollar (fingers) akımı baralara taşır.

Şekil 5.15'te bara ve kollar gösterilmiştir.



Şekil 5.15: Bara ve kollar

Üst yüzey dizaynında optimum noktayı bulabilmek için direnç kayıplarını azaltabilmek adına geniş akım taşıma yolları (kollar ve baralar) ve yansımayı azaltmak için daha ince akım taşıma yolları arasında tercih yapmamız gerekir.

Bu bölümün sonunda teorik olarak bir tasarım yapılmıştır.

### 5.3.1 Gövde Direnci

Fotoakım üretildiğinde gövdeden üst yüzeye kadar dikey olarak, yüzeyden üst kontaklara da yatay bir seyir izler. Gövde direnci ve akımı sabit kabul edilir. Gövde akımına gösterilen dirence gövde direnci ( $R_b$ ) adı verilir ve aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$R_b = \frac{\rho \ell}{A} = \frac{\rho_b w}{A} \quad (5.3)$$

$\rho$  = Gövde öz direnci (Tipik silisyum pillerde 0,5 ile 5  $\Omega \cdot \text{cm}$  arasında değişir)

$\ell$  = malzeme uzunluğu

A = Malzeme kesiti (alan)

w = Gövde genişliği

### 5.3.2 Tabaka Özdirenci

Emiter tabakasının kalınlığı bilinmediği için özdirenç ve kalınlık kullanılarak direnci hesaplamak son derece güçtür. Ancak özdirenç ve kalınlığa bağlı olan tabaka özdirenci ( $\rho_A$ ) kolayca hesaplanabilir.

Tabaka özdirenci  $\Omega/\text{Alan}$  ( $\Omega/\square$ ) birimiyle ifade edilir ve düzenli şekilde katkılanmış katmanın tabaka direncinin denklemi aşağıdaki gibidir.

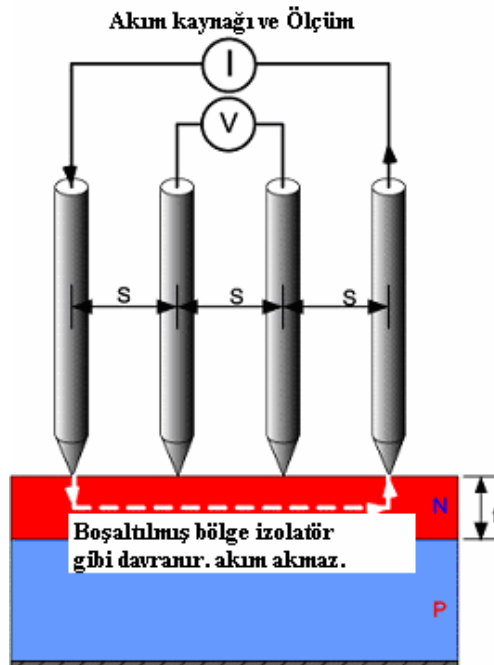
$$\rho_A = \frac{\rho}{t} \quad (5.4)$$

t: Tabaka Kalınlığı

Düzensiz şekilde katkılanmış tabakalar içinde denklem 5.5 kullanılır.

$$\rho_A = \frac{1}{\int_0^t \frac{dx}{\rho(x)}} \quad (5.5)$$

Emiter tabakası özdirenci “4 noktalı prob” yöntemiyle kolayca ölçülebilir. Şekil 5.16’ daki devreden okunan akım ve gerilim değerleri 5.6 denkleminde yerine konur.



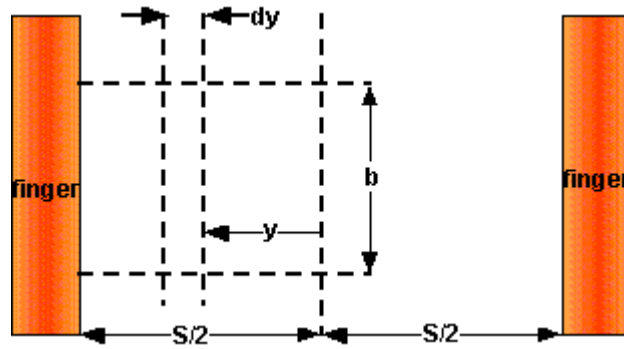
Şekil 5.16: Tabaka özdirenci ölçümü

$$\rho_A = \frac{\pi V}{\ln 2 I} \quad (5.6)$$

Silisyum güneş hücrelerinde tabaka direnci 30 ila 100  $\Omega/\square$  arasında değişir.

### 5.3.3 Emiter Direnci

Emiter tabaka direncinden kaynaklanan güç kaybı kol aralıklarının bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Emiter direncini hesaplamak için gerekli ölçüler şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17: Emiter direnci ölçmek için gerekli mesafeler

$dy$  kesitinde oluşacak güç kaybı ;

$$dP_{\text{loss}} = I^2 dR \quad (5.7)$$

diferansiyel direnç  $dR$ ;

$$dR = \frac{\rho}{b} dy \quad (5.8)$$

Akımda  $y$  mesafesine bağlıdır ve yatay akım  $I(y)$  , düzenli aydınlanma olan hücrelerde kollara yaklaştıkça artar.

$$I(y) = J b y \quad (5.9)$$

$J$ : Akım yoğunluğu

Böylece toplam güç kaybı denklem 5.10 ile bulunur.

$$P_{loss} = \int I(y)^2 dR = \int_0^{s/2} \frac{J^2 b^2 y^2 \rho_A dy}{b} = \frac{J^2 b \rho_A S^3}{24} \quad (5.10)$$

S: Kollar arasındaki mesafedir.

**Tablo 5.2:** S'in iki farklı değeri için güç kaybı.

J = <input type="text" value="0.030"/> A/cm <sup>2</sup>	J = <input type="text" value="0.030"/> A/cm <sup>2</sup>
b = <input type="text" value="10"/> cm	b = <input type="text" value="10"/> cm
$\rho_A$ = <input type="text" value="100"/> $\Omega/A$	$\rho_A$ = <input type="text" value="100"/> $\Omega/A$
S = <input type="text" value="0.1"/> cm	S = <input type="text" value="0.4"/> cm
$P_{loss}$ = <input type="text" value="0.0375"/> mW	$P_{loss}$ = <input type="text" value="2.4"/> mW

Maksimum güç noktasında üretilen güç ( $P_{gen}$ ) denklem 5.11'den bulunur.

$$P_{gen} = J_{mp} b \frac{S}{2} V_{mp} \quad (5.11)$$

Kısmi güç kaybı ise denklem 5.12'den bulunur.

$$P_{\%lost} = \frac{P_{loss}}{P_{gen}} = \frac{\rho_A S^2 J_{mp}}{12 V_{mp}} \quad (5.12)$$

**Tablo 5.3:** Tipik bir silisyum güneş pili için kısmi güç kaybı.

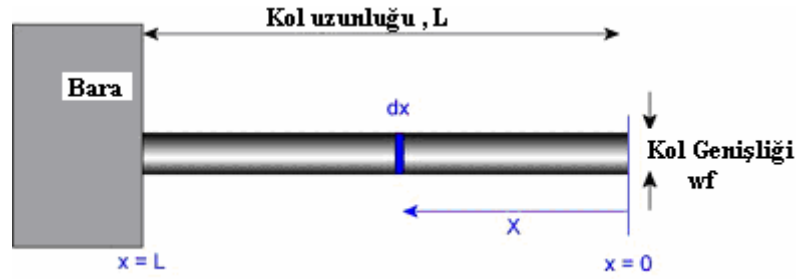
J = <input type="text" value="0.030"/> A/cm <sup>2</sup>	J = <input type="text" value="0.030"/> A/cm <sup>2</sup>
$V_{mp}$ = <input type="text" value="0.45"/> V	$V_{mp}$ = <input type="text" value="0.45"/> V
$\rho_A$ = <input type="text" value="40"/> $\Omega/A$	$\rho_A$ = <input type="text" value="40"/> $\Omega/A$
S = <input type="text" value="0.1"/> cm	S = <input type="text" value="0.4"/> cm
$P_{loss}$ = <input type="text" value="0.22"/> %	$P_{loss}$ = <input type="text" value="3.56"/> %

### 5.3.4 Kontak Direnci

Kontak direnci silisyum güneş piliyle metal kontaklar arasında oluşur. Bu direncin değerini küçültebilmek için kontakların alt bölgesine aşırı katkılama yapmak gerekir. Aşırı katkılamanın bazı seviyeleri ise başka sorunlara yol açar. Eğer bu seviye çok yüksek olursa uyarılmış fosfor pil yüzeyine difüze olur ve pil yüzeyinde “ölü katman” oluşur. Pek çok ticari modülde bu ölü katman nedeniyle mavi ışıktan yeterince faydalanamazlar. Bu nedenle kontak alt bölgelerine aşırı katkılama yapılırken düşük doyma akımı ve yüksek difüzyon mesafesi arasındaki dengeye dikkat etmek gerekir.

### 5.4 Kol Direnci

Kollar üzerindeki direnç kayıpları şekil 5.19’da gösterilen ölçülerle hesaplanır.



Şekil 5.18: Kol direnci için gerekli mesafeler

$dx$  elemanından geçecek akım;

$$x J_{mp} S_f \text{ 'dir.} \quad (5.13)$$

$J_{mp}$  : Maksimum güç noktasındaki akım.

$S_f$  : Kollar arası mesafe

$dx$  elemanının direnci:

$$\frac{dx \rho_f}{w_f d_f} \quad (5.14)$$

$d_f$  : Kol derinliği

$w_f$  : Kol genişliği

dx elemanında meydana gelecek güç kaybı:

$$I^2 R = \frac{dx \rho_f}{w_f d_f} (x J_{mp} S_f)^2 \quad (5.15)$$

0'dan L mesafesine kadar kolda meydana gelecek toplam güç kaybı:

$$\int_0^L \frac{(x J_{mp} S_f)^2 \rho_f}{w_f d_f} dx = \frac{1}{3} L^3 J_{mp}^2 S_f^2 \frac{\rho_f}{w_f d_f} \quad (5.16)$$

## 5.5 Güneş Pili Tasarımına Genel Bakış

Güneş pillerinde meydana gelen kayıplar iki bölüme ayrılır. Temel kayıplar ve teknolojik kayıplar.

Temel kayıplardan kaçınılması mümkün değildir fakat teknolojik kayıplar önceki bölümlerde anlatılan işlemlerle en aza indirilebilir.

### 5.5.1 Temel Kayıplar

- Solar spektrumda bulunan uzun dalga boylu Eg enerjisinden daha az enerjili fotonların elektron-delik çifti oluşturamaması sebebiyle oluşan kayıplardır.
- Fotonların fazla enerjilerinden kaynaklanan kayıp. Eg enerjisinden fazla olan enerji pil içerisinde ısınmaya sebep olur. Bu konuda çalışmalar yapılmıştır ancak henüz etkili bir sonuca varılamamıştır [23-24].
- Voltaj Faktörü. Voltaj faktörü  $q V_{oc} / E_g$ , hücre tarafından üretilen maksimum geriliminin ( $V_{oc}$ ) enerji aralığı voltajına ( $E_g/q$ ) oranıdır. Voltaj faktörünün üst limiti kaçınılamaz Auger rekombinasyonu ile sınırlandırılmıştır. Kalın silikon hücreleri için  $V_{oc}$  0.65 V tir ve 20- $\mu$ m kalınlıktaki hücre için 0.72 V ye yükselir [25].
- Fill Faktör (FF). İdeal bir güneş pilinde FF 0,89'dur. Pratikte taşıyıcı rekombinasyonu ve direnç kayıpları nedeniyle daha küçük değerdedir.

### 5.5.2 Teknolojik Kayıplar

- Yansımadan kaynaklanan kayıplar. Gelen enerjinin bir kısmı, hücrenin yüzeyinden yansır. Bu kayıplar, özel yüzey bakımları ve ARC kullanımı ile çözülebilen teknolojik bir problemdir.



- Metal kapsamdan dolayı oluşan kayıplar. Metal kapsam  $A_f/A_t$ .  $A_f$ , metal temaslarla kapsammamış ön yüzey alanıdır ve  $A_t$  toplam alandır. Bu kapsam faktörü  $1-A_f/A_t$  denkleminin neden olduğu teknolojik bir sınırlamadır. Kapsam faktörü, gölgelemeden gelen güç kayıpları ve seri direncin neden olduğu FF kayıpları arasındaki bir uzlaşmadır.
- Sınırlı hücre kalınlığı nedeniyle, soğurmanın tam gerçekleşmemesi ile oluşan kayıp. Özel ışık yakalama teknikleri, soğurulmayı çok ince solar hücrelerde bile önemli derecede arttırır.
- Üretilmiş taşıyıcıların hepsinden akım elde edilemez. Bazıları, gövdede yada yüzeyde rekombinasyona uğrar. Auger ve Shockley-Read-Hall gibi rekombinasyonlar ve ışık saçan rekombinasyonlar kaçınılmazdır ancak uygun silikon ve hücre-işleme teknikleri onların katkısını önemli şekilde en aza indirir.

Güneş pillerinden optimum verim alabilmek için yapılabilecek işlemler ve bunların etkileri Şekil 5.19 da gösterilmiştir [26].

Şekilde kullanılan kısaltmaların anlamları aşağıdadır;

- $N_A$  taban alıcı atom yoğunluğu,  $N_D$  donör atom yoğunluğu,  $G$  taşıyıcı üretim oranı,  $L_d$  taşıyıcıların difüzyon mesafesi,  $W$  taban kalınlığı,  $S$  yüzey rekombinasyon hızı, CP Collection Probability,  $R_b$ ,  $R_e$  ve  $R_c$  sırasıyla, taban, emiter ve kontak seri dirençleridir.  $L_e$  elektronların difüzyon mesafesi,  $\mu_h$  delik hareketliliği,  $n_i$  öz taşıyıcı yoğunluğu,  $D_n$  elektronlar için difüzyon katsayısı, GF geometrik faktör,  $I_{ob}$  taban doyma akımı,  $k$  Boltzman sabiti,  $T$  pil sıcaklığı,  $I_{oe}$  emiter doyma akımıdır.

Güneş pillerinde verimi artırmak için yüksek CP, ve düşük gölgeleme ve direnç kayıpları istenir. Bu parametrelerde emiter katkılama konsantrasyonu  $N_D$ , emiter kalınlığı  $W_e$  kollar arasındaki mesafe, kol uzunlukları ve kol genişliklerine ( $d$ ,  $l$ ,  $L_B$ ) bağlıdır.

$L_e$  elektronların difüzyon mesafesi,  $R_x = e/W_e$ ,  $\sigma_e$  emiter ortalama öz direnci,  $a$  kol kalınlığı ve  $\sigma_m$  metal öz direncidir.

5.19 numaralı denklemden görebileceğimiz gibi yüksek CP için düşük emiter kalınlığı ( $W_e$ ).

Gereklidir fakat emiter kalınlığının küçük olması denklem 5.20’de görülen emiter direncinin artmasına sebep olur. Daha düşük emiter ve kontak dirençleri için kontaklar genellikle Gümüş, Titanyum ve Palladyumdan (Ag, Ti, Pd) yapılır. Gölgeleme kayıplarının azaltılması için kollar ve baraların değerleri dikkatlice dizayn edilmek zorundadır.

$$R_b = \frac{1}{q\mu_h N_A} \left( \frac{Wb}{A} \right) \quad (5.17)$$

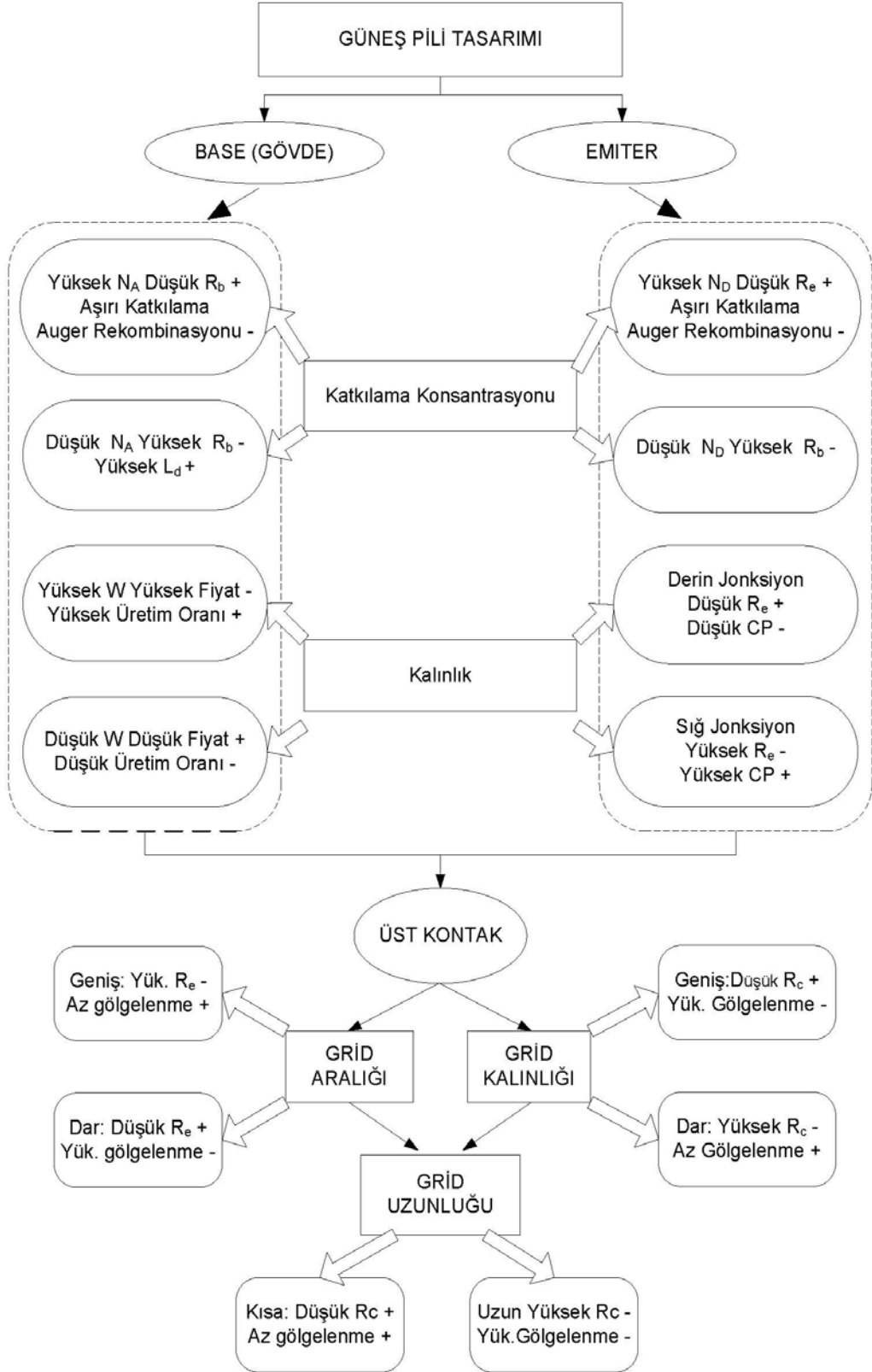
$$I_{0b} = \frac{qn_i D_n}{N_A L_d} G_F \quad (5.18)$$

$$V_{0C} = \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{I_{0b} + I_{0e}} + 1 \right) \quad (5.19)$$

$$CP = e^{-W_e/L_e} \quad (5.20)$$

$$R_e = \frac{R_x}{1} \frac{d}{6} \quad (5.21)$$

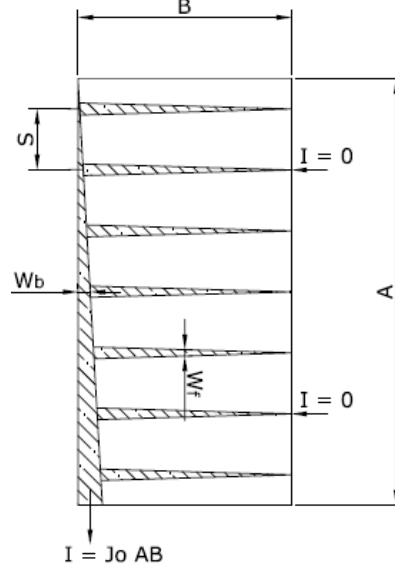
$$R_c = \frac{1}{6} \frac{l}{a L_B} \sigma_m \quad (5.22)$$



**Şekil 5.19:** Optimum verim için yapılabilecek işlemler ve etkileri

## 5.6 Teorik Üst Kontakt Tasarımı

Bu tasarımda kullanılan formüllerin detaylı incelemesi [27] numaralı kaynakta mevcuttur. Şekil 5.20 de tasarım esnasında kullanılacak parametreler gösterilmiştir.



Şekil 5.20: Tipik bir pil yüzeyinin ölçüleri.

Tasarım yapılacak güneş pilinin parametreleri

$J_0 = 25 \text{ mA/cm}^2$  (Çalışma noktası akım yoğunluğu)

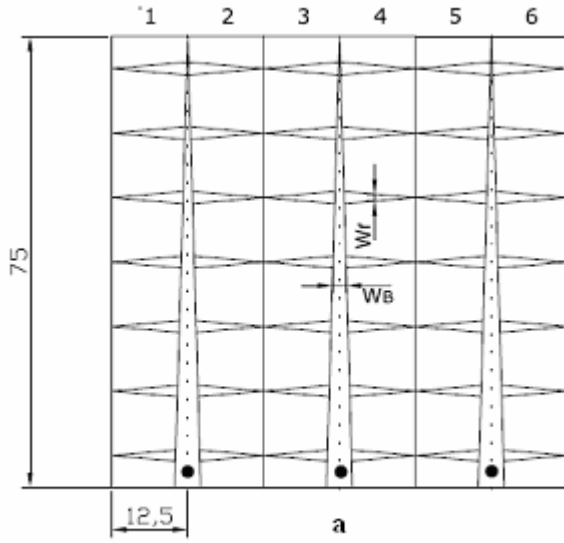
$V_0 = 0,5 \text{ V}$  (Çalışma noktası gerilimi)

$\sigma_A = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ } \Omega/\square$  (Tabaka özdirenci, kol ve baralar için aynı değer alınmıştır.)

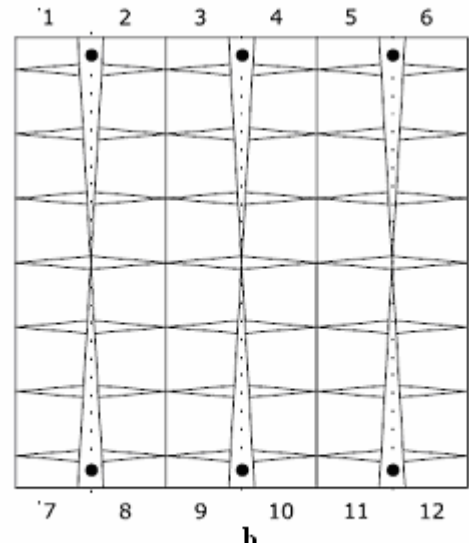
Tablo 5.4 : Pil kayıplarına göre optimum uzunlukları belirleme tablosu.

	Biçim	Optimum Genişlik	Toplam Kayıp
BARA	Düz	$A \cdot B \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\sigma_A J_0}{V_0}}$	$A^2 \cdot B \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_A V_0 J_0^3}$
	Uca Doğru İncelen	$\frac{A \cdot B}{2} \sqrt{\frac{\sigma_A J_0}{V_0}}$	$A^2 \cdot B \sqrt{\sigma_A V_0 J_0^3}$
KOL	Düz	$S \cdot B \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\sigma_A J_0}{V_0}}$	$A^2 \cdot B \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_A V_0 J_0^3}$
	Uca Doğru İncelen	$\frac{S \cdot B}{2} \sqrt{\frac{\sigma_A J_0}{V_0}}$	$A^2 \cdot B \sqrt{\sigma_A V_0 J_0^3}$

Şekil 5.20 a ve b de kenar uzunluğu 7,5 cm olan iki adet kare güneş pilinin üst yüzey desenleri gösterilmiştir.



Hücre birim sayısı 6



Hücre birim sayısı 12

**Şekil 5.20 a:** 6 bölmeli güneş pili

**Şekil 5.20 b:** 12 bölmeli güneş pili

Güneş Pilinin Gücü:  $25 \times 7,5^2 \times 0,5 = 703 \text{ mW}$

Şekil 5.20.a için;

$A = 7,5 \text{ cm}$  ve  $B = 1,25 \text{ cm}$ 'dir.

Şekil 5.20.b için;

$A = 3,75 \text{ cm}$  ve  $B = 1,25 \text{ cm}$ 'dir.

Tablo 5.4'deki denklemlerden;

$W_B \text{ (mm)} = 0,075 AB$  (Optimum bara genişliği)

$W_F \text{ (mm)} = 0,075 SB$  (Optimum kol genişliği)

$P_B \text{ (mW)} = 0,188 NA^2B$  (Barada meydana gelen kayıp, N= Birim hücre sayısı)

$P_F \text{ (mW)} = 0,188 NAB^2$  (Kollarda meydana gelen kayıp, N= Birim hücre sayısı)

bulunur.

A desenindeki kayıplar;

$P_B \text{ (mW)} = 0,188 NA^2B = 0,188 \times 6 \times 7,5^2 \times 1,25 = 79,3 \text{ mW}$  (Bara kayıpları)

$P_F \text{ (mW)} = 0,188 NAB^2 = 0,188 \times 6 \times 7,5 \times 1,25^2 = 13,2 \text{ mW}$  (Kol kayıpları)

B desenindeki kayıplar;

$$PB \text{ (mW)} = 0,188 NA^2B = 0,188 \times 12 \times 3,75^2 \times 1,25 = 39,6 \text{ mW}$$

$$PF \text{ (mW)} = 0,188 NAB^2 = 0,188 \times 12 \times 3,75 \times 1,25^2 = 13,2 \text{ mW}$$

A desenindeki toplam kayıp  $79,3 + 13,2 = 92,5 \text{ mW}$

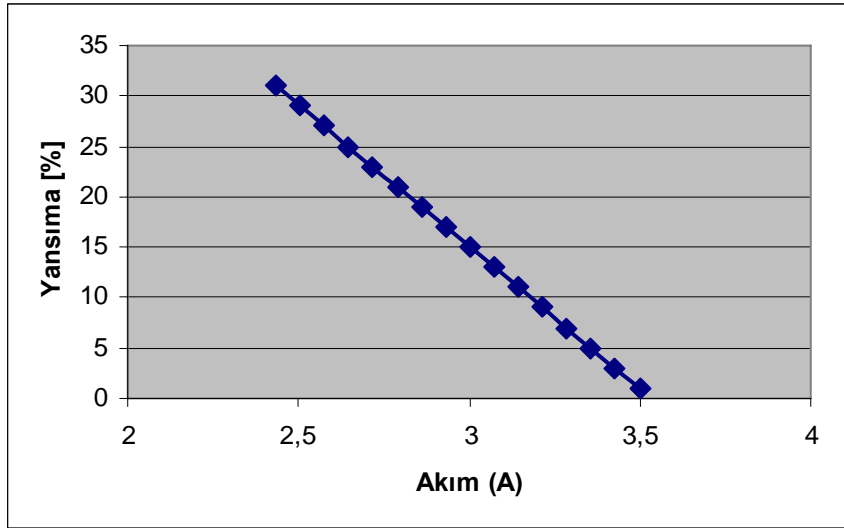
B desenindeki toplam kayıp  $39,6 + 13,2 = 52,8 \text{ mW}$

Toplamda  $39,7 \text{ mW}$ 'lık bir kazanç sağlanmıştır.

Şekil 5.20'deki üst yüzey desenine sahip pillerin kayıplarının daha az olmasına rağmen üretim teknolojilerinin belli limitleri vardır ve bu desenlerde üretim yapmak günümüz teknoloji ile çok ekonomik değildir [28].

### 5.7 PC1D ile Simülasyon

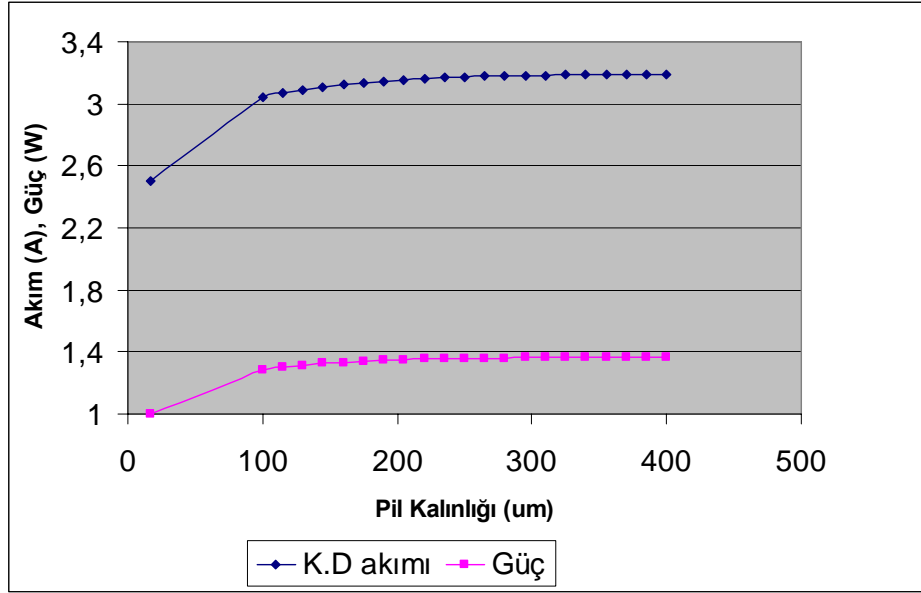
Simülasyonlar, özellikleri Ek-C de verilen silisyum güneş pili için yapılmıştır. Şekil 5.21'de sonuçları görülen yüzey yansımaya oranının etkisi beklendiği gibi yansımaya oranı ile pil çıkış akımı arasında ki ters oranı göstermiştir. ARC kullanımının gerekliliği daha net şekilde görülmüştür.



Şekil 5.21: Yansımaya Oranı ve Kısa devre akımı

Şekil 5.22 de malzeme kalınlığının artırılmasının güneş pilinin çıkış gücü ve akımı üzerinde ki etkisi gösterilmiştir. Malzeme kalınlığını artırmak ışığın soğurulmasını artırdığı için pil çıkış akımında ve gücünde artışa sebep olmaktadır.

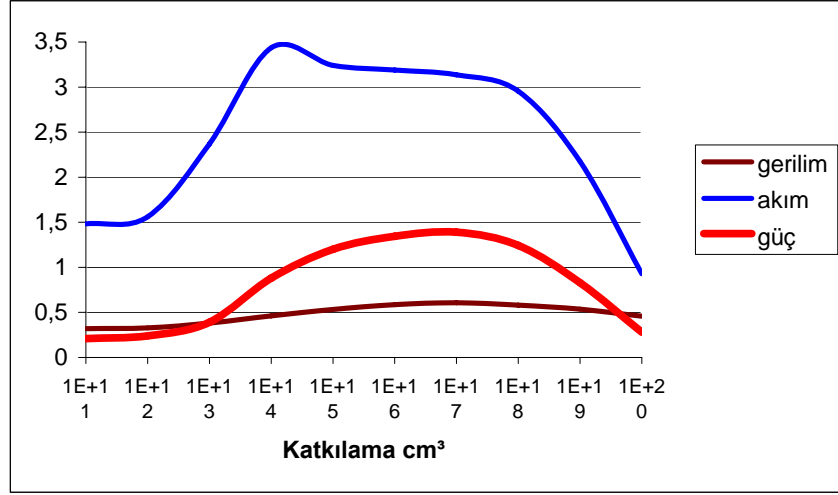
Ancak belli bir noktadan sonra, incelenen güneş pilinde 300  $\mu\text{m}$ , bu artış durma noktasına gelmektedir. Malzeme kalınlığını artırmak aynı zamanda pilin maliyetini de artıracığı için ekonomik kriterlerde göz önüne alınarak optimum malzeme kalınlığı belirlenmelidir.



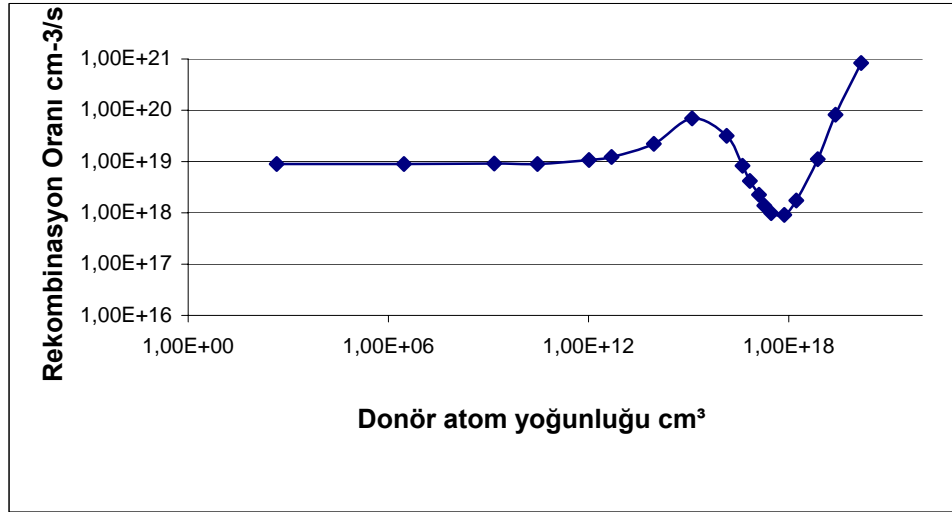
**Şekil 5.22:** Malzeme kalınlığının pil gücüne ve akımına etkisi

Şekil 5.23 Katkılamanın güneş pilinin güç, gerilim ve akıma etkisi gösterilmiştir. Katkılama oranının artmasıyla güneş pilinin akıma direnci azalmakta ve iletkenlik artmaktadır. Ancak katkılama oranı arttıkça elektron ve deliklerin hareketliliği ile difüzyon mesafeleri azalmaktadır. Katkılama oranı  $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$  seviyesini aştığında iletkenlikteki artışın miktarı azalmaya başlar. Oran  $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$  e yaklaştığında artık difüzyon mesafesinde ki artış daha önemli parametre haline gelir ve rekombinasyon hızla artmaya başlar. Rekombinasyonun katkılamağa bağlı davranışı Şekil 5.24'te gösterilmiştir.

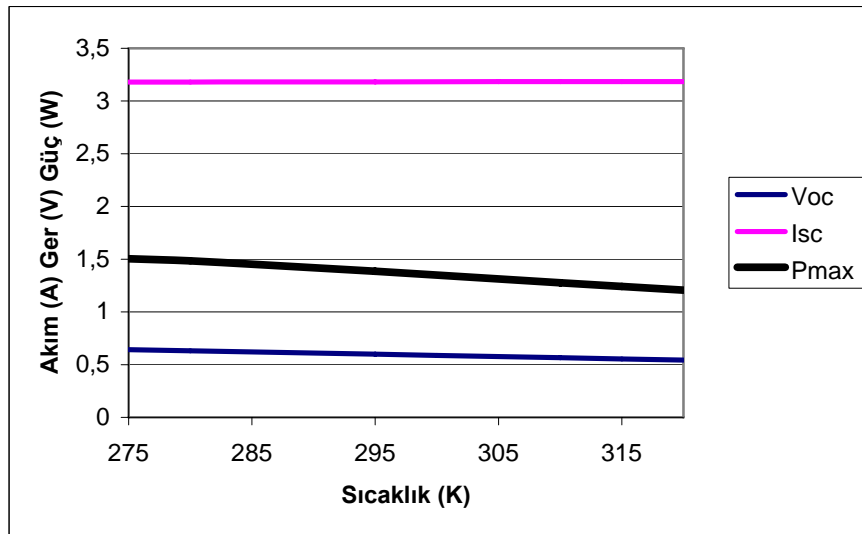
Şekil 5.25'te çalışma sıcaklığındaki artışın güneş pilinin çıkış gerilimi, akımı ve gücü üzerindeki etkisini göstermektedir. Diyot doyma akımının sıcaklıkla birlikte artması sonucunda açık devre gerilimde meydana düşüşün,  $I_{sc}$ ' de ki artıştan daha etkili olması sonucunda pil gücünde azalma görülmüştür.



Şekil 5.23: Katkılamanın, Güç, Gerilim ve Akıma etkisi



Şekil 5.24: Katkılamanın, Rekombinasyona Etkisi



Şekil 5.25: Pil çalışma sıcaklığının, Güç, Gerilim ve Akıma etkisi



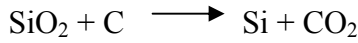
## 6 SILİSYUM GÜNEŞ PİLİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

### 6.1 Silisyum Saflaştırma Metotları

#### 6.1.1 Saf Silisyumun Elde Edilmesi ve Türleri

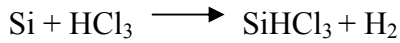
Yeryüzünde en çok bulunan mineral silisyum dioksittir (SiO<sub>2</sub>). Fotovoltaik piller için saf silisyum üretimi SiO<sub>2</sub>'in silis veya kum formundaki halini bulmakla başlar. Demir, alüminyum ve diğer metallerde az miktarda silis bulunur.

SiO<sub>2</sub>'in kömür formundaki C ile tepkimeye sokulur ve 1500-2000 °C'lik ark fırınlarında ısıtılır.



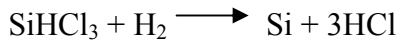
Bu işlem sonucunda %98 saflıkta silisyum elde edilir. Ancak bu saflık düzeyi de arttırılır.

300 °C de herhangi hidroklorürle Si tepkimeye sokulur.



SiHCl<sub>3</sub> kaynama noktası çok düşüktür (31.8 °C) distilasyonla diğer halidelerden (FeCl<sub>3</sub>, AlCl<sub>3</sub>, BCl<sub>3</sub>) ayrılır.

Daha sonra 1100 °C de 200-300 saat boyunca H<sub>2</sub> ile tepkimeye sokulur ve saf silisyum elde edilir.



Bu işlem havası vakumlanmış büyük bir odanın gerçekleşir ilk kez Siemens tarafından gerçekleştirildiği için Siemens metodu olarak da bilinir.

Kristalize silisyum (c-Si) tanecik boyutlarına göre şu şekilde sınıflandırılır.

Tek kristalli, (sc-Si), tanecik boyutu >10cm ,

Çok kristalli, (mc-Si), tanecik boyutu = 1mm-10cm ,

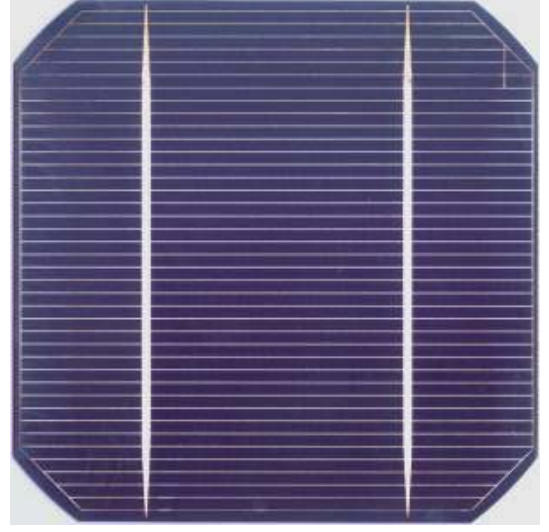
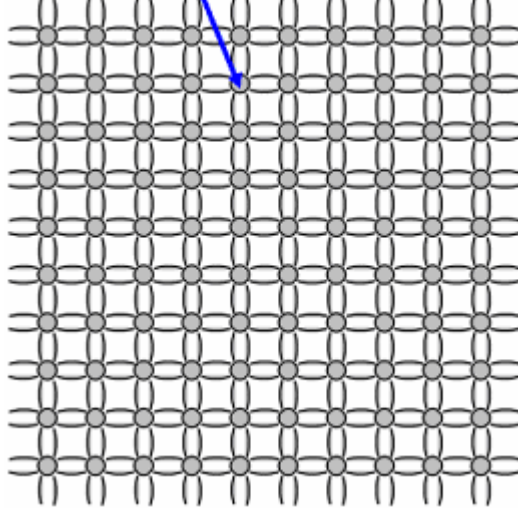
Mikrokristalli, (mc-Si), tanecik boyutu <1mm.

## 6.2 Silisyum Külçeleri Elde Etme Metotları

Bu silisyumun yapısında atomlar tek sıralı ve düzenli bir şekilde yerleştirildikleri için materyal parametreleri çok iyidir, ancak üretim aşaması uzun ve dikkatli bir çalışma gerektirdiği için en pahalı silisyum türüdür.

Şekil 6.1’de tek kristalli silisyumunun yapısı ve tek kristalli silisyumdan imal edilmiş güneş pili gösterilmiştir.

**Her silisyum atomunun 4 komşu atomla bağı vardır.**



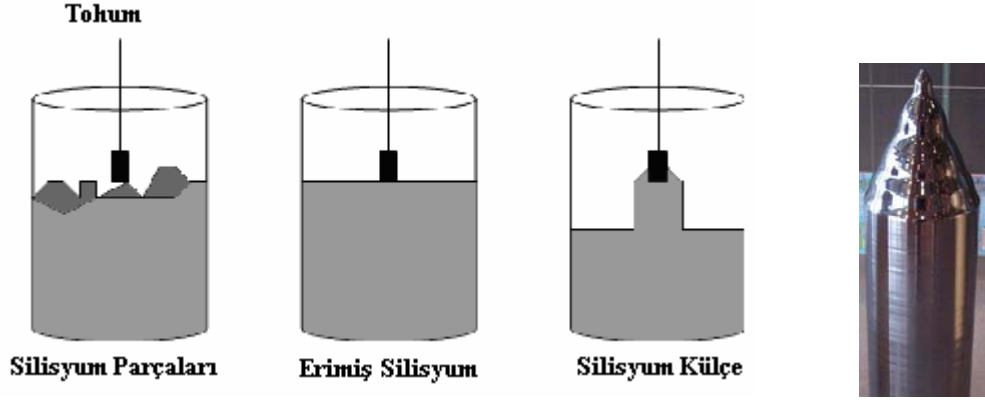
**Şekil 6.1:** Tek kristalli silisyum

Büyük külçeler halinde elde edilmesi için başlıca kullanılan iki yöntem vardır.

### 6.2.1 Czochralski Prosesi

Czochralski prosesi (CZ) silisyum külçesi elde etmek için en sık kullanılan yöntemdir. Çok yüksek saflıkta silisyum Kuartz bir kabın içinde eritildikten sonra çok dikkatli şekilde kontrol edilen sıcaklık, dönüş hızı altında tohum kristal adı verilen parça yukarı doğru çekilir.

Şekil 6.2 de bu proses gösterilmiştir. Günümüzde bu metotla 400 mm çapında 1-2 metre uzunluğunda külçeler imal edilebilmektedir [29].

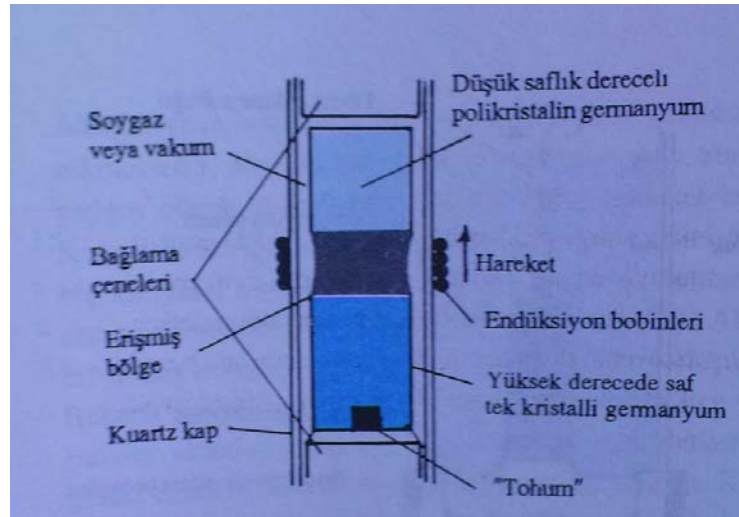


Şekil 6.2: Czochralski prosesi

### 6.2.2 Yüzer Bölge (Float Zone) Prosesi

CZ metodunda kullanılan kuartz kap yüzünden silisyum içinde oksijen kirliliği meydana gelir. Yüzer bölge prosesiyle (FZ) bu sorun ortadan kaldırılır ve saflık derecesi daha yüksek silisyum külçesi elde edilir.

Silisyum külçesi içinde bulunan yabancı parçacıklar ayırım katsayılarından ötürü eriyik içinde yol alırlar ve bu yöntemle 150 mm çapında saf silisyum külçeleri elde edilebilir. Şekil 6.3'te FZ prosesinin işleyişi gösterilmiştir [30].



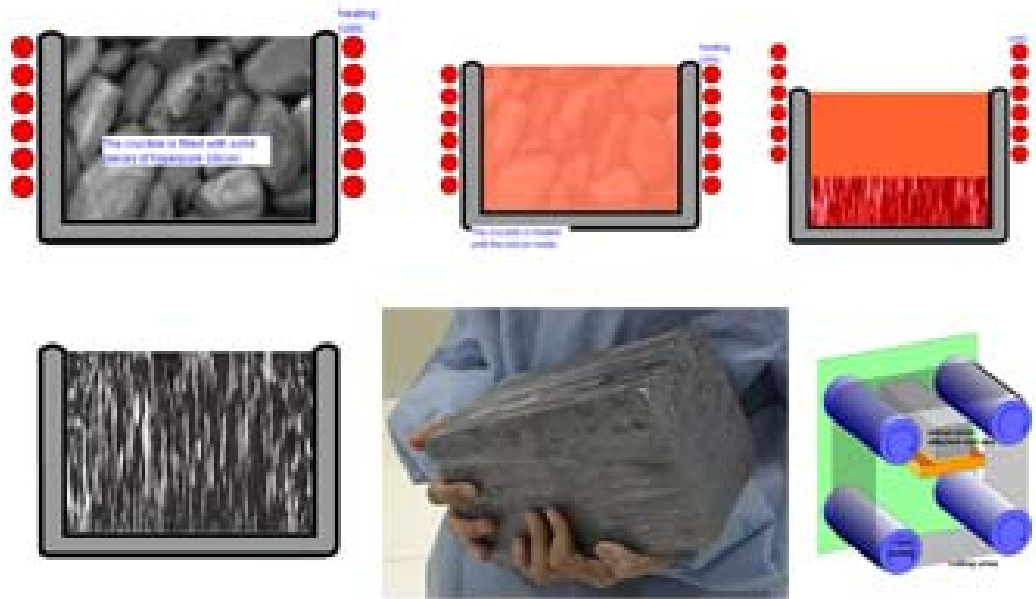
Şekil 6.3: Yüzer bölge prosesi

### 6.2.3 Çoklu Kristal Silisyum

Çoklu kristal teknolojisinde ise, silikon, tekrar tekrar kullanılabilen grafit bir kalıp içine dökülerek, 0.5 metreye ulaşan kenar uzunluğuna sahip küp şeklinde çoklu kristal haline getirilir. Bu küpler daha sonra, tel bir testere aracılığıyla; önce silindir

şeklinde çubuklar, sonra da bir CD'den az daha büyük yongalar halinde kesilir. Asitle aşındırılmak suretiyle temizlenen ürün, pil imalatı için hazır hale getirilir. Bir sonraki aşamada difüzyon yöntemiyle; yonganın bir yüzeyine boron, diğer yüzeyine fosfor emdirilerek yonga yarıiletken p-n yonga haline getirilir. Son olarak da bu yonganın iki yüzeyine, iletken birer ağ döşenir. Bunun için, hatların yuvaları lazer ışınlarıyla kazılabildiği gibi, litografi yöntemleri de kullanılabilir. Bu ikincisinde, iletken ağ şemasının negatif resmi yonga üzerine düşürülüp, ağı oluşturan hatlar dışındaki kısımları kaplanır. Açıkta kalan iletken hatlar, asitle aşındırıldıktan sonra, içleri metal buharlarıyla doldurulup, yüzeyler tekrar temizlenir. Böylelikle, güneş pili yapımında kullanılmaya hazır p-n yongalar elde edilmiş olur.

Çok kristalli yongalarla yapılan piller, tek kristalli yongalarla yapılanlardan daha düşük verime sahip olmakla beraber, fiyatları daha ucuz olduğundan, imalatta açık farkla önde gidiyorlar. Şekil 6.4'te çok kristalli yonga üretimi gösterilmiştir [5].



**Şekil 6.4:** Çoklu kristal külçe büyütme prosesi

### 6.3 Endüstriyel Güneş Pilleri

Endüstriyel güneş için yüksek verimden ziyade öncelikli hedef düşük fiyattır. Yapım aşamasındaki teknikler ve kullanılan malzemeler bu hedef doğrultusunda seçilir. Endüstriyel güneş pilleri 100 cm<sup>2</sup> den daha büyük CZ tek veya çok kristalli silisyum substratların (tabaka) üzerine yapılır.

Ticari modülünün pazar fiyatını belirten analizlere göre, modül fiyatları 3.5-4.5 \$/W aralığındadır. (Ülkemizde 5.5 – 6 \$ /W )

Modül maliyetinin %40 ila %50'si silisyum külçelerinin büyütülmesi işlemlerinden kaynaklanır.

Genel eğilim, substrat boyutunu arttırarak, doğramada oluşan kesme kaybını azaltmak ve 200 µm altındaki substratların kalınlığını azaltarak, ucuz, iyi kalitede polisilisyum hammadde materyalini geliştirmektir. Hücre imalatı ve modül montajını maliyeti, son modül maliyetinin %25-30'u kadar olur.

Ticari olarak üretilmiş silisyum güneş pillerinin tipik verimi, %13-16 aralığındadır. Pil verimini arttırmak için yapılacak işlemler maliyetlere yansıtacağı için verim değerleri fazla yükseltilmemiştir. Endüstriyel hücreler için hedeflenen verim değerleri %18-20' dir. Bir güneş pilinin bu hedefe ulaşabilmesi için aşağıdaki özelliklerin bir çoğuna sahip olması gerekir [31].

- Ön Yüzey Dalgalandırılması (Surface Texturing 5.1.1.2)
- Kontrollü katkılama işlemi
- Etkin ön yüzey pasivizasyonu
- Düzgün hatlı ön elektrot
- Ön elektrot pasivizasyonu
- İnce taban (base) bölgesi
- Arka yüzey pasivizasyonu veya arka yüzey alanı (BSF)
- Arka elektrot pasivizasyonu
- Alt yansıtıcı
- Arka yüzey dalgalandırılması
- Paketlemeye uygun ARC

#### **6.4 Endüstriyel Güneş Pilleri Teknolojileri**

Çoğu ticari olarak üretilmiş kristalize silisyum güneş pillerinin yapım tekniği Ekran Baskısı (Screen Printing) metoduna dayanır. Diğer daha gelişmiş metotlar, gömülmüş kontaklı güneş pilleri (Buried Contact Solar Cell) (BCSC), Metal İzolatörlü Yarı İletken (MIS) (Metal Insulator Semiconductor), Edge-defined film-fed growth (EFG) gibi yapım tekniklerinin kullanılma oranı %10 civarındadır.

#### 6.4.1 Ekran Baskısı (Screen Printing) Metodu

Ekran baskısı, çok iyi kurulmuş, basit, sağlam, sürekli ve kolayca uygulanabilir bir işlemdir. Tamamen otomatik olan ekran baskılı solar hücre üretim hatları, birçok şirket tarafından uygulanır. Son zamanlarda, birçok araştırma grubu ve şirketi tarafından temel olarak Japonya ve Avrupa da Screen Printing işlemini geliştirmek için önemli çabalar sarf edilmiştir. Temel gelişim, macun oluşumunda ve modern Screen Printing cihazlarında yapılmıştır. Bu yeni gümüş macunların en önemli özelliği gövde silikonu içine derin nüfuz etmeyen silikon dioksitin ve TiO<sub>x</sub> yada SiN<sub>x</sub>'ten yapılmış ARC katmanlarının seçici çözülmesine izin veren katkı maddelerini içermesidir [31].

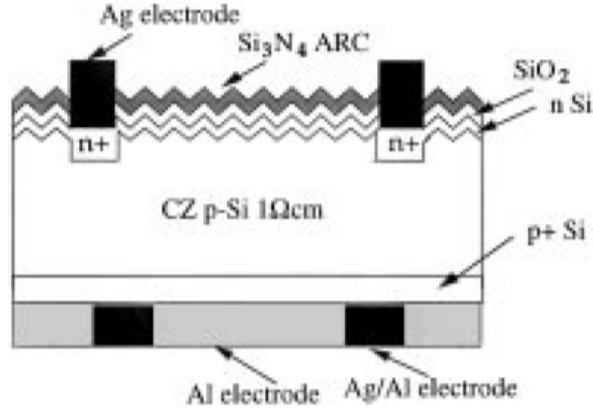
Bu macunlar yüzeylere seçicilik özelliği kazandırır ve bu, yüzey pasivizasyonu ve ARC işlemlerinin basitleştiği anlamına gelir. Screen Printing prosesinin adımları Tablo 6.1 de verilmiştir.

**Tablo 6.1:** Ekran baskısı proses adımları.

Adım No	Proses Tanımı
1	Testere hasarının aşındırılması
2	Bütün ön yüzey üzerinde derin n <sup>++</sup> yayılması (15 Ohm/kare)
3	Temas parmakları arasında yayılmış seçmeli yapı aşındırması
4	İkinci hafif n <sup>+</sup> yayılması (80-120 Ohm/kare)
5	Pasifleştirilmiş kuru termal oksitin büyümesi
6	Kenar bölgesi izolasyonu
7	ARC çökmesi (APCVD TiO <sub>x</sub> yada PECVD SiN <sub>x</sub> )
8	Üst ve arka kontakların baskısı ve kuruması
9	Her iki temasında birlikte ateşlenmesi ve oksit ve ARC katmanını pasifleştirme yoluyla ateşleme

Homojen emiterli, CZ büyük alanlı güneş pilleri için verim %16,6 düzeyindedir [32]. Seçici emiterli Cz-Si için %17.32'e yakın ve büyük alanlı çoklu kristal hücreleri için %15.9'a yakın verim elde edilir [33-34]. Bu işlemde daha büyük hücre boyutları için uygundur: 15 x 15 cm<sup>2</sup> çoklu kristal hücrelerinden %15.6'lık verim alınmıştır [35].

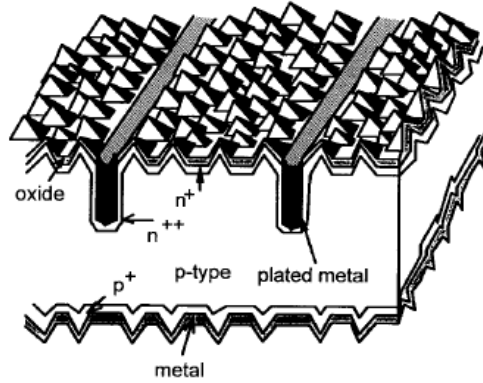
Şekil 6.5'te Ekran baskılı güneş pilinin kesiti verilmiştir.



**Şekil 6.5:** Ekran baskılı güneş pili kesiti

#### 6.4.2 Gömülmüş Kontaktlı Güneş Pilleri (BCSC)

BCSC işlemi , New South Wales Üniversitesinde geliştirilmiştir.Laboratuar verimleri küçük alanlı FZ materyalleri kullanıldığında %21,3'e ulaşmıştır. Şekil 6.6'da ticari bir BCSC güneş pili kesiti gösterilmiştir.



**Şekil 6.6:** BCSC güneş pili kesiti

Bu prosesin adımları Tablo 6.2'de gösterilmiştir. BCSC güneş pili yapımında kullanılan, bölüm 6.2'de bahsedilen, tüm ileri teknolojileri içinde barındırır. Bu prosesin en önemli adımlarından birisi, aynı anda hem difüzyon maskesi, hem kaplama maskesi hem de yüzey pasivizasyon tabakasını oluşturan kalın bir oksit tabakasının üretilmesidir. Bazı durumlarda yansımayı azaltmak amacıyla oksit yerine silikon nitrit kullanılır. Bu proses ticari uygulamalar göz önüne alındığında bazı dezavantajlara sahiptir. Yüksek sıcaklık altında gerçekleşmesi gereken pek çok ve uzun (950 °C sıcaklıkta 16 saat ) proses adımları mevcuttur. Gerekli ekipmanlar çok pahalıdır ve çok dikkat gerektiren ön temizleme işlemlerine ve laboratuar çalışmalarına ihtiyaç duyulur.

**Tablo 6.2:** BCSC Metodunun proses adımları

Adım No	Proses Tanımı
1	Testere hasarının aşındırılması ve rasgele yapılandırma
2	Bütün yüzey üzerinde hafif n++ yayılması
3	Kalın termal oksidin büyümesi
4	Mekanik yada lazer yiv oluşumu
5	Yiv hasarının aşındırılması ve temizlenmesi
6	Sadece yivli alanlarda ikinci ağır yayılma
7	Arka tarafta alüminyum buharlaşması
8	Yüksek ısılı Al alaşımı
9	Nikelin elektrotsuz kaplaması, sinterleme ve aşındırma
10	Bakır ve gümüşün elektrotsuz kaplaması
11	Lazer kesme ile köşe bağlantısı izolasyonu

Bu sebeple pek çok güneş pili üreticisi BCSC lisansı almasına rağmen ticari modellerinde bu prosesi kullanmaz [36].

Bu işlem basitleştirmesinin amacı, Screen Printed prosesiyle çalışan birçok solar hücre üretim fabrikasında zaten mevcut olan altyapıya ve ekipmana uymasındır. Yüksek ısılı işlem basamak sayısı bire indirilmiştir, ön yüzey pasivizasyonu difüze olan oksitin tutulması ve ARC olarak kullanılan  $TiO_2$  katmanın üzerine püskürtülmesiyle başarılıdır. Bu işlemle başarılı hücre performansı hakkında hiçbir veri yayınlanmamıştır.

#### **6.4.3 Metal İzolatörlü Yarıiletken (MIS-IL) Güneş Pilleri**

MIS-IL hücrelerinin ticari versiyonu, 1980'lerde geliştirilmiştir [37].

$10 \times 10 \text{ cm}^2$  hücrelerin endüstriyel üretimi 1990'ların başında ortaya çıkmıştır. MIS-IL güneş pilleri, pil üretim prosesi sırasında termal oksit pasifleştirilmesi gibi yüksek sıcaklık gerektiren basamakların ortadan kaldırılması nedeniyle çok fazla dikkat çekmiştir. Buharlaşmış Al ön kontakları, yüzey rekombinasyonunu azaltan ince bir oksit tüneli ile silikon arabiriminden ayrılır.  $100 \text{ cm}^2$  Cz silikonu üzerindeki %15.3'lük bir etkinlik ölçülmüştür ve onaylanmıştır [34].

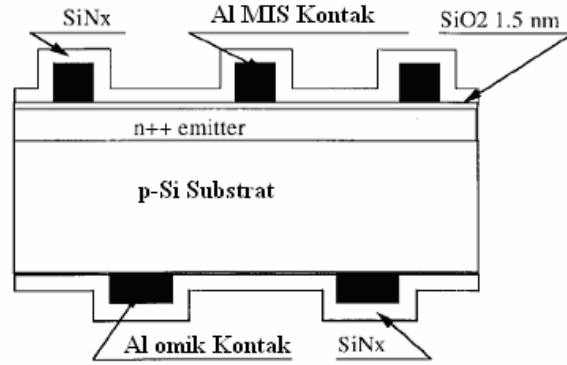
MIS-IL güneş hücreleri, düşük ısılı işlemlerde yüksek ömrü koruduğu için FZ silikonu gibi yüksek kaliteli materyal için özellikle uygundur. P-N bağlantısı ve MIS güneş hücrelerin kombinasyonu MIS-temaslı p-n bağlantı güneş pilinde



gösterilmiştir (Şekil 6.7). %16.5'lik verim  $98 \text{ cm}^2$  Cz-Si substratında elde edilmiştir. MIS işlem sırası, Tablo 6.3'te gösterilmiştir.

**Tablo 6.3:** MIS işlem sırası

Adım No	Proses Tanımı
1	Testere hasarının aşındırılması ve rasgele dalgalandırma
2	Kimyasal dalgalandırma
3	Arka tarafta $4 \mu\text{m}$ Al'nin buharlaşması
4	Arka tarafta 500 derecede temasların sinterlemesi ve ön tarafta 1.5 nm oksit tünelinin büyütülmesi
5	Oksit tünelinin tepesindeki metal maske yoluyla ön $6 \mu\text{m}$ Al grid buharlaşması
6	Grid levha çizgileri boyunca aşındırılmış fazla Al
7	Arttırılmış sabit pozitif yük yoğunluğu için CsCl çözeltisinde daldırma
8	5 dakika için 250 derecede bütün ön yüzey üzerinde PECVD silikon nitratin çökmesi



**Şekil 6.7:** MIS güneş pili kesiti

#### 6.4.4 EFG Silikon Levhalar Üzerinde Güneş Pilleri

EFG silikon levhalar, CZ itme yada çoklu kristal bloklarını kalıplama gibi geleneksel kristal silikon teknolojilerine göre belirgin bir maliyet avantajı sunar. Tasarruflar, Cz ve çoklu kristal tabakalarında (wafer) belirgin bir maliyet katkısı olan dilimleme işleminin ortadan kaldırılmasıyla ortaya çıkar. Ancak, EFG materyali, yüksek kristal bozulma yoğunluğuna sahiptir.

Yüksek mekanik stres ve EFG levhalarının düzgün olmayan yüzeyi, yüksek kırılma nedeniyle standart Screen Printing işlemlerinin uygulamasını zorlaştırır. Bazı patentli işlem basamakları yüksek derecede bozulmuş EFG gövde materyalini pasifleştirmek ve düzgün olmayan yüzeyle temas etme problemini ile uğraşmak için geliştirilmiştir. Bazı bilgiler bulunmuş olmasına rağmen EFG solar hücre işleminin

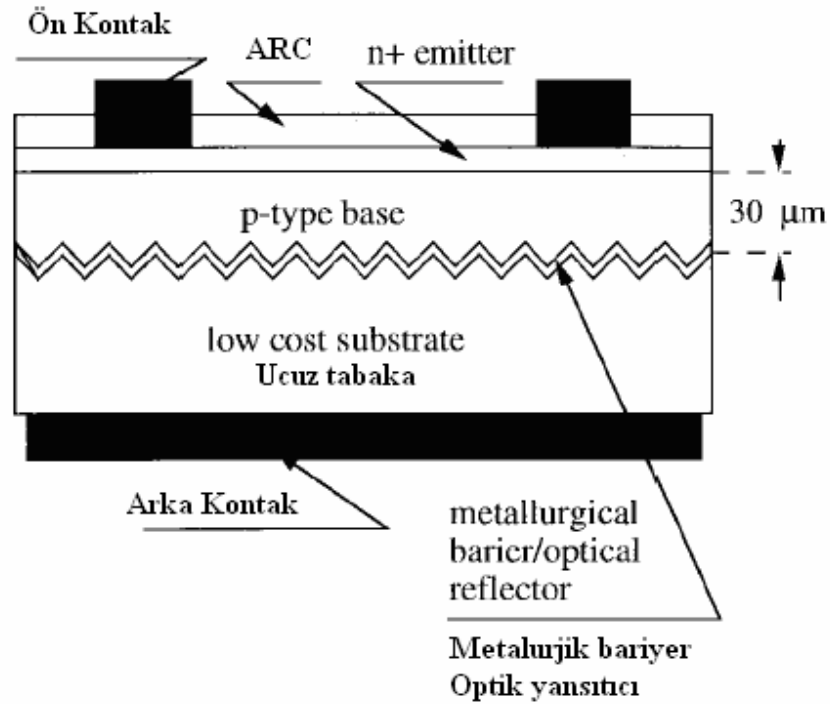
detaylı açıklaması yayınlanmamıştır [38]. Bu üretim prosesinde bildirilen en yüksek verim %14,3'tür [39].

### 6.5 Ticari İnce-Film Kristal Silisyum Güneş Pilleri

Potansiyel olarak ucuz substratlar üzerinde ince bir (20-50  $\mu\text{m}$ ) silikon filminden oluşan ince-film silikon solar hücrelere artan bir ilgi vardır [40].

Bu tür ince yapılar, silikon hücrelerin çok geleneksel külçe-tipi hücrelerden daha az saflıkta silisyum kullanabilmeye fırsat sunar. Etkin bir ışık yakalama şeması kullanıldığı zaman, standart tipteki kalın hücreler için kullanılanlardan daha yüksek verimler mümkündür. Potansiyel substratlar metalurjik dereceli silikon, paslanmaz çelik, grafit, seramik yada hatta camdır. Birçok çökeltme metodu arasında, en bilinenleri, kimyasal buhar çökeltmesi ve sıvı fazlı eksen üstü büyümedir.

Bu alandaki çoğu gelişme hala erken safhasında olmasına rağmen, iletken seramikler üzerinde polikristal silikonun sürekli levhalarının oluşumu, Silikon-Film işlemi olarak adlandırılır, deneme üretimine başlanmıştır. Bu levhalar istenen kalınlıkta üretildikleri için, belirgin maliyet indirimine yol açarak külçe testereleme ortadan kaldırılır. Si-Film solar hücresi kesiti Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8: Si-Film solar hücresi kesiti

Silisyum-Film, özel bir işlemdir ve sadece çok genel işlem sırası yayınlanır. Genel işlem, seramik oluşumu, metalurjik bariyer oluşumu, polikristal katmanı çökmesi, emiter difüzyonu ve kontak fabrikasyonundan oluşur. İletken seramik substrat düşük maliyetli materyallerden seçilir. Metalurjik bariyer, substrat safsızlıklarının aktif ince silikon katmanına girmesini ve bulaşmasını önler. Rasgele dalgalandırılmış ve yüksek derecede yansıtıcı metalurjik bariyer katmanı ışık yakalamasını geliştirir. Uygun bir p-tipi katkılı 30-100 µm'lik aktif katmanı sıvı bir çözeltide çökeltir. Fosfor ve alüminyum safsızlığını almak gövde kalitesinin gelişimi için kullanılır. Hücre işleminin geri kalanı standart baskılı ekran üretimi dizisine benzer. 240, 300 ve 700 cm<sup>2</sup> alanlı hücreler geliştirilmiştir. 675 cm<sup>2</sup> lik bir pilden %11.6'lık verim alınmıştır [40].

### **6.6. Ekran Baskısı ve Gömülmüş Kontaklı Güneş Pillerinin Karşılaştırılması**

Bu bölümde en çok kullanılan iki güneş pili üretim metodunun performans analizleri yapılmıştır.

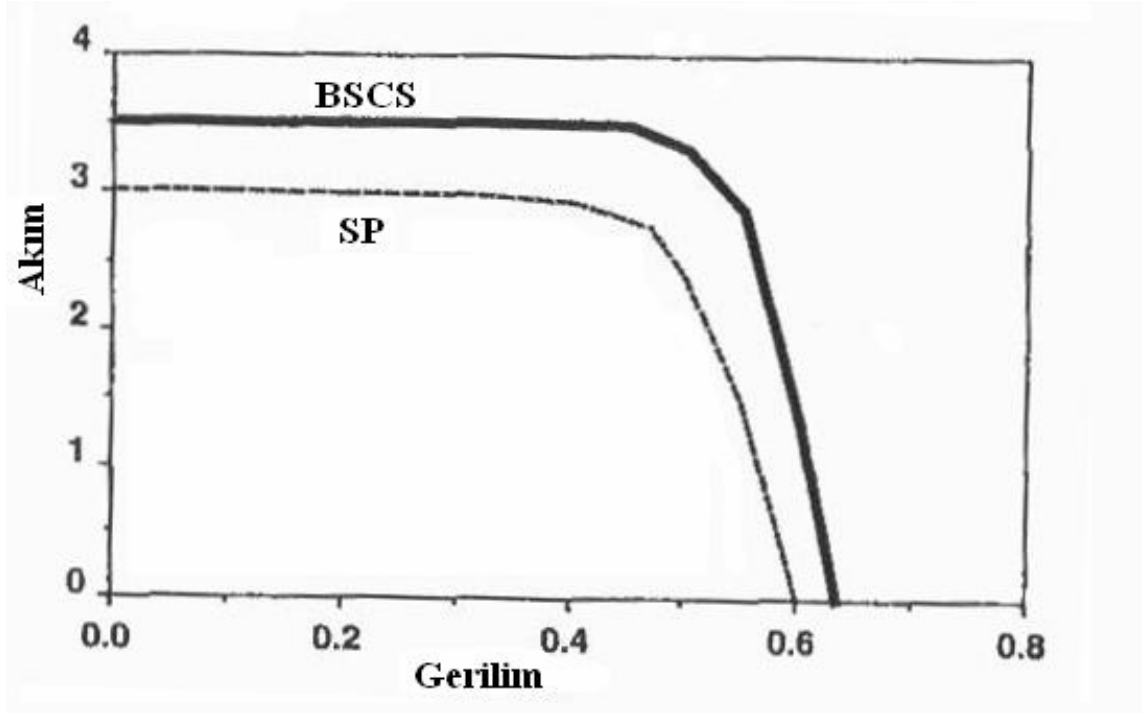
Ekran baskısı metodunun özellikleri 6.4.1'de anlatılmıştı.

Ekran baskısı metodunun dezavantajları şunlardır;

- Kullanılan metal pastaların maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen göreceli olarak düşük verim elde edilmesidir.
- Yakarak birleştirme işlemi esnasında iletkenlikte azalma olması da bir başka dezavantajdır.

BCSC, SP metoduna göre yaklaşık olarak %30 daha yüksek performans gösterir. İki metodun BP Solar tarafından karşılaştırılmasının sonucu Şekil 6.9'da verilmiştir [18].

BCSC metoduyla, direnç ve gölgelenme kayıpları azalır. Aşırı katkılama ile Rekombinasyon sınırlanır. BCSC metodunun ilk yatırım maliyetleri daha yüksektir Ancak daha ucuz malzeme kullanıldığı için işletme maliyetleri daha ucuzdur.



Şekil 6.9: Ekran Baskısı ve BCSC metotlarının akım gerilim eğrileri

## **7. TEST , KALİBRASYON ve DİĞER MALZEMELER**

### **7.1 Giriş**

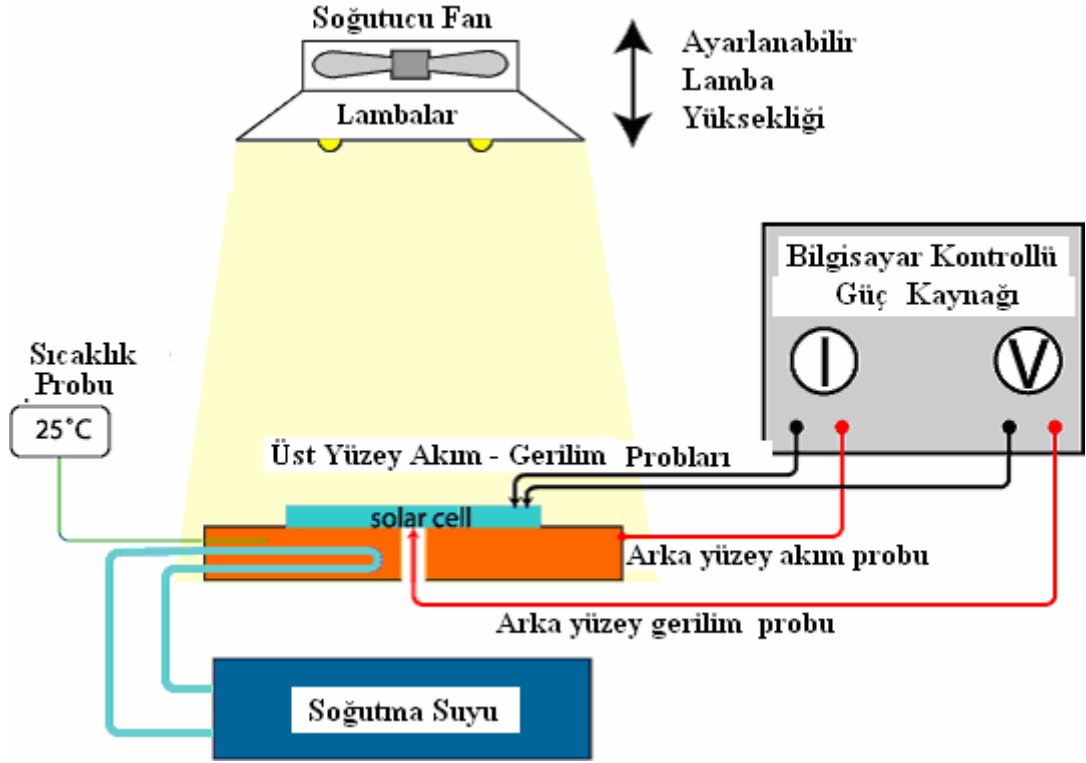
Güneş Pili karakteristiği yeni güneş pili teknolojilerinin gelişimi ve kontrolü açısından önemlidir. Fotovoltaik (FV) alanında yarıiletken malzeme karakteristiklerini belirlemek için pek çok yöntem vardır. Özellikle yeni FV malzemelerin yapılarının incelenmesi için çok ileri düzeyli teknolojiler kullanılmamaktadır. Ancak bu ileri teknolojilerin pek çoğu üretim bandında kullanılmaya uygun değildir [41].

### **7.2 Verim Ölçümü**

En temel güneş pili karakteristiği verimdir. Standart testlerle farklı firmalar tarafından yapılmış güneş pillerinin kıyaslanması esnasında kullanılır.

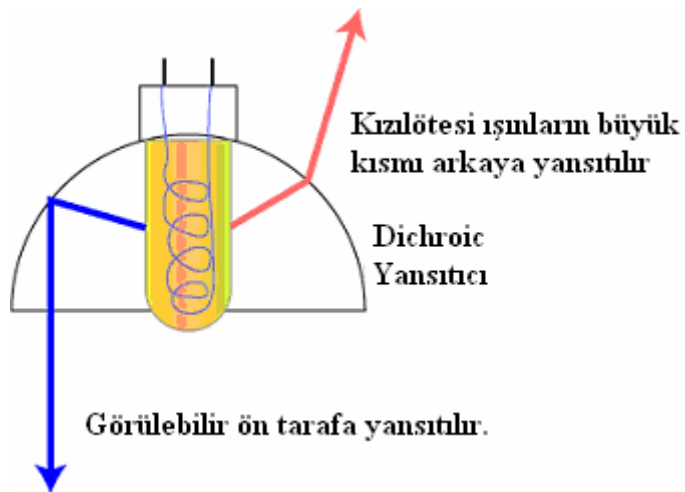
Standart test koşulları, uzayda kullanılacak güneş pilleri için AM.0, yeryüzünde kullanılacak olanlar için AM1.5, ışık yoğunluğu  $1000 \text{ W/m}^2$ , bir güneş aydınlanmasında), Pil sıcaklığı  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $300 \text{ K}$  değil), tüm bu koşulları aynı anda sağlamak zor ve pahalıdır. Bir çok test laboratuvarı bu koşulları sadece ana çerçeveleriyle sağlayan düzeneklere sahiptir. Bir çok üretici firma ve araştırma enstitüsü periyodik olarak cihazlarının karakteristiklerini sertifikalı laboratuvarlara ölçtürmemektedir.

Bu testler sonucunda ispatlanmış verimlilik değeri, testleri yapan firmanın ve test tarihini içerecek şekilde üreticiye bilgi verilir. Bu ölçümlerin yapılması için Şekil 7.1'deki test düzeneği kullanılır.



Şekil 7.1: Test Düzenegi

Bu sistemde ışık yoğunluğu lambanın aşağı yukarı hareketiyle (gücünün ayarlanmasıyla da gerçekleşebilir.) gerçekleştirilir. Tungsten-Halojen lampa kullanıldığında daha güneş ışığına göre daha çok kırmızı ışık ve daha az görülebilir ve mor ötesi ışık üretilir. Bunun için lampa dichroic yansıtıcı adı verilen seçici bir cam içine konulur ve kırmızı ışıkların bir kısmını lambanın arkasına doğru yansıtır. Şekil 7.2’de bu lampa gösterilmiştir [42].

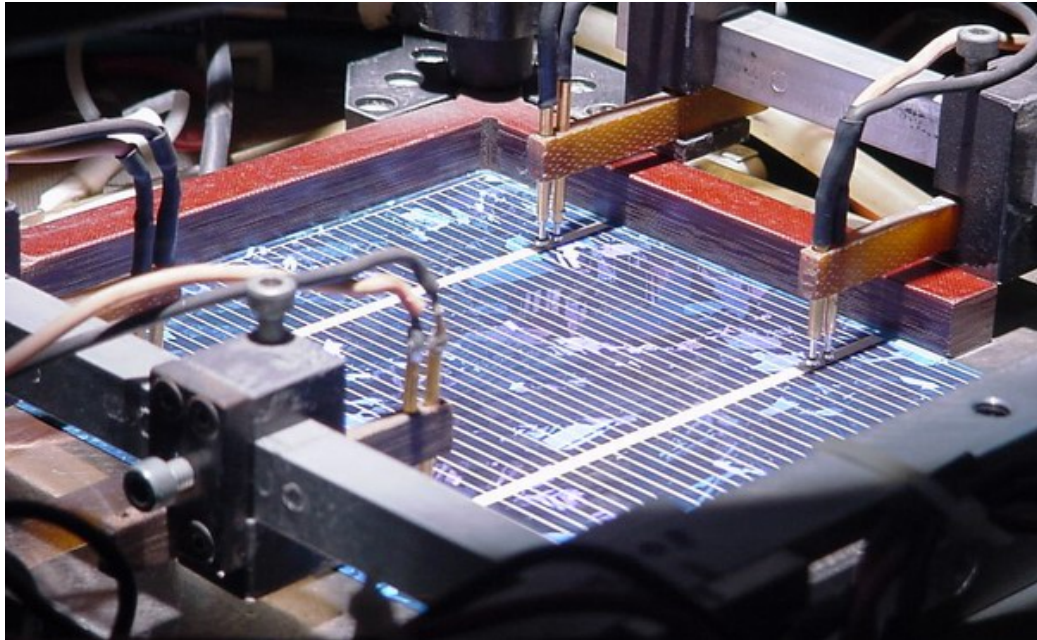


Şekil 7.2: Yansıtıcılı Tungsten lampa

AM 1.5'ten sapmaları ölçmek için, ASTM E973-91 test metodu kullanılır kullanılan yapay ışık kaynağının spektrumu ile standart spektrum arasındaki farklar göz önüne alınarak düzeltmeler yapılır [43].

Sıcaklık kontrolü metal soğutucular ve su kullanılır sistem içindeki ısı çiftiyle pil sıcaklığı 25 °C' e sabitlenir. Sıcaklık kontrolündeki hatalar  $V_{oc}$  de hatalara neden olur.

Ölçüm sırasında problemlerin temas noktalarında hatalar oluşması durumunda FF,  $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$  değerleri hataları ölçülebilir.(FF bazen silisyum piller için bir güneş altında maksimum değer olan 0,85 çıkabilir) Bu durumda Şekil 7.3'te görülen düzenekteki gibi problemler birazcık ileri kaydırılarak kontrol ikinci bir ölçüm yapılır.



**Şekil 7.3:** Dört proflu Ölçüm Düzeneği

Seri dirençleri ölçmenin en kolay yolu IV eğrisini ideal diyot denklemine uydurmaktır.

### 7.3 Modül Kalite Testleri

Uluslar arası Elektroteknik Komisyonunun (International Electrotechnical Commission) (IEC) 82 numaralı Teknik Komitesi (TC-82) Kristalize silisyum güneş pilleri için standart oluşturmuştur. IEC 1215 numaralı standart daha sonra IEC 61215 olarak revize edilmiştir. Şu sıralarda TC-82, IEC 61215 üzerinde de bazı

çalışmalar yapmaktadır bu taslak FV endüstrisi için önemli olduğundan hazırlanan taslağa göre yapılacak testler aşağıda kısaca belirtilmiştir [44].

### **7.3.1 Termal Döngü Testi**

Bir termal döngü, -40 °C de en az 10 dakika bekletilen pilin akabinde 85 °C de 10 dakika tutulmasıdır. Modül sıcaklığındaki değişim bir saat içinde 100 °C'yi geçmemelidir ve test en az 6 saat sürdürülmelidir. Bu testin amacı dizayn zayıflıklarının saptanmasına ilişkindir.

### **7.3.2 Nemli Sıcaklık Döngüsü**

Bu döngü 85 °C lik sıcaklıkta %85 bağıl nem oranındaki bir ortamda güneş pilinin 1000 saat bulundurulmasıyla başlar. Daha sonra 25 mm lik buz tabasının 2400 Pa'lık mekanik yük testiyle devam eder.

### **7.3.3 Morötesi (Ultra Viyole) Işığa Maruz Bırakma**

Herhangi bir testten önce modül kısa bir süreliğine mor ötesi (UV) maruz bırakılır. Bu işlemden sonra 50 termal döngü ve 10 nemli-dondurma çevrimi gerçekleştirilir.

## **7.4 Güvenilirlik Testi**

Kalite testleri bir çeşit hızlandırılmış testleridir ve güvenilirlik testi olarak algılanmamaları gerekir. Güvenilirlik testlerinin bir bölümü hızlandırılmış testlerin modül başarısızlığa uğrayana kadar uzatılması şeklinde yapılırken bazen de kalite testinin üstüne nemli sıcaklık testinin yüksek gerilim koşulları altında yapılması gibi ek bir yük daha bindirilerek yapılır.

## **7.5 Modül Sertifikasyonu ve Ticari Hizmetler**

Ürün sertifikasyonu ürünlerin akredite edilmiş laboratuvarlarda test edilerek, performans ve uyumluluklarının onayı safhalarını kapsayan resmi bir prosestir. Bu işlemler diğer endüstriler için uzun zamandır yapılıyor olmasına rağmen FV endüstrisi için oldukça yenidir. FV modüller için güvenlik sertifikaları 20 yıldan beri verilmektedir ancak kalifikasyon testlerine bağlı olarak verilen sertifikalar ancak son 10 yılda ortaya çıkmıştır. Bunun örneği Fotovoltaikleri Küresel Onaylama Programıdır. (Global Approval Program for Photovoltaics). (PV GAP)



Bir çok bağımsız FV modül test laboratuvarı vardır. Bunların bazıları;

ASU Photovoltaic Testing Laboratory, Mesa, AZ, USA

- European Commission Joint Research Centre, Environment Institute, Renewable Energies Unit, Ispra, İtalya
- TÜV Rheinland, Berlin/Brandenburg, Almanya
- Underwriters Laboratories, mc., Northbrook, IL, USA
- VDE Testing and Certification Institute, Olfenbach, Almanya

## **7.6 Diğer Malzeme Çeşitleri**

### **7.6.1 Galyum Arsenid (GaAs)**

Bu malzemeyle laboratuvar şartlarında %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcılı olanlarda) verim elde edilmektedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemli GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcılı sistemlerde kullanılmaktadır [16].

### **7.6.2 Amorf Silisyum**

Kristal yapı özelliği göstermeyen bu silisyum pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 mertebesinde. Amorf silisyum ışığı kristal silisyumdan daha fazla emebilmektedir. Bu nedenle daha ince tabakalar halinde üretilebilirler. Bu ince tabakalar daha sonra dilimlenerek paneller içerisindeki hücrelerde kullanılabilirler. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılan amorf silisyum güneş pilinin bir başka önemli uygulama sahasının, binalara entegre yarısaydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üretici olarak kullanılabilmesi tahmin edilmektedir. Bu uygulamalarla birlikte kullanım alanları artmaktadır [45].

### **7.6.3 Kadmiyum Tellürid (CdTe)**

Çok kristal yapıda bir malzeme olan CdTe ile güneş pili maliyetinin çok aşağılara çekileceği tahmin edilmektedir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde %16, ticari tip modüllerde ise %7 civarında verim elde edilmektedir [16].

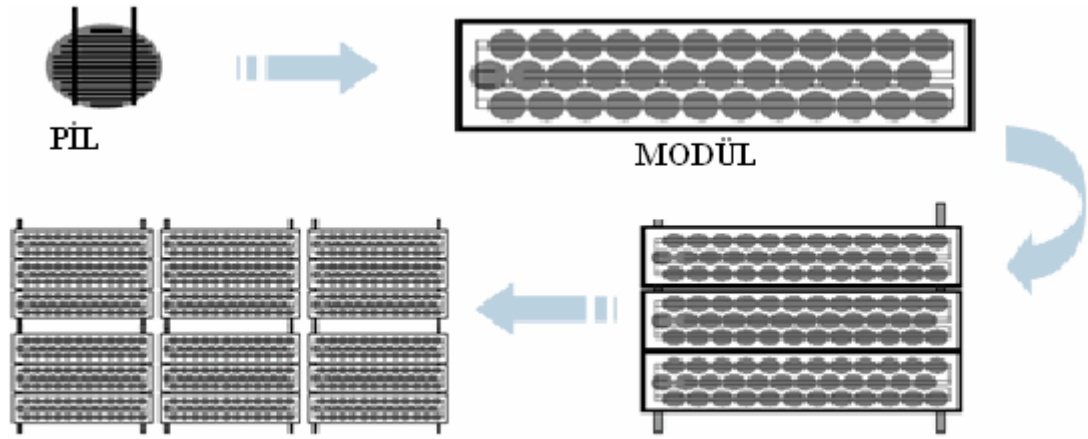
#### **7.6.4 Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe<sub>2</sub>)**

Bu çok kristalli yapıya sahip pilde laboratuvar şartlarında %17,7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip bir modülde ise %10,2 verim elde edilmiştir [16].

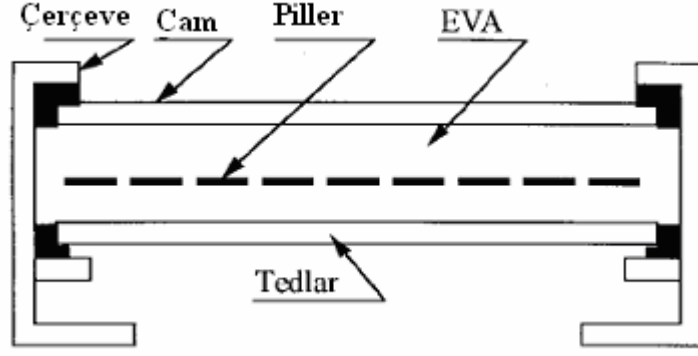
## 8. TİCARİ PV MODÜLLERİNİN MALİYETİ VE UYGULAMALARI

Tipik bir kristal Si güneş pili, maksimum güç noktasında 0.5 V'luk bir voltaj üretir. Bir modül içerisindeki piller genellikle pratik bir uygulama için gerekli olan voltajı üretmek amacıyla seri bağlanırlar. Çoğu endüstriyel modül bugün 12-V'luk aküleri yüklemek için 36 seri-bağlı pilden oluşur. Şekil 8.1'de bu yapı gösterilmiştir.

Tipik bir PV modülünün kesiti Şekil 8.2 deki gibidir. Piller (hücreler) , bir sandviç yapılı cam/kapsül levha/hücreler/kapsül levha/arka substrat içine yerleştirilir. Gelen ışığın dış yüzeydeki cam tarafından soğurulmasını engellemek amacıyla cam düşük demir içerir ve dolu mekanik zorluklara karşı kimyasal ya da termal olarak temperlenerek dayanıklılık kazanması sağlanır. Kapsül levha, cam üzerine lamine edilebilen şeffaf bir polimerdir. En sık kullanılan kapsüller, polivinil büteril yada etil vinil asetattır. Arka substrat için, birçok materyaller kullanılır: aniyonize alüminyum, cam, yada Mylar veya Tedlar gibi polimerlerdir.



Şekil 8.1: Pil ve Modül



**Şekil 8.2:** PV modülünün kesiti

Ticari olarak mevcut olan PV modüllerinin fiyatı 3.5-4.5 \$/Wp dir. Beş farklı pil üreticisinden alınan 1997 yılına ait ortalama maliyet dökümü Tablo 8.1’de gösterilmiştir. Toplam modül maliyetinin, %46’sı silikon plaka (wafer) , %24’ü pil üretimi ve %30’u modül üretiminden kaynaklanmaktadır.

**Tablo 8.1:** Maliyet Ayrıntıları

Toplam - Maliyet \$/W	Silisyum hammaddesi	Kristalleşme	Levhalama	Hücre üretimi	Modül üretimi
4	0.38	0.73	0.73	0.96	1.2

1993 yılındaki tahminlere göre 2000 yılı için ortalama modül maliyeti 2.4 \$/W olacaktır. Ancak bu maliyet indirimini elde etmenin yolu açıklanmamıştır [46]. Avrupa projesi APAS RENA CT94 0008 çerçevesinde henüz tamamlanmış bir çalışma 500 MW/p/y ye doğru büyüyen pazar boyutunun , tabaka (wafer) tipi ve pil işleme bağı olarak kristalize silisyum güneş pillerinin maliyetinde 0.95-1.73 \$/Wp arasında indirim yol açacağını belirtmiştir [47].

Önceki bölümde anlatılan pil üretim teknolojileri üzerinde maliyet analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 8.2’de gösterilmiştir.

Durum 1: EFG Si Levhaları, Basılı Temaslar n=%15

Durum 2: Doğrudan Katılaştırılmış Çoklu-Si, Screen Printed Kontaklar n=%15

Durum 3: Cz Tekli-Si, BCSC n=%18

Durum 4: Cz Tekli Si, Screen Printed Kontaklar n=%16,

Durum 5: Tekli Si, MIS-Temaslı , n=%17 tüm durumlarda levha boyutu 12,5x12,5 kalınlık 250 µm’dir.

**Tablo 8.2:** Maliyetler Karşılaştırması

Üretim Basamağı	D1	D2	D3	D4	D5
Külçe Büyümesi	0,37	0,37	0,73	0,82	0,78
Dilimleme (Wafering)	0	0,29	0,24	0,28	0,28
Pil Fabrikasyonu	0,15	0,15	0,19	0,16	0,24
Modül Fabrikasyonu	0,43	0,40	0,37	0,41	0,43
Fabrika Fiyatı	0,95	1,21	1,53	1,67	1,73

Bu sonuçlar, EFG prosesiyle üretiminin dilimleme işlemine ihtiyaç duymaması nedeniyle en ekonomik olduğunu göstermiştir [31].

Bugün, PV modülleri, uzak alanlar, telekomünikasyon, su pompalama, trafik sinyalizasyonu, solar teraslar ve bunun gibi amaçlar için temel olarak tek başına duran, elektrik enerji kaynağı olarak uygulanır. PW güç santralleri de büyük ölçekli elektrik üretimi için bir seçenektir. Her hangi bir tipteki güç santralleri için kritik parametrelerden biri enerji geri ödeme zamanıdır. Fotovoltaik modüllerin ( $T_{EPB}$ ) enerji geri ödeme zamanı, bir modülün üretimini için gerekli tüm yatırımın , modülün sağlayacağı bir yıllık enerji çıkışına oranıdır.

Enerji geri ödeme zamanı, üretim işleminde direkt olarak tüketilmiş enerjiye, temel işlem materyallerinde gizli olan enerjiye (substratlar, metaller, kimyasallar, gazlar, vb.), PV modüllerinin enerji dönüştürme verimliliğine ve bir PV güç santrali sahası üzerindeki solar aydınlatmaya bağlıdır.

### 8.1 PV Sistemin Şebeke Sistemiyle Ekonomik Kıyası

Bu örnekte günlük elektrik enerji tüketimi yaklaşık 65 kWh küçük bir işletme incelenmiştir. Bu tüketime karşılık gelen aylık elektrik faturası tüketimi 270 YTL dir. 42 adet 120 W'lık modüllerden 5 kW'lık bir PV sistemi oluşturulmuştur. Kurulum masrafları, kablolar , ölçü aletleri ve inverterler dahil olmak üzere maliyet Watt başına 10 YTL kabul edilmiştir. Toplam maliyet 50.000 YTL olmaktadır.

- PV sisteminin (yıllık ortalama) günlük enerji üretimi yaklaşık olarak 25 kWh'tır.

- Sistemin günlük üretimi kazancı mevcut fiyatlara göre (bir kWh için 0,16 YTL) 4 YTL , aylık 120 YTL'dir.
- Aylık fatura 150 YTL ye iner.
- 50.000 YTL'nin konut kredisi faiziyle (% 4,6 yıllık) borç alındığını kabul edersek, ana paranın yanında , aylık ödenmesi gereken faiz 190 YTL'dir.
- 50.000 YTL harcayarak faturanızı 340 YTL'ye çıkarmış olursunuz.
- Başka bir açıdan bakılırsa; 50.000 YTL %16 aylık faiz oranıyla bankaya yatırıldığında aylık net getirisi 560 YTL olur.

## 8.2 Jeneratör ve PV Modülü Karşılaştırılması

PV sistemler şebekeden bağımsız çalışabilir. Sarf malzemesi, gürültü kirliliği yok, estetik görümlü ve çevre dostudur.

Jeneratör mekanik bir cihazdır, sarf malzemeleri vardır. Enerji için düzenli yakıt beslemesine ve bu işlem içinde düzenli işgücüne ihtiyaç duyar. CO<sub>2</sub> emisyonuna neden olur ve yıllık periyodik bakımları mevcuttur.

Bir karavanda kullanılmak üzere günlük 1000-1500 Wh arasında mevsime göre değişiklik gösteren yüklerin (mini buzdolabı, televizyon ve lambalar) beslenmesi için PV sistem ve Jeneratör arasında kıyaslama yapılmıştır.

PV Sistemi: 2 adet 125 W'lık çoklukristal güneş modülü + 500 W inverter +  
2 adet 12 V 104 Ah akü + 4 Adet 15 W tasarruflu Lamba+ Şarj Regülatörü

Yatırım Maliyeti: **4750 YTL**

10 Yıl Boyunca Sarf Malzeme ve Yakıt İhtiyacı Yok. 10 Yıldan sonra eğer  
Aküler yetersiz kalırsa değiştirilir. Maliyeti 606 Euro

Jeneratör

Yatırım Maliyeti 500 YTL (Orta Kalite)

Jeneratör 1 yılda 475 Saat Çalışıyor ve saatte 1 lt Süper benzin tüketiyor.

475 \* 3 YTL/lt.benzin = **1425 YTL**

3.Yıl Sonunda ;

PV Paketi İçin: Yatırım + Enerji Maliyeti Toplam: 4750 YTL

Jeneratör İçin : Yatırım + Enerji Maliyeti Toplam: 4775 YTL

Bu tür uygulamalarda PV sistemleri kullanmak daha konforlu olduğu içinde tercih edilmektedir [48].

### 8.3 Alçak Gerilimde Dağıtım

Kablolar modüllerden sağlanan gücün elektrikli cihazlara iletimini sağlar. Kablolarda ki dirençlerden ötürü gerilim düşümü meydana gelir. Güneş pili sistemlerinde bu gerilim düşümü göz önüne alınarak kablo kesitleri seçilmediği durumlarda sistemde hatalar oluşur.

Kablo kesitleri tablolardan seçilerek veya denklemler yardımıyla hesaplanır. Tablo 8.3'te standart kablo ölçüleri ve çok fazla ısınmadan taşıyabilecekleri akım taşıma kapasiteleri verilmiştir [49].

**Tablo 8.3:** Standart Kablo Ölçüleri

Kesit (mm <sup>2</sup> )	Akım (A)
1,0	10
1,5	15
2,5	20
4,0	30
6,0	35
10,0	50
16,0	70
25,0	90

#### 8.3.1 Tablo Yardımıyla Minimum Kablo Kesiti Seçimi

Tablo 8.4 ve 8.5'te standart kablolarına göre değişik güçler ve gerilimler için kablo uzunlukları verilmiştir.

**Tablo 8.4:** 12 V 'luk sistemde %5'lik gerilim düşümüne göre değişik güçlerdeki kablo uzunlukları.

12 V'luk Sistem		Maksimum Kablo Uzunluğu (m)						
Kablo	Yük (W)	24	36	48	60	72	96	120
Kesiti	Akım (A)	2	3	4	5	6	8	10
1,5		12	8	7	5	5	4	3
2,5		20	13	10	8	7	6	5
4		31	21	16	13	11	8	7
6		46	31	23	19	16	12	10
10		76	51	38	31	26	20	16

**Tablo 8.5:** 24 V 'luk sistemde %5'lik gerilim düşümüne göre değişik güçlerdeki kablo uzunlukları.

24 V'luk Sistem		Maksimum Kablo Uzunluğu (m)						
Kablo	Yük (W)	48	72	96	120	144	192	240
Kesiti	Akım (A)	2	3	4	5	6	8	10
1,5		23	16	12	10	8	7	5
2,5		38	26	20	16	13	10	8
4		61	41	31	25	21	16	13
6		91	61	46	37	31	23	19
10		151	101	76	61	51	38	31

Örnek 8.1 : 24 V, 116 W'lık bir yükü 30 m'lik bir kablo ile beslemek gerekirse, minimum kablo kesiti kaç mm<sup>2</sup> olmalıdır ?

116 W'a en yakın bir üst güç değeri 120 W. 30m'nin üzerindeki bir üst mesafe 37 m. Kablo kesiti 6 mm<sup>2</sup> seçilir.

### 8.3.2 Denklemlerle Minimum Kablo Kesiti Seçimi

Elektriksel güç ifadesi

$$P (W) = V (V). I (A) \quad (8.1)$$

Denklem 8.1'de verilen güç ifadesinden akım bulunur ve Denklem 8.2'de yerine konarak minimum kablo kesiti bulunur.



$$I \times \ell \times 0,04 \div V_{dr} = d_{min} \quad (8.2)$$

I: Maksimum akım (A)

$\ell$  : Kablo uzunluğu (m)

$V_{dr}$  : İzin verilebilir maksimum gerilim düşümü

$d_{min}$ : Minimum kablo kesiti ( $mm^2$ )

Örnek 8.1'deki sistem için minimum kablo kesitini denklem yardımıyla hesaplırsak;

$$116 \div 24 = 4,8 \text{ A}$$

$$4,8 \times 30 \times 0,04 \div 12 = 4,8 \text{ mm}^2$$

En yakın standart kablo  $6 \text{ mm}^2$ 'dir.

Kabloda meydana gelecek gerilim düşümü denklem 8.3'ten bulunur.

$$I \times \ell \times 0,04 \div V_{dr} = d_{min} \quad (8.3)$$

#### 8.4 Akü Seçimi

Aküler gün boyunca şarj edilerek güneş battıktan sonra güç kaynağı olarak kullanılırlar. Aküler ayrıca gün içindeki dalgalanmaları da engeller. Kapalı havaların arka arkaya kaç gün sürdüğünün belirlenmesi ile aşağıdaki denklemle gerekli akü kapasitesi bulunur.

$$\boxed{\text{Elektrik ihtiyacı (Wh /gün)}} \times \boxed{\text{Depo yapılacak periyot (gün sayısı)}} \div \boxed{12 \text{ (V)}} = \boxed{\text{Gerekli Güç (A h , 12 V)}} \quad (8.4)$$

##### 8.4.1 Akü Özellikleri

Akü seçimi yapılırken ihtiyaç duyulan (Ah birimli) enerji ve akünün kullanılabilir deşarj derinliği en önemli iki parametredir.

Deşarj derinliği üretici tarafından belirlenir. Akülerin ömrü bu deşarj seviyesine bağlıdır. Akü sayısı denklem 8.5'ten hesaplanabilir.

$$\boxed{\text{Toplam Gerekli Güç (Ah 12 V)}} \div \boxed{\text{Bir akünün kapasitesi (ah)}} \times \boxed{\text{Deşarj derinliği}} = \boxed{\text{Akü Adeti}} \quad (8.5)$$

Örnek 8.2:

Günde 716 Wh lık elektrik ihtiyacı olan bir sistem için 110 Ah lik kapasitesi olan , %60 deşarj derinliğine sahip aküler seçilecektir. 5 günlük besleme yapabilmesi için seçilmesi gereken akü sayısı kaçtır ?

Toplam yük;  $716 \times 5 = 3850$  Wh

12 V luk akülerin beslemesi gereken yük;  $3850 / 12 = 298$  Ah

Akü sayısı;  $\frac{298}{110 \times \frac{60}{100}} = 4,52$ . 5 adet akü gereklidir.

## 8.5 FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR

Fotovoltaik sistemler bir önceki bölümdeki gösterilen ekonomik kriterlerde göz önüne alınarak genellikle elektriğin ulaşmasının mümkün olmadığı noktalarda, fotovoltaik sistem ile besleme yapmak, işletme bakım maliyetlerinin sıfıra yakın olması nedeniyle oldukça yararlıdır.

### 8.5.1 Binalarda Yapılan Uygulamalar

Geniş alanlar tutan solar enerji malzemeleri binaların yapısına monte edilir. Bunun en büyük örneklerinden biri New York Times Square binasıdır. Güneş mimarisinin de önde gelen örneklerindendir.

Binaların ön yüzün ve çatısına monte edilen panellerle evlerin elektrik enerjisi ihtiyaçları da karşılanmaktadır. Almanya , Hollanda , İsveç ve UK da yapılan araştırmalar vardır. Özellikle Almanya bu konuda lider ülke konumundadır.

Almanya da 1991 de yapılan araştırma sonucunda  $650 \text{ km}^2$  lik PV sistem kurmak için uygun çatı alanı olduğu saptanmıştır. Bu da 52 GW'lık santrale eş değerdir. Binaların ön yüzlerini de eklersek bu potansiyelin artacağı da kesindir. Bu sistemin uygulandığı bir bina Şekil 8.3 de verilmiştir [48].

Bu sistemin Avantajları;

Herhangi bir toprak parçası almanız gerekmemektedir ve iletim kayıpları en aza indirilmiştir.

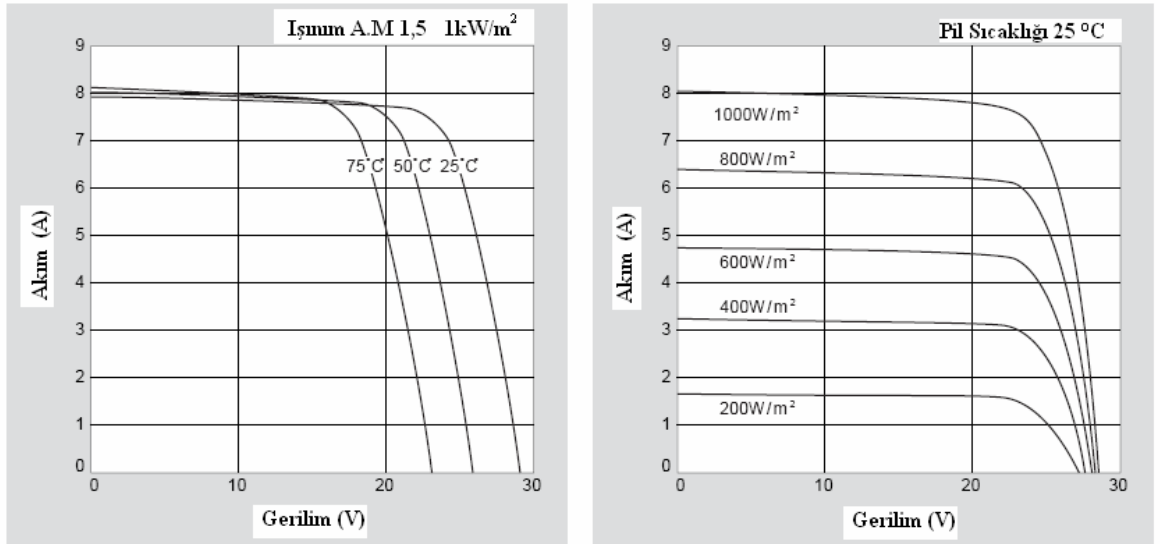


Şekil 8.3: Bina uygulaması

### 8.5.1.1 Müstakil Bir Ev İçin Fotovoltaik Sistem Dizaynı

Günlük elektrik enerjisi tüketimi ortalama 6500 kWh olan Antalya'daki bir evin elektrik ihtiyacı güneş pillerinden karşılanmak istenmektedir. Buna uygun sistemin dizaynı aşağıda gösterilmiştir.

Bu işlem için özellikleri Şekil 8.4 ve Tablo 8.6'da belirtilen Kyocera markalı 170 W'lık modüller kullanılacaktır.



Şekil 8.4: Kullanılan modüllerin akım gerilim değerleri

**Tablo 8.6:** Kullanılan Panelin Elektriksel Özellikleri

Maksimum Güç (Pmax)	W	170
Tolerans	%	+10 / -5
Maksimum Güç Gerilimi	V	23,4
Maksimum Güç Akımı	A	7,27
Açık Devre Gerilimi (V <sub>oc</sub> )	V	29
Kısa Devre Akımı (I <sub>sc</sub> )	A	8,03
Voc Sıcaklık Katsayısı	( V/°C )	- 1,09 10 <sup>-1</sup>
Isc Sıcaklık Katsayısı	( A/°C )	3,18 10 <sup>-3</sup>

Modül Sayısının Belirlenmesi;

Kayıplar	
Akü kaybı	%16
İnverter kaybı	%15
Güvenlik payı	%10
Toplam Kayıp	%41

Bir modülden alacağımız net güç  $170 \times 0,59 = 100,3 \text{ W}$

Şekil 8.5'ten alınan değerlere göre, Antalya yıllık ortalama günlük güneşlenme süresi ortalama olarak 4,5 saat alınmıştır [49].

Bir modülden alınabilecek yıllık ortalama günlük güç üretimi;

$100 \times 4,5 = 450 \text{ Wh/gün}$  dür.

$$\text{Modül Sayısı} = \frac{6500}{450} = 14,44 \Rightarrow 15 \text{ adet.}$$

Akü Sayısının Belirlenmesi;

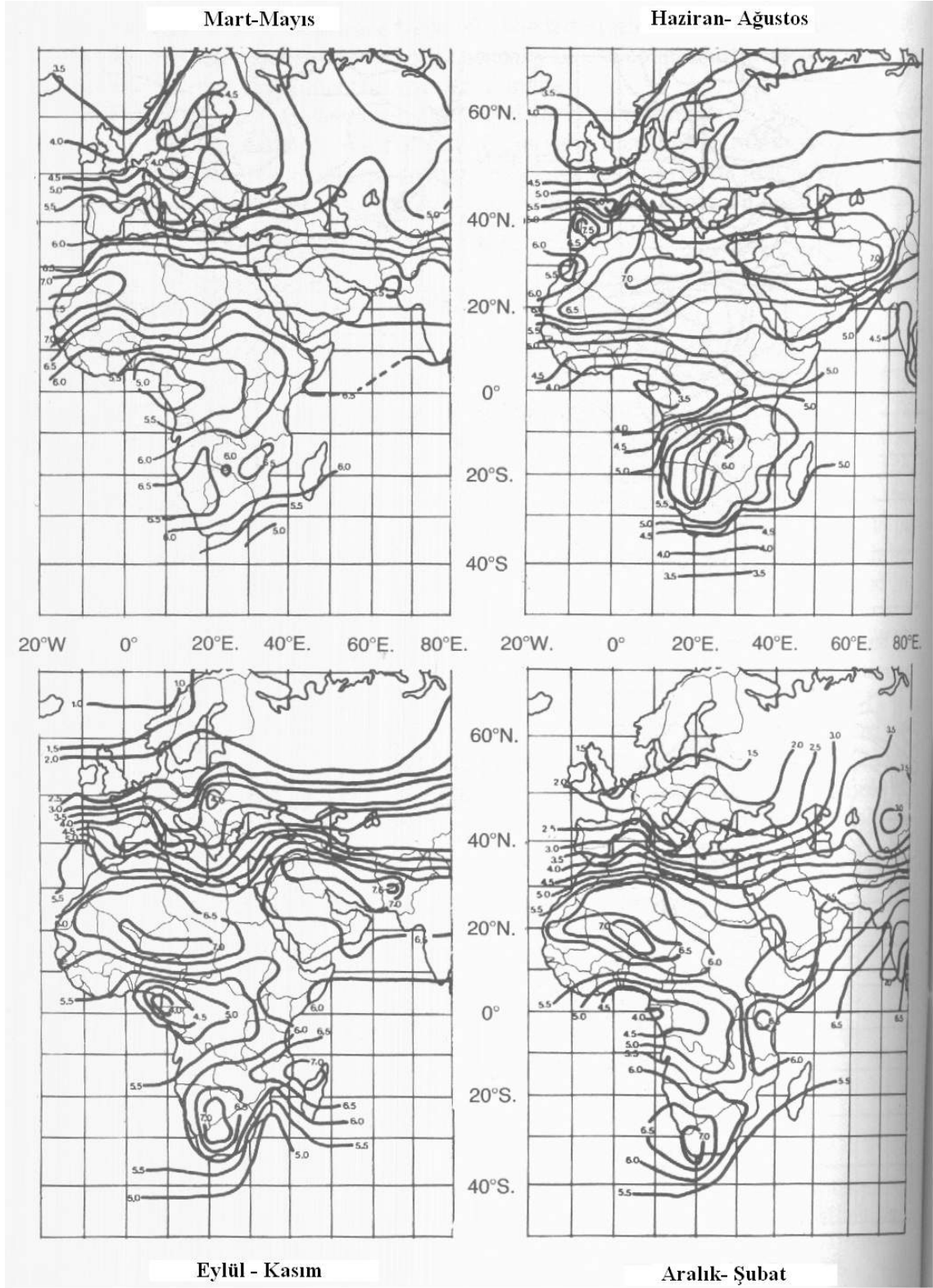
12 V, 120 Ah lik %60 deşarj derinliği olan aküler kullanılacaktır. Aküler iki günlük ihtiyaç göz önüne alınarak belirlenecektir.

İki günlük enerji ihtiyacı  $6500 \times 2 = 13000 \text{ Wh}$

$13000 / 12 = 1083 \text{ Ah}$

Akü sayısı =  $1083 / 120 \times 0,60 = 15 \Rightarrow 15$  adet akü kullanılacaktır.

Gerekli gücü karşılayabilmek için 180 Vdc girişli 10 kVA'lık bir adet inverter kullanılacaktır.

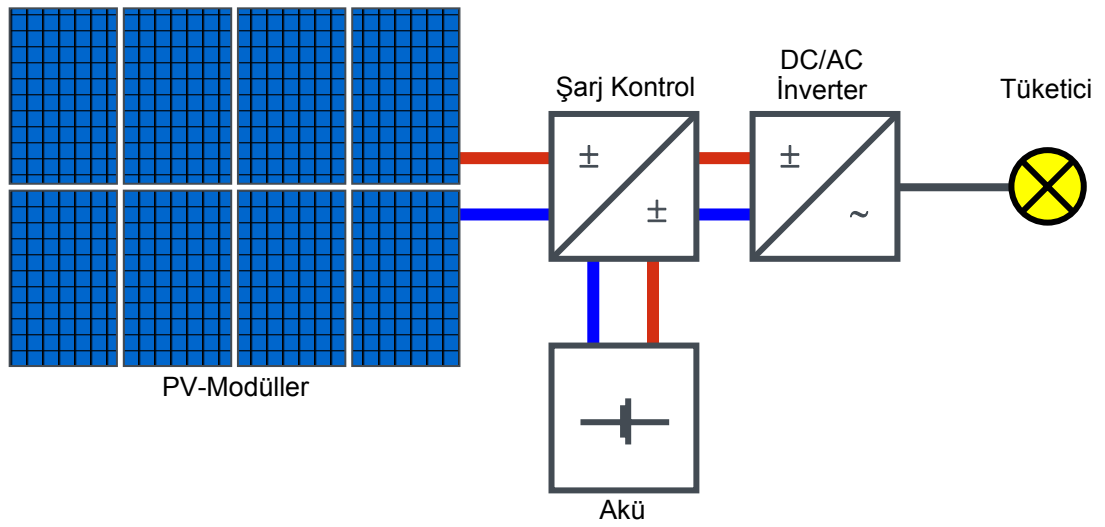
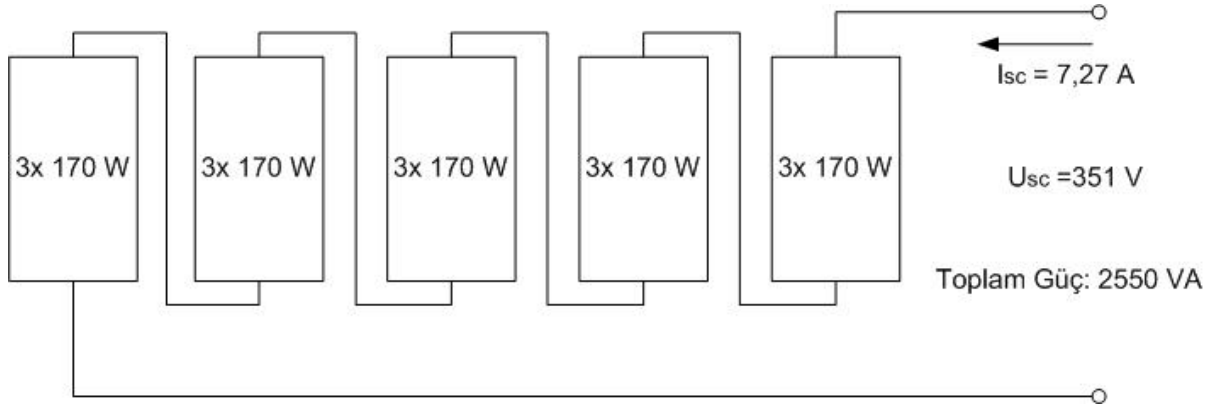


Şekil 8.5: Güneşlenme süreleri

Sistem bağlantı şeması Şekil 8.6'da ve sistemin maliyeti Tablo 8.7'de verilmiştir.

**Tablo 8.7:** Toplam Sistem Maliyeti

Ürün	Özellik	Adet	Fiyat (YTL)	Tutar (YTL)
Güneş Paneli	170 W	15	2100	31.500
Akü	12 V 120 Ah	15	360	5.400
İnverter	180 Vdc 10 kVA	1	4000	4.000
Şarj Regülatörü	Akü Şarj kontrolü	15	40	600
İşçilik + Montaj				2000
<b>TOPLAM MALİYET</b>				<b>43.500 YTL</b>



**Şekil 8.6 :** Sistem Bağlantı Şeması

### **8.5.1.2 Fotovoltaik Sistem Dizayn Edilirken Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar**

Paneller Seri bağlanarak akım düşük değerde tutulmuştur böylece daha küçük kesitli kablolar kullanılmıştır.

Aküler 120 Ah seçilerek panel sayısı ile eşit sayıda akü kullanılması sağlanmıştır. Böylelikle kolayca temin edilebilen akü şarj kontrol kartlarının kullanılması sağlanmıştır.

Aküler 12 V luk seçilmesinde kolay temin edilebilirlik kriteri ve şarj edilirken nominal gerilimlerinin %20 fazlasıyla şarj olmaları şartı göz önüne alınmıştır.

İnvertörün 10 kVA seçilmesinde bu cihazların optimum çalışma yüklerinin %40-60 olması göz önüne alınmıştır.

### **8.5.2 Kırsal Kesimlerde Yapılan Uygulamalar**

Fotovoltaik (PV) uygulamaların çok geniş bir kullanım potansiyelleri mevcuttur. Birleşmiş Milletlerin tahminine göre ekvatorla 20 °C'lik açı içerisindeki bantta bulunan 2 milyon köyün elektrik ve fosil yakıtlara ulaşım imkanı yok [50].

Güneş enerjisi kullanılmasına uygun iklimlerde yaşayan 2 milyar insanın elektrik enerjisini kullanmadığı saptanmıştır. Hatta Avrupa da bile binlerce (özellikle yazlıklar) evin bu şekilde enerji ihtiyacını karşılaması gerektiği saptanmıştır [50].

Rappenecker Hof adlı , (Almanya) 17. yy da çiftlik olarak kullanılan bina otele dönüştürülmüş ve 1987 yılından beri PV sistem kullanılmaktadır. Yeterli güneş ışığında otelin bütün elektrik enerjisi PV sistem karşılarken pik yükler ve kötü hava koşulları içinse diesel jeneratör kullanılmamaktadır. 1988 yılında ki 2797 kWh'lık harcanan enerjinin %77 si PV sistemle karşılanmıştır [51].

### **8.5.3 Su Pompaları ve Sulama Alanlarında**

İhtiyacı olan enerjiyi PV sistemden sağlayan 10000 üzerinde çalışan su pompası olduğu bilinmektedir. Sondaj kuyularından su çekmek, açık kanallardan çevresindeki çiftliklere su dağıtımı gibi uygulamalarda özellikle Hindistan'da çok yaygın bir yöntemdir. Bu yöntemde enerjiyi depolama zorunluluğu yoktur . Su ihtiyacının fazla olduğu kurak dönemde güneş ışığının yeterli olması da bir başka avantajdır [52].

### 8.5.3.1 Güneş Enerjisi İle Su Pompalama Sistemi Uygulaması

Kişi başına günlük su tüketimi 100 litre kabul edilerek 130 kişilik bir köyün içme suyu ihtiyacını karşılamak için yaklaşık 25 metre derinlikten su çekilecektir.

Bu işlemin yapılabilmesi için iki seçenek sunulmuştur.

Birinci seçenek 840 W lık güneş panellerinin kullanıldığı Lorentz PS600 Solar Powered Water Pumping sisteminin kullanılması (paneller, pompa, kontrol cihazları ve kablolarında dahil) , ikinci seçenek ise saatte 2,6 ton pompalama kapasitesine sahip 0,75 HP'lik Şahinler marka (40101-7) pompa ve Teksan markalı R-2000 model jeneratör ve kontrol panosundan oluşan sistemin kullanılmasıdır. Jeneratörün yakıt tüketimi 1,24 L/h Benzindir. Her iki sisteminde günde 5 saat boyunca çalışacağı göz önüne alınmıştır. Tablo 8.8 de sistemlerin maliyetleri gösterilmiştir [53].

**Tablo 8.8:** Su pompalama sistemleri maliyet tablosu

	Güneş Paneli Sistemi	Jeneratör Sistemi
İlk yatırım maliyeti	9000 YTL	1600 YTL
İşletme masrafı	-	1,25 l/h benzin
Faiz Oranı	%16	%16

Sistemler gelecekteki değer metoduyla 2 yıl sonrası için karşılaştırılmışlardır.

Güneş panellerinin kullanıldığı sistemin iki yıl sonra ki değeri;

$$G_{GP} = 9000 (F/P, \%16, 2) = 9000 \times 1,3456 = \mathbf{12.110 \text{ YTL}}$$

Jeneratörlü sistem

Günlük işletme masrafı:  $1,25 \times 5 \times 3 = 18,75 \text{ YTL}$

$$G_{JS} = 1600 (F/P, \%16, 2) + 18,75 \times 365 (F/A, \%16, 2)$$

$$G_{JS} = (1600 \times 1,3456) + 6844 (2,16) = 2153 + 14783 = \mathbf{17.025 \text{ YTL}}$$

$$(F/P, \%i, n) = (1 + i)^n \quad (8.6)$$

$$(F/A, \%i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (8.7)$$



#### 8.5.4 Haberleşme Alanında

Özellikle yerleşim birimlerine uzak baz istasyonlarında sıkça kullanılan bir yöntemdir. Tv ve radyo alıcı-verici istasyonlarında düşük maliyet ve bakım masraflarının ekonomikliği sebebiyle PV sistemler tercih edilmektedir. Şekil 8.7’de bir haberleşme istasyonu görülmektedir.



Şekil 8.7: Haberleşme İstasyonu Uygulaması

#### 8.6 Diğer Uygulamalar

Trafik ışıklarında, yol aydınlatmasında, park bahçe aydınlatmalarında, hesap makinelerinde ve Şekil 8.8 görülen çeşitli mobil uygulamalar vardır.



Şekil 8.8: Bazı Mobil Uygulamalar

## 9. GÜNEŞ PİLLERİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

### 9.1 Giriş

Enerji üretiminin çevreye verdiği hasar uzun bir süredir bilinmektedir, ve bu zararın incelenmesinin önemi gittikçe artan bir konu haline gelmektedir.

Çevreye verilen hasarlar, genel olarak ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır fakat enerji ekonomisinin haricinde yapılmıştır çünkü çevre ortak bir mal olarak değil, herkese açık bir alan olarak görülmüştür. Enerji kaynaklarının yarattığı çevresel zararların ve hasarın onarımı yada geri alınması ile ilgili maliyetlerin toplum tarafından vergi yada yaşam kalitesinin düşmesi şeklinde ödenmesi beklenmektedir. Enerji oluşumunun çevresel zararları önemslenmediği için enerji sektörü kaynak elde edilmesi ile ilgili kararlarını çok güçlü bir şekilde yeni teknolojilere karşı direnç göstermektedir.

Enerjinin oluşumunun harici ve dahili maliyetlerini tanımlamak sadece bütün değişik enerji teknolojilerinin maliyetlerini tespit etmekle ve hesaplamakla mümkün değildir. Bunları hesaplamak için bir yöntem çerçevesi oluşturulur. Bu sistem öncelikle kolay ve herkesin anlayacağı dilden olmalıdır. Ayrıca tüm enerji teknolojilerine de uygulanması kolaylıkla gerçekleştirilmelidir ki bütün enerji sistemleri ve fiyatları eşit şekilde karşılaştırılabilir. Bu yöntem kısaca dış maliyetlerin nasıl bir şekilde türetilmesi, ölçülmesi ve geliştirilmesine yardımcı olur. Bu yöntemin birinci basamağı bütün dış maliyetin ve enerji teknolojilerinin tanımlanması ve yakıtın çıkartılması, işlenmesi, dönüştürülmesi, enerjinin dağıtımı, kullanımı ve son atık halini kapsar. Bu kirlenme oranları hesaplanarak, çevreye verilen hasar miktarı tahmin edilebilir ve bunlarla ilgili maliyetlerde değişik ekonomik değerlendirme şekilleri içerisinde hesaplanabilir. Günümüzde şuan kullanılan bilgisayar modelleri bu tür bilgileri işleme koyabilir ve çevresel maliyetleri hesaplayabilir.

Bütün enerji kaynaklarının toplam toplumsal maliyeti hakkındaki bu bilgiye dayanarak, kamu hizmeti düzenleyicileri ve karar verme yetkisi olanlar toplum ve çevre için en uygun değerlere sahip enerji teknolojisini seçebilir [54].

Teoride, bu yaklaşım çok iyi işleyebilir ancak günümüzde ekonomik kıstaslar ön planda olduğu için yukarıda anlatılan işlemin gerçekleştirilmesi için zaman alabilir.

Elektrik oluşumunda kullanılan harici maliyetler anlatılmış olup, ve bunun yanında bu maliyetlerin hesaplanmasında kullanılan yöntem ve bu yöntem için gerekli olan zorunlulukların altı çizilmiştir.

## 9.2 Harici Maliyetler

Harici maliyetler genel olarak çevresel olan ve çevresel olmayanlar olarak ikiye ayrılmıştır. Çoğunlukla bütün harici maliyetler çevresel maliyetler başlığı altında toplanmıştır çünkü bu grup dış maliyetlerin en önemli malzemelerini kapsar örneğin; insan sağlığı ve yaşamının değeri, sera gazları ve küresel ısınma. Halen çevresel olmayan maliyetlerin önemliliği ve hangi çerçevede dış maliyetlere katılıp katılmaması hakkında tartışmalar vardır. Çevresel olmayan maliyetler dört gruba ayrılmıştır ve bunlar: güvenlik durumu, doğal kaynak yönetimi, istihdam ve siyasal-ekonomik şartlar. Bu duruma göre, burada toplumsal maliyetler vardır ve tüm enerji teknolojilerinin maliyetlerini hesaplarken bunlar göz ardı edilmemelidir [55].

Çevresel etkiler ve bunlarla ilgili harici maliyetler 4 kategoriye ayrılır: Önemsiz maliyetler, ufak maliyetler, önemli maliyetler ve büyük maliyetler. Yakıt analizinin her bir safhasında çevresel etkilerin fiziksel büyüklüğüyle ilgili bir tahmin bu 4 kategoriyi kullanarak yapılabilir. Bu dış maliyetlerden en göze çarpanı fosil yakıt ve yakıt üretiminden kaynaklanan havanın kirliliğinin, insan sağlığına verdiği zarar ve nükleer güç santrallerindeki radyasyon riskidir. Havayı kirleten maddelerin çevreye olan zararları büyük bir maliyete sebep olur. “Sera etkisi” çoğunlukla fosil yakıtlarının karbondioksit emisyonlarından oluşmuş ve küresel ısınmanın sonucu olarak incelenmektedir fakat hala büyük maliyetlere sebep olmaktadır [56].

Diğer çevresel etkiler; asit yağmurları, insan sağlığına ve hayatına karşı tehlikeli, yıkıcı olaylar büyük maliyetlere sebep olmaktadır. Operasyonel kazalar yada radyasyon riskleri önemli maliyetlere sebep olabilir. Buna rağmen diğer çevresel maliyetler mesela ses, sağlık ve güvenlik materyal maliyetleri, girdilere bağlı olarak önemsiz maliyetler olarak görülebilir [56].

### 9.3 Güneş Pillerinin Çevresel Maliyetleri

Bölüm 6.1’de anlatılan basamakların her birinde enerji ve maddi girdiler vardır ve bunlar sermaye ekipmanları gerektirmektedir ve ayrıca her biri potansiyel tehlikedir. İlk basamak madencilere ve dizel yakıt ve makinelerle karşı tehlikeli bir maden operasyonudur. Metalurji-grade silisyum demir sanayi için büyük miktarlarda yapılmış olup ufak bir kısmı da yarı iletken sanayine girdi olarak verilmiştir. Bu maddenin dışarı en çok yaydığı şey silis tozudur ve bu akciğer hastalıklarına sebep olabilir, ayrıca burada bir kıymetli enerji girdisi yer almaktadır. Silisyum maddesinin arındırılması silan gibi tehlikeli maddeler içerebilir (silisyum+metan), az miktarlarda diboron ve fosfin gibi zehirleyici kimyasallar içerebilir. Bu maddeler mikro elektronik sanayinde kullanılır ve bunların izlenmesi ve kontrol edilmesi kolaydır [57].

PV modüllerinin üretiminde kullanılan enerji ve PV sisteminin diğer malzemeleri konvansiyonel enerji kaynaklarından üretilmiştir ve böylece sera gazlarının ve asidik gazların yayılımlarıyla ilişkilidir. Silisyum tabakalı (wafer) PV modüllerinin enerji içerikleri Palz ve Zibetta tarafından Photowatt fabrikasında ölçülmüştür ve 235 kWh(e)/m<sup>2</sup> ve 1990 teknoloji için 1.5 MWp her üretim yılı olarak ölçülmüştür. Karbondioksit yayılımı her gigawatt için yıllık 400000 ton olarak hesaplanmıştır. Bu karbondioksit yayılımı gigawatt başına yılda 9 milyon ton emisyon yapan modern ve daha verimli kömür santralleriyle karşılaştırılabilir. Kaynamış su reaktörleri gigawatt başına yıllık 75000 ton civarında CO<sub>2</sub> yaymaktadır [58], çoğunlukla yakıt oluşumu ile, fakat bu tahmini değer onay alınmayan atık iyileştirme ve depolama enerjisini içermemektedir. Yürürlükteki çeşitli PV hücre teknolojilerinin CO<sub>2</sub> yayılımları ve 2020 PV teknolojilerinin tahmin edilmiş değerleri, Tablo 9.1 de gösterilmiştir.

Tablo 9.1 de gösterildiği ve daha önceki konularda anlatıldığı üzere, PV hücreleri için silikon tabakalarından başka teknolojiler de kullanılır. Amorf silisyum hücreleri güneş enerjisi ile çalışan hesap makinelerinde, saatlerde kullanılmaktadır, fakat güç modülleri için daha seyrek biçimde kullanılır. Seramik substratların üzerindeki çoklukristal silikon filmler, ince poli kristal filmler CIS (Copper indium diselenide), ve Kadmiyum telluride (CdTe) ticari üretimin ilk aşamaları olarak değerlendirilir.

Bu 3 madde hakkında bilimsel, teknik, ekonomik ve çevresel eleştiriler Zweibel tarafından yazılmıştır [59].

İnce film silisyum pillerinin çevresel etkileri silisyum tabaka hücrelerine nazaran daha azdır çünkü bu tür hücrelerde kullanılan silisyum miktarı daha azdır.

**Tablo 9.1:** Fotovoltaik malzeme üretimde CO<sub>2</sub> emisyonu.

Pil Malzemesi	Verim	CO <sub>2</sub> kt GW <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>
Tek Kristalli Silisyum	%12	400
Tek Kristalli Silisyum	%16	150
Çok Kristalli Silisyum	%15	100
İnce Film	%14	50
2020 için Tahmin	%30	24

CIS hücresinin hidrojen selenitle olduğu zaman potansiyel bir tehlikesi vardır. Hem CIS hem de CdTe hücrelerinin üzerinde bir kadmiyum sülfat tabakası vardır böylece her iki tip hücrede kadmiyumdan dolayı potansiyel birer tehlikedir. Kadmiyum tehlikeleri en fazla arıtma aşamasında görülür çünkü bu aşamada kadmiyum oksit tozları yayılımı başlar. Aynı işlem üretim sırasında yada bir yangın sırasında tekrarlanırsa PV modülleri kadmiyum içerdiği için tehlikeli olabilir. Bütün bu vakalarda, endüstrilerde kontrol stratejileri ispatlanmış olup, tehlikenin büyüklüğü hücrelerdeki kadmiyum oranlarıyla orantılı olmaktadır.

CIS modüllerinde 0.04 g/m<sup>2</sup> miktarında kadmiyum kullanılmıştır bu orandaki kadmiyum kolayca kontrol edilebilir. Çok fazla miktarda dikkatsizce kullanılan CIS modülleri kadmiyum ve selenyum sızıntısı nedeniyle yeryüzündeki suya karışarak büyük tehlikeler oluşturabilir. Diğer bir taraftan, kadmiyum ve selenyumun nasıl kullanılacağı hakkındaki yönetmelikler modüllerin dönüştürülmesini ve indiyum, kadmiyum ve selenyumun tekrar kullanılmasını sağlar.

Kadmiyum tozu fabrikada çalışanlara kronik olarak tehlike oluşturabilir fakat bunun olmaması için bu tür endüstrilerde ve üretim yapan fabrikalarda yeterli önlemler alınmıştır. Tablo 9.2'de Fotovoltaik malzemelerin tehlikeli emisyonları gösterilmiştir.

**Tablo 9.2:** Fotovoltaik malzemelerin tehlikeli emisyonları

Materyal	Üretim	İşletme	Atık
Silisyum	Silisyum tozu Silanlar Diboron Kaliforniyum Çözeltiler		
CIS	Hidrojen Selenid Kadmiyum oksit Kadmiyum Tozu Selenyum Çözeltiler	Kadmiyum Selenyum (yandıığında)	Kadmiyum Selenyum (geri dönüşüm yapılmadıında)
CaTe	Kadmiyum oksit Kadmiyum Tozu Tellür Çözeltiler	Kadmiyum Tellür (yandıığında)	Kadmiyum Tellür (geri dönüşüm yapılmadıında)

## 10. SONUÇLAR

Kolayca anlaşılacağı üzere tüm enerji kaynaklarının kökeninde güneş enerjisi vardır. Birincil veya ikincil enerji kaynakları güneş enerjisinin türevleridir. Ancak güneş enerjisinin birincil enerji kaynağı olarak kullanılamamasının nedeni güneş enerjisini, ısı yada elektrik enerjisine dönüştürmedeki güçlüklerdir.

Uzay teknolojisine yapılan yatırımların sonucunda güneş enerjisinden elektrik elde edebilen fotovoltaik cihazların doğuşu gerçekleşmiştir.

Güneş pillerinin maliyetini etkileyen en önemli faktör verimdir. Verimin artırılması için modül dizayn ve imalatında direnç kayıpları ve optik kayıplar azaltılmalıdır. Optik kayıpların azaltılması için pil yüzeyleri yansımayı en aza indirecek bir tabakayla kaplanması ve yüzey dalgalandırması işlemi yapılarak pilin etkin bir ışık yakalama sistemine sahip olması sağlanır. Gelen ışığın tümünün pil içinde soğurabilmesi uygun materyal kalınlığı seçilir. Materyal kalınlığı , difüzyon mesafesinde daha kısa olmalıdır.

PC1D programı ile pek çok parametrenin güneş pilinin çıkış akımı ve gerilimi üzerindeki etkisi kolaylıkla görülebilmekte ve pilin fiziksel yapısı çok daha kolay anlaşılabilir.

Foton enerjisiyle ortaya çıkan taşıyıcıların kullanılabilmesi için güneş pilinin bazı bölgelerinin çok iyi pasifleştirilerek dirençlerin sebep olduğu güç kaybının en aza indirilmesi gerekir. Dirençlerden ötürü oluşan kayıpları minimize ederken gölgelenmeden ötürü oluşan kayıplar artırılmak zorunda kalındığı için optimum verim noktası bulunmalıdır.

Günümüzde silisyum güneş pillerinin yaklaşık %90'ı silisyumdan yapılmaktadır. Pil yapısındaki sağlamlık ve sürekli gelişme önümüzdeki 10 yılda da bu durumun değişmeyeceğini göstermektedir.

Ticari güneş pillerinin pek çoğu hala 1970'li yılların sonunda geliştirilen Ekran Baskısı metoduyla üretilmektedir. Bu işlemin avantajları; basitliği, ekipman sağlamlığı ve yüksek iş yapma potansiyelidir. Bu proseste üretilen pillerin verimi

genellikle %15'in altındadır. Emiter yüzeyine seçicilik kazandırılıp, pasifleştirme işlemi yapıldığı durumlarda verimler %17'e kadar yükselir.

Üretim teknolojilerinde en yüksek verim gömülmüş kontaklı güneş pilleri (BCSC) metoduyla elde ediliyor olmasına rağmen bu prosesin ilk yatırım maliyetinin yüksekliği kullanım alanını sınırlandırmıştır.

Elektriğin ulaşmasının mümkün olmadığı noktalarda, fotovoltaik sistem ile besleme yapmak, işletme bakım maliyetlerinin sıfıra yakın olması nedeniyle oldukça ekonomiktir. Güneş pillerinin güvenilirliği hareketli parça içermediği için yüksektir.

Şebekenin ulaştığı bölgelerde günümüz koşullarında güneş pilleriyle elektrik elde etmek ekonomik değildir.

Si imalatı sırasında çevreye CO<sub>2</sub> emisyonu olmakta , Kadmiyum içeren pillerin yapımı sırasında zararlı maddeler ortaya çıkmaktadır fakat bunların kontrol altına alınma sorunu yoktur.

Ülkemizin enerji ihtiyacının sadece %30'unu kendi imkanlarıyla karşılayabildiği günümüz şartlarında dışa olan bağımlılığın azaltılması için güneş enerjisi çok önemli bir kaynaktır. Ülkemizde güneş pili üretimi yapılamadığı için Watt başına maliyetler gelişmiş ülke pazarlarının 2-3 YTL üzerinde seyretmektedir. Önümüzdeki yıllarda büyüyecek olan pazarın ve geliştirilecek teknolojilerin etkisiyle bu fiyatların daha da düşeceği göz önüne alınırsa, çeşitli devlet teşvikleriyle ve en kısa sürede oluşturulacak ölçülebilir hedefleri olan politikalarla enerji ihtiyacımızın bir kısmını güneş pillerinden sağlamak gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Lomborg, B.**, 2001. *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World* , Cambridge University Pres
- [2] [www.german-renewable-energy.com](http://www.german-renewable-energy.com)
- [3] Thema Larousse, 1993. Cilt 3. s 220-221. Milliyet 1993-1994.
- [4] **Feynman, R. P.**, 1985. *QED : The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, Princeton NJ.
- [5] **Green, M.A.**, 1992. *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Application*, University of NSW, Kensington, Australia.
- [6] **Messenger R.A.**, 2004. *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press
- [7] **Yun, T.T.**, 2004. *Impact On The The Power System With A Large Penetration Of Photovoltaic Generation* , *PhD Thesis*, The University of Manchester Institute Of Science and Technology
- [8] **Kılıç A, ve Öztürk A.**, 1984. Güneş ışınımı ve düz toplayıcılar SEGEm ders notları.
- [9] **Loferski, J.J.**, 1993. "The First Forty Years: A Brief History of the Modern Photovoltaic. Age", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **1**, p. 67-78
- [10] **Adams, W.G. and Day, R.E.**, 1877. "The Action of Light on Selenium", *Proceedings of the Royal Society (London)*, **A25**, p.113
- [11] **Fritts, C.E.**, 1883. "On a New Form of Selenium Photocell", *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science*, **33**, p. 97

- [12] **Nix, F.C. and Treptwo, A.W.**, 1939. "A Thallous Sulphide Photo EMF Cell",  
Journal Opt. Society of America, **29**, p. 457.
- [13] **Bell Laboratories Record**, 1955. pp. 232-234.
- [14] **Yanık, E.M.**, 2001. "Photovoltaic Technology: Application For Turkey", p. 2 .  
*Master of Science*, NY Institude of Technology, New York.
- [15] **Boylestad, R. and Nashelsky, L.**,1994. "Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi", MEB. p 1-10.
- [16] **Nizam, O**, 2004. Güneş Enerjisi Sistemlerinde Maksimum Güç Transferi  
*Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Wenham S. R.**, 2007. *Applied Photovoltaics*, James & James/Earthscan
- [18] **Green,M.A.**, 1995. Silicon Solar Cells: Advanced Princibles And Practise  
Centre For Photovoltaic Devices And Systems, UNSW.
- [19] **Tyagi,M.S. and Overstraeten R.V.**, 1983. "Minority Carrier Recombination in Heavily Doped Silicon" Solid State Electronics, **26**, p 577-597
- [20] **Green, M.A., Emery, K., Bücher, K., King, D.L. and Igari, S.**, 1997. "Solar Cell Efficiency Tables", Progress in Photovoltaics, **5**, 51-54,
- [21] **Green, M.A.**, 1982. "Accuracy of Analytical Expressions for Solar Cell Fill Factors", Solar Cells, **7**, pp. 337-340
- [22] **Altaş, İ.H** ,1998. "Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, **47**, Sayfa:66-71"
- [23] **S. Kolodinski, J. H. Werner, and H. J. Queisser**, 1994. "Quantum efficiency exceeding unity in silicon leading to novel selection principles for solar cells materials," Sol. Energy Mat. Sol. Cells, **33**, pp. 275–285
- [24] **M. J. Keevers and M. A. Gren.**, 1993."Efficiency improvements of silicon solar cells by the impurity photovoltaic effect," in Proc. 23rd IEEE PV Spec. Conf., p 140–146.

- [25] **M. A. Green**, 1984. "Limits on the open-circuit voltage and efficiency of silicon solar cells imposed by intrinsic Auger process," IEEE Trans. Electron Devices, **ED- 31**, pp. 671–678.
- [26] **P. Kittidachachan, T. Markvart and D. Bagnall**,2003. Materials Research Group, Electronic and Computer Science University of Southampton, Highfield, Southampton. SO17 1BJ. [www.soton.ac.uk](http://www.soton.ac.uk)
- [27] **Serreze, H.B.** 1978, "Optimizing Solar Cell Performance by Simultaneous Consideration of Grid Pattern Design and Interconnect Configurations", Conference Record, 13th IEEE Conf., Washington, D.C., pp. 609-614.
- [28] **Gangopadhyay, U., Saha, H., Dutta S.K., Kyunghae, K., Charaberty, K., Junsin,Y.,** 2002, "Front Grid Design For Plated Contact Solar Cell".
- [29] **Boer, W.K.**,1990, Survey of Semiconductor Physics.
- [30] [www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat\\_en/kap\\_6/advanced/t6\\_1\\_3.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/advanced/t6_1_3.html)
- [31]**Szlufcik,J., Sivoththaman,S., Nijs,J.F., Mertens,R.P., Overstraeten, R.V.,**1997. "Low-cost Industrial Technologies Of Crystalline Silicon Solar Cells – Proceedin of the IEEE", p 711-729.
- [32] **J. Szlufcik, F. Duerinckx, E. Van Kerschaver, R. Einhaus, A. Ziebakowski, E. Vazsonyi, K. De Clercq, J. Horzel, L. Frisson, J. Nijs, and R. Mertens,** 1997. "Simplified industrial type processes for high efficiency crystalline silicon solar cells," in 14th Euro. PVSEC and Exhibition, Barcelona, Spain.
- [33] **J.Nijs, E. Demesmaeker, J. Szlufcik, J. Poortmans, L. Frisson, K. De Clercq, M. Ghannam, R. Mertens, and R. Van Overstraeten,** 1994. "Latest efficiency results with the screen printing technology and comparison with the buried contact structure," in Con. Record of 1st World Conf. on PV Energy Conversion, p.1242-49

- [34] **ISE PV Chart, Fraunhofer Institute FhG-ISE**, 1996. Freiburg, Germany, Nov. solar cells in Japan,” in Proc. 22rd IEEE PV Specialists’ Conf., 1991, pp. 1026–29.
- [35] **T.Saitoh, R. Shimokawa, and Y. Hayashi**,1991. “Recent improvements of crystalline silicon in Japan” IEEE PV Specialists Conf. pp.1026-1029
- [36] **S. R. Wenham and M. A. Green**, 1996. “Silicon solar cells,” , **4**, pp. 3–33.
- [37] **R. Hezel and R. Schroner**, 1981. “Plasma Si nitride—A promising dielectric to achieve high-quality silicon MIS/IL solar cells,” J. Appl. Phys., **27**, p. 3076.
- [38] **J. Amick, F. J. Bottari, and J. I. Hanoka**, 1994. “Solar cell and method of making same,” U.S. Patent 5 320 684,.
- [39] **Bell, R.O., M. Prince, F. V. Wald, W. Schmidt, and Rasch, K. D.**,1994. “A comparison of the behavior of solar silicon material in different production processes”. IEEE Conference p1531-1534.
- [40] **Ford, D.H., A. M. Barnett, J. C. Checchi, S. R. Collins, R.B. Hall, C. L. Kendall, S. M. Lampo, and J. A. Rand**, 1996. “675-cm<sup>2</sup> Silicon-Film<sup>TM</sup> solar cells,” Tech. Dig. 9th Int. PVSEC, pp. 247–248.
- [41] **Keogh, W.**, 2001. "Natural Sunlight Calibration of Silicon Solar Cells.", *PhD Thesis*, Australian National University, Australia.
- [42] **Emery, K., Myers, D. and Rummel, S.**, 1988. "SOLAR SIMULATION - PROBLEMS AND SOLUTIONS", 20th IEEE PV Specialists Conference, p 1087.
- [43] **King, D. and Hansen, B.**, 1991. "A Sensitivity Analysis of the Spectral Mismatch Correction Procedure Using Wavelength-Dependent Error Sources,"
- [44] **Ross,R.G.Jr.**, 1984. Photovoltaic module and design in torial notes IEEE Photovoltaic Specialist Conf. Las Vegas. p 1014-1020.

- [45] **Partain, L D.** ,1995. Solar Cells and Their Application WILEY
- [46] **J. Nijs.**, 1994. “Photovoltaic cells and modules: Technical and economic outlook toward the year 2000,” Int. J. Solar Energy, **15**, pp. 91–122,.
- [47] Final report of the EC project,2002. “Multi-megawatt upscaling of silicon and thin film solar cell and module manufacturing,”—APAS RENA CT94, European Community Project Report.
- [48] [www.schuco.com.tr](http://www.schuco.com.tr)
- [49] **Roberts, S.**, 1991. Solar Electricity, “A practical guide to desinging and installing small photovoltaic systems”
- [50] **Christensen,C.M., Raynor,M.E.**, 2003. “The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth”
- [51] [www.wind-energie.de](http://www.wind-energie.de)
- [52] **Yeşilata, B., Aydın M., Işiker Y.**,2006. Mühendis ve Makine Dergisi, **47**, S. 553
- [53] [www.lorentzpumps.com](http://www.lorentzpumps.com)
- [54] **Moskowitz, P.D, Zweibel, K, and Fthenakis, V.M.**, 1990. Health, Safety and Environmental Issues Relating to Cadmium Usage in PV Energy Systems.
- [55] OECD, 1989.Enviromental Impacts of Renewable Energy, Paris ,
- [56] OECD, 1988.Enviromental Effects of Electricity Generation, Paris,
- [57] USDoE, 1989. Energy Systems Emission and Material Requirements, Washington, DC.
- [58] **Palz, W. , Zibetta, H, Int. J.**, 1991. Solar Energy
- [59] **Zweibel, K. Harnessing.**, 1990. Solar Power, New York.

## **EK A: WEB SİTELERİ**

[www.nrel.gov/pv](http://www.nrel.gov/pv)

[www.azsolarcenter.com](http://www.azsolarcenter.com)

[www.icpglobal.com](http://www.icpglobal.com)

[www.bpsolarex.com](http://www.bpsolarex.com)

[www.solardesign.com](http://www.solardesign.com)

[www.eren.doe.gov/pv](http://www.eren.doe.gov/pv)

[www.udel.edu](http://www.udel.edu)

[www.solarpv.com](http://www.solarpv.com)

[www.eren.solar.com](http://www.eren.solar.com)

[www.eco-tuv.com](http://www.eco-tuv.com)

[www.jas.eng.buffalo.edu/education/pnapp/solarcell/index.html](http://www.jas.eng.buffalo.edu/education/pnapp/solarcell/index.html)

[http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat\\_en/kap\\_6/backbone/r6\\_1\\_2.html#\\_1](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/backbone/r6_1_2.html#_1)

<http://www.crystec.com/crysolae.htm>

<http://www.ece.gatech.edu/research/UCEP/>

<http://www.iea-pvps.org/isr/31.htm>

[www.globalsources.com](http://www.globalsources.com)

<http://www.fvgenenergy.com>

[www.soton.ac.uk/~solar](http://www.soton.ac.uk/~solar)

<http://www.eurosolar.org.tr/sunumlar/EIE2002.pdf>

## EK B: Silisyumun Özellikleri

Silisyumun Özellikleri	Değer
Atomik Yoğunluk	$5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ $5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$
Atomik Ağırlık	28.09
Yoğunluk ( $\rho$ )	$2.328 \text{ g cm}^{-3}$ $2328 \text{ kg m}^{-3}$
Energy Aralığı (EG)	1.1242 eV
Öz taşıyıcı konsantrasyonu ( $n_i$ )*	$1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$
Öz taşıyıcı konsantrasyonu ( $n_i$ ) at 25°C*	$8.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ $8.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$
Örgü (kafes) Sabiti	0.543095 nm
Erime noktası	1415 °C
Termal iletkenlik	$1.5 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$ $150 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Termal genleşme katsayısı	$2.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Elektron İlgisi	4.05 eV
Elektron Difüzyon Katsayısı ( $D_e$ )	$kT/q \text{ me}$
Delik Difüzyon Katsayısı ( $D_h$ )	$kT/q \text{ mh}$

Fiziksel Sabitler		
Sembol	Değer	Tanım
q	$1.602 \times 10^{-19}$ coulomb	electronic charge
$m_0$	$9.108 \times 10^{-31}$ kg	electron rest mass
c	$2.998 \times 10^8$ m/s	speed of light in vacuum
$\epsilon_0$	$8.85418 \times 10^{-14}$ farad/cm $8.85418 \times 10^{-12}$ farad/m	permittivity of free space
h	$6.626 \times 10^{-27}$ erg·s $6.626 \times 10^{-34}$ joule·s	Planck's constant
k	$1.380 \times 10^{-16}$ erg/K $1.380 \times 10^{-23}$ joule/K	Boltzmann's constant
s	$5.67 \times 10^{-8}$ J/m <sup>2</sup> s K <sup>4</sup>	Stefan-Boltzmann constant
kT/q	0.02586 V	thermal voltage at 300 K
$\lambda_0$	wavelength of 1eV photon	1.24 mm

Enerji Ve Güç Dönüşümü	
1kWh	$3.6 \times 10^6$ J
1 hp (horsepower)	746 W
1 Btu	1.055 kJ
<b>Zaman</b>	
1 year	8765.8 hours
1 hour	3600 sec
1 year	$3.157 \times 10^7$ sec
<b>Solar Işınım</b>	
1 kWh/m <sup>2</sup>	1 Peak Sun Hour
1 kWh/m <sup>2</sup>	3.6 MJ/m <sup>2</sup>
1 kWh/m <sup>2</sup>	0.0116 Langley
1 kWh/m <sup>2</sup>	860 cal/m <sup>2</sup>
1 MJ/m <sup>2</sup> /day	0.01157 kW/m <sup>2</sup>
1 kW/m <sup>2</sup>	100 mW/cm <sup>2</sup>

Standart SI Önekleri		
Sembol	Ön ek	İfade
T	tera	$10^{12}$
G	giga	$10^9$
M	mega	$10^6$
k	kilo	$10^3$
c	centi	$10^{-2}$
m	milli	$10^{-3}$
m *	micron	$10^{-6}$
n	nano	$10^{-9}$
p	pico	$10^{-12}$



## EK C

PC1D programı ile simülasyonlarda kullanılan güneş pilinin özellikleri.

### DEVICE

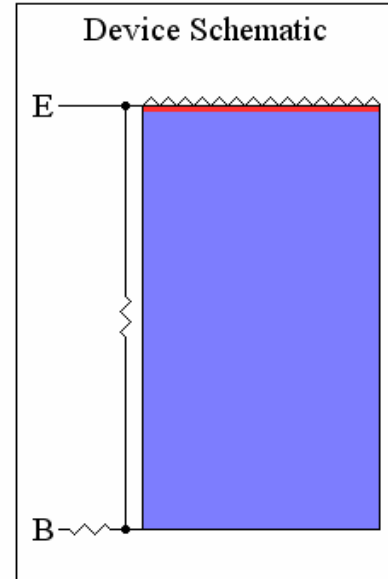
Device area: 100 cm<sup>2</sup>  
Front surface texture depth: 3 μm  
*No surface charge*  
Exterior Front Reflectance: 10%  
*No Exterior Rear Reflectance*  
Internal optical reflectance enabled  
Front surface optically rough  
Emitter contact enabled  
Base contact: 0.015 Ω  
Internal conductor: 0.3 S

### REGION 1

Thickness: 300 μm  
Material from si.mat  
Carrier mobilities from internal model  
Dielectric constant: 11.9  
Band gap: 1.124 eV  
Intrinsic conc. at 300 K: 1×10<sup>10</sup> cm<sup>-3</sup>  
Refractive index from si.inr  
Absorption coeff. from si300.abs  
Free carrier absorption enabled  
P-type background doping: 1.513×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>  
1st front diff.: N-type, 2.87×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> peak  
*No 2nd front diffusion*  
*No rear diffusion*  
Bulk recombination:  $\tau_n = \tau_p = 7.208 \mu\text{s}$   
Front-surface recom.: S model,  $S_n = S_p = 1 \times 10^{+006} \text{ cm/s}$   
Rear-surface recom.: S model,  $S_n = S_p = 100000 \text{ cm/s}$

### EXCITATION

Excitation from one-sun.exc  
Excitation mode: Transient, 16 timesteps  
Temperature: 25°C  
Base circuit: Sweep from -0.8 to 0.8 V  
*Collector circuit: Zero*  
Primary light source enabled  
Constant intensity: 0.1 W cm<sup>-2</sup>  
Spectrum from am15g.spc  
*Secondary light source disabled*



## ÖZGEÇMİŞ

8 AĞUSTOS 1979 tarihinde TUNCELİ’de doğan Engin ORUÇ, 1997 yılında Fenerbahçe Lisesinden mezun olmuştur. Lisans eğitimini 2003 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji ana bilim dalında 2005 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2007 yılında tamamlamıştır.