

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜNEŞ ENERJİSİNDEN
ELEKTRİK ENERJİSİ ELDE EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Hasan Basri ÇETİNKAYA

105915

TR. YÜKSEK LİSANS ENSTİTÜSÜ
KONULAN TEZİN
KAYIT NO

105

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Haziran 2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Eylül 2001

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Nurettin ABUT**

(.....)
Nurettin Abut

**Üye
Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK**

(.....)
Semra Öztürk

**Üye
Prof. Dr. İrfan GÜNEY**

(.....)
İrfan Güney

EYLÜL 2001

GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ELDE EDİLMESİ

Hasan Basri ÇETİNKAYA

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaikler, Güneş Pili, Güneş Enerjisi

Özet: Fotovoltaikler, ışığın elektriğe direkt dönüşümünü sağlarlar. Belli malzemeler güneş ışığına tutulduğunda, doğal olarak elektron bırakırlar ve bu elektronlar daha sonra bir elektrik akımı oluşturmak için kullanılır. Işığın yoğunluğu ne kadar fazlaysa, hücre tarafından üretilen güç de o kadar büyük olur. Güneşin bulunduğu her yerde enerji vardır. Bugün dünyada, fotovoltaik gücü üretmek için mevcut güneş enerjisi miktarı, dünyanın toplam enerji kullanımının 10.000 katıdır.

Geleneksel jeneratörlerle karşılaştırıldığında FV sistemler güvenli, sessiz, kokusuz ve hiçbir yakıtta ihtiyaç duymadıklarından, çevreye duyarlıdır ve kendi başlarına ayakta durabilirler. Fotovoltaikler ayrıca tüm köylerin elektrik enerjisini sağlamak için diğer güç kaynakları ile birlikte kullanılabilirler. Bu sistemler tipik olarak rüzgar ve dizel jeneratörlere ek olarak fotovoltaik panelleri kapsar.

Fotovoltaik teknolojisi uzaya ait olmayan güç ihtiyaçları için 1970'lerdeki enerji krizine kadar ilgi çekmemiştir. Bugün, 20 yıldan daha fazla bir geçmişi olmayan dünyaya ait fotovoltaik endüstrisi ile, imalatçıların ve dağıtıcıların kapsamlı uluslararası ağı yardımıyla fotovoltaikler çok iyi kurulmuştur.

Dünya çapında yaklaşık 750 profesyonel bilim adamı ve mühendis personel direkt olarak fotovoltaikler üzerinde araştırma ve geliştirme ile meşguldürler. Araştırmaların bir çoğu, görülebilir bir gelecekte ticari uygulamalar kazanımını sağlamaya muktedir materyaller ve teknolojiler üzerinde yoğunlaşmıştır.

GENERATING ELECTRICITY FROM THE SUN

Hasan Basri ÇETİNKAYA

Keywords: Photovoltaics, Solar Cell, Solar Energy

Abstract: Photovoltaics is the direct conversion of light into electricity. Certain materials naturally release electrons when they are exposed to light, and these electrons can be harnessed to produce electric current. The greater the intensity of light, the more power is generated by the cell. Where there is sunlight, there is energy. Here on Earth, the amount of solar energy available to generate photovoltaic power is about 10.000 times greater than total world energy use today.

Compared to conventional generators, PV systems are reliable, quiet, odorless, safe and, because they require no fuel, they are both environmentally benign and self-sustaining. Photovoltaics is also being used in conjunction with other sources of power to provide for electrical needs of entire villages. Such hybrid systems typically incorporate wind and diesel generators in addition to PV panels.

It wasn't until the energy crisis of 1970s that photovoltaic technology gained recognition as a source of power for non-space applications. Today, with the terrestrial PV industry not much more than 20 years old, photovoltaics is a well-established, proven technology with an extensive international network of manufacturers and distributors.

Worldwide, about 750 professional, scientific and engineering personnel are directly engaged in research and development on photovoltaics. Most of that research is focused on materials and technologies that promise to have commercial applications in the foreseeable future.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, kendini sürekli yenileyen ve alternatif enerji kaynakları arasında gerek 20 yıla yakın birikimi, gerekse kendini ispatlamış teknolojisi ile güneş pilleri (fotovoltaikler) anlatılmaktadır. Fotovoltaiklerin üretilmesinde kullanılan değişik malzemeler ve farklı üretim yolları belirtilmiş ve bu üretimlerin sonucu elde edilen ve elde edilmesi düşünülen verimliliklerine değinilmiştir. Ayrıca, kendi başlarına kullanımlarının yanısıra şebeke ölçekli uygulamaları incelenmiş, enerjiyi büyük ölçekte kullanırken gerekli olan büyük depolama kapasitelerini sağlayacak sistemler araştırılmıştır.

20. yüzyılın ikinci çeyreğinde yaşanan petrol krizinden sonra dünyaya ait fotovoltaik uygulamalar çok büyük önem kazanmış ve dünyanın bu konu üzerinde önemli çalışmalar yapmasını sağlamıştır. Dünyanın birçok yerinde birçok bilimadamı fotovoltaikler konusunda çok ciddi araştırma ve geliştirme çalışmaları yapmaktadır. Endüstri büyüdükçe ve teknoloji geliştikçe gün ışığından üretilen elektriğin maliyeti düşmektedir.

Dünyada mevcut bulunan güneş enerjisi miktarı bugünün dünyasında kullanılan toplam enerjinin çok üstündedir. Yapılan değerlendirmelere göre Türkiye'nin bütün yüzeyine düşen güneş enerjisi de hayli fazladır. İnsanoğlu yeni bin yıla artan enerji ihtiyaçları ile girse de, fotovoltaik teknolojisi dünya uygarlığının ağırlığını çekmede önemli bir katkı sağlayacaktır.

Çalışmalarım boyunca bana en başından sonuna kadar yardımını esirgemeyen, Doç. Dr. Nurettin ABUT'a, tüm Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Akademik Personeline, Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma, Elektrik Yüksek Mühendisi Deniz ATACA'ya (Orjin Solar LTD.) teşekkürü bir borç bilirim.

HAZİRAN, 2001

HASAN BASRİ ÇETİNKAYA

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ	xv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. FOTOVOLTAİKLERİN (FV) TARİHÇESİ	4
BÖLÜM 3. FOTOVOLTAİKLER VE SOLAR IŞIMA	7
3.1. Solar Işıma	8
3.1.1. Takip sistemli ve takip sistemi olmayan kollektörlerdeki ışıma	12
3.1.2 Yeryuvarlağının dışında yatay bir düzlemdeki ışıma	15
3.1.2.1. Yatay bir düzlemdeki toplam parlaklığın aylık ortalamasından, güneş parlaklığının günlük ışın ve yayılım bileşenleri	16
3.1.2.2. Yatay bir düzlemde saatlik toplam ışıma	17
3.1.3. Yatay bir düzlemde saatlik gelen ışın ve saçılan ışıma miktarı	18
3.1.4. Eğimli bir düzlemdeki saatlik gelen ışın ve saçılan ışıma miktarı	18
3.2. Fotovoltaikler (FV)	20
3.2.1 Panel tipleri	21
BÖLÜM 4. GÜNEŞ PİLLERİNİN GENEL YAPILARI	24
4.1. Elektronların Konumları ve İletim Olanakları	24
4.2. Fotonların Etki Olasılıkları	25
4.3. Güneş Pilindeki Kayıplar	25
4.4. Işıksal Kayıplar	26
4.4.1. Işıksal yansıma kayıpları	26

4.4.1.1. Saydam kaplama	26
4.4.1.2. Yarı iletken tabakalar	27
4.4.1.3. Opak kontak.....	27
4.4.2. Işıksal dış soğurulma kayıpları.....	27
4.5. Elektrik Kayıpları	27
4.5.1. Güneş Pillerinin Elektriksel Özellikleri	28
4.5.2. Akım Kayıpları.....	29
4.5.3. Açık Devre Gerilimi	30
4.5.4. Direnç Kayıpları	30
4.5.5. Ara Yüzeyde Yeniden Birleşme.....	30
4.6. Verim Kaybı Süreçleri.....	30
4.7. Belirleyici Öz Süreçler	31
4.8. Çevreden Kaynaklanan, Etkileri Geçici Süreçler.....	31
BÖLÜM 5. FV GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL DEVRE	
MODELLERİ ve GÜNEŞ İLE SICAKLIĞIN ETKİLERİ	32
5.1. FV Güneş Pili Eşdeğer Devre Modelleri	33
5.2. Çalışma Sıcaklığı ve Güneş Işığı Seviyesindeki Değişimlerin FV Pili	
Üzerindeki Etkilerinin Modellenmesi	37
5.3. FV Güneş Pili Referans I-V Karakteristikleri.....	37
5.4. Referans I-V Karakteristiklerinin Değişen Çalışma Sıcaklığı ve Güneş Işığı	
Seviyeleri İçin Yeniden Belirlenmesi	39
5.5. Sonuç ve Değerlendirmeler.....	41
BÖLÜM 6. FV HÜCRELERİN ELEKTRİK ÜRETİMİ	42
6.1. Silikonun Yapısı	42
6.2. Birleşme Kesitinde Elektrik Alanının Oluşması	43
6.3. Yüzeyleri Birleştirilmiş Silikonlara Enerji Verilmesi	44
6.4. Güneş Işığındaki Enerji Miktarı.....	44
6.5. Multi-Jonksiyon Amorf Silikon	45
6.6. FV Pili Çalışması.....	46
6.7. Işık Bant Aralığı.....	47
6.8. Hücrelerden Modüler Sistemlere	50

6.9. Modüllerin Kesiti	51
6.9.1. Düzlemsel kesitler	51
6.9.2. Yoğunlaştırılmış kesitler	51
6.10. FV Hücresinin Genel Yapısı	52
BÖLÜM 7. HÜCRE MALZEMESİ SİLİKON	53
7.1. "p" ve "n" Malzemesini Üretmek	54
7.2. Silikon Molekülü	54
7.3. "n" Tipi	55
7.4. "p" Tipin Oluşturulması	56
7.5. Elektrik Kontaklar	56
7.6. Sistemin Çalışması	57
7.7. Yarı-kristal Silikonun FV Hücresi Haline Dönüştürülmesi	57
7.8. Amorf-Silikonun FV Hücresi Haline Dönüştürülmesi	58
7.9. Üç Eklemlili Hücre	59
BÖLÜM 8. KOMPLE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	61
8.1. Kristal Silikon Güneş Pilleri	63
8.2. Silikon Fotovoltaik Pillerin Elde Edilmesi	63
8.3. Kristallerden Güneş Pillerine	64
8.4. Pil Dizaynlarındaki Gelişmeler	66
8.5. Polikristal Silikon	67
8.6. Şerit ve Yaprak Silikon	69
8.7. İnce Film Güneş Pilleri	69
8.8. Amorf Silikon	71
8.9. Polikristal İnce Filmler	73
8.10. Tabakalar Halindeki Güneş Pilleri	74
8.11. Yoğunlaştırıcılar	76
8.12. İleri Fotovoltaik Teknolojileri	78
8.13. Yüksek Verimli Piller	78
8.14. Isıdan Elektrik Üretimi	79

BÖLÜM 9. SİSTEMİN DENGELENMESİ (BOS-Balance Of System)	82
9.1. Doğru Akım Sistem Teçhizatı.....	83
9.1.1. Şarj kontrolörü.....	83
9.1.2. Akü	84
9.2. Alternatif-Akım Sistem Teçhizatı	84
9.2.1. İnverter.....	84
9.3. Şarj Kontrol Üniteleri.....	86
BÖLÜM 10. FOTOVOLTAİKLERİN TEMEL DİZAYN PRENSİPLERİ	88
10.1. FV Teknolojisi	88
10.2. FV Sistem Uygulamaları	89
10.3. FV Sistemler Ne Zaman Uygun Olabilir?	90
10.4. Bölgelerin FV Sistemler İçin Elverişliliği	91
10.5. Hava Durumunun FV Modüller Üzerindeki Etkisi	92
BÖLÜM 11. ŞEBEKE ÖLÇEKLİ FOTOVOLTAİKLER	93
11.1. Düz Plaka İnce Film Fotovoltaikler	93
11.2. Sistem Uygulamaları, Yararları ve Etkileri	94
11.3. Teknoloji Varsayımları ve Sonuçları.....	95
11.4. Gelişim Tahminleri.....	96
11.5. Performans ve Maliyet Tartışması	96
11.6. Materyaller	105
11.7. Tesisin Üretimi	105
11.8. Enerji, Laboratuar ve Hizmet	106
11.9. Yapı Bütünleşik Güneş Pilleri.....	108
BÖLÜM 12. ŞEBEKE ÖLÇEKLİ YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	112
12.1. Sistem Uygulamaları, Yararları ve Etkileri	113
12.2. Teknoloji Varsayımları.....	114
BÖLÜM 13. FOTOVOLTAİKLERİN GELECEĞİ	119
13.1. Büyüyen Pazarlar	119

13.2. Anahtar Teknolojiler.....	119
BÖLÜM 14. TÜRKİYE’NİN ENERJİ KAYNAKLARI ARASINDA GÜNEŞ ENERJİSİNİN YERİ ve ÖNEMİ	122
14.1. Türkiye’de Enerji Sektörü.....	123
14.2. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları	124
14.3. Türkiye’nin Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	125
14.4. Güneş Enerjisi ve Türkiye’deki Durumu.....	126
14.5. Güneş Enerjisinin Kullanım Alanları	127
BÖLÜM 15. ELEKTRİK ENERJİSİ DEPOLAMANIN ÖNEMİ ve YENİ GELİŞMELER	130
15.1. Akü Sistemleri.....	131
15.2. Hidrojen ve Yakıt Pilleri	131
15.2.1. Hidrojen yakıt teknolojisi.....	131
15.2.2. Hidrojenin depolanması	132
15.2.3. Güneş ışığından elektroliz.....	133
15.2.4. Yakıt pilleri	134
BÖLÜM 16. SERA GAZI EMİSYONLARI	135
BÖLÜM 17. FOTOVOLTAİK PANELLERİN MONTAJ ŞEKLİ.....	137
17.1. Montaj Sekli ve Güneş Açıları.....	137
17.2. Bakım.....	139
17.3. Dikkat Edilmesi Gerekenler.....	139
17.4. Tekli Bağlantı.....	139
17.5. Montaj Anında Dikkat Edilmesi Gerekli Bilgiler	140
17.6. Oluşabilecek Normal ve Genel Problemler	140
17.7. Sıkça Sorulan Sorular	141
BÖLÜM 18. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİNDE GÜÇ DENETİMİ İÇİN BİR MODELLEME.....	143
18.1. FV Güneş Enerjisi ile Çalışan Örnek Sistem.....	143

18.2. Modelleme	146
18.2.1. Birinci çalışma durumu	147
18.2.2. İkinci çalışma durumu	150
18.3. Sonuçlar ve Modelin Geçerliliği	150
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	152
KAYNAKLAR.....	153
ÖZGEÇMİŞ.....	155



SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

GaAs	: Galyum Arsenür
P	: Fosfor
In	: İndiyum
CdTe	: Kadmiyum Tellür
GaInP ₂	: Galyum indiyum fosfit
Wp	: Tepe güç değeri

FV	: Fotovoltaik
FVP	: Fotovoltaik Panel
YBGP	: Yapı Bütünleşik Güneş Pilleri
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
eV	: Elektron-volt
BOS	: Sistem Dengesi (Balance Of System)
CIS	: Bakır İndiyum Diselenit (Fotovoltaik malzeme tipi)
TPV	: Termo-fotovoltaikler
NEC	: Uluslararası Elektrik Kodu
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
GSMH	: Gayri Safi Milli Hasıla
TET	: Ton Eşdeğer Taşkömürü
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
SMDAM	: Sabit Miknatıslı Doğru Akım Makinesi
DGK	: Doğru Gerilim Kısıyıcısı
AD	: Analog-Dijital Çevirici
DA	: Dijital-Analog Çevirici

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Güneş enerjisi dengeleme şeması.....	8
Şekil 3.2. Farklı hava ağırlığı değerleri için güneş parlaklığı Amerika Atmosferi; $H_2O = 20$ mm; $O_3 = 3.4$ mm. ($\alpha = 1.3$; $\beta = 0.02$).....	10
Şekil 3.3. Atmosferin dışında güneş spektrumu ile aydınlatılmış ve p-n eklemi biçiminde yarı-iletken yapılmış malzemenin enerji aralığının fonksiyonu şeklinde elde edilebilecek maksimum verimliliğin hesaplanan eğrisi. (Loferski 1963).....	11
Şekil 3.4. İngiltere'nin Kew bölgesinde aylık ışınım miktarı değişimi (1955-1970).	11
Şekil 3.5. Aden bölgesinde aylık ışınım miktarı değişimi (1958-1967).....	12
Şekil 3.6. 5 Ekim 1983'te Kuveyt'te, değişik saptırılmış yüzeylerdeki güneş ışınım yoğunluğu.....	13
Şekil 3.7. 5 Ekim 1983'te Kuveyt'te, değişik saptırılmalar için günde toplanan enerji miktarları.....	13
Şekil 3.8. 3.1 numaralı denkleme bağlı olarak, yıl boyunca sapma açısının değişimi. Güneş yılının günü 1 Ocak'ta bire eşit oluyor.	14
Şekil 3.9. P noktasındaki bir yerin, saptırılmış düzleme bağlı olarak güneşsel geometrisi.....	15
Şekil 3.10. Güneş pillerinin aşamaları.	22
Şekil 5.1. FV pilinin genel statik eşdeğer devresi.....	33
Şekil 5.2. FV pilin dinamik modeli.....	34
Şekil 5.3. FV güneş pilinin basite indirgenmiş eşdeğer devresi.	35
Şekil 5.4. FV güneş pilinin ölçülen ve hesaplanan referans I-V karakteristikleri.	39
Şekil 6.1. Elektrik alanın "n tip"i ve "p tipi"i etkileyiş diyagramı.	43
Şekil 6.2. Fotonların silikondaki elektron hareketi oluşturması.....	44
Şekil 6.3. Saf silikon FV hücresi.	45
Şekil 6.5. Güneş ışığının dağılımı.....	47
Şekil 6.6. Farklı bant aralıklarına sahip malzemelerin ışığı soğurmaları.....	48
Şekil 6.6. Fotovoltaik pillerin enerji üretim şeması.....	49
Şekil 6.7. Işığın panellere geçişi.	49
Şekil 6.9. Düzlemsel bir fotovoltaik hücrenin kesiti.....	51

Şekil 6.10. Yoğunlaştırılmış fotovoltaik hücrenin kesiti.	52
Şekil 6.11. FV hücrenin yapısı	52
Şekil 7.1 a) Tek kristalli silikonun yapısı.	
b) Polikristalin yapısı.	53
Şekil 7.2. Silikonun atomik yapısı.	54
Şekil 7.3. Kristal silikonun atomik yapısı.	55
Şekil 7.4. Silikonun fosfor atomu ile katkılanıp “n” tipinin oluşturulması.	55
Şekil 7.5. Silikonun bor atomu ile katkılanıp “p” tipinin oluşturulması.	56
Şekil 7.6. Bir fotovoltaik hücredeki elektrik kontaklarının görünümü.	56
Şekil 7.7. Bir fotovoltaik hücrenin çalışması.	57
Şekil 7.8. Yarı kristal silikonun elde edilmesi.	58
Şekil 7.9. Amorf silikonun yapısı.	58
Şekil 7.10. Amorf silikon hücrenin yapısı.	59
Şekil 7.11. Üç eklemli hücrenin katmanları.	60
Şekil 7.12. Üçlü hücre yapısı.	60
Şekil 8.1. FV modüllerin sipariş miktarları.	62
Şekil 8.2. a) Silikonun geniş kristallerinin yapımında kullanılan Czochralski işlemi	
b) Tek kristal silikona ait silindirik külçenin ince dilimlere ayrılması.	65
Şekil 8.3. FV modüllere ait karesel polikristal hücreler yapmak için iki yol.	68
Şekil 8.4. İnce filmlerin esnek plastik yapraklara uygulanması.	69
Şekil 8.5. İnce filmlerin tek bir birim halinde üretimleri.	71
Şekil 8.6. Polikristal İnce-Film Güneş Pillerinin Verimliliği.	73
Şekil 8.7. Çoklu eklem yapısındaki sistem.	75
Şekil 8.8. Yoğunlaştırıcı sistemlerde en fazla kullanılan Fresnel lensleri.	
a) Doğrusal bir odaklanma istendiğinde.	77
b) Işığın noktasal odaklanması istendiğinde.	77
Şekil 8.9. Texas’ın Austin şehrinde 3M şirketinin kurduğu 300 kWp gücündeki	
doğrusal yoğunlaştırma sistemi.	78
Şekil 8.10. TPV sisteminin genel çalışma prensibi.	80
Şekil 9.1. a) DC enerji kullanımı.	82
b) AC enerji kullanımı.	82
Şekil 9.2. Doğru akım sisteminin yapısı.	83
Şekil 9.3. Alternatif akım sisteminin yapısı.	85

Şekil 9.4. Şarj kontrol cihazının iç yapısı.....	86
Şekil 9.5. Şarj kontrol cihazının bağlantı şeması.....	86
Şekil 9.6. Düşük voltajda akünün çalışmasını engelleyen bağlantı şeması.	87
Şekil 10.1. Güneşin mevsimsel olarak değişen ufku üzerindeki öğlen vakti yükseklği.....	92
Şekil 11.1. Düz plaka, ince film fotovoltaiklerin şebeke uygulaması.....	93
Şekil 11.2. Dış ortamda yapılan sekiz yıllık ince film modül testleri sonuçları.....	102
Şekil 11.3. Polikristal ince filmlerin günümüzdeki laboratuvar hücre verimleri.	104
Şekil 12.1. Yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistemlerin şebeke uygulaması.....	113
Şekil 13.1. Fotovoltaik Uygulamalarının Yayılma Modeli.....	120
Şekil 15.1. Elektroliz cihazı.....	133
Şekil 15.2. 1KW enerji üreten saklanabilir hidrojen tüpün prototipi.....	133
Şekil 15.3. Hidrojen tüpleri.....	134
Şekil 15.4. Jeneratör seti.....	134
Şekil 17.1. Güneşin gökyüzündeki durumuna göre hesaplanması gereken açılar... ..	138
Şekil 18.1. Fotovoltaik güneş pili panelinden yüke güç aktarımı.....	144
Şekil 18.2. Örnek sistemin açık devre şeması.....	144
Şekil 18.3. Kıyıdaki temel dalga biçimleri.....	145
Şekil 18.4. Değişik ortam koşulları için başlangıç ve sürekli çalışma durumlarında FPV'nin simülasyonla elde edilen akım-gerilim (I-V) karakteristikleri	148
Şekil 18.5. Değişik ortam koşulları için başlangıç ve sürekli çalışma durumlarında FPV'nin deneysel olarak elde edilen akım-gerilim (I-V) karakteristikleri.....	149
Şekil 18.6. Kıyıcı görev sabitinin deney ve simülasyon sırasındaki değişimleri	149

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Hücre tipleri ve verimlilikleri	21
Tablo 3.2. Güneş paneli tipleri ve harcanan enerjinin geri kazanımı.	23
Tablo 8.1. Fotovoltaik Modüllerin Dönüşüm Verimleri (%)	63
Tablo 11.1. Performans ve Maliyet Göstergeleri.....	998
Tablo 11.1. (Devam)Performans ve Maliyet Göstergeleri.	101
Tablo 11.2. 1997'nin en iyi ince film modülleri.....	103
Tablo 11.3. İnce film üretici maliyetleri özeti: uzun dönem indirgemeleri.	105
Tablo 11.4. Kaynak İhtiyaçları	107
Tablo 12.1. Bugünkü yoğunlaştırıcı teknolojisi ve gelişimi için yapılan çalışmalar.	115
Tablo 12.2. Performans ve Maliyet Göstergeleri.....	116
Tablo 12.2. (Devam) Performans ve Maliyet Göstergeleri.	117
Tablo 12.3. Kaynak İhtiyaçları.	119
Tablo 14.1. Ülkelere göre TEP/GSMH oranları.	123
Tablo 14.2. Yıllara göre enerji talebi ve GSMH büyüme hızları tahminleri.....	124
Tablo 14.3. Çeşitli enerji taşıyıcıları tarafından kWh başına maliyetler.....	125
Tablo 17.1. Güneş açılarının İzmir için hesaplanan değerleri.	138

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Güneş pilleri güneş-elektrik teknolojilerinin en basit ve en şık olanıdır. Bu nedenle kamuoyunun yoğun ilgisini çekmektedir. Günümüzde ufak ölçekli ancak giderek büyüyen, hesap makinelerinden su pompalamaya kadar bir çok uygulama için güneş pili üreten bir fotovoltaik endüstrisi oluşmuştur.

Fotovoltaik elektriğin, elektrik şirketleri pazarında yer almaya başlaması için önemli maliyet azalmaları ve performans iyileştirmeleri gerekmektedir. Bu hedefe ise, eskisine göre biraz daha yoğun araştırma geliştirme yapılarak erişilmesi olası görünmektedir.

Güneş pillerinin kuramsal veriminin bir üst sınırı vardır. Bugün için güneş pili verimlerinin iyileştirilmesi doğrultusunda laboratuvar düzeyinde hala yapılabilecek geliştirmeler bulunmaktadır.

Dağlık bölgelerdeki haberleşme sistemleri ve deniz fenerleri gibi denizcilik destek tesislerine güç sağlanmasında giderek fotovoltaik sistemlere yönelinmektedir. Böylece pillerin şarjı veya dizel jeneratörlerin bakım ve yakıt ikmali gibi sorunlar ortadan kalkmaktadır. Tatil evlerine fotovoltaik sistemlerin kurulması ABD ve Avrupa'da yaygınlaşmaya başlamıştır.

Az-gelişmiş ülkelerin kırsal kesimlerine güç sağlanması güneş pilleri için hızlı büyüyen bir potansiyel pazar olarak görülmektedir. Dünya çapında yaklaşık iki milyon köyün içme suyu temini, soğutma, aydınlatma ve diğer temel gereksinimlerini karşılayabilmesi için gerekli elektrik enerjisine sahip olmadığı Birleşmiş Milletler tarafından açıklanmıştır.

ABD ve diğer endüstrileşmiş ülkelerde fotovoltaik sistemler için en önemli pazarı büyük güç santrallerinin ve zayıf şebekelere bağlı ev ve işyerlerinin oluşturması

beklenmektedir. Büyük ölçekli fotovoltaik elektrik üretiminin olasılıklarını incelemek üzere ABD’de PG&E şirketi “Photovoltaics for Utility Scale Applications” isimli bir proje kapsamında, hükümet ve endüstri temsilcilerini bir araya getirmiştir. Proje fotovoltaik ARGE çalışmaları ile ticari uygulamalar arasında bir köprü kurmayı amaçlamaktadır. Değişik sistemler test edilerek, güvenilirlik ve performans, işletme ve bakım maliyetlerinin yanı sıra yenilikçi sistem tasarımları üzerine karşılaştırmalı veri sağlanmaktadır. Japonya’da bütün elektrik şirketleri fotovoltaik projeleri ile ilgilenmektedir. Örneğin Rokko Adası’nda, güç şebekesine bağlı 100 konut ölçekli bir fotovoltaik sistem test edilmektedir. Almanya’nın en büyük elektrik şirketi olan Rheinisch Westfälisches Electrizitätswerk 1 MW üretim kapasiteli bir tesiste çeşitli fotovoltaik teknolojileri denemektedir. İtalyan ve İspanyol hükümetleri konutlar ve enterkonnekte şebekeden uzak bölgelerde yararlanılabilecek sistemlere destek verip tesis etmektedir. İtalya’da 3 MW kapasiteli bir sistem kurulması planlanmaktadır.

Enerji Araştırma ve Teknoloji Komitesi ülkemizin de üye olduğu Uluslararası Enerji Ajansı bünyesinde 1993 yılında imzaya sunulan Fotovoltaik Güç Sistemleri Uygulama Anlaşmasında altı ayrı görev tanımlanmıştır.

- i) Fotovoltaik Güç Sistemleri Konusunda Bilgi Değişimi (İtalya)
- ii) Fotovoltaik Sistemlerin ve alt sistemlerin İşletme Performansı ve Tasarımı (Almanya)
- iii) Fotovoltaik Sistemlerin Tek Bağlanma ve Ada Uygulamalarında Kullanımı (GENEC, Fransa)
- iv) Elektrik Şebekesinin Desteklenmesinde Dağınık Fotovoltaik Güç Üretiminin Modellenmesi (PG&E, ABD)
- v) Çatıya Monte Edilmiş ve Diğer Dağınık Fotovoltaik Sistemlerin Tasarımı ve Enterkonnekte Şebekeye Bağlanması (NEDO, Japonya)
- vi) Büyük Ölçekli Güç Üretimi için Modüler Fotovoltaik Tesislerinin Tasarımı ve İşletilmesi (ENEL, İtalya)

Birçok fotovoltaik uygulamalar, şebekeye bağlantıları ekonomik olarak uygun olmayan uzak yerlerdeki, kendi başına sistemleri oluştururlar. Bu durumlarda eğer

uygulama için gerekli elektrik, fotovoltaik sistemin ürettiği seviyeyi aşarsa klasik bir elektrik jeneratörü, fotovoltaik/jeneratör hibrit sistemini oluşturmak için kullanılabilir. Uzak uygulamaların örnekleri aşağıda sıralanmıştır.

- Trafik uyarı ışıkları (uyarı tabelaları ve demiryolu geçitleri için ışıklandırma)
- Sulama ve çiftlik hayvanları için su pompalanması
- Yürüyüş yolları, ortak kullanılan alanlar, sokaklar ve otoyolların aydınlatılması
- Uzak bölgelerdeki oturmaya ayrılmış yerlerdeki gücün karşılanması
- Kamp bölgeleri, limanlar ve kıyıda uzak petrol platformları
- Hava istasyonları ve yangın gözetleme kuleleri
- Yol boyunca konulan acil telefonlar gibi iletişim cihazları
- Boru hatları için katodik (korozyon) koruma
- İletişim kulelerinde çakan uyarı ışıkları

Fotovoltaikler, şebeke gücünün güvenilirliğinin sorgulandığı veya enerji talebinin en yüksek olduğu saatlerde gerilim oynamalarının olduğu şebekeye bağlı bölgelerde iyi bir seçim olabilir. Yazın en yüksek talep (pik değer) genelde soğutma-havalandırma ile ilgilidir ve fotovoltaik sistemler tipik olarak soğutma ve havalandırmaya ihtiyaç olduğu vakitler en fazla gücü üretirler.

Eğer küçük uygulamalara sahip bir bölge en yakın şebekeye bir milden (1.6093 km) fazla uzak bir alana yerleştirilmişse, fotovoltaikler genelde elektrik üretimi için en uygun seçim olurlar. Maliyet avantajlı durum için ana faktör genellikle şebeke gücünden uzaklıktır.

BÖLÜM 2. FOTOVOLTAİKLERİN (FV) TARİHÇESİ

FV sistemler, ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirir. "Photo" Yunanca'da "phos" ışık anlamında, "volt" ise 1745-1827 arasında yaşamış ve elektrik alanında öncü bir bilim adamı olan Alessandro Volta'nın adından gelir. "Photo-Voltaic" diğer anlamda "Işık-Elektriği"dir. Güneş pilleri FV sistemlerini oluştururlar. Saatlerimizdeki ve hesap makinelerimizdeki enerji üretenler işte bu FV hücrelerdir. Ev aydınlatmasında, sulamada, havalandırmada kullanılan FV'ler biraz daha karışık ve teknik isteyen türlerdendir.

"Fotovoltaik etki" olarak tarif edilen olay ilk olarak, bir elektrolitik hücrenin bir elektrodunu güneş ışığına yönelterek 1839 yılında Becquerel tarafından gözlemlenmiştir. Heinrich Hertz 1870'lerde selenyumun bu elementlerden biri olduğunu bulmuştur. Daha sonra, Adams ve Day (1877) selenyumdaki etkiyi gözlemlenmişlerdir. Selenyum ve bakır oksit fotoselleri alanında uğraşan katı-hal çalışanları ile Lange'in (1930), Schottky'nin (1930) ve Grondahl'in (1933) öncülük eden çalışmaları, fotografik ışıklandırma ölçüm cihazının ve diğer birçok yararlı cihazın gelişimine liderlik etmiştir. En belirgin buluş 1950 yıllarında Czochralski tarafından gerçekleşen saf silikon kristalinin oluşturulmasıyla başlar. 1954 yılında Bell laboratuvarındaki bilim adamları saf silikon kristalini oluşturduğunda verim %4'ler seviyesine çıkmıştır.

1973'lere kadar yerküreye ait fotovoltaik uygulamalardaki merak sessiz kalmış ve çok seyrek konuşulmuştur. Ama o yıl içinde petrol fiyatlarında dört kata yakın bir fiyat artışının meydana gelmesi fosil yakıtların sınırlı olduğu ve politik baskılar altında olduğu gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Bundan dolayı hükümetler, petrol şirketleri ve elektrik şirketleri, geleneksel kaynaklara ek olma anlamında yenilenebilir enerji kaynakları arayışına girmişlerdir. Fotovoltaiklerde, araştırma fonlarının, gelişim ve gösterim programlarının, vergi desteklemeleri ve üretim

faaliyetlerindeki gelişimlerle desteklenmesi, gelişmeye devam eden yeni bir endüstrinin doğuşunu sağlamıştır.

1975' ten sonraki ilk 15 yılda özellikle uzay programları için kristal silikon güneş pillerinin üretimi yılda ortalama 100 kW civarındaydı. 1987 yılına doğru tüm dünya içinde yerküre uygulamaları için kullanılan modüllerin yıllık siparişi 1986 yılında 28.6 MW'a ulaştı. Günümüzdeki birçok uygulamaları arasında, daha önce de değinildiği gibi, telekomünikasyon, boru hatlarının ve diğer metalik yapıların katodik koruması, su pompalama, kırsal elektrikleendirme, yön bulma yardımı, alarm sistemleri, trafik uyarı ışıkları, hesap makineleri vardır. Bu yeni teknoloji kırsal kesimlerin elektrikleendirilmesi için çalışan kesimin ilgisini artan bir şekilde çekmektedir.

Fotovoltaiklerin ilk ticari kullanımı 1954 yılında, uzayda bir uyduyu denetlemek içindi. 1954 yılında 20 kW olan FV'lerin üretimi 1990 yılında 50 MW'a ulaştı. Amorf silikon teknolojisi ise en ön sırayı aldı. Bu enerji türü pahalı da olsa hafif ve güvenilir olduğundan uzaya ait uygulamalarda hep birinci sırada kalmıştır. Fotovoltaik pillerin verimleri, rakip olarak görünen yarı iletkenlerin yanında, kuramsal beklentilerden azdır, ancak FV pil elektriği kullanımının temelinde yer alan uzay teknolojisinde, hemen hemen kusursuz güvenilirlik önemlidir. İlerleyen gelişmeler, uzay güneş pillerinin dönüştürme verimini yaklaşık %20 oranına getirmiştir. Uzay araçlarının ihtiyaç duyduğu güç birkaç miliwattan en son haberleşme uyduları ile 10 kW değerine ulaşmıştır. Bu yüzden uzaydaki FV güç üretimi, güvenilirliğin ve dayanıklılığının ispatlanmış kayıtları ile çok iyi tasarlanmış bir teknoloji konumuna gelmiştir.

FV pazarındaki büyüme modüllerin fiyatlarındaki düşüş ile artmaktadır. Kristal yapıdaki silikon modüller 1975'e oranla 6 kat daha ucuzdur ve bu ucuzlama trendi bu pazarın teşviki ile devam edecek gibi görünmektedir. Günümüzde amorf silikon modüllerin ve diğer ince film modüllerin gelişimi, dünyanın güneşli bölgelerinde büyük ölçekli güç santrallerine öncülük edebilecektir.

Bununla birlikte yaklaşık 20 yıllık araştırma-geliştirme, sını ölçekte deneme ve ticarileştirme deneyiminden sonra bu teknolojilerin çoğunda muazzam maliyet düşüşleri sağlanmış, verimlilikleri de katlanmış. Özellikle güneş pili ve rüzgar sistemlerinde sistem performansları, güvenilirlikleri önemli ölçüde artmış, yalnızca dağıtım şebekesinin bulunmadığı ücra noktalarda kullanımları uygun olmaktan çıkarak, şebekeye bağlı çalıştırılacak temiz, uygun maliyetli seçenekler haline gelmişlerdir (<http://www.orjinsolar.com>, <http://www.nrel.gov>, UYAR 1993).



BÖLÜM 3. FOTOVOLTAİKLER VE SOLAR İŞİMA

1839 yılında Becquerel, elektrolit işleminde kullanılan elektrotların birine direkt ışık düşürüldüğünde bir gerilim oluşturduğunu keşfetti. Daha sonra diğer bir çok bilim adamı aynı etkiyi diğer materyalleri kullanarak gözlemledi. Fotovoltaik hücrelerin keşfi ve gelişimi uzayı araştırma yarışının direkt bir sonucudur. 1954 yılında Ruslar, 1959 yılında Amerikalılar, iletişim cihazlarına enerji sağlamak için dünya etrafında yörünge oluşturan uydularını fırlatmışlardır. Bu uydular fotovoltaik kavramına güveniyordu. Bir güneş pili, hiçbir hareketli parça olmadan gün ışığını doğru akıma dönüştüren bir sistemdir. Bu yolla elde edilen enerji temizdir ve herhangi bir zararlı atığa sahip değildir. Hücreler çoğunlukla dünyada çoklukla bulunan bir element olan silikondan yapılır ve 20 yılın üstünde bir ömre sahiptirler. 1973 yılında alternatif enerji ihtiyacı da fotovoltaik endüstrisi üzerine büyük bir ilgi geliştirmiştir. 1978 yılında 1MW olan siparişin 1988 yılında 40 MW'a ulaşması ve bu artışın sürekli devam etmesi bunun bir göstergesidir. O zamanlarda maliyet de keskin bir şekilde azalmıştır. FV güneş pilleri yardımıyla gün ışığının direkt olarak elektriğe dönüşümü günümüzde, yenilenebilir enerji seçenekleri arasında en çok umut verici seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

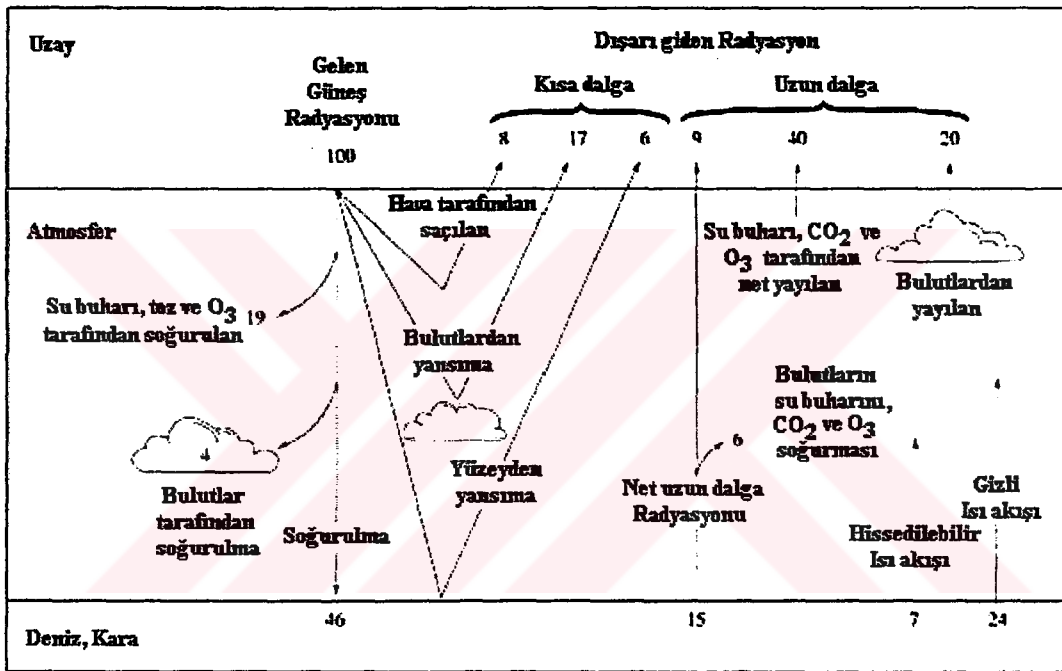
FV üretimi, sonlu kaynaklar olan fosil yakıtlardaki tükenişini hızlandırmadan, atmosferi kirletmeden ve yüzlerce nükleer güç santrali kurmadan, dünya çapında artan elektrik talebini karşılamak için bir yol sunar.

Bugün güneş pilleri genellikle, dünyada en çok bulunan elementlerden olan silikondan yapılırlar. Görevlerini sessizce yaparlar ve onları çevreleyen hiçbir hareketli parçaları yoktur. Atmosferi kirletmezler ve geride hiçbir zararlı atık ürün bırakmazlar. Mekaniksel basitlikleri, az ya da hiç bakım yapılmadan birçok yıl güvenle kullanılacak şekilde düzenlenebilecekleri anlamına gelir. Aslında varolan birçok tesis otomatik olarak çalışmakta ve hiçbir teknisyen görevliye ihtiyaç duymamaktadır. Dolayısıyla işletme giderleri düşüktür. FV piller bulutlu havalarda

bile etkili olarak çalışır ve solar ısıtıcılarının aksine düşük sıcaklıklarda daha verimlidirler. Ayrıca bulutların geçişi sırasında oluşabilecek ışık girişindeki ani değişimlere de hızlı biçimde tepki verirler. Bu özellikler, bulutlu gökyüzünden büyük bir oranda dağınık gelen ışınımın olduğu ılıman iklimlerde özel bir öneme sahiptir.

3.1. Solar Işıma

Güneşin parlama sebebi nükleer fizyondur. Güneşten ne kadar enerji (foton) geldiği, aşağıdaki güneş enerjisi dengeleme şemasından incelenebilir.



Şekil 3.1. Güneş enerjisi dengeleme şeması.

Gelen %100 enerjinin %31'i tekrar atmosfere optik kısa dalga olarak geriye döner. %31'in dağılımında; %17 bulutlardan yansır, %8'i hava molekülleri tarafından geri yansıtılır ve yeryüzü de %6'sını yansıtır. Bu yansıyan %31 enerjiye Albedo denir. Geriye kalan %69 radyasyonun %19'u stratosferdeki ozon tabakasına gider, %4'ü iklimlerin oluşmasında harcanır. Geriye kalan %46 enerji yeryüzüne erişir ve sonunda %24'ü direkt olarak bize ulaşır.

Kristalli silikon güneş pilleri, yıllar boyunca diyot, tranzistör ve mikroçip gibi elektronik komponentleri için geliştirilen, çok iyi tasarlanan yarı-iletken teknolojisini bazında olmanın önemli bir avantajına sahiptirler.

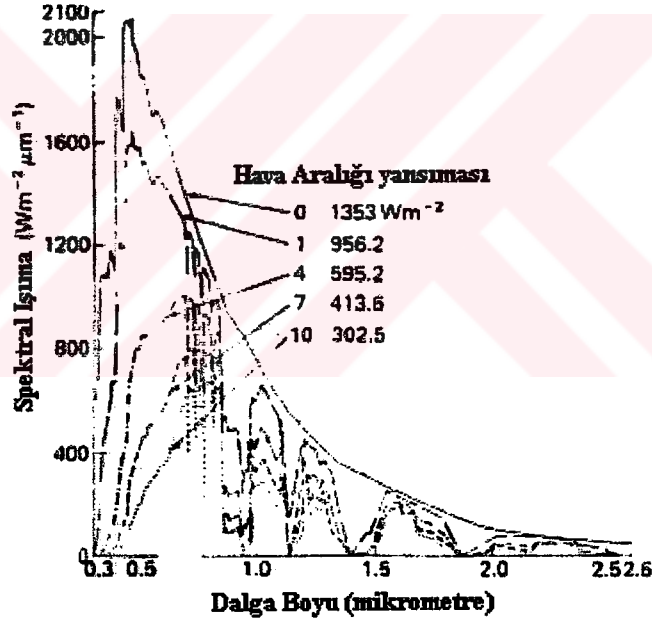
Fotovoltaik üretimin diğer önemli bir avantajı ise modülerliğidir. Her boyuttaki ve her voltaj değerindeki diziler, standart modüller kullanılarak kurulabilir. Hiçbir ölçülendirme etkisi yoktur ve dönüşüm verimi gerçekte çıkıştan bağımsızdır. Büyük üretimin potansiyel kullanıcıları bu sistemin daha küçük versiyonları ile önceden deneyim kazanabilirler. Sistem daha fazla fonun kullanılabilir hale gelmesi ve talebin artması ile büyüyebilir. Onarım genelde, hatalı bir modülün yenisi ile değiştirilmesi şeklindedir. Bir veya daha fazla modül arızalanabilir ve bu modüller yenileri ile değiştirilene kadar sistem çalışmaya devam eder.

FV güç tesisleri hızlı bir şekilde ve kolayca kurulabilir. Kömür, sıvı yakıt veya nükleer güç istasyonlarının planlanması ve kurulmasına ilişkin, genelde on yıl veya daha fazla olan uzun yönetim ve idare zamanının böylelikle önüne geçilebilir. Dolayısıyla, genellikle hataya dönüşebilen, geleceğin elektrik ihtiyacına ait uzun vadeli tahminlere güvenme ihtiyacı kalmaz.

Bununla beraber güneş gücü, merkezi güç istasyonları ve dağıtım şebekelerinin temeli olarak düşünülmemelidir. Belki de bu en önemli karakteristiğidir, çünkü gün ışığı dağıtılmış enerji kaynağıdır ve maliyeti düşürmek ve iletim hatlarındaki kayıpları engellemek için ihtiyaç duyulan yerde güç üretilebilir. Ana kaynakların ve elektriğin aküler ile, küçük dizel veya gaz jeneratörleri yoluyla pahalı şekilde sağlandığı dünyanın birçok yerinde ihtiyaç olan mekanlarda bu sistemler bu yüzden tek başına yerleştirilir. Bu nedenle, nüfusun büyük bir çoğunluğunun yaşadığı yayılmış küçük köylerin bulunduğu ve gün ışığı yoksunluğu olmayan gelişen ülkelerde fotovoltaiklerin oynadıkları önemli rolleri vardır.

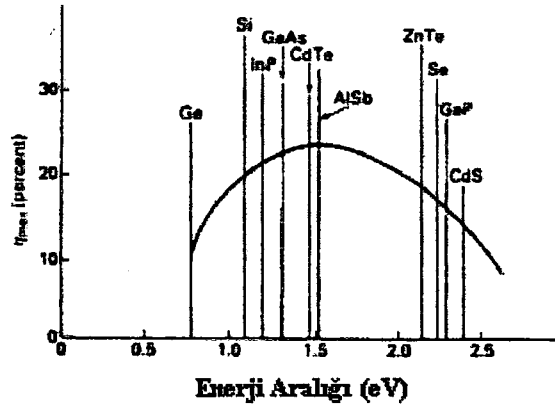
Dünya, güneşten dakikada 10^{16} KJ enerji almaktadır ve günde güneş 12 saat parladığı sürece dünya günde yaklaşık 7.2×10^{18} KJ enerji almaktadır. Bu enerjinin %1'inden yararlanabileceğimizi düşünelim ki bu da 2049 yılında düşünülen tüm dünya enerji ihtiyacının 1.65×10^2 katıdır. Bununla beraber dünya atmosferi dışındaki güneş

ışınmasının değeri 1367 W/m^2 'dir ve bu da güneş sabiti olarak bilinir. Güneş ışınları atmosfere girdiğinde bir çoğu ozon tabakası, karbonmonoksit ,karbondioksit ve su partikülleri tarafından emilirler. Bu soğurma, ışının seyahat ettiği atmosferin kalınlığına bağlıdır. Atmosfer katmanının kalınlığı "Havanın Ağırlığı" olarak bilinir. Bu yüzden hava ağırlığı, güneş tam tepedeyken, direkt güneş ışınının atmosferin diğer tarafına geçip deniz seviyesine ulaşan yolları olarak tanımlanır. Bu yüzden güneş zirvedeyken, deniz seviyesindeki yol uzunluğu 1 hava ağırlığı, dünya atmosferinin üzerinde ise 0 hava ağırlığıdır. Hava ağırlığı, günün zamanına, yılın zamanına, yerin enlem ve boylamına bağlıdır. Şekil 2.2 değişken hava ağırlıklarında güneş ışınımını göstermektedir. Yatay bir düzlemde, dağınık yansıyan ve direkt ışınımın toplamı, toplam ışınımı veya global ışınımı verir. Parlaklık kelimesi güneş ışınımının yoğunluğunu belirtmek için kullanılır. Dağılma bileşeni açık bir havada %20'den, tamamen kapalı havada %100'e kadar bir değişim gösterir.



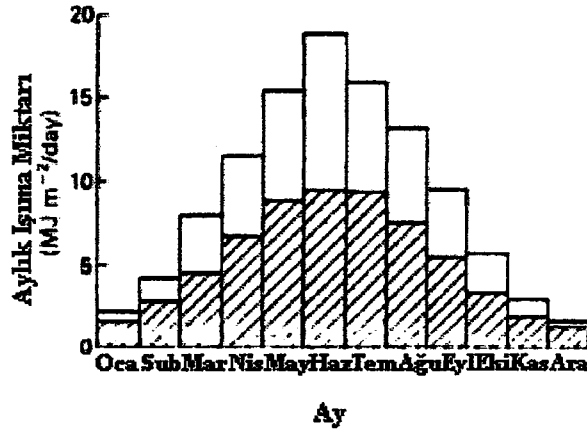
Şekil 3.2. Farklı hava ağırlığı değerleri için güneş parlaklığı
 Amerika Atmosferi; $\text{H}_2\text{O} = 20 \text{ mm}$; $\text{O}_3 = 3.4 \text{ mm}$.
 ($\alpha = 1.3$; $\beta = 0.02$)

Fotovoltaikler ve ışınım ile ilgili diğer önemli bir faktör de, diğer fotovoltaik tiplerinin güneş enerji dalga boyuna tepkisi veya fotovoltaiklerin enerji aralığı tepkisi olarak bilinen faktördür. Şekil 3.3, enerji aralığına bağlı olarak çeşitli fotovoltaiklerin hesaplanan maksimum verimini göstermektedir.

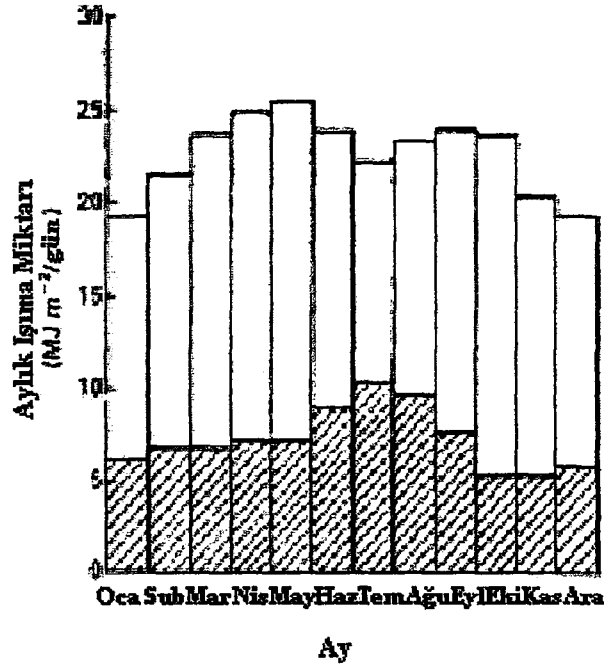


Şekil 3.3. Atmosferin dışında güneş spektrumu ile aydınlatılmış ve p-n eklemi biçiminde yarı-iletken yapılmış malzemenin enerji aralığının fonksiyonu şeklinde elde edilebilecek maksimum verimliliğin hesaplanan eğrisi. (Loferski 1963)

Fotovoltaiklerin performansını etkileyen diğer önemli bir faktör ise belirtilen alandaki mevcut olan güneş enerjisinin miktarıdır, çünkü bu miktar ne kadar büyükse verilen hücre alanında o kadar büyük miktarda elektrik üretilebilir. Örneğin şekil 3.4. ve 3.5. İngiltere’de Kew ve Aden bölgelerindeki dağılmış ışmaları göstermektedir. Bu değerler Aden bölgesinde 1958-1967 yılları arasında, Kew bölgesinde 1958-1970 yıllarında ölçülmüştür. Kew, yıllık olarak toplam ışıma olarak 5500 MJ/m^2 , Aden ise 10800 MJ/m^2 almıştır. Kew ve Aden arasındaki oran yaklaşık %50’dir. Bu yüzden bir fotovoltaik panelin Kew’de üretebileceği enerji Aden’de üretebileceği enerjinin yarısıdır.



Şekil 3.4. İngiltere’nin Kew bölgesinde aylık ışıma miktarı değişimi (1955-1970).



Şekil 3.5. Aden bölgesinde aylık ışıma miktarı değişimi (1958-1967).

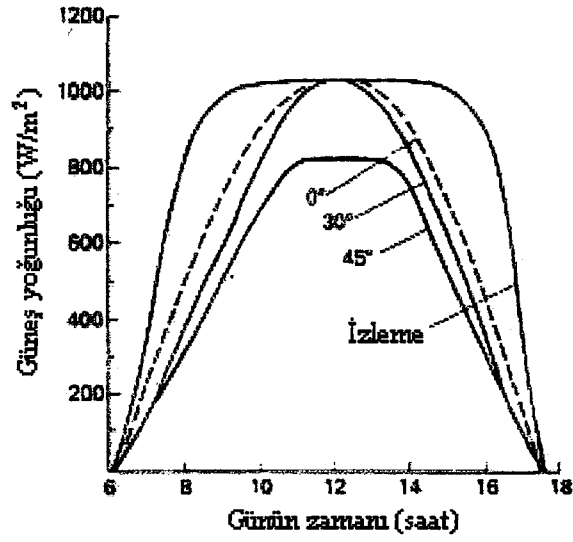
3.1.1. Takip sistemli ve takip sistemi olmayan kollektörlerdeki ışıma

Takip sistemlerinin önemi, 5 Ekim 1983 yılındaki Kuveyt'in günlük güneş ışıma yoğunluğunu gösteren şekil 3.6.'te belirtilmiştir. Şekil 3.7, o gün içinde 1m²'lik alanda değişik miktarda toplanan enerjiyi göstermektedir. Bunlar, yatay eğimli, güneye 30° yatay bakan ve güneye 45° yatay bakan yüzeylerin, izleme sistemi için günlük değerleri olan 9.5, 6.6, 6.2 ve 5.8 kWh/m²'dir. Eğer izleme yoluyla toplanan enerjinin %100 olduğu varsayılırsa bu durumda yatay, 30°eğimli ve 45° eğimli sistemlerde bu değerler %69.5, %65.3 ve %61.0 olacaktır.

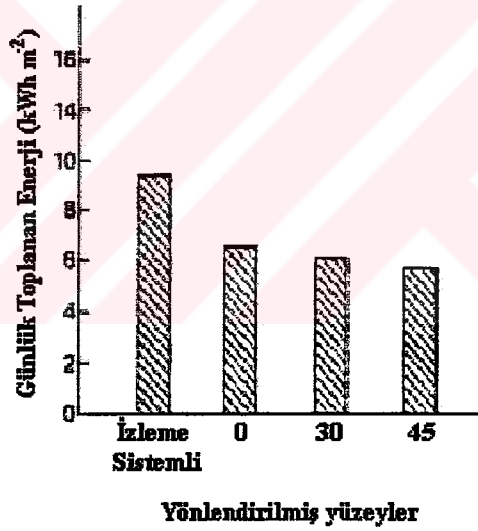
Aşağıdaki tanımlamalar güneşin geometrisi ile ilgilidir ve anlaşılması gerekir.

- Sapma açısı "δ": Güneş ışınlarının öğle zamanı ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Bu açı, 21 Haziran'da +23.45° , 21 Eylül'de 0.0° , 21 Aralık'ta -23.45° ve 21 Mart'ta 0.0° aralıklarında değişir. Şekil 3.8, yıl içinde bu açının zamana göre sapma değişikliklerini göstermektedir. Güneş yılının günü "n" değeri 1 Ocak'ta 1 değerini alır. Yıl içindeki herhangi bir gün için bu sapma açısını veren matematik formülü aşağıdaki gibidir.

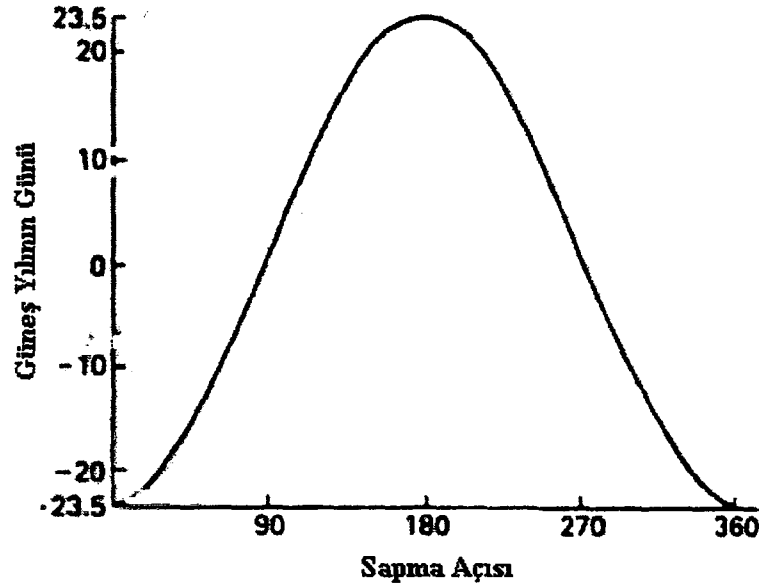
$$\delta = 23.45 \sin \frac{360}{365.24} (n + 284) \quad (3.1)$$



Şekil 3.6. 5 Ekim 1983'te Kuveyt'te, değişik saptırılmış yüzeylerdeki güneş ışınım yoğunluğu.



Şekil 3.7. 5 Ekim 1983'te Kuveyt'te, değişik saptırılmalar için günde toplanan enerji miktarları.



Şekil 3.8. 3.1 numaralı denkleme bağlı olarak, yıl boyunca sapma açısının değişimi. Güneş yılının günü 1 Ocak'ta bire eşit oluyor.

- Güneşin öğle vakti: Herhangi bir yerde, dünyanın ortasından geçip güneşe ulaşan bir doğrunun, yer bilgisine sahip boylamın meridyeninden geçiş zamanıdır.
- Saat açısı " ω ": Şekil 3.9a'da gösterildiği gibi ω saat açısı, P noktasındaki yer bilgisine sahip meridyenle, dünyanın merkezinden geçip güneşe ulaşan OQ doğrusunu kapsayan meridyen arasındaki, ekvator boyunca uzanan yayın açısı olarak tanımlanır. Saat açısı, her 15.0° için 1.0 saat olacak şekilde zaman birimlerine de dönüştürülebilir. Saat açısının öğleden önce pozitif olmasının kabulüyle aşağıdaki bağıntı oluşur.

$$\omega = (12.0 - t) \times 15^\circ \quad (3.2)$$

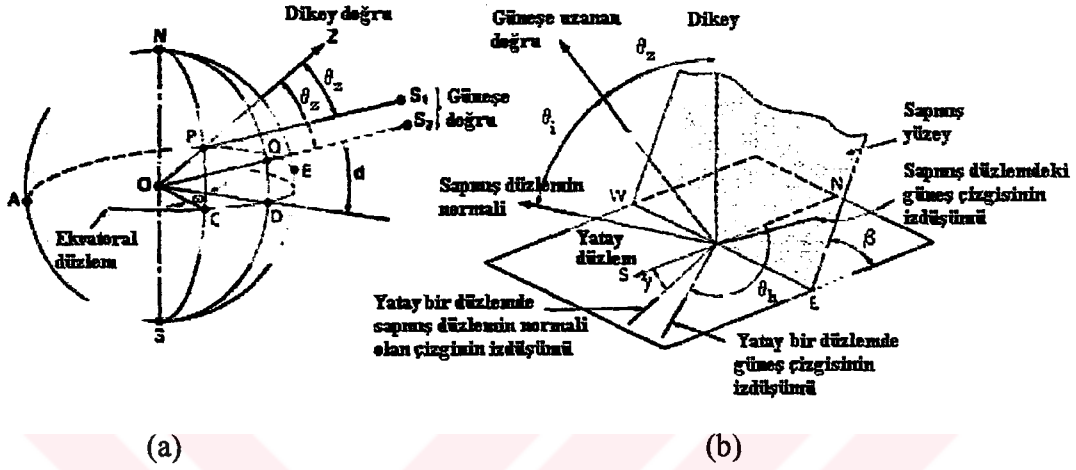
Bu denklemde "t" saat cinsinden yerel güneş zamanıdır.

- Zirve açısı " θ_z ": Bazen eğim açısı olarak nitelendirilen bu açı, şekil 3.9.'da gösterildiği gibi, güneşle, P noktasının üzerinde bulunduğu dikey doğrunun arasındaki açıdır. Zirve açısı günün zamanına, yılın zamanına ve mevkinin konumuna bağlıdır.

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (3.3)$$

Burada ϕ , ekvator düzlemi ve dünyanın merkezinden geçip P noktasına ulaşan doğru arasındaki enlem açısıdır.

- Yükseklik açısı: Güneşin yönü ve yatay düzlem arasındaki açıdır. Bu açı, zirve açısının tamamlayıcı açısıdır.



Şekil 3.9. P noktasındaki bir yerin, saptırılmış düzleme bağlı olarak güneşsel geometrisi.

- Günbatımı saati açısı “ ω ”: Bu açı günün uzunluğunu belirtir ve aşağıdaki bağıntıyla tanımlanır.

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (3.4)$$

Gün uzunluğu T ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$T = (2/15) \omega_s \quad (3.5)$$

3.1.2 Yeryuvarlağının dışında yatay bir düzlemdeki ışıma

Bu, atmosferin dışındaki yatay bir düzlemdeki ışıma olayını tanımlar. Herhangi bir zamandaki bu ışıma G_0 aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$G_0 = 1367 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (3.6)$$

Burada kullanılan n, yılın günüdür ve 1 Ocak için 1 olarak alınmıştır, θ_z ise zirve açısıdır.

Yatay bir düzlemdeki yeryuvarlağının dışında meydana gelen günlük toplam ışıma, metrekare başına megajoule formunda ifade edilir. H_0 aşağıdaki şekilde verilir.

$$H_0 = 2 \times 10^{-6} \int_0^{\omega_s} G_0 dt$$

ve (3.7)

$t = 240 \omega'$ dir.

Burada ω_s ve ω değerleri derece cinsinden günbatımı saati ve saat açılarıdır, t ise saniye cinsinden güneş zamanıdır. 6 numaralı denklemi 7 numarada yerine koyup, dt yerine $240 d\omega$ koyarsak aşağıdaki denklem oluşur.

$$H_0 = 37.595 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] C$$

ve burada

$$C = \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir.

3.1.2.1. Yatay bir düzlemdeki toplam parlaklığın aylık ortalamasından, güneş parlaklığının günlük ışıma ve yayılım bileşenleri

Düzlemsel güneş ışını toplayıcısı tarafından toplanan güneş enerjisini tahmin etmek yerine toplam gelen ışını bilmek daha yararlıdır. Düzlemsel bir yüzeydeki günlük toplam güneşlemeyi bilerek, gün boyunca toplayıcıya düşen ışını ve yayılan güneş ışımasını tahmin etmek mümkündür. Bundan da öte, gün içindeki saatlik ışımayı tahmin etmek mümkündür.

Dağılan ışığın uzun dönem ortalaması toplama oranlandığında, yarıküreye ait yatay bir düzlemdeki ışımaya olan H_d/H_h 'in tamamen günbatımı saat açısı olan ω_s 'e ve açıklık göstergesi K_h 'a bağlı olduğu bulunmuştur. Periera ve Rabl H_d/H_h oranının aşağıdaki şekilde gösterilebileceğini belirtmişlerdir.

$$\frac{H_d}{H_h} = a - bc$$

burada

$$\begin{aligned} a &= 0.775 + 0.00606 (\omega_s - 90) \\ b &= 0.505 + 0.00456 (\omega_s - 90) \\ c &= \text{Cos} (115 K_h - 103) \end{aligned} \quad (3.9)$$

ve açıklık göstergesi K_h , yatay bir düzlemdeki toplam parlaklığın (H_h), yerküre dışındaki güneşlemeye (H_0) oranı şeklinde ifade edilir.

$$K_h = \frac{H_h}{H_0} \quad (3.10)$$

K_h belli bir zaman periyodu için aşağıdaki şekildedir.

$$K_h = \frac{1}{N} \sum_{1}^N \frac{H_h}{H_0} \quad (3.11)$$

H_d bir kez bulunduktan sonra, uzun dönem ışın bileşeni terimi aşağıdaki bağıntıyla bulunabilir.

$$H_b = H_h - H_d \quad (3.12)$$

3.1.2.2. Yatay bir düzlemde saatlik toplam ışımaya

Yatay bir düzlemdeki saatlik ışımaya miktarı günbatımı saati açısına bağımlı bulunur. Saatlik toplamın, günlük toplama oranı aşağıdaki şekilde verilir.

$$\frac{I_{tot}}{H_h} = \frac{\pi}{24} (A + B \cos \omega) \left[\frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (2\pi \omega_s / 360) \cos \omega_s} \right] \quad (3.13)$$

Burada I_{tot} , yatay bir düzlemdeki saatlik toplam ışınmayı, her metrekare başına megajoule değeri ile vermektedir. A ve B katsayıları da aşağıdaki şekilde verilir.

$$A = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$B = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

3.1.3. Yatay bir düzlemde saatlik gelen ışın ve saçılan ışın miktarı

Saatlik saçılan güneş ışınımının günlük saçılan ışınımına oranı I_d/H_d aşağıdaki şekilde verilir (Lui and Jordan 1960).

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \left[\frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (2\pi \omega_s / 360) \cos \omega_s} \right] \quad (3.14)$$

Burada I_d ve H_d MJ/m² formunda, sırasıyla saatlik ve günlük güneş ışınımı saçılma değerleridir. Saatlik ışın bileşeni aşağıdaki formülden kolaylıkla çıkarılabilir.

$$I_b = I_{tot} - I_d \quad (3.15)$$

3.1.4. Eğimli bir düzlemdeki saatlik gelen ışın ve saçılan ışın miktarı

Genelde, güneşe yöneltilmiş her düzlem, sapan ışın ile bir açı yapar. Yüzeyin normali ile güneş ışını arasındaki bu açı, sapma açısı θ_i olarak isimlendirilir ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} \cos \theta_i = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \omega \cos \gamma \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \omega \sin \gamma \end{aligned} \quad (3.16)$$

Burada;

δ = Sapma açısı

β = Eğim açısı

ϕ = Enlem açısı

γ = Toplayıcının güney yönünden oluşturduğu açıdır.

Düzlem göz önüne alındığına yukarıdaki açılar oluşmaktadır (Bkz. Şekil 2.9b). Eğer düzlem yatay ise, sapma açısı, toplam azimut açısına (θ_z) eşit olur. Güneş ışını toplayıcılarının sabitlendiği birçok uygulamada, toplayıcılar ekvator boyunca eğimlendirilmişlerdir. Bu durumda $\gamma=0^\circ$ 'dir ve θ_i denklemi aşağıdaki şekilde basitleştirilir.

$$\cos \theta_i = \cos (\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin (\phi - \beta) \sin \delta \quad (3.17)$$

Bilinmelidir ki bu sapma açısı, mevkisi (ϕ') olan enlemin eşdeğeridir.

$$\phi' = \phi - \beta$$

R_b , eğimli bir düzlemdeki demet ışınımının, yatay bir düzlemdeki ışınımına oranı olarak tanımlanırsa,

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} \quad (3.18)$$

Eğimli bir düzlemde saçılan ışının iki bileşeni vardır.

1. Hemisfer tabakasından saçılan güneş ışınımı (I_{dh}).

$$I_{dh} = I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (3.19)$$

Burada $(1 + \cos \beta) / 2$ değeri, gökyüzüne yönlendirilmiş yüzeyin görüş faktörü olarak bilinir.

2. Yeryüzünden dağılarak yansıyan güneş ışınımı (I_{dg}).

$$I_{dg} = I_{tot} \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.20)$$

Burada ρ_g , ortamın yansımadır. 0.2 ve 0.7 yansıma değerleri sırasıyla çimen ve karla kaplı yüzeylere ait değerlerdir. $(1 + \cos \beta) / 2$ faktörü, yüzeyin yere göre görüşü olarak bilinir. Yönlendirilmiş bir yüzeyde, toplam dağılan ışımaya I_{dt} , iki dağılma bileşeninin toplamı ile kolayca hesaplanabilir.

$$I_{dT} = I_{dh} + I_{dg} \quad (3.21)$$

Sonuç olarak, güneş ışınımını ve gelen ışımaya göre panelin pozisyonu, verim üzerinde, dolayısıyla güneşten yararlanılarak elde edilen enerji üzerinde önemli bir rolü vardır.

3.2. Fotovoltaikler (FV)

Güneş pillerinin temeli olan fotovoltaik etkisi, güneş ışığını oluşturan fotonların silikon gibi bir yarı-iletken malzemenin yüzeyine çarparak atomlardan elektronları serbest bırakmalarıyla ortaya çıkar. Malzemeye küçük miktarlarda katılan bileşenler ile bu reaksiyonlar kolaylaştırılır ve hızlandırılır. Bu fiziksel olgu sayesinde 10-15 cm çapında bir güneş pili ile yaklaşık 1 watt'lık doğru akım gücü üretilebilir. Araştırmacıların kullandıkları en eski güneş pili malzemesi silikondur. Galyum ve germanyum gibi elementlerle katılan silikonun tek kristal, polikristal ya da amorf hallerde kullanıldığı görülmektedir. Daha yeni olarak geliştirilmeye başlanan ince film kaplama teknolojilerinde kadmiyum ve bakırın çeşitli alaşımları kullanılmaktadır. Seri halinde bağlanmış ortalama 36 hücreden oluşan bir güneş pili dizini ve bu dizinin oluşturduğu fotovoltaik modül yaklaşık 35 mA/cm^2 akım yoğunluğu ya da 550mV doğru gerilim üretmektedir.

Güneş pillerinin seri halinde bağlandıkları modül, temelde en az bir tarafı geçirgenliği yüksek cam olmak üzere koruyucu ve destekleyici birkaç plastik ya da metal katmandan oluşmaktadır. Güneş pili sisteminin bütünü ise, modül, elektronik kontroller, akü, DC-AC çevirici ve kablolardan oluşur.

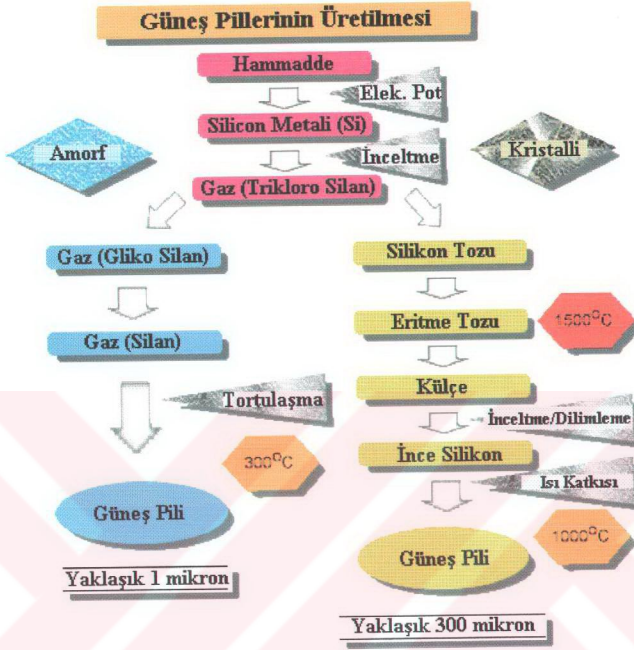
Tablo 3.1. Hücre tipleri ve verimlilikleri

Hücre tipi	Doğal ortamda Verimlilik	Laboratuar Ortamında verimlilik
mono-Si	16%	23.5%
multi-Si	15%	18.0%
Amorf-Si	7%	12.5%
Amorf - üç eklemli Si*	13%	17.3%
III/V GaAs/Ge	Uydularda 21%	27.3%
III/V GaInP/GaAs	-	30.2%
CIS	8%	17.5%
CdTe	4 - 5%	15.8%
İnce film poly-Si	8,2%	10.3%
organik	-	8 - 10%

* Üst hücre: a-Si; Orta hücre: a-SiGe; Alt Hücre: a-SiGe

3.2.1 Panel tipleri

Tabiatta silikon oksit şeklinde bol miktarda olan malzemeyi saflaştırmak gerekir. Bunun yanında yarı iletken galyum, germanyum gibi elementlerde yardımcı malzeme olarak kullanılır. Aşağıdaki şema panellerin üretilmesi için silikon oksidin saf silikon ve amorf silikona dönüştürülmesi sıralamasıdır.



Şekil 3.10. Güneş pillerinin aşamaları.

Solar panelleri üretebilmek içinde enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerjinin üretilen panel tarafından tekrar geri dönebilmesi için gerekli yıl:

Üretim sırasında
harcanan enerjinin
geri üretilmesi için
geçen yıl

$$= \frac{\text{Üretimde harcanan enerji}}{\text{Üretilen solar panelin yılda ürettiği enerji}}$$

Tablo 3.2. Güneş paneli tipleri ve harcanan enerjinin geri kazanımı.

Güneş Paneli Tipi	Üretilmesi için harcanan enerjiyi geri üretebilmesi için gerekli yıl
Amorf Silikon	1.2 yıl
Çoklu kristal yapıdaki Silikon	4.2 yıl
Tekli kristal yapıdaki Silikon	7.1 yıl

Tekli kristal yapıdaki silikon hücresi : Silikon dilimlerinden yapılır. Silikon atomları homojen kristal yapıya sahip olup bütün atomlar aynı yönde sıralıdır. Tekli kristal yapıdaki Silikon “Czochralski Growth Technology” denilen metotla eriyik saf silikonun, saatte birkaç santimetre çekilmesiyle oluşturulur.

Çoklu kristal yapıdaki silikon hücresi : Erimiş silikonun yüzeye dökülerek yapımı gerçekleşir. Rengi koyu lacivettir. Verimi homojen kristale göre azdır ancak yapımı kolay ve ucuzdur.

İnce film solar hücreleri : Plazma tortulaştırması gibi tortulaşma tekniği ile imal edilir. Kristal yapıya sahip değildir. Amorfun anlamı da zaten kristal yapısı olmayana denir. Verimliliği çok düşüktür, çok ucuzdur.

Üç eklemlili hücreler : Amorf teknolojiyle yapılır ancak veriminin çok yüksek olmasına sebep üç kat şeklindeki teknolojisidir. Teknolojisi çok ileridir, ancak malzeme girdileri düşük olduğundan maliyeti en düşük olan panel tipidir (TREBLE 1991, <http://orjinsolar.com>).

BÖLÜM 4. GÜNEŞ PİLLERİNİN GENEL YAPILARI

4.1. Elektronların Konumları ve İletim Olanakları

İletim elektronların hareketidir. Bu nedenle iletim ancak elektronlara kinetik enerji aktarılabildiğinde mümkündür. İzole atomlarda, elektronların çekirdek etrafında belli konumları olduğunu bilmekteyiz. Kristal yapı içinde ise en dışta iletim ve valans bantları vardır. Bu bantların bazıları elektronlar tarafından doldurulmuştur, diğerleri ise boştur.

Metal, yalıtkan ve yarıiletken malzemelerde elektronların konumları ve iletim olanakları arasında farklılıklar vardır. Metallerde valans elektronları serbesttirler ve ufak bir elektrik alanı uygulandığında hareket edebilecek bir elektron denizi oluştururlar. Örneğin alüminyumda iletim ve valans bantları bitişiktir ve enerji aralığı bulunmamaktadır. Bu durumda, elektronlara kinetik enerji aktarımı mümkündür.

Silisyum dioksit gibi yalıtkanlarda farklı bir durum söz konusudur. Valans elektronlarının komşu atomlarla güçlü bağları vardır. Enerji aralığı geniş olduğundan iletimde yer alabilecek serbest elektronlar yoktur. Tamamı valans bantta bulunan elektronları iletim bandına yükseltmek mümkün olmadığından silisyum dioksit iyi bir yalıtandır.

Silisyum gibi yarı iletkenlerde ise komşu silisyum atomları arasında zayıf bağlar vardır. Silisyum atomlarının ısı titreşimi sonucu, mutlak sıfır üzerindeki herhangi bir sıcaklıkta bazı bağlar kopar. Her kopan bağ elektrik iletebilen bir elektron ortaya çıkarır. Böyle elektronlara iletim elektronu denir. Ayrıca bağ kopmadan önce elektronun bulunduğu yerde şimdi bir açık oluşmuştur. Bu açık “oyuk” olarak adlandırılır. Bu oyukta komşu bağlardan valans elektronlar sıçrayabilir ve iletim gerçekleşebilir. Bu ek iletimi artı yüklü oyukun ters yönde hareketi olarak düşünmek daha kolaydır. Benzer bir durum sıvı içindeki hava kabarcıklarında görülür. Aslında

hareket eden sıvı olsa da, hava kabarcığının ters yöndeki hareketinden söz etmek daha açıklayıcıdır.

Yarı iletkenlerde enerji aralığı, yalıtkanlara göre daha dardır (Silisyum için bu değer 1.1 eV'dur) ve bazı elektronlar valans bandından, arkalarında bir oyuk bırakarak, iletim bandına sıçrayabilirler. Bir elektrik alanı uygulandığında ise iletim bandındaki elektronlar ve valans bandındaki oyuk elektrik iletmek üzere kinetik enerji kazanabilirler.

4.2. Fotonların Etki Olasılıkları

Fotovoltaik güneş pilleri, elektron-oyuk çiftleri üretmek amacıyla eklemnin çevresinde ışıksal uyarıya olanak sağlayan yarı iletken bir diyottur. Güneş ışınımı diyot eklemde potansiyel engel civarında yarı iletken malzemeye ulaştığında bir gerilim farkı yaratabilir. Güneş ışınımının geniş bir spektrumu vardır. Güneş piline ulaşan fotonların her biri, yarı iletken içinde taşıyıcılar (elektron ve oyuk) üretmeyebilir. Fotonun etki olasılıkları aşağıdaki şekildedir.

- Foton, pil içinde bir elektron-delik çifti oluşturmak için gerekli enerjiye sahip olmadığı zaman soğurulamaz.
- Foton, pilin dış yüzeyinden yansiyabilir.
- Foton eklemde çok uzak bir noktada soğurulur ve üretilen taşıyıcılar potansiyel engelle ulaşmadan yeniden birleşebilirler.
- Foton, potansiyel engelden bir yayınımlı uzaklığı içinde elektron-oyuk çiftini yaratır. Böylece taşıyıcılar var olan elektrik alanı tarafına yönlendirilebilir.

İlk üç durum enerji çevrim mekanizmasının kayıplarını oluşturur. Sadece son oluşum elektrik enerjisi üretimi için yararlıdır.

4.3. Güneş Pilindeki Kayıplar

Yukarıda tanımlanmaya çalışılan malzeme bileşimleri ile güneş pilleri yapılabilse, teorik verimi %24'e ulaşan piller elde edilebilirdi. Gerçek güneş pilleri, kayıplar nedeniyle, daha düşük verimle çalışmaktadır. Bu bölümde güneş pili kayıplarının

özellikle nereden kaynaklandığı belirlenmeye çalışılmıştır. Güneş pillerinde ilk çalışma anından başlayarak görülen kayıpları aşağıdaki gibidir.

- Işıksal Kayıplar; Güneş ışığı fotonlarının soğurulamaması ve azınlık taşıyıcılarının üretilmemesinden doğan kayıplar,
- Elektriksel Kayıpları; Fotovoltaik diyotların optimum elektrik parametrelerini düşüren kayıplar,
- Ara yüzey kayıpları; Beş tabakanın her biri için hacim kayıplarına ek olarak ortaya çıkan kayıplar olarak sınıflandırabiliriz.

Zamanla performansta görülen azalmalar ise tanımlanan hacim veya ara yüzey özelliklerindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Bu kayıpları tek tek incelemek gerekir.

4.4. Işıksal Kayıplar

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

4.4.1. Işıksal yansıma kayıpları

Işıksal yansıma kayıpları saydam kontakta, yarı iletken tabakada ve opak kontakta gerçekleşebilir. Bu kısımların her birine ilişkin kayıp öngörümüleri yapılabilir. Kayıpları güneş ışınımının güneş piline varışından itibaren sırayla ele almak uygun olacaktır.

4.4.1.1. Saydam kaplama

Saydam kaplamadan yansıma, ilk kaybı oluşturacaktır. Bir yansıma koruyucu örtünün varlığı ve/veya güneş pili yüzeyinin yansıma koruyucu bir işleminden geçirilmiş olması, yansıma kaybını önlemede yeterli olmamaktadır. Saydam kaplamadaki kayıplar, kadmiyum sülfid/bakır sülfid gibi çok iyi tasarlanmış güneş pilleri için %3'ün altına düşürülebilir. Saydam kontaklardaki kayıplar kontak tipi,

iletici cam veya metal ızgara ve bu kontakın gerektirdiği kapasitesine bağı olarak önemli değişimler gösterir. Bir metal kontak kullanıldığında, yansıma (gölgeleme) kayıpları %5 ile %10 arasında değişir. Geniş alanlı cihazlarda kabul edilebilir direnç kayıplarına ulaşmak amacıyla daha yüksek yansıma kayıpları hoş görülebilir.

4.4.1.2. Yarı iletken tabakalar

Kaplama veya yansıma koruyucu örtü ile yarı iletken tabakanın ışıksal sabitleri arasındaki farklılıklara bağı olarak, yarı iletken tabakalardan bir miktar yansıma beklenebilir. Kaplamanın ve yansıma koruyucu tabakaların uygun bir işleminden geçirilmesi ve ışık tuzaklaması bu yansımayı iyi tasarlanmış pillerde %5'in altında düşürebilir.

4.4.1.3. Opak kontak

İnce yaygı opak kontakta soğurucu-üretici yoluyla bir miktar ışığın sızması beklenebilir. İdeal bir durumda, bu ışık tekrar soğurucu-üreticiye doğru yararlı bir şekilde soğurmak üzere yansıtılabilir. Opak kontaktaki yansıma kayıpları %2'yi geçmemelidir. İyi tasarlanmış bir güneş pili için toplam ışıksal yansıma kayıpları %5'e kadar düşebilir. Aksi halde %18'e kadar yükselebilir.

4.4.2. Işıksal dış soğurulma kayıpları

Güneş pillerinde dış ışıksal soğurma azınlık taşıyıcıları üretimin mümkün olmadığı tabakalar tarafından fotonların soğurulması üzerine ortaya çıkar. Dış soğurulma kayıpları önceki bölümde yansıma kayıpları tanımlanan malzemeler için %0-10 arasında değişir.

4.5. Elektrik Kayıpları

Elektrik kayıplarını tanımlamanın en kolay yolu akım-gerilim karakteristiğini kullanmaktır. Bu kayıplar akım ve gerilim kayıplarından oluşur. Toplanıp çoğunluk taşıyıcılarına çevrilemeyen azınlık taşıyıcıları, akım kayıplarını belirler. Gerilim kayıpları, açık devre geriliminin beklenen değerinin altına bir düşüş olarak tanımlanır. Seri ve paralel direnç kayıpları ile zayıf diyot karakteristikleri, elde edilecek akım ve gerilim değerlerini küçültecektir.

4.5.1. Güneş Pillerinin Elektriksel Özellikleri

Fotovoltaik pil, elektron-oyuk çiftleri üretmek amacıyla eklemin çevresinde ışıksal uyarıya olanak sağlayan yarı iletken bir diyottur. Karanlık ortamda ideal bir p-n ekleminin $J \approx \exp(qV/kT) - 1$ karakteristiği doğrultusunda davranır. Aydınlatıldığı zaman bu eğriye akım eksenini boyunca $-J_{sc}$ nicelinde bir akım yoğunluğu bileşeni eklenir. J_{sc} , kısa devre akım yoğunluğudur ve gerilimden hemen hemen bağımsızdır. Akım akışı için karşıt işareti almak daha uygundur. Böylece pasif bir yüke sevk edilen akım pozitif olacaktır. Bir güneş pili karakteristiğinin temel biçimi

$$J = J_{sc} - J_{01} \left[\exp(qV/kT) - 1 \right] \quad \text{şeklinde olacaktır.} \quad (4.1)$$

J_{01} , “karanlık doyum akım yoğunluğu”dur. V azınlık taşıyıcıların yarı iletken içinde ısı etkisiyle üremelerinin bir sonucudur. Pilin ürettiği çıkış gerilimini en yüksek değere ulaştırabilmek için bu akım olabildiğince küçültülmelidir. Bu gereksinim taban bölgesinde azınlık taşıyıcı yoğunumun, çoğunluk taşıyıcı yoğunuma göre daima küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Pile bir yük bağlandığında, yükün empedansına bağımlı bir gerilimde akım elde edilir. Eğer yük empedansı sıfır ise, pil aydınlatma yoğunluğu ile orantılı olan kısa devre akımını (J_{sc}) üretir. Eğer yük ayrılırsa pil,

$$V_{oc} = kT/q \times I_n (J_{sc}/J_{01} + 1) \quad (4.2)$$

$$\approx kT/q \times I_n (J_{sc}/J_{01})$$

denklemleriyle verilen bir açık-devre gerilimi geliştirir. Denklem (4.2)'de yapılan yaklaşımdaki hata, J_{sc}/J_{01} , 10^{10} - 10^{14} mertebesinde olduğu için ihmal edilebilecek bir düzeydedir. Yük empedansı uygun şekilde düzenlenirse en yüksek güç elde edilir.

$$P_{max} = J_m \times V_m = f \times J_{sc} \times V_{oc} \quad (4.3)$$

Eğri faktörü, f , akım-gerilim eğrisinin keskinliğine bağlı olarak değişir. Denklem (4.1)'de tanımlanan karakteristiklere sahip ve 300°K 'de 0.6 V verecek şekilde yaklaşık “bir güneş yoğunluğu” ile aydınlatılmış “ideal” bir silisyum pilinin eğri

faktörü 0.827 olacaktır. Gerçek pillerin eğri faktörleri ise 0.75-0.8 mertebesinde gerçekleşir.

İdeal bir P-I-N pili için denklem (4.1)'i yazarsak

$$J = J_{sc} - J_{02} \left| \exp(qV/2kT) - 1 \right| \quad \text{elde ederiz.} \quad (4.4)$$

4.5.2. Akım Kayıpları

Güneş pillerinde üretilen azınlık taşıyıcılarının kaybı pek çok yolla gerçekleşebilir.

- Hacim içinde yeniden birleşme kayıpları, uyarılan taşıyıcıların sonlu ömürlerinden kaynaklanır. Bu nedenle ortaya çıkan akım kaybı, yayının uzaklıklarıyla soğurucu kalınlığı arasındaki orana bağlıdır. Soğurucu kalınlığının aynı zamanda soğurmayı en iyi hale getirmek üzere seçilmesi gerektiğinden, ışıksal ve elektriksel gereksinimler arasında bir uzlaşma sağlanmalıdır. İyi tasarlanmış güneş pillerinde hacim içi yeniden birleşme kayıpları %5 ile %20 arasında değişir.
- Yüzey yeniden birleşmesi, bir malzemedeki her kesintinin yeni elektronik koşullar yaratmasından kaynaklanır. Işınım ile üretilen ve yüzeye doğru yayınıma uğrayan taşıyıcılar, yüzey etkilerini önleyici özel önlemler alınmadığı ya da taşıyıcıların yüzeye ulaşmaları engellendiği zaman, yüzeyde yitirilirler. Yüzeyde bir oksit tabakanın oluşturulması, genellikle, yüzey koşullarının etkisini ve bundan dolayı da taşıyıcı kaybını azaltır. Yüzey yakınlarına uygulanan homojen olmayan bir katıştırma işlemi, bir iç elektrik alanı oluşumuna yol açarak, azınlık taşıyıcıların yüzeyden uzaklaştırılmasına ve akım kayıplarının azaltılmasına neden olur. Yüzeydeki bu yeniden birleşme kaybı en iyileştirilmiş güneş pillerinde %0-5 arasında değişim gösterir.
- Kristal sınırları iç yüzeyler gibi davranabildiğinden, serbest bir yüzey ölçüsünde azınlık taşıyıcı kaybına neden olabilirler. Kristal sınırlarında pürüzler çok daha etkin olduğundan yapılacak bir katıştırma işlemi azınlık taşıyıcılarını uzaklaştıracak ve akım kayıplarını önlemede başarılı olacaktır.

4.5.3. Açık Devre Gerilimi

Homojen eklemler, heterojen eklemler ve Schottky diyotlarında açık devre gerilimi ya hacim içi yeniden birleşme ömrü, ya da ara yüzey yeniden birleşme hızları ile denetlenir. Açık devre gerilimini kontrol eden ve etkileyen ek parametreler bant aralığı ve eklemin n ve p taraflarının katıştırılma seviyeleridir. Açık devre gerilim kayıpları %4 ile %50 arasında değişir.

4.5.4. Direnç Kayıpları

Seri direnç ve paralel iletkenlik güneş pillerinde arzu edilmeyen özelliklerdir. Örneğin Bakır Sülfid/Kadmiyum Sülfid pillerinde seri direnç oluşturan temel etken Cu_2S 'in tabaka direncidir. Isıl bir işlem ile bu tabakanın direnci azaltılabilmektedir. Izgara geometrisi de seri direnç değerini belirleyen önemli etkenlerden biridir.

Paralel direnç değeri açık-devre gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İdeal bir güneş pilinde paralel direnç sonsuza yakın olmalıdır. Bakır Sülfid/Kadmiyum Sülfid güneş pillerinde altın ızgara, kadmiyum sülfid tabakasına kısmi kontak yaparak paralel bir iletkenlik oluşturur. Güneş pillerinde paralel iletkenlik ve seri direnç kayıpları %0-%10 mertebesindedir.

4.5.5. Ara Yüzeyde Yeniden Birleşme

Bir heterojen eklemden, eklemin iki yanında bulunan malzemelerin örgü uyumsuzluğu, ara yüzey konum yoğunluğunun artmasına yol açar. Normal değeri $10^{10}/cm^2$ 'ye kadar yükselir. Ara yüzey konum yoğunluğu ile ara yüzey yeniden birleşme hızı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bakır Sülfid/Kadmiyum Sülfid güneş pilinde ara yüzeydeki uyumsuzluğun %4, ara yüzey yeniden birleşme hızının ise $10^5 cm/s$ mertebesinde olduğu saptanmıştır. Uygun şekilde tasarımı yapılarak imal edilmiş C_2S/CdS pillerinde ara yüzeylerdeki net kayıp %5'in altına indirilebilir.

4.6. Verim Kaybı Süreçleri

Güneş pillerinde maliyetin düşürülebilmesi, pil ömrünün uzun olması ile mümkündür. Günümüzde güneş pillerinin ömrüne ilişkin belirsizlikler vardır. Ancak genellikle, 20 yıllık bir süre için güneş pili veriminde %10 ile %20 arası düşüşler

tasarımcı ve imalatçıların hedefi olmaktadır. Güneş pillerinin çıkış gücündeki azalmanın kolayca anlaşılabilen birkaç nedeni vardır. Pilin dış yüzeyinde, güneş ışınımının gelişini engelleyen toz ve pisliklerin birikmesi bu nedenler arasındadır. Bu bölümde pilin içinde yer alan ve temel olarak ikiye ayrılan verim kayıp süreçleri ele alınacaktır.

4.7. Belirleyici Öz Süreçler

- Bir p-n homojen kontakları ve katıştırma malzemeleri
- Heterojen eklem veya Schottky diyotlarında ise kimyasal elemanları içeren yayılım süreci önem kazanmaktadır. Yayılım süreçleri ısı olarak başlatıldığından, belli pil parametrelerindeki verim düşme hızlarını belirlemek amacıyla yükseltilmiş sıcaklıklarda hızlandırılmış ömür deneyleri yapılır. Çok kristalli güneş pillerinde kristal sınırları, yayılımı sağlayan bir pompa işlevine sahip olabilir. Bu nedenle ölçümlerin gerçek pillerde yapılması ve modelleme çalışmalarının çok kristalli malzemeler gözetilerek yürütülmesi önerilmektedir.

4.8. Çevreden Kaynaklanan, Etkileri Geçici Süreçler

Çevre etkilerinin en önemlilerinden biri, kaplamanın yetersiz olduğu koşullarda, yarı iletken tabakanın oksitlenmesidir. Diğer dış etkiler arasında;

- Kontak malzemelerin çürümesi,
- Özellikle rutubetli bölgelerde yansıma koruyucu örtünün çürümesi,
- Mor ötesi ışınlar veya meteorolojik etkiler nedeniyle kaplama malzemesinin kararması sayılabilir.

Hızlı soğuma ve ısınmanın yer aldığı sıcaklık dönüşümleri nedeniyle de verim kaybı söz konusu olabilir (KILINÇ 1993).

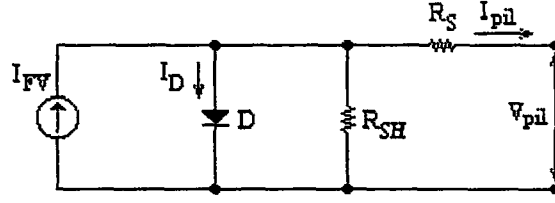
BÖLÜM 5. FV GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL DEVRE MODELLERİ VE GÜNEŞ IŞIĞI İLE SICAKLIĞIN ETKİLERİ

FV güneş pillerinin elektriksel eşdeğer devre ve ilgili matematiksel modellerinin belirlenip incelenmesi bu kısmın ana konusunu oluşturmaktadır. Bu modellerde kullanılan parametreler, değişen gün ışığı şiddeti ve ortam sıcaklıklarına bağlı olarak değiştiklerinden, modellemede bu durum dikkate alınmıştır. Dolayısıyla gün ışığı şiddeti ve ortam sıcaklığındaki değişimlerin geliştirilen FV güneş pili ve paneli modellerini nasıl etkiledikleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu amaçla FV güneş pili panelinin belirli bir gün ışığı ve ortam sıcaklığı seviyesinde deneysel olarak elde edilen ve referans alınan akım-gerilim karakteristiğinden model parametrelerinin belirlenmesi ve farklı gün ışığı ve ortam sıcaklığı seviyeleri için bu modelin yeniden düzenlenmesi ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

Diğer elektrik enerji kaynaklarının tasarımında ve kullanımında olduğu gibi, FV güneş pili panelleri tasarlanırken de, ihtiyaç duyulan güç ve gerilimi sağlayacak şekilde panelin elektriksel özellikleri önceden yapılan simülasyon çalışmalarıyla incelenir. Bu inceleme sonucunda seri-paralel bağlanacak olan pil sayıları, panelin değişik ışık şiddeti ve çalışma sıcaklığı seviyelerinde verebileceği maksimum çıkış gücü ve yükteki değişimler karşısında panel çıkış büyüklüklerinin göstereceği tepkiler belirlenerek, gerekli önlemler tasarım aşamasında alınır. Ayrıca tasarımı tamamlanmış olan FV pil ve panellerinin daha verimli ve etkin bir şekilde kullanımını sağlamak, gerekli denetim işlemlerini gerçekleştirmek için de kurulu sistemin simülasyonuna ihtiyaç duyulur.

FV güneş pilini simüle etmek için bir eşdeğer devre modeline ihtiyaç vardır. Günümüze kadar FV güneş pillerinin devre modellerine ilişkin değişik çalışmalar yapılmıştır. Burada basit ve kullanışlı bir model belirlenecektir.

5.1. FV Güneş Pilinin Eşdeğer Devre Modelleri



Şekil 5.1. FV pilinin genel statik eşdeğer devresi.

Şekil 5.1’de verilen devre modeli, FV güneş pilinin genel statik eşdeğer devresidir. Bu modeldeki parametreler ışık şiddeti ve sıcaklığa bağlıdır. Dolayısıyla hesaplanacak her çıkış değeri için ışık ve sıcaklık seviyelerinin bilinmesi gerekir. Bu şekilde verilen devre modeli matematiksel olarak aşağıdaki denklem ile temsil edilebilir.

$$I_{pil} = I_{FV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{e}{kT_{pil}} (V_{pil} + R_S \times I_{pil}) \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pil} + R_S \times I_{pil})}{R_{SH}} \quad (5.1)$$

Burada;

- I_{pil} : FV pilin çıkış akımı (A)
- I_{FV} : Işık seviyesi ve P-N birleşim noktası sıcaklığının fonksiyonu, fotoakım (A)
- I_0 : D diyodunun ters doyma akımı (A)
- V_{pil} : FV pilin çıkış gerilimi (V)
- R_S : Eşdeğer devrenin seri direnci (Ohm)
- R_{SH} : Eşdeğer devrenin paralel direnci (Ohm)
- e : Elektron yükü (1.6021917×10^{-9} C)
- k : Boltzmann sabiti (1.380622×10^{-23} J/°K)
- T_{pil} : Referans çalışma sıcaklığı (°K)

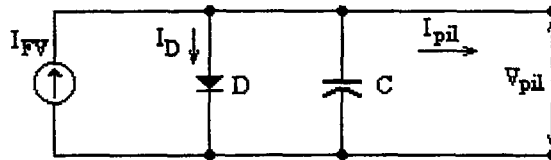
Boltzman sabiti k ve referans çalışma sıcaklığı T_{pil} anı, sıcaklık birimine sahip olmalıdırlar. Yani her ikisi de ya derece ya da kelvin olarak hesaba katılmalıdır. Boltzman sabiti k genelde kelvin olarak verildiği için, T_{pil} sıcaklığını, kelvin formuna dönüştürerek kullanmak daha uygun olur.

FV pilin I-V karakteristiği denklem (5.1) yerine polinom denklemleri ile de temsil edilebilir. Polinom denklemlerinde pil akım ya da gerilimi biri diğerinin fonksiyonu olacak şekilde temsil edilir. Örneğin, denklem (5.2) de pil akımı, pil gerilimine bağlı olarak verilmiştir.

$$I_{pil} = k_0 + k_1 \times V_{pil} + k_2 \times V_{pil}^2 + k_3 \times V_{pil}^3 \dots + k_n \times V_{pil}^n \quad (5.2)$$

Bu polinom denklemindeki katsayılar, deneysel olarak belirlenmiş bir FV pilin I-V karakteristiğinden, kullanılan polinom derecesi kadar, mesela denklem (5.2) için n adet veri alınıp, bu n adet denklemin çözülmesiyle, veya “En Küçük Kareler Yöntemi” kullanılıp eğri uydurmak suretiyle belirlenebilirler. Yedinci dereceden bir polinom, FV pilin I-V karakteristiğini temsil etmeye yeterli olacaktır. Ancak bu tür denklemlerin derecesi arttıkça katsayıların belirlenmesi zorlaşır, bilgisayarla yapılan simülasyon çalışmalarında çözüm süresi artar. Bu nedenle de pek tercih edilmezler. Üstelik polinom denklemleri ile temsil edilen FV pil I-V karakteristiğinin gerçek karakteristiğe uyumluluğu denklem (5.1)’den türetilen diğer modellere göre daha azdır. Yani modelleme hatası daha fazladır.

FV güneş pillerinin kullanıldığı sistemlerin dinamik simülasyonu yapılırken doğal olarak FV pilin de bir dinamik (geçici durum) modeline ihtiyaç vardır. Literatürde, temelde aynı olsa da, birbirinden bazı farklılıklar gösteren dinamik modellere rastlamak mümkündür. Örneğin şekil 5.1’deki şönt dirence paralel bağlı bir kondansatöre ya da şekil 5.2’de görüldüğü gibi doğrudan çıkış terminallerine paralel bağlı bir kondansatöre sahip dinamik FV pil modelleri kullanılmaktadır.



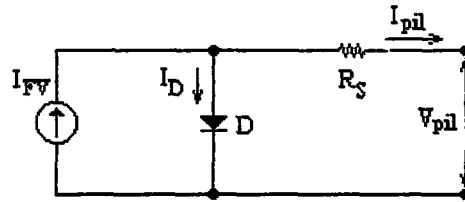
Şekil 5.2. FV pilin dinamik modeli.

Karşılaştırmaların sonucuna göre FV güneş pilinin statik ve dinamik modellerden elde edilen akım ve gerilimi temelde hemen hemen aynı olmaktadır. Dolayısıyla FV pil modeline kondansatör dahil ederek işlemleri zorlaştırmak gereksizdir. Hatta bir çok çalışmada dinamik model yerine statik model kullanma yoluna gidilmiştir. Bu durumda dinamik model yerine statik model kullanmanın sonucu etkilemeyeceği açıktır.

Şekil 5.1'de şönt direnç R_{SH} , seri direnç R_S 'den çok daha büyük olduğu için, denklem (5.1)'deki son terim I_{pil} akımı ile kıyaslandığında oldukça küçük kalır ve ihmal edilebilir. Bu ihmal yapılırsa, denklem (5.1) yerine,

$$I_{pil} = I_{FV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{e}{kT_{pil}} (V_{pil} + R_S \times I_{pil}) - 1 \right) \right] \quad (5.3)$$

denklemini kullanılabilir. Benzer şekilde, şönt direnç ihmal edildiği için şekil 5.1'de verilen devre yerine şekil 5.3'de verilen basit eşdeğer devre kullanılabilir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, şekil 5.1 ve denklem (5.1)'in temsil ettiği eşdeğer devre ile şekil 5.3 ve denklem (5.3)'ün temsil ettiği eşdeğer devre arasında önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Dolayısıyla, bundan sonraki kısımlarda FV güneş pili, şekil 5.3'de verilen ve denklem (5.3) ile temsil edilen eşdeğer devresi kullanılarak incelenecektir.



Şekil 5.3. FV güneş pilinin basite indirgenmiş eşdeğer devresi.

Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'de I_D olarak işaretlenen akım, FV pili oluşturan yarıiletken malzemelerin P-N birleşme noktasından akan bir iç akım olup, pilin mutlak sıcaklığı, terminal gerilimi ve yük tarafından çekilen akımın bir fonksiyonu olarak değişir. Bu akım denklem (5.4) ile ifade edilir.

$$I_D = I_0 \exp\left[\frac{e}{AkT_{pil}}(V_{pil} + R_s \times I_{pil})\right] - 1 \quad (5.4)$$

FV pil akımı aynı zamanda yükün çektiği akım olduğundan, FV güneş pilinin simülasyonunda yük akımı pil akımı olarak alınıp, pil akımı biliniyor kabul edilebilir. Dolayısıyla denklem (5.1) ve (5.3)'de pil akımının gerilimine bağlı olarak verildiği $I_{pil} = f(V_{pil})$ biçimindeki denklemler yerine $V_{pil} = f(I_{pil})$ biçiminde pil gerilimini akımın fonksiyonu olarak veren denklemlerin kullanılması daha uygun olur. Denklem (5.3)'den hareketle, FV güneş pilinin gerilimi, akıma bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$V_{pil} = \frac{AkT_{pil}}{e} \ln\left(\frac{I_{FV} + I_0 - I_{pil}}{I_0}\right) - R_s \times I_{pil} \quad (5.5)$$

Denklem (5.5)'de verilen A katsayısı bir eğri uydurma faktörü olup bu denklemden elde edilecek olan I-V karakteristiğinin deneysel olarak elde edilen gerçek I-V karakteristiğine uyumunu sağlamak için kullanılmaktadır. Denklem (5.5) ile verilen ifade, bir tek FV pilin çıkış gerilimini temsil eder. Eğer bir tek pil yerine bir çok pilin seri-paralel gruplar halinde bağlanmasıyla oluşturulan FV pil panelinin çıkış gerilimi hesaplanacaksa, aşağıda sıralanan işlemlerin yerine getirilmesi gerekir.

- i. Önce yük akımı paralel kol sayısına (N_p) bölünerek bir tek pilden akan akım bulunur.
- ii. Sonra da elde edilen bu akım, denklem (5.5)'de kullanılarak bir tek pilin ürettiği gerilim elde edilir.
- iii. Son olarak da, denklem (5.5) ile belirlenen pil gerilimi, paralel bağlı kollardan birindeki seri bağlı pil sayısı (N_s) ile çarpılarak panelin çıkış gerilimi bulunur.

Şunu belirtmek gerekir ki, eğer seri olarak bağlı FV pillerinin kısa devre akımları birbirlerinin aynı, ya da birbirlerine çok yakın değilse problemler meydana gelir. Yani kısa devre akımı düşük olan pil bozularak (yanarak) terminallerinde ters gerilim meydana getiren bir diyot gibi davranır. Düşük kısa devre akımına sahip pilin ters

gerilimden korunması için bu pilin uçları arasına bir bypass diyodu (geçiş yolu) bağlanarak akım için bir alternatif yol oluşturulur.

5.2. Çalışma Sıcaklığı ve Gün Işığı Seviyesindeki Değişimlerin FV Pil Üzerindeki Etkilerinin Modellenmesi

Denklem (5.5), pilin sadece belirli bir T_{pil} P-N birleşim noktası sıcaklığı ve belirli bir S_{pil} gün ışığı (güneş radyasyonu) seviyesi için geçerlidir. Eğer FV pilin birleşim noktası sıcaklığı ya da gün ışığı seviyesinde bir değişim olursa pilin ürettiği gerilim ve akım da buna bağlı olarak değişir. Dolayısıyla gün ışığı ve pil sıcaklığında meydana gelen değişimlerin etkileri de FV güneş pilinin simülasyon modeline dahil edilmelidirler. Bu değişimlerin etkileri farklı biçimlerde simülasyon modeline eklenebilir. Belli yöntemlere göre bilinen bir çalışma sıcaklığı ve gün ışığı seviyesinde deneysel olarak pilin I-V karakteristiği elde edilip, referans I-V, karakteristik olarak kullanılır. Şöyle ki, bu referans I-V karakteristik farklı çalışma sıcaklığı ve gün ışığı seviyeleri için yeniden düzenlenir. Bazı uygulamalarda paneldeki pillerin seri-paralel bağlantı konfigürasyonları hava koşullarına göre değiştirildiği için, panelin değil de tek bir pilin I-V karakteristiğini referans almak doğru olur. Çünkü tek bir pile ait I-V karakteristik değişen hava koşullarına göre yeni biçimini alınca bu karakteristik seri bağlı pil ve paralel bağlı seri pil kol sayıları dikkate alınarak, panelin I-V karakteristiğine genelleştirilebilir. Referans I-V karakteristik ve bunun matematiksel bağıntısı olan denklem (5.5)'deki katsayı ve parametrelerin belirlenmesinde izlenen basamaklar aşağıda sıralanmıştır.

5.3. FV Güneş Pilinin Referans I-V Karakteristikleri

Referans I-V karakteristik elde edilirken, FV pil panelinde kullanılacak pillerden birisi üzerinde test yapılarak, bu pile ilişkin I-V karakteristik belirli bir çalışma sıcaklığı T_{pil} ve gün ışığı şiddeti S_{pil} değerleri için elde edilir. Tabii burada, panelde kullanılan bütün FV pillerin aynı elektriksel özelliklere sahip oldukları kabul edilmektedir. FV pilin I-V karakteristiğini deneysel olarak elde etmek için;

1. Ayarlanabilir bir direnç FV güneş pilinin çıkış terminalleri arasına bağlanır ve değişik direnç değerlerinde çıkıştaki V_{pil} gerilimi ve I_{pil} akımı ölçülerek kaydedilir.

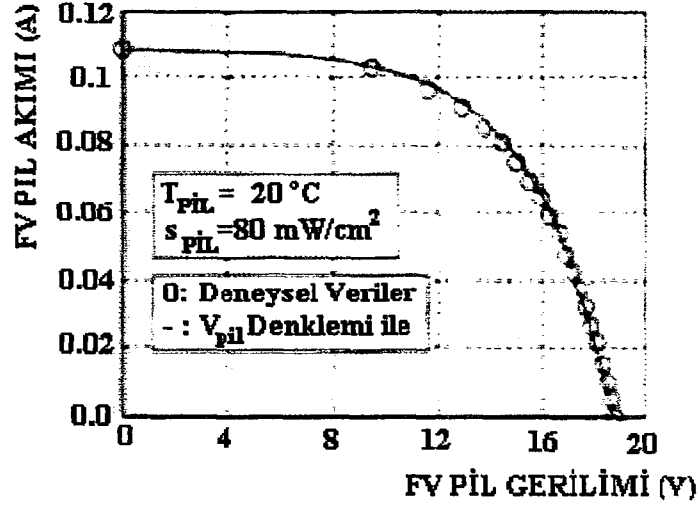
2. FV pilin kısa devre akımı I_{kd} (ayarlanabilir direncin değeri sıfır) ve açık devre gerilimi V_{ad} (ayarlanabilir direnç açık devre) 1. adımda elde edilen verilerden belirlenir.

$$V_{pil} = 0.0 \quad \text{iken} \quad I_{kd} = I_{pil}$$

$$I_{pil} = 0.0 \quad \text{iken} \quad V_{kd} = V_{pil}$$

3. Kısa devre sırasında diyodun ters doyma akımı I_0 , kısa devre akımına kıyasla çok daha küçük olduğu için ihmal edilebilir. Bu durumda FV pilin fotoakımı I_{FV} , kısa devre akımı I_{kd} 'na eşit kabul edilerek işlem yapılabilir.
4. Diyodun ters doyma akımı I_0 için çok küçük rastgele bir değer alınır.
5. Referans I-V karakteristiğini belirlemek için yapılan test sırasında çalışma sıcaklığı T_{pil} ve güneş radyasyonu (ışığı) seviyesi S_{pil} değerlerini belirlemek gerekir. Burada ele alınan referans I-V karakteristiğe ilişkin, test esnasında bu değerler sırasıyla, $T_{pil} = 20^\circ\text{C}$ ve $S_{pil} = 80 \text{ mW/cm}^2$ olarak tespit edilmiştir.
6. Referans I-V karakteristiği deneysel olarak elde edildikten sonra, bu karakteristiği verecek şekilde denklem (5.5)'deki bilinmeyen R_s seri direnci, I_0 diyodun ters doyma akımı ve A eğri uydurma katsayısı deneme-yanılma ya da eğri uydurma yöntemleri kullanılarak belirlenir. Bu üç bilinmeyen, deneysel I-V eğrisinin maksimum güç noktası civarlarından alınan üç noktaya ilişkin verilerin denklem (5.5)'de kullanılmasıyla elde edilecek üç doğrusal olmayan denklem takımının çözülmesiyle belirlenebilir. Bu çözüm sırasında da I_{FV} fotoakımı, I_{kd} kısa devre akımına eşit kabul edilebilir. Denklem (5.5)'deki bütün değerler belirlenince bu denklem referans I-V karakteristiğini veren ve bilgisayar simülasyonunda FV pili matematiksel olarak temsil eden referans denklem olarak kullanılır.

Deneysel olarak ölçülen ve denklem (5.4) ile hesaplanan referans I-V karakteristiklerinin son biçimleri şekil 5.4'de verilmektedir. Unutulmamalıdır ki bu I-V karakteristik sadece 20°C 'lik bir çalışma sıcaklığı ve 80 mW/cm^2 'lik bir güneş radyasyonu (gün ışığı) seviyesi için geçerlidir. Farklı çalışma sıcaklığı ve farklı gün ışığı seviyeleri için bu karakteristiğin yeniden düzenlenmesi gerekir.



Şekil 5.4. FV güneş pilinin ölçülen ve hesaplanan referans I-V karakteristikleri.

5.4. Referans I-V Karakteristiğinin Değişen Çalışma Sıcaklığı ve Gün Işığı Seviyeleri İçin Yeniden Belirlenmesi

Bilinen T_{pil} çalışma sıcaklığı ve S_{pil} güneş radyasyonu seviyesi için denklem (5.5) temel denklem olarak alınabilir. Güneş panelinin bulunduğu ortamın sıcaklığı ve güneş radyasyonu seviyesi değişince, paneldeki FV pillerin çalışma sıcaklığı T_{pil} de değişerek yeni bir fotoakımı ve yeni bir çıkış gerilimi oluşturur. FV pillerin çalışma sıcaklığı, güneş radyasyonu seviyesi ve ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişir. Değişken ortam sıcaklığı T_x pilin çıkış gerilimi ve fotoakımını etkiler. Bu etkiler, aşağıda açıklandığı gibi, pil modelinde sırasıyla sıcaklık, gerilim ve akım katsayıları C_{TV} ve C_{TI} ile temsil edilmektedirler.

$$C_{TV} = 1 + \beta_T (T_a - T_x) \quad (5.6)$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_{pil}} (T_x - T_a) \quad (5.7)$$

Burada T_a test sırasında bilinen referans ortam sıcaklığını temsil etmektedir ve 20°C olduğu varsayılmıştır. T_x farklı zamanlardaki farklı ortam sıcaklıklarını temsil eder. β_T ve γ_T katsayıları ise sırayla sıcaklık nedeniyle pil gerilimi ve akımında meydana gelen değişimlerin eğimlerini temsil etmektedirler. Bu β_T ve γ_T katsayıları FV pil

tipine bağı olarak değişir ve deneysel olarak belirlenirler. Normalde B_T 0.004 ile 0.006 arasında, γ_T ise 0.02 ile 0.1 arasında değerler alır.

Her ne kadar gün boyunca ortam sıcaklığı önemli ölçüde değişmese de, güneş radyasyonu seviyesi, gün ışığı miktarı ve havanın bulutluluk durumuna bağı olarak etkin biçimde değişerek FV pilin fotoakımını ve çalışma sıcaklığını, dolayısıyla da çıkış gerilimini etkiler. Eğer güneş radyasyonu seviyesi S_{C1} gibi bir değerden S_{C2} gibi bir değere değişirse, çalışma sıcaklığı T_{C1} 'den T_{C2} 'ye, fotoakım ise I_{FV1} 'den I_{FV2} 'ye değişir. Böylece, güneş radyasyonu seviyesindeki değişimin, pil fotoakımı ve çıkış gerilimi üzerindeki etkileri iki ayrı düzeltme katsayısı ile ifade edilir. Bu düzeltme katsayıları çıkış gerilimi için C_{SV} , fotoakım için ise C_{SI} ile verilmekte ve sırasıyla denklem (5.8) ve (5.9) ile tanımlanmaktadır.

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \times \alpha_s (S_x - S_{pil}) \quad (5.8)$$

$$C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_{pil}} (S_x - S_{pil}) \quad (5.9)$$

Burada, S_{pil} referans güneş radyasyon seviyesi olarak kullanılan gün ışığı şiddetidir. S_x ise farklı zamanlardaki farklı güneş radyasyon seviyelerini temsil etmektedir. α_s , güneş radyasyon seviyesindeki değişimin, pil çalışma sıcaklığında meydana getireceği değişime ait bir katsayı olup denklem (5.10) ile tanımlanır.

$$\alpha_s = \frac{\Delta T_{pil}}{S_x - S_{pil}} = \frac{T_{pil} - T_a}{S_x - S_{pil}} \quad (5.10)$$

α_s 'nin değeri, aynı özelliklere sahip olmayan FV piller için farklıdır ve deneysel olarak belirlenir. Ancak bu değer genellikle 0.3 ile 0.4°C cm²/mW arasındadır. Yukarıda verilen düzeltme katsayıları C_{TV} , C_{TI} , C_{SV} ve C_{SI} kullanılarak FV pilin yeni çıkış gerilimi V_{Xpil} ve yeni fotoakımı I_{XFV} , yeni çalışma sıcaklığı T_x ve yeni güneş radyasyonu seviyesi S_x için aşağıdaki gibi belirlenir.

$$V_{Xpil} = C_{TV} \times C_{SV} \times V_{pil} \quad (5.11)$$

$$I_{XFV} = C_{TI} \times C_{SI} \times I_{FV} \quad (5.12)$$

Burada, C_{TV} ve C_{TI} , denklem (5.6) ve (5.7)'de verildiği gibi ortam sıcaklığındaki değişimin sırasıyla pil gerilimi ve akımı üzerindeki etkilerini, C_{SV} ve C_{SI} ise denklem (5.8) ve (5.9)'da verildiği gibi güneş radyasyonu seviyesindeki değişimin sırasıyla pil gerilimi ve akımı üzerindeki etkilerini temsil ederler. Bu ifadelerdeki V_{pil} ve I_{FV} ise referans alınan pil çalışma sıcaklığı ve gün ışığı (güneş radyasyonu) seviyelerindeki pil çıkış gerilimi ve fotoakımının değerleridir. Daha önce de belirtildiği gibi, kısa devre sırasında diyodun I_0 ters doyma akımı, I_{FV} fotoakımına kıyasla çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Dolayısıyla I_{FV} fotoakımı, I_{kd} kısa devre akımına eşit alınabilir. Böylece her yeni I_{XFV} fotoakımı değerine karşılık, I-V karakteristiğinde yeni bir I_{Xkd} kısa devre akımı değeri olacaktır.

5.5. Sonuç ve Değerlendirmeler

FV güneş pilleri klasik DA kaynaklarından farklı akım-gerilim karakteristiklerine sahiptir. Bu nedenle de farklı eşdeğer devre modelleri gerektirirler. Farklı güneş radyasyonu ve ortam sıcaklıklarında farklı akım-gerilim karakteristikleri meydana geldiğinden, güneş radyasyonu ve ortam sıcaklığında meydana gelen değişimlerin etkileri de eşdeğer devre modellerine dahil edilirler. Ayrıca yapılan çalışmalar göstermiştir ki; FV güneş pillerinin statik eşdeğer devre modelleri dinamik model olarak da kullanılabilirler. Bunun en büyük nedeni de güneş radyasyonu ve ortam sıcaklığında meydana gelen değişimlerin sistem dinamiği bakımından çok yavaş olmalarıdır (ALTAŞ 1998).

BÖLÜM 6. FV HÜCRELERİN ELEKTRİĞİ ÜRETMESİ

6.1. Silikonun Yapısı

FV hücreleri yarı iletken malzemelerden yapılır. Silikon en çok kullanılan yarı iletken malzemedir. Işık yarı iletken malzemeye yansıdığında malzeme tarafından emilir. Diğer bir anlatımla ışık enerjisi yarı iletken malzemeye geçer, malzemedeki elektron bağlarını zayıflatır ve bir yerden bir yere gitmesini sağlayarak elektrik akımını oluşturur. Yarı iletkenin üzerine koyulan metal kollektörler bu elektrik akımını toplarlar.

Tabi bu anlatım aslında çok basittir. Silikonun tek kristal halini incelemek gerekir. Silikon kristal halindeyken birçok kimyasal özelliğe sahiptir. Silikon atomunun 14 elektronu vardır. Üç halka şeklinde çekirdeğin etrafında hareket ederler. İlk halkada 2, ikinci halkada 8 elektron çekirdeğe yakın bir şekilde hareket ederler. Son halkada 4 elektron vardır. Silikon son halkadaki 4 elektrona bir başka 4 elektron ekleyip son halkasındaki elektron adedini 8'e çıkarmaya çalışır. Halkadaki son 4 elektron yanındaki diğer silikon atomundaki 4 elektronla sanki el tutuşarak bağlanır. Bu bağlantı diğer komşu atomlarla devam eder ve silikon saf kristal yapısına kavuşmuş olur. Bağlanacak elektronu kalmayan kristal silikon atomunun iletkenliği çok zayıflar. Çünkü elektronlar sıkıca birbirlerine bağlı olduğundan bağlanacak elektron arayışı son bulmuştur.

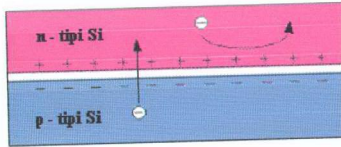
Saf silikona ısı enerjisi verilirse, bu ısı enerjisi saf silikondaki bazı elektronların atom yapısından kopmasını sağlar, ancak bu saf silikonda çok azdır. Silikon, yapısında elektronu kopmuş yere başka bir elektron arar, aynı şekilde yan atomdan kopan elektronu bu boşluğa yerleştirir. Bu boşluktan çıkan elektron da yerine gelen elektronun boşluğuna gider. Bu elektronların yer değiştirmesinden elektrik akımı oluşur. Ancak saf silikonda serbest kalabilen elektron çok azdır. Bunun için saf silikona enerji verildiğinde çok az elektrik akımı oluşur.

Enerji verildiğinde daha fazla elektronun kopup yer değiştirmesi için, saf silikonun içine bir madde ilave edilmelidir. Bu elektronlar yer değiştirirken de elektrik enerjisi üretecektir. Saf silikonun fosfor'la zenginleştirilmesine "Doping" denir. Her bir milyon silikon atomunun içine, son halkasında 5 elektron olan bir adet fosfor atomu atıldığı düşünülürse, komşu silikon atomlarıyla bağlandığında fosfor atomunun çekirdeği tarafından sadece bir adet elektron tutulur. Bu durumda 1 milyon silikon atomu birbirine bağlı ve bu bağ bir fosfor atomuna bağlı haldedir ve bu sıra devam edip gitmektedir. Seyrek de olsa fosfor elektronları çok az bir enerjiyle yer değiştirebilecek durumdadır. Bu durumdaki silikon yarı iletken haline dönüşmüştür. Fosforun silikonla yapmış olduğu bu bağa negatif tip denir.

Oluşturulan bu hücre bir yerde dururken, aynı metotla silikon boron'la zenginleştirir. Boron atomunun son halkasında 3 adet elektron vardır. Milyonlarca silikon atomu boron ile zenginleştirildiği zaman, yapıda 1 elektronluk boş bir delik oluşacaktır. Böylelikle bu yapı da pozitif tip olacaktır.

6.2. Birleşme Kesitinde Elektrik Alanının Oluşması

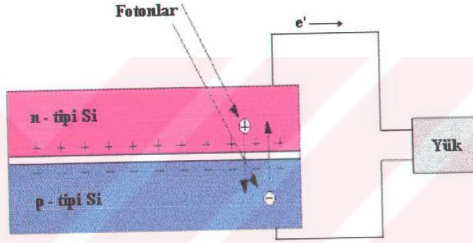
Bu ayrı ayrı elektrik alanı olmayan ve kendi halinde doğal olan parçalar birleştirildiğinde, birleşme kesitinde "n tip" silikonun içindeki elektronlar "p tip" silikonun içindeki pozitif boşlukları dolduracak, ancak birleşme yerinde bu birleşme o kadar kuvvetli olacak ki elektronlar bu bariyeri bir zaman sonra geçemeyeceklerdir. Yani elektronlar "p" tip silikona geçemeyecektir. Birleşme noktasındaki "n tip" silikon, elektronunu "p" tipe gönderdiğinden, birleşme noktasında "+" alan oluşacak, aksi taraftaki "p" tip ise elektron aldığından "-" alan oluşturacaktır. Serbest kalabilecek elektronların hareket yönleri şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Elektrik alanın "n tipi" ve "p tipi" etkileşim diyagramı.

6.3. Yüzeyleri Birleştirilmiş Silikonlara Enerji Verilmesi

Güneş ışığının içindeki foton denilen enerji bu birleşmiş malzemeye yansıdığında, elektronları serbest bırakacaktır. Serbest kalan elektronların yeri de boş kalacaktır. Eğer bu olay birleşme alanı yakınında oluyorsa elektrik alanındaki elektronlar “n” tipe, boşluklar da “p” tipe geçecektir. Eğer bu iki parça bir iletkenle birbirine bağlanırsa, elektronlar tekrar eski yerine, delikler de eski yerine döneceklerdir. Elektrik enerjisinin temel prensibi olan bu elektron hareketinden dolayı akım, elektrik alanından dolayı da voltaj elde edilir. Bu döngü ışık olduğu sürece devam eder.



Şekil 6.2. Fotonların silikondaki elektron hareketi oluşturması.

6.4. Güneş Işığındaki Enerji Miktarı

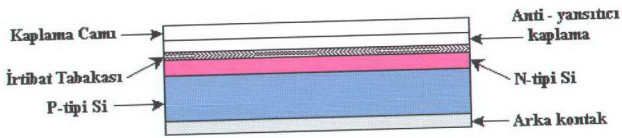
FV hücreleri güneşten gelen ışığın ancak %15 ile %25'i arasındaki miktarı soğurabilirler. Görünür güneş ışığı, elektromanyetik spektrumun sadece bir bölümüdür. Elektromanyetik radyasyon çeşitli dalga boylarından oluşur. Her dalga boyunun değişik enerji seviyesi vardır. Panele gelen foton enerjisi de çeşitli seviyededir. Çeşitli seviyedeki bu enerjilerin bazıları silikondaki elektron-oyukları ayırılmayacak seviyededir. Eğer FV malzeme şeffaf ise bu enerji FV'den geçip gider. Bazı enerjiler de çok büyük değerlerdedir. Bunlar da elektron-oyukları serbest bırakmazlar. Saf silikon kristalin, elektron-oyukları serbestte çıkaracak enerji 1.1eV (elektron-Volt) seviyesindedir. Buna malzemenin “bant genişliği” denir. Eğer foton enerjisi, elektronların ayrılmak için istediği enerjiden fazla ise fazla kısmı da işe yaramaz. Bu iki şarttan dolayı FV'lere gelen radyasyon enerjisinin %70'i boşa gitmiş olur. Akla gelen bir soru da güneş ışığının içindeki

çeşitli dalga boylarında 1.1 eV'dan küçük foton enerjisi çoğunlukta, bant genişliği enerjisi düşük olan malzemelerin neden seçilmediğidir. Bant genişliği enerjisi seviyesi iki silikon birleştirildiğinde elektrik alanının kuvvetini oluşturur. Eğer bu bağ zayıf ise daha fazla elektron-oyuk boş çıkar ve "p" tipten "n" tipe geçerler, ama unutulmamalıdır ki, sonuçta gerekli olan elektrik gücüdür. Güç = Volt x Akımdır. ($W=V \times I$). Bunun için en ideal bant genişliği enerjisi 1.4eV'dur.

Gelen ışığın ve malzemenin özelliklerinden kaynaklanan kayıplardan başka kayıplar da vardır. Elektronları bir yerden bir yere taşıyan iletkenler de kaybı artırır. Hücrelerin altı tamamen metal kaplanabilir. Ancak üstüne de aynı metal kaplanırsa ışık engellenmiş olur. Hücrelerin üst yanlarına iletkenler yerleştirilirse bu sefer elektronlar uzun yol katetmiş olacaklardır. Unutulmamalıdır ki silikon yarı iletken bir malzemedir ve akımın kolay geçmesini engeller. O halde hücrelerin üstüne akımı sağlayabilecek ince metalden kafes sistem yapılmalıdır. Ancak bu kafes de fotonların emilmesini, yarattığı gölge ile engelleyecektir.

Silikon oldukça parlak bir malzemedir ve ışığı yansıtır. Yansıtmaması için anti-yansıtıcı filmle korunmalıdır. Ancak bu film de vazifesini tam yapamaz.

Buraya kadar saf silikondan yapılmış hücre veriminin neden %25-%15 düştüğünü anlıyoruz. Aynı verim çok daha ucuz yollardan elde edilemez mi? Çünkü bilinen bir gerçek vardır ki saf silikondan yapılmış hücrelerin maliyeti yüksektir.



Şekil 6.3. Saf silikon FV hücresi.

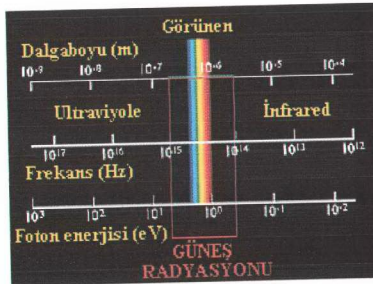
6.5. Multi-Jonksiyon Amorf Silikon

Saf silikon kristalinden üretilmiş hücre için harcanan enerjiyi, hücrenin kendisi üretebilmesi için 7.2 yıl geçmesi gerekir. Hücre üretiminde en pahalı girdi üretim enerjisidir. Amorf silikon için harcanacak enerji ise 1.2 yıldır. Ancak multi-jonksiyon

amorf silikonu üretmek için ileri teknoloji gerekir. Verimi saf silikona göre %1-%2 düşüktür ancak aynı güç seviyesindeki saf silikonun hücre maliyet fiyatına göre maliyet hücre fiyatı çok çok düşüktür. Piyasa ekonomisinden dolayı multi-jonksiyon amorf silikonu üreten firma sayısı arttıkça, fiyatların çok daha aşağıya ineceği açıktır. Çeşitli elementlerin bant genişliği enerjileri farklıdır. Galyum arsenür, bakır indiyum diselenit ve kadmiyum tellür gibi. Amorf silikon ise kristal yapıya sahip değildir. Boşta olan tek halkasına hidrojen eklenerek molekül yapısı düzeltildikten sonra üç kat uygulamayla en büyük bant genişliği enerjisi olan eleman yukarıda olacak şekilde düzenlenir. Böylelikle gelen yüksek voltajlı fotonları yukarıda, daha az enerjili fotonları da alt iki tabakada toplayan sandviç biçimde, toplam kalınlığı 1 mikronu geçmeyen film üretilebilir. Üretim tamamen bilgisayar kontrollüdür. En büyük maliyet teknolojik bilimdir. Ayrıca 10 yıl sonra dahi panellerin ürettiği enerjinin, ilk yıl ürettiği enerjinin %93' ünün altına düşmediği kanıtlanmıştır. 20 yıl sonra paneller ilk günün %90 kapasitesinde üretime devam ederler.

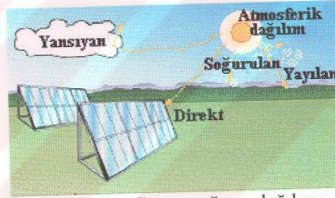
6.6. FV Piliinin Çalışması

Güneş dünyamızın enerji kaynağıdır. İklimlerin oluşumundan bitkilerin enerji ihtiyaçlarına kadar tüm dünyaya enerjisini %95 oranında gözükür ışık yoluyla yollar. Ultraviyole ve kızılötesi ışık da güneş spektrumu içindedir. Her ne kadar çok büyük yıldızlar da enerjilerini x-ışınları ve radyo sinyalleri şeklinde gönderse de, bu miktar, güneşin gönderdiği miktardan çok çok küçüktür.



Şekil 6.4. Güneş ışığının dalga boyları.

Güneş radyasyon enerjisini $2 \times 10^{-7} - 4 \times 10^{-6}$ metre dalga uzunluğunda, dünyamıza ulaştırır. Bu dalga uzunlukları da şemadan görüldüğü gibi görünen ışık dalga boylarına çok yakındır. Her dalga boyu bir frekansa ve enerjiye (eV olarak gösterilir ve elektron voltu denir) tekabül eder. Dalga boyu küçüldükçe frekans ve eV artar. Spektrumun her bölümü değişik enerji seviyesine sahiptir. Mesela kırmızı renk en az enerji seviyesine sahipken, mor renk en fazla enerjiye sahiptir. Görünmez taraftaki mor ötesi ışınlar daha fazla foton enerjisine sahip olduklarından, derimiz üzerinde yanıklara sebep olurlar. Öte yandan kırmızı kısmını biz sıcaklık olarak hissederiz, kırmızı ötesinde daha az enerji olduğundan görünen kırmızı bizi daha fazla ısıtır. Işığın bir yerden bir yere gitmesi dalgayla karakterize edilir. Dalga boyu ne kadar büyürse enerjisi o kadar küçük demektir. Her saniye, güneş çok büyük boyutlarda enerjiyi sistemine serbest bırakır. Dünyamızı bu enerjinin çok küçük bir bölümünü alır. Ortalama olarak 1367 watt/m^2 ışık enerjisi atmosferin en üst katmanına isabet eder. Atmosferimiz x-ışınları ve mor ötesi ışınları süzerek toprağa iletir. Bu halde dahi her dakika gelen güneş enerjisi insanların sarf ettiği enerjiden fazladır.



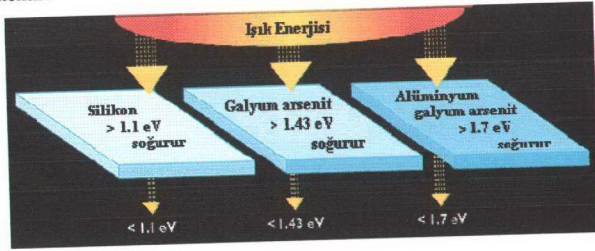
Şekil 6.5. Güneş ışığının dağılımı.

Dünya atmosferinde, bulutlar ışık enerjisinin bir kısmını emerler, bir kısmını yansıtırlar. Geriye kalan enerji toprağa erişir. Bu enerji de elektrik enerjisine çevrilebilen enerjidir.

6.7. Işık Bant Aralığı

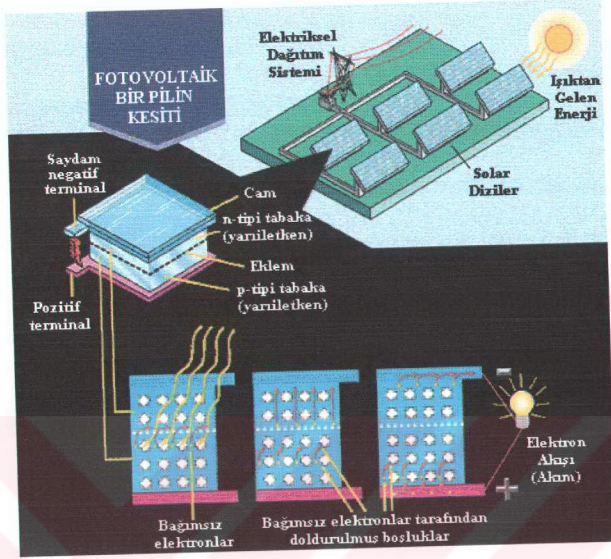
Güneş ışığındaki foton FV hücreye geldiğinde sadece bir kısım enerji elektronları açığa çıkartabilir. Bu seviyedeki enerjiye bant aralığı enerjisi denir. Bu enerji aralığı elementin kovalent bağından elektronu ayırabilir. Ayrılan elektron elektrik devresini oluşturur. Işıktaki fotonların bu enerjisine foton-enerjisi denir. Bu enerjinin elektronları açığa çıkarabilmesi için en az bant aralığı enerjisi kadar olmalıdır. Foton

enerjisinin bant aralığı enerjisinden fazla olan kısmı, elektronları serbeste çıkarırken ısı oluşturur. Burada en önemli olay yarı-iletken malzemenin moleküler yapısının ayarlanmasıdır. Yani bant aralığı enerjisinin alabildiği en fazla foton enerjisini verebilmektir.



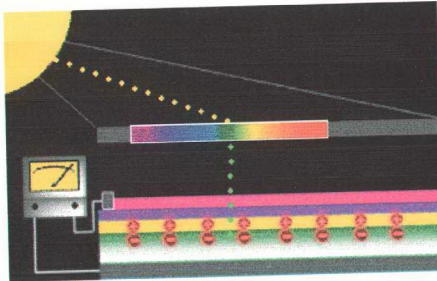
Şekil 6.6. Farklı bant aralıklarına sahip malzemelerin ışığı soğurmaları.

FV yarı iletkenlerin bant-aralığı enerjisi 1.0 - 1.6 eV'tur. Bu enerji elektronların ısınmadan açığa çıkabileceği enerji miktarıdır. Silikon kristalinin bant aralığı enerjisi 1.1 eV'dur. Değişik dalga boyundaki ışık foton enerjisi de eV birimi ile ölçülür. Güneş spektrumu infrared-ultraviyole arasında 0.5 eV'tan 2.9 eV'a kadardır. Kırmızı ışık 1.7 eV, mavi ışık 2.7 eV enerjiye sahiptir. Güneş ışığının %55'i kullanılmaz, çünkü foton enerjisi bant-aralığı enerjisinin ya altındadır (Elektronları serbeste çıkaracak enerjiye sahip değildir) ya da üstündedir (Isınmaya sebep olurlar).



Şekil 6.6. Fotovoltaik pillerin enerji üretim şeması.

Elektron, bu kazandığı enerjiyle mevcut yerinden ayrılır ve elektrik devresini oluşturur. Elektronun bu yer değiştirmesinden dolayı boşluklar oluşur. Oluşan elektrik alanı sayesinde, bir yük bağlarsa bir akım oluşur ve yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi lambayı yakar.

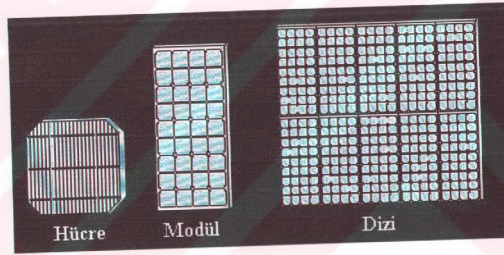


Şekil 6.7. Işığın panellere geçişi.

Güneş ışığı fotonlarla birliktedir. Bu fotonlar değişik ışık dalga boylarında farklı enerjiye sahiptir. Fotonlar FV düzeneğe çarptığında bir kısmı yansır bir kısmı FV tarafından emilir, bir kısmı da FV hücreyi geçer. Sadece FV tarafından emilen fotonlardan elektrik üretilir. Emilen fotonların enerjisi FV'deki elementin elektronuna transfer olur. Yukarıda görünen ışık dalga boyunun sol tarafında daha çok enerji vardır. Bu enerjinin bir kısmı elektronları serbeste çıkarır, bir kısmı da ısıya dönüşür. Sağ tarafı ise FV'yi geçer ve elektronları yerinden oynatamaz. Sonuçta tüm güneş ışığının %55'i elektrik enerjisine dönüşebilir.

6.8. Hücrelerden Modüler Sistemlere

FV sistemlerin en küçüğü hücredir. Bir hücreli FV sistemler 1 ile 2 watt enerji üretirler. Birçok hücreyi birleştirip daha fazla enerji üretebilecek modüler sistemler oluşturulabilir.



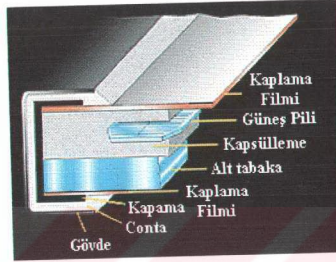
Şekil 6.8. Hücreden modüllere.

Modüllerle değişik bağlantılar kullanılarak çok daha büyük enerjiler üretilebilir. Modüler sistemler, birden fazla hücrenin birleştirilmesinden veya ince-film teknolojisiyle imal edilmiş amorf-silikondan oluşurlar. Genelde 12V, 50 Watt güce sahiptirler. Modüler sistemler yan yana bağlanarak çok daha büyük enerjiler elde edilebilir. Modülleri daha verimli hale getirebilmek için güneş hareketine göre yönlendirmek gerekmektedir.

6.9. Modüllerin Kesiti

6.9.1. Düzlemsel kesitler

Hücreler, atmosferin etkilerini en aza indirgeyecek elemanlarla sağlamlaştırılır. Genelde FV modüllerin üstü, ışığı geçiren ve ısıya dayanıklı plastik ya da demiri az camla kaplanır.



Şekil 6.9. Düzlemsel bir fotovoltaik hücrenin kesiti.

Düzlemsel FV modüllerin üretilmesi kolay ve ucuzdur. Bu tür FV'ler ışığı direkt olarak algıladığı gibi yansıyan ışıktan da faydalanır. Dezavantajları, çok yer kaplamalarıdır.

6.9.2. Yoğunlaştırılmış kesitler

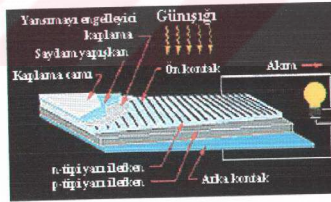
FV hücrenin kapladığı yere göre verimliliği bu sistemlere ilave edilen merceklerle iyileşir. Işık enerjisini yoğunlaştırırken ısıyı da düşünmek gerekmektedir. Ancak FV hücreyi oluşturan en pahalı parça silikon hücresidir. Silikon hücrelerinin büyüğünü yapmak hem daha fazla teknoloji gerektirir hem de maliyeti artırır. Yoğunlaştırılmış sistemlerde küçük silikon hücreleri kullanılır. FV hücrenin, mercek, kaplama birimleri, soğutucuların maliyetleri düşüktür. Elde edilen enerji teoriye göre daha fazladır ancak dikkat edilmesi gereken en önemli işlem ışığın merceklerle direkt olarak gelmesidir. Yıl boyunca saat saat güneşi takip edecek sistemlere ihtiyaç vardır, enlem açısının ve azimut açısının takip edilmesi gerekir. Takip etme işlemi elektro-mekaniktir ve pahalıya mal olur. En önemli dezavantajı ise hücrelerin ısındıkça verimini düşürmesidir. Bu dezavantaj çözümü bulmadıkça yoğunlaştırılmış kesitleri kullanmak avantajlı değildir.



Şekil 6.10. Yoğunlaştırılmış fotovoltaik hücrenin kesiti.

6.10. FV Hücresinin Genel Yapısı

Güneş hücresinin en önemli parçası yarı-iletken katmandır, çünkü elektron akımı burada oluşur. Bu yarı-iletken tabakayı oluşturan birçok element vardır, ancak bu elementlerin FV paneli oluşturmaları için artı ve eksileri vardır. İdeali yoktur. En fazla enerji sağlayabilen hücreler vardır. Sadece hücreler, elde edilecek elektrik miktarının ölçüsü olamaz. Hücrelerin üstüne ve altına konulan kontak levhaları, üstünü örten cam veya plastik, verimliliği etkileyecektir (<http://www.orjinsolar.com>).

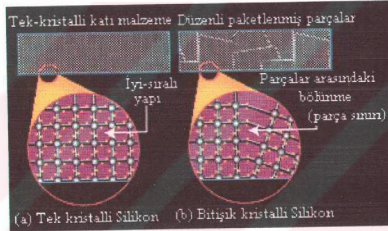


Şekil 6.11. FV hücrenin yapısı

BÖLÜM 7. HÜCRE MALZEMESİ SİLİKON

Silikon güneş hücresi üretimi için en popüler malzemedir. Dünyada oksijenden sonra en fazla var olan elementtir. Ancak silikonu güneş enerjisinde kullanabilmek için 99.99999% saflığında olması gerekir.

Tek-kristal silikonun moleküler yapısı düzenlidir, çünkü tek-kristal silikon tohumundan oluşmuştur. Bu düzenlilik elektronların transferi için idealdir.



Şekil 7.1 a) Tek kristalli silikonun yapısı.

b) Polikristalin yapısı.

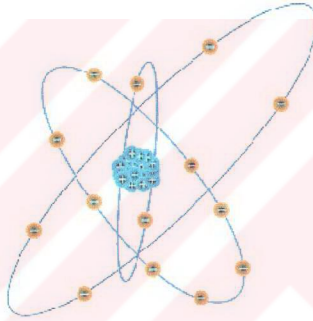
Yarı-kristal silikonun moleküler yapısı, birçok kristalin kümeler halinde olması şeklindedir. Sınırları ile kümeleşmiş bu yapı, serbeste çıkan elektronun serbeste çıktıktan sonra elektrik akımına dönüşeceğine, oluşan boşluklara elektronun tekrar geri dönmelerini teşvik etmektedir. Bu hareket de hücrenin elektrik üretimini azaltır. Fakat yarı-kristal silikonun üretilmesi, tek-kristal silikonun üretilmesinden çok daha ucuz ve basittir. Fizikçiler küme sınırlarını azaltacak metotlar için çalışmaktadırlar. Başarılarında FV endüstrisinde maliyetler düşecektir.

Amorf silikonun moleküler yapısı, atomların sıralı, düzenli olmadığı şeklindedir. Cam buna uygun bir malzemedir. Atomlar arası bağ gelişigüzel olup birçok yapı ve bağ hataları vardır. Amorf-silikon, tek-kristal silikonun güneş enerjisini soğurmasından 40 defa daha fazla güneş enerjisini soğurabilir. 1 mikron kalınlığındaki amorf-silikon

foton enerjisinin % 90'ını soğurur. Amorf-silikonun FV piyasasında lider olmasına sebep düşük derecelerde imal edilebilmesi, çeşitli levhaların üzerine tatbik edilebilmesidir.

7.1. "p" ve "n" Malzemesini Üretmek

Atomlar negatif yüklü elektronlar, pozitif yüklü protonlar ve nötronlardan oluşur. Kütleli oluşturan atomun çekirdeğindeki protonlar ve nötronların etrafında çok hızlı hareket eden elektronlar çok az kütleyle sahiptirler. Az enerjiye sahip elektronlar çekirdeğin yanındaki yörüngede dönerken, daha fazla enerjiye sahip elektronlar dış yörüngelerde dönerler.

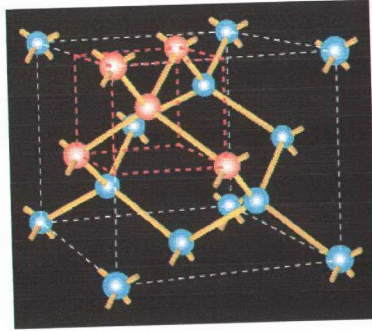


Şekil 7.2. Silikonun atomik yapısı.

Silikonun 14 elektronu vardır ve son yörüngedeki 4 elektronuna "valans" elektronları denir. Bu elektronlar başka elementlerle bağ kurmada etkilidir.

7.2. Silikon Molekülü

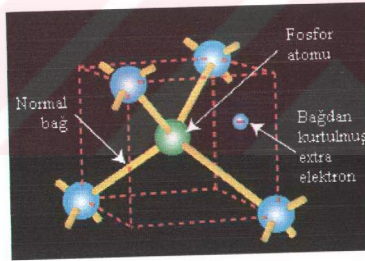
Çok sayıda silikon atomu valans elektronları ile birbirine bağlanarak silikon kristalini meydana getirirler. Kristal silikonunda dört komşu atom valans elektronlarını bir silikon atomuyla paylaşarak kovalent bağ oluştururlar. Böylelikle 2-8-8 düzenine girerler. Bu bağlantıya başka silikon atomlarının ilavesi ile kristal yapı oluşur.



Şekil 7.3. Kristal silikonun atomik yapısı.

7.3. "n" Tipi

Doping prosesiyle silikona ilave edilecek diğer element silikonun elektriksel özelliğini ortaya çıkaracaktır. Fosfor elementi silikonla birleştiğinde bir adet elektron serbeste çıkacaktır. Fosfor elementinin valans elektronları 5 addtir. Silikon atomları fosforun 4 elektronu ile bağ kuracaklar, bir adet elektron boşta kalacaktır.

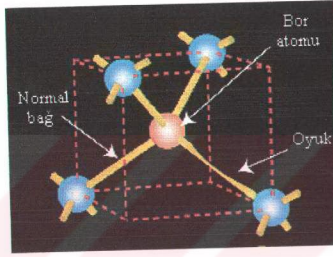


Şekil 7.4. Silikonun fosfor atomu ile katkılanıp "n" tipinin oluşturulması.

Bunu üretmek için silikon dilimleri ısıtılır ve üstüne fosfor dökülür. İki malzeme ısıtıldığında, fosfor silikon atomları ile bağlantıyı sağlamış olur. Soğutulduğunda silikon-fosfor bileşeni olarak, birçok negatif elektronun boşta olduğu malzeme elde edilmiş olur. Bu malzemeye "n" tip silikon denir.

7.4. "p" Tipin Oluşturulması

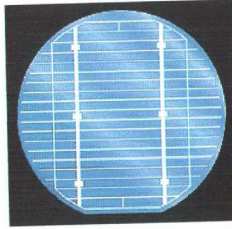
Sadece "n" tip silikonla FV malzemesi yapılmaz. Elektrik alanın elde edilmesi için "n" tipinin zıttı, yani elektrona ihtiyacı olan bir malzeme yapılması gerekir. Bor elementi 3 adet valans elektronuna sahiptir. Bağlantıda bir adet boşluk oluştururlar ve bir adet elektrona ihtiyaçları vardır. Bundan dolayı pozitif bir malzemedir. Silikonun saflaştırılması sırasında bor silikona ilave edilir. Bu malzemeye de "p" tip silikon denir.



Şekil 7.5. Silikonun bor atomu ile katkılanıp "p" tipinin oluşturulması.

7.5. Elektrik Kontaklar

"p" ve "n" tip malzemeleri oluşturulup bunlar sandviç şeklinde birleştirildikten sonra, elektronları toplayıp elektrik enerjisi haline dönüştürebilecek toplayıcılara ihtiyaç vardır. Arka toplayıcı (güneşi görmeyen yüz) oldukça basit bir alüminyum levha olabilir. Ön kontak (güneşi gören ön yüz) kolay bir toplayıcı değildir. Elektronlar tüm yüzeydedir. Güneş ışığını gölge yapmayacak bir şekilde tüm yüzeyden toplamak gerekir.

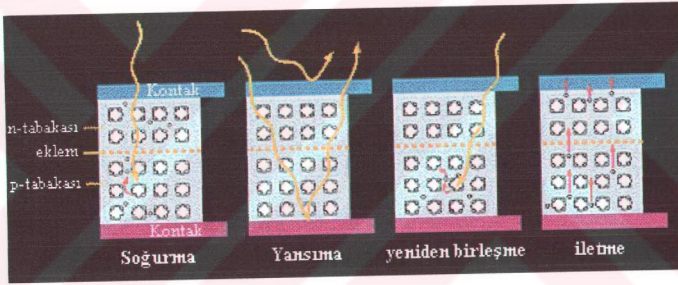


Şekil 7.6. Bir fotovoltaik hücredeki elektrik kontaklarının görünümü.

Toplayıcının kolları ışığı gölgelemesin diye mümkün olduğu kadar dar (yüzey alanın %3 - %5 'i kadar), mümkün olduğu kadar kalın olmalıdır (elektronları taşıırken düşük dirençli olmalıdır). Yapılış tarzı, fotofiligrofi denilen elektronik devrelerin hazırlanmasında kullanılan metottur.

7.6. Sistemin Çalışması

FV hücrelerinde, "p" katmanı fotonları emer. Bu katmanın iyi ayarlanması (kalınlık,vs.) sayesinde fazla foton emilip o kadar elektronun serbeste çıkması sağlanır ve bu serbeste çıkan elektronları, kendi içinde boşlukları tekrar doldurmadan hücrenin dışına atabilir. Bunun için de serbeste çıkacak elektronların birleşme bölgesinden serbestleşip kontaklarla dışarıya atılabilmesi ve elektrik üretmesi gerekir.

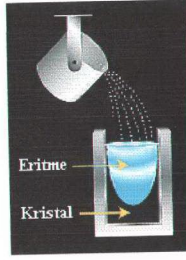


Şekil 7.7. Bir fotovoltaik hücrenin çalışması.

Hücrelerin oluşması bitmiştir. Bundan sonra çeşitli sayıdaki hücrelerin, çeşitli bağlanma tarzlarıyla modüller oluşturulur ve bir çerçeve içine konulur. Bir hücrenin açık devre akımı genellikle ortalama 1.9-2.6 Amp. , açık devre Voltajı 0.50V tur.

7.7. Yarı-kristal Silikonun FV Hücresi Haline Dönüştürülmesi

Tek-kristal silikondan FV hücresi elde edilmesinden farklı olan noktalara değinilmesi gerekir. Temel fikir aynıdır ancak yarı-kristal silikondan FV hücresi elde edebilmek için, erimiş saf silikon, içinde az miktarda eriyik tek-kristal silikonu bulunan kaba yavaşça dökülür. Soğuduğunda elde edilen malzemeye aynı tek-kristal silikonuna uygulanan işlemler geçerlidir.

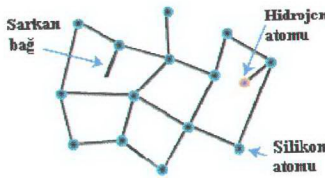


Şekil 7.8. Yarı kristal silikonun elde edilmesi.

En büyük özelliği dökülen kabın şeklinin isteğe göre seçilebilmesidir. Genelde karedir ve modüllerde yer kaybına sebep olmaz.

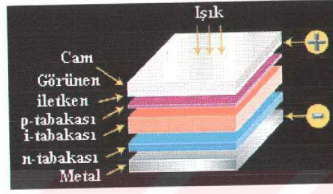
7.8. Amorf-Silikonun FV Hücresi Haline Dönüştürülmesi

Amorf-silikonun yapısı, kristallerdeki, hatta polikristallerdeki gibi düzgünlük göstermez. Öyle sapmalar vardır ki bazı bağlarda atomlar dahi eksiktir. Başka bir atoma asılı durup boşta sallanan bağlar mevcuttur. Serbest çıkmak isteyen elektronlar, bırakın elektrik enerjisi oluşturmak için boşlukları doldurmaya çalışmayı, bu boşta sallanan bağlara yönelirler. Bu da amorf-silikonun elektrik üretmesini engeller. Ancak bu boşta sallanan bağlara az miktarda hidrojen atomu enjekte edilirse bu bağların hidrojen atomuyla bağ oluşturduğu ve elektronların boşta çıkabilmelerine engel kalmadığı görülür.



Şekil 7.9. Amorf silikonun yapısı.

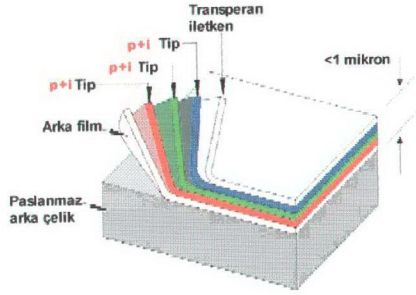
Hidrojenleştirilmiş amorf-silikon süreklilik özelliğine sahip olur. Ultra-ince üst “p” tip tabaka 0.008 mikron kalınlığındadır. Ortada doğal “i” tip tabaka biraz daha kalındır (0.5-1 mikron). “n” tip tabaka 0.02 mikron kalınlığındadır. Üst “p” tip tabaka o kadar incedir ki, ışık bu tabakayı geçip orta tabakaya yakın yerde elektronların açığa çıkmasını sağlar. “n” ve “p” tip katmanların oluşturulması, tek kristallerde olduğu gibidir.



Şekil 7.10. Amorf silikon hücrenin yapısı.

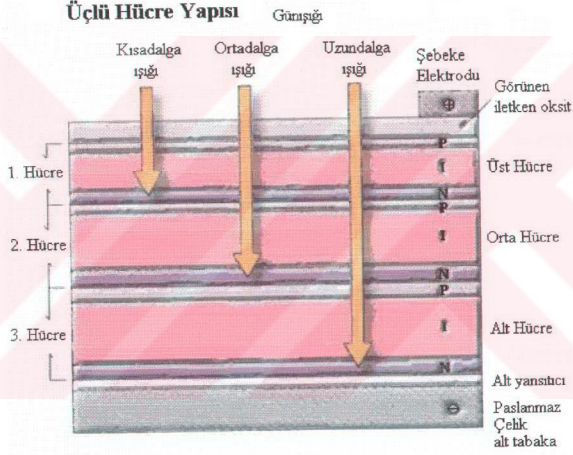
7.9. Üç Eklemlili Hücre

Çok katmanlı ince film amorf-silikon'dan üretilen piller, ışığın üç çeşit karakterine göre ayrı ayrı p-i-n yarı iletken tabakalar halinde ışıktan optimum faydalanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Amorf-silikondan üretilmiş güneş panellerinin en verimlisinin verimliliği %13 değerindedir (<http://www.orjinsolar.com>).



Şekil 7.11. Üç eklemlü hücrenin katmanları.

Üçlü Hücre Yapısı



Şekil 7.12. Üçlü hücre yapısı.

BÖLÜM 8. KOMPLE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

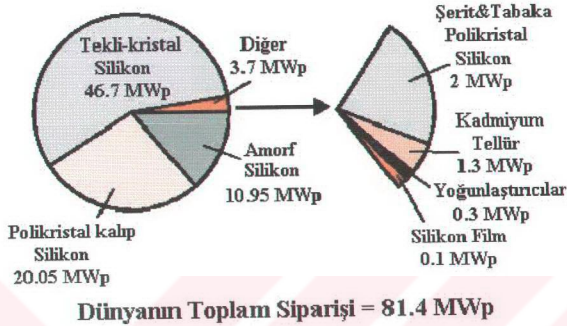
Fotovoltaik hücre veya modül yalnızca elektriği üretir. “Sistem balansı” (BOS) olarak nitelendirilen diğer bileşenler ise depolamak, elektriği elektriksel yükte uyuşacak şekilde iletmek ve düzenlemek içindir. Uygulama için doğru voltaj, doğru akım ve güç değerlerini elde etmek için, modüller diğer modüllerle bağlanabilir. Modüllerin kombinasyonu dizi olarak adlandırılır. Diziler, en güvenilir ve en ucuz uygulama olan sabit bir yüzey üzerine veya dizinin güneşin gökyüzündeki yolunu izleyeceği şekilde hareket eden bir izleme sistemi üzerine monte edilebilir. İzleme sistemleri mevcut olan gün ışığının en etkili şekilde kullanımını sağlar.

Çıkış gücünü arttırmanın diğer bir yolu da, yüksek verimli küçük güneş pillerinin üzerine güneş ışığını yoğunlaştıracak şekilde lens sistemleri kullanmaktır. Bu yaklaşım pahalı yarı-iletken malzeme kullanım miktarını minimize edebilir ancak bir izleme sistemine de ihtiyaç duyar. Bir fotovoltaik modül, üzerine düşen güneş ışığına bağlı olarak doğru akım üretir. Eğer kullanıcı, sabit bir elektrik enerjisi isterse veya güneş parlamazken elektrik enerjisine ihtiyaç duyarsa, elektriği depolayan bir sisteme gereksinim duyar. Aküler genellikle, fotovoltaik diziler tarafından aşırı şarjdan veya yük tarafından aşırı boşalma durumundan korunmaları için bir şarj kontrolörüne ihtiyaç duyarlar. Eğer kullanıcı, sıradan ev uygulamaları için alternatif akıma ihtiyaç duyarsa bir inverter de kullanılmak zorundadır.

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler akülere ihtiyaç duymazlar çünkü şebeke ağı yedekleme gücü için kullanılabilir. Bununla birlikte çok daha ayrıntılı güç düzenlemelerine ihtiyaç duyarlar. Şebeke bağlantılı inverterler şebekeden yüke, fotovoltaik diziden yüke ve diziden şebeke ağına akan elektriği şebekenin AC dalga formuyla uyum sağlayacak şekilde düzenlemek zorundadırlar.

Bugün sistem balansı bileşenleri tüm fotovoltaik sistem maliyetinin yarısını oluştururlar. Fotovoltaik modüller tipik olarak 20 yıl veya daha fazla bir süre

sorunsuz çalışırken inverterler yılda ortalama bir ya da iki kez arızalanabilirler. Bunun ötesinde fotovoltaik modüller tarafından üretilen elektriğin %15'i, sistem balansı bileşenleri boyunca gerçekleşen dönüştürme ve iletim işlemleri sırasında kaybedilir.



Şekil 8.1. FV modüllerin sipariş miktarları

Hücre verimi ve üretim maliyeti önemli bir faktördür. Düşük maliyet ve yüksek verimlilik arayışları fotovoltaik elektrik enerjisi üretmek için birçok değişik yaklaşım doğurmuştur. Ama bugünün ticari fotovoltaik modüllerinin hepsi (%95), tekli kristal, polikristal silikon ve amorf silikon ince filmleri kullanılarak yapılmaktadır. Maalesef silikonun bir kısmı testere işleminde kaybolmaktadır.

Amorf silikonlarla (kristal olmayan yapıda) yapılan ince filmler 1995 yılında dünya pazarının %14'üne sahipti. Hücre verimliliği limitlidir, bununla beraber kristal kafesin olmaması nedeniyle elektrik akımının amorf silikonun içinden akması daha zordur. En iyi laboratuvar hücreleri %11 verimliliğe, ticari modüller ise %7 verimliliğe sahiptir. Silikondan başka yarı-iletken malzemeler de ince filmler içinde kullanılmaktadır. Bakır indiyum dioksit, uzun dönem için hatırı sayılır bir performans göstermekte ve polikristal kadmiyum tellür ile yapılan modüller de ticari anlamda bulunmaktadır.

Değişik tipteki yarı-iletkenlerin, çoklu tabakaya sahip hücre oluşturacak biçimde sıkıştırılması ile daha fazla ışık enerjisi hücre tarafından soğurulabilir. Sürekli

sayıları artan amorf silikon modüller bu yolla üretilirler. Diğer yarı iletken malzemeler kullanılarak yapılan yığınlar laboratuvarında %30 verime ulaşmıştır, ama hiçbir üretim modüllerinin içine katılmamıştır.

Tablo 8.1. Fotovoltaik Modüllerin Dönüşüm Verimleri (%)

Hücre Tipi	1995	2000	2010
Tekli-Kristal Silikon	15	18	22
Polikristal Silikon	14	16	20
Şerit ve Tabaka Silikon	14	17	21
Yoğunlaştırıcılar (silikon hücreli)	22	25	30
Amorf Silikon (yığın hücreler dahil)	7-9	10	14
Bakır İndiyum Diselenit	7-9	12	14
Kadmilyum Tellür	7-9	12	14
Silikon Film	8-10	12	15

8.1. Kristal Silikon Güneş Pilleri

Fotovoltaik cihazlar içinde silikon 1950'lerin başından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Diğer malzemelerin teorik olarak daha fazla dönüştürme verimleri olmasına rağmen, bu alternatiflerin uygulanmasının önemli teknik ve finansal engelleri olmuştur. Üzerinde yıllarca yapılan araştırmalar ile birlikte silikonun özellikleri çok iyi belgelenmiştir ve diğer malzemelerin de aynı bilgi seviyesine getirilebilmesi çok pahalı olacaktır. Amorf silikon ince film teknolojisine öncülük ederken, bugün birçok fotovoltaik piller kristal silikondan yapılmaktadır. Bağlı verimliliği, stabilitesi, rekabetçi maliyeti ve ispatlanmış verileri ile kristal silikon gelecek yıllarda da en baskın güneş pili olmayı sürdüreceği gibi gözükmektedir.

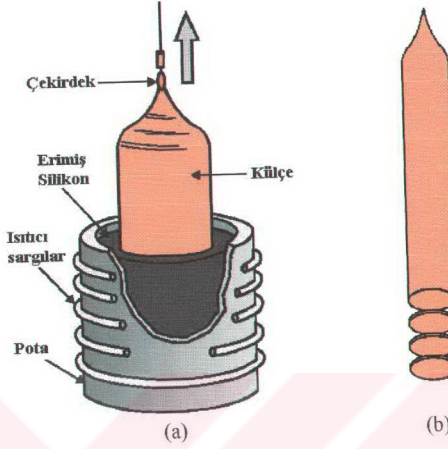
8.2. Silikon Fotovoltaik Pillerin Elde Edilmesi

Silikon, dünya kabuğunda çok bulunan bir mineraldir. Kum ve kuvars, silikonun en çok bilinen iki formudur. Fotovoltaikler için öneminden öte, silikon modern mikroelektronik endüstrisinin kalbi durumundadır. Neredeyse tüm bilgisayarlar, televizyonlar, radyolar ve diğer elektronik cihazlar, gelişmiş devreler silikondan imal edilmiş diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Yarı-iletken mertebesindeki silikon, güneş

pilleri üretiminde ve gelişmiş devrelerde neredeyse %100'lük saflıkta kullanılır. (Spesifik kimyasal katkıları iletkenliği geliştirmek için sonradan ilave edilir). Kum saf silikonun iyi bir kaynağı değildir, çünkü silikon kimyasal olarak oksijen ve diğer katkıları ile kuşatılmıştır, ancak kuvarsit (kaya kuvarı) yüksek değerdeki tortusu %90 silikona sahiptir. Bu kuvarsit metalurjik mertebedeki silikon haline getirilir (%98-99 saflıkta) ve daha sonra yarı-iletken mertebesindeki silikonun üretimi için artırılarak, en az %99.9999 saflıktaki malzemeye dönüştürülür. Bilgisayar endüstrisi için yaklaşık 15.000 ton yarıiletken mertebesindeki silikon yıllık olarak üretilmektedir. Fotovoltaik piller genelde, elektronik cihaz üreticilerinin ayırdığı, daha az pahalı artık silikondan yapılır. Ama bunun ötesinde bu artık silikonun yarıiletken endüstrisi tarafından absorbe edilmesi, fiyatı yukarı çekmektedir. 1995 yılında silikon fiyatı, kristal silikon fotovoltaik modüllerin üretim maliyetinin %20-%40'ını oluşturmaktaydı.

8.3. Kristallerden Güneş Pillerine

Bugün yapılan güneş pillerinin yaklaşık yarısı, büyük, tekli kristal yapıya sahip silikonun kesilmesiyle elde edilir. Araya giren yıllarda performansın son derece gelişmesine karşın, aslında bu teknoloji 40 yıl önceki ilk silikonda kullanılan teknoloji ile aynıdır. 1940 ve 1950 yıllarında Czochralski'nin, silikonun tekli kristallerinin büyümesi üzerinde yaptığı işlem gelişimi, silikonun fotovoltaiklerde kullanılmasını mümkün kıldı. Bu kristaller, kristal kafesinin atomik yapısında oldukça küçük yapıda eksikliklere ihtiyaç duymaktadır. Bu eksiklikler hücre verimini düşürmektedir. Büyüyen kristallerin diğer metotları gelişmesine rağmen, Czochralski'nin silikonu hala tekli-kristal silikon hücresi üreticileri için en popüler hammaddedir. Silindirik külçe halinde bir silikon geliştirildiğinde, özel bir testere ile bu külçe güneş pillerinde işlenmek üzere ince dilimlere ayrılır. Değerli kristal malzemesinin %20'si testere atığı şekline gelir. Silikon da israf edilir çünkü dilimler optimum fotovoltaik performans için olması gerekenden daha kalın kesilir. Bu kristal silikon dilimlerinin çok kırılmalı olmasından ve üretim aşamasında kalın dilimlerin kırılmaya karşı daha dirençli olmasından ileri gelir.



Şekil 8.2. a) Silikonun geniş kristallerinin yapımında kullanılan Czochralski işlemi
b) Tek kristal silikona ait silindirik külçenin ince dilimlere ayrılması

Bir elektrik alan oluşturmak için, dilimler bir tarafında pozitif yük, diğer tarafında negatif yük taşımak zorundadır. Bu da silikonun doping adı verilen işlemde, iki farklı kimyasal ile işlenmesi ile başarılır. Boron, külçe haddelenmeden önce erimiş silikonun içine katılarak kristal boyunca yayılır. Kesilen dilimler daha sonra yalnız bir tarafından fosfor ile katılır. Fosfor, dilim içinde çok kısa bir mesafeye yayılır ve yalnız borona sahip tabakadan daha fazla elektrona sahip çok ince bir tabaka oluşturur. Elektronlar negatif yük taşıdığı için fosfor katkılı tabaka n-tipi olarak tanımlanır. Boron, bir elektronları eksik olan zayıf bağların varlığını güçlendirir. Bu bağlar veya tanımlandıkları isimleriyle oyuklar pozitif yüklüdür ve böylece boron katkılı silikon da p-tipi silikon olarak nitelendirilir. N-tipi tabakada fosfor, borunun etkisini bastırır. Bu iki tabaka arasındaki eklemde (p-n eklemi olarak bilinir) bir elektrik alanı oluşur. Daha sonra hücrenin bir elektrik devresine bağlanabilmesi için dilimlerin her iki tarafına elektrik kontaktları eklenir ve hücrenin en üst yüzeyine anti-yansıma kaplaması uygulanır. Tüm kristal silikon hücreler ortak olarak aynı

elemanlara sahiptir. Hücre dizaynlarındaki modifikasyonlar tekli-kristal hücrelerinin verimini arttırmakta ve üretim maliyetlerini düşürmektedir.

8.4. Pil Dizaynlarındaki Gelişmeler

Fotovoltaik etkinin gücü yarı-iletken işleyen ışığın miktarı ile belirlenir. İşlenmeyen silikon hücreler gelen ışığın %30'unu yansıtacak kadar parlaktırlar ve geleneksel hücre dizaynları, yüzeyin %3 ila %5'ini kaplayan ve altındaki silikon dilimlerini gölgeleyen ön kontak ızgarasına sahiptirler. Hücre verimini geliştirmek için bu iki husus ele alınır.

Üst yüzeyin yansımısını indirmek için değişik metotlar kullanılır. Tek tabaka silikon monoksit tortulaştırması, yansımayı yaklaşık %10 değerine getirir ve diğer bir madde tabakasının ilavesi ile yansıma %4'ün altına çekilebilir. Yansımayı düşürmek için diğer bir yol da hücre yüzeyinin üst kısmını pahalı olmayan kimyasal aşındırma işlemi ile dokulaştırmaktır. Böylece hücre tarafından %80 soğurulabilme olasılığına sahip ışığın, bu doku tabaka ile %96 soğurulabilmesi sağlanır. Bugün en yüksek verimliliğe sahip hücreler, bir doku tabakasında iki yansımayı engelleyici kaplamaya sahiptirler ve bu sistem gelen ışığın yansımısını %2 değerinin altına düşürebilir.

Birçok yenilikçi yaklaşım ön kontak ızgarası tarafından meydana gelen gölgeleme değerini indirmeye çalışmaktadır. Mikro-oluklu hücrelerde, hücre yüzeyinin üst kısmında, düşey düzlemde ince yarıklar açmak için lazer ışını kullanılmaktadır ve daha sonra da elektriksel kontaklar bu yarıklara yerleştirilmektedir. Bu yaklaşım mükemmel iletimi mümkün kılar, çünkü kontaklar, gölgelemeyi önemli derecede düşürürken oldukça büyük bir yüzey alanına sahip olurlar. Bazı tip hücrelerde, pozitif ve negatif kontaklar, ön yüzeyde gölgelemeye engel olmak için hücrenin arka kısmı boyunca bağlanmışlardır. Bu temadaki bir değişikliğe sahip olan nokta-kontaklı hücreler, silikon dilimi boyunca işlenen, izoleli p ve n tipi küçük yamalara sahip bir düzeni içerir. Metal kontak noktaları hücrenin arka kısmında, yalnızca bu yamaların merkezlerine yerleştirilir.

Üretim alanında, kristal silikon endüstrisi daha büyük hücreler kullanma yönünde hareket etmektedir. Geleneksel olarak, dairesel dilimler, daha fazla yarı-iletken

malzemenin modül içerisinde yerleştirilebilmesi için kare şekline getirilir, çünkü kare hücreler arasında hiçbir ölü nokta bulunmamaktadır. Ama üreticiler, dilimleri kare halinde kesme maliyetini elimine edip, dairesel hücelere uydurmak için büyük modüllerin ihtiyaç duyduğu iskelet ve ekstra cam kullanma maliyetini kullanarak, daha fazla kazandıklarının farkına varmışlardır. Yuvarlak dilimler kullanılarak yapılmış modüller ayrıca, aralarındaki beyaz yüzeye bağlı olarak daha az ısınarak çalışabilmektedirler. Tümleşik devreler endüstrisi silikon dilimlerini 10 inç çapına kadar üretmekte ve birçok fotovoltaik şirketi de modüllerinde daha büyük hüceleri kullanabilmek için daha büyük dilimlere sahip olmanın avantajını kullanmaktadırlar.

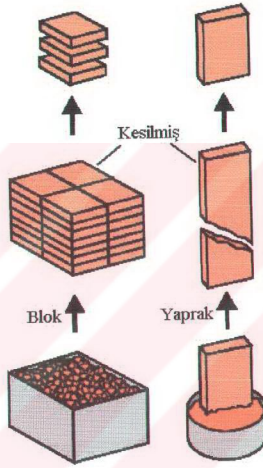
8.5 Polikristal Silikon

Tekli-kristal silikon, bugün mevcut olan en verimli düz plaka teknolojisi konusunda tartışılmaz durumda kalmasının yanında, en pahalı konumdadır. Birçok küçük kristale sahip, polikristal silikon malzemesi kullanılarak yapılan güneş pilleri, üretimleri daha ucuz olduğu için popüler hale gelmişlerdir. Kalıp polikristal silikon 1995 yılında satılan fotovoltaiklerin %25'inde kullanılmıştır. Birçok polikristal hücrenin üretimi, erimiş silikonun dikkörtgen bir kalıp içine döküldüğü kalıplama işlemi ile başlar. Kalıplama, her yanı yaklaşık 8 inç (2.4384 m) uzunluğunda bir kare blok halindeki polikristal silikonu meydana getirir. Bu külçe daha sonra, güneş pilini yapmak için, 4 inç (1.2192 m) genişliğindeki karesel dilimler halinde kesilir. Karesel olmalarından dolayı bu hücreler dikkörtgensel bir modül içine çok verimli bir şekilde yerleştirilebilir.

Polikristal hücrelerin üretimi daha ucuz olmasına karşın, iyi bir verimliliğe sahip değildirler. Çünkü daha fazla katışıkyı sahiplerdir ve içlerinden akan elektrik kristaller arasındaki sınırların diğer tarafına atlamalıdır. Maliyet verimliliği açısından vazgeçme, polikristal hücrelerden elde edilen elektriğin, her watt maliyetinin tekli-kristal hücrelerle aynı olduğu anlamına gelir. Düşük verimlilikleri de, polikristal modüllerin aynı çıkış gücüne ulaşmaları için biraz daha büyük olmaları anlamına gelir.

Polikristal silikon içindeki kristaller veya taneler genellikle çevreleri 3/8 inç (0.1143 m) olmak üzere oldukça büyüktür. Bu yüzden, polikristal malzemenin bazen

yarı-kristalli olarak da bahsedilir ve fotovoltaik literatürü de bu terimleri değişken biçimde kullanır. Çünkü malzeme bir kristalin daha fazlasından yapılmıştır, ayrıca bazen çoklu-kristal olarak da tanımlanır. Çok küçük silikon kristalleri ile bile başarılı güneş pilleri yapılabilir. Bir şirket, polikristali ince bir tabaka halinde, patentli, düşük maliyetli bir alt tabaka üzerinde büyüterek, ince film güneş pili geliştirmektedir. Bu silikon filmdeki her bir kristal tanesi yalnızca 40-100 mikron çapındadır ki bu da yaklaşık bir insanın saç telinin kalınlığıdır.



Şekil 8.3. FV modüllere ait karesel polikristal hücreler yapmak için iki yol.

Polikristal silikonun performansını geliştirmek için birçok değişik teknik kullanılmaktadır. Kristal sınırlarındaki iletim zayıflığı, dikkatin çekilmesi gereken hatırı sayılır bir meseledir. Bu probleme bir yaklaşım, kristal kafesini malzemeyi tavlayarak (ısıtarak ve soğutarak) modifiye etmektir. Bu olay, doğal olarak düzenli kristalleri, daha büyük, daha kolon biçimine getirerek daha az kristal sınırın olmasını sağlar. İşlemden pasifleştirme olarak tanımlanan, hidrojenin dilimlerin içine sokulması, kalan kristal sınırlarından gelecek elektriğin akışını geliştirmektedir.

Tek-kristal silikon hücrelerinde olduğu gibi, polikristal hücrelerin üst yüzeyi, yansıyan ışık miktarını düşürmek için işlenmelidir. Tek-kristallerde kullanılan

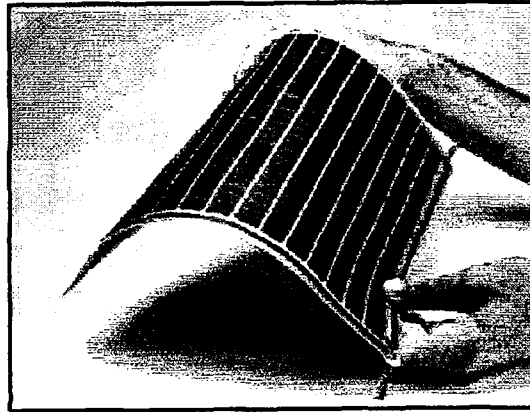
kimyasal aşındırma yolu, bugün mekaniksel olarak aşındırılan polikristal malzemeler için uygun değildir. Yansımayı düşürecek umut verici bir yaklaşım, dokulaştırılmış filmi doğrudan hücrenin en üst yüzeyine koymaktır. Bir kaplama uygulamak, mekaniksel dokulamaya göre hem hızlı hem de daha az maliyetli bir uygulamadır ve bu yolla üretilen hücreler, geleneksel yolla üretilen hücrelerin performansı ile uyumdadır.

8.6. Şerit ve Yaprak Silikon

Diğer tip kristal silikonlarla ilgili testere kısmını hemen hemen elimine etmek için kullanılan bir yol ise, dilim inceliğinde ve güneş pilleri için doğru genişlikte, polikristal silikonun şeritlerini geliştirmektir. Bu şerit geliştirme teknolojileri, döküm teknikleri kullanılarak maliyet olarak rekabetçi hale getirilebilir ve özellikle günümüzde üretilen modüllerin yüksek verimleri nedeniyle (%13-%14) büyük bir potansiyel göstermektedirler.

8.7. İnce Film Güneş Pilleri

İnce film fotovoltaik pillerin gelişimi, bu teknoloji ile mümkün olan, tatmin edici maliyet kazançları ile büyük bir oranda motive edilmiştir. Ayrıca daha hafiftirler, esnekler ve kristal silikon modüllere oranla üretimleri daha kolaydır.



Şekil 8.4. İnce filmlerin esnek plastik yapraklara uygulanması.

İnce film modülleri, ışık-duyarlı yarıiletken malzemelerin oldukça ince tabakalarının (1 mikrondan daha ince), cam, plastik veya ince, esnek çelik yapraklar gibi ucuz destek malzemelerine uygulanması ile elde edilir. Her fotovoltaik cihaz için, kristal

silikon modüllere oranla çok daha az yarı-iletken malzemeye ihtiyaç duyarlar. Dolayısıyla malzeme maliyeti oldukça düşüktür ve hafiflikleri de daha az yapısal desteğe ihtiyaç duyacakları anlamına gelir. İnce film üreticileri, tüm üretimleri yeniden dizayn etmek yerine, mevcut bulunan endüstriyel işlemlerden de yararlanabilmektedir. İnce filmler yoğun laboratuvar işlemlerine daha az ihtiyaç duyarlar, çünkü çerçeveler şeklinde montaj yapılması ve birlikte kablolanması için, büyük, tamamlanmış modüller ve bağımsız olmayan hücreler halinde üretilirler. Yarı-iletken malzemenin fiziksel olarak toplanması yerine, elektriksel kontaklar, yansımayı önleyici kaplama ve koruyucu tabakalar, ince filmler, bu elementlerin ayrı tabakalarının, seçilen destekleyicinin üzerine sıralı bir biçimde koyulması ile elde edilir. Destekleyici tabaka yapısal destek için, tipik olarak cam veya plastikten üretilir ve modülün en üst koruyucu tabakası şeklinde iki katman halinde konur.

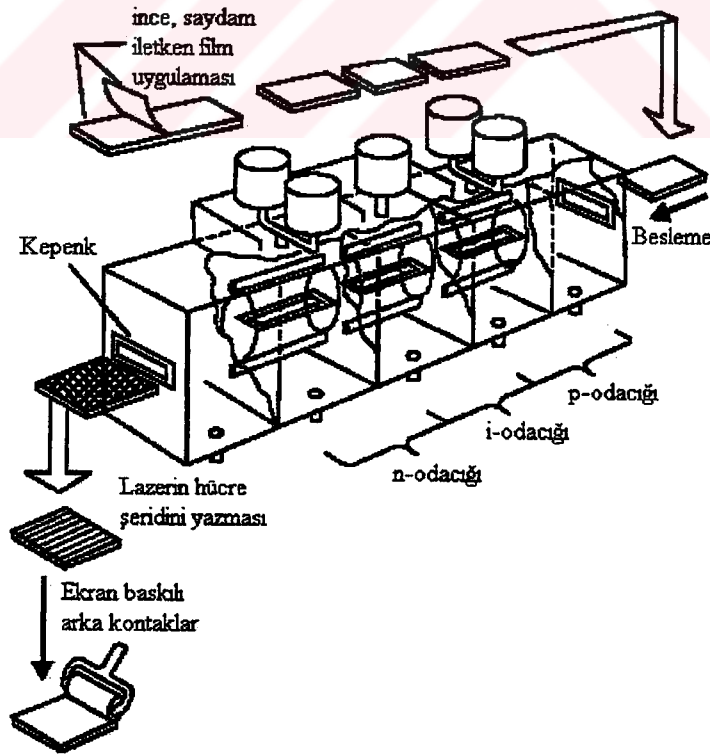
Destekleyici tabakaya uygulanan ilk kaplama ön elektrik kontaklarıdır. Akımı toplamak için metal kafes kullanmak yerine, bu kontak ince tabaka halinde kalay oksit veya çinko oksit olmak üzere, saydam metal oksiti kapsar. Bu oksitler elektriği çok iyi bir şekilde iletirler ve çiftli yansımayı engelleyici kaplama olarak tasarlanabilirler. Tipik bir ince film üretim tesisinde, kaplanan destekleyici daha sonra, çevresel ortamdan izoleli, sıralı olarak yarı iletken tabakaları uygulayan devamlı akış halindeki işleme makinesine verilir. Bu makinenin kullanılması elle işleme olayını önemli ölçüde düşürür, laboratuardan kazanç sağlar ve kirlilik için elverişli durumu minimize eder. Ayrıca çok küçük bir enerji kullanır ve kristal silikonda yapılabilen 4 inç (1.2192 m) kenarsal uzunluğa sahip karesel dilimlerden çok daha büyük şekilde birkaç fit (yaklaşık yarım metre) kenarsal uzunluğa sahip modüllerin üretimine olanak verir.

Genelde alüminyum veya gümüş olan metalin ince bir temel tabakası bazen bu makineye katılır. Bu tabaka arka kontak işlevini görür ve ayrıca gelen ışığı yarı iletken malzemeler üzerine geri yansıtır. Böylece modülden geçen ışığın en iyi kullanımı sağlanmış olur. Bağımsız hücreler daha sonra her tabakaya işleyecek şekilde bir lazer ışığı ile yerleştirilir (destekleyici tabakaya kadar). Diğer durumlarda lazer çizimi arka kontağı eklemeyen önce yapılır ve bu da daha sonra çizilen hücrelerin düzeninde olduğu gibi modül üzerine ekran baskısı şeklinde uygulanabilir.

İnce filmler, yapıya uyabildiklerinden, destekleyici kısmın şekli ve esnekliğinden dolayı çok yüksek oranda uygunluğa sahiptirler. Bu benzersiz özellik ince filmlerin, fotovoltaiklerin çatı kaplamaları gibi yenilikçi ürünlerin kullanımına olanak verir.

8.8. Amorf Silikon

En fazla gelişen, kristal silikon teknolojisinin yaklaşık yarı süresine sahip, ince film teknolojisi amorf silikondur. 1974'te araştırmacılar amorf silikonun fotovoltaiklerde kullanımını keşfetmeden önce orijinal olarak, fotokopi makinelerindeki dramların optiksel hassas kaplamalarında kullanılmışlardır. Dikkate değer adımlar bu tarihten sonra gözlemlenmektedir ve amorf silikon laboratuvar araştırmacılarının ve üreticilerinin ilgisini hayli fazla bir şekilde çekmiştir. Bugün Amerika'da, fotovoltaik modül üretim kapasitesinin gelişiminin yarısını ince-film amorf silikonlar kapsamaktadır. Ticari modüllerin verimlerindeki artış yükselmektedir. 1980'lerde %3.5 olan verim değeri 1990'larda %7 değerine, prototip modüllerin verim değeri ise %10 seviyesine ulaşmıştır. 1995 yılında amorf silikonların dünya çapındaki fotovoltaik modüllerde kullanımı %14 değerine ulaşmıştır.



Şekil 8.5. İnce filmlerin tek bir birim halinde üretimleri.

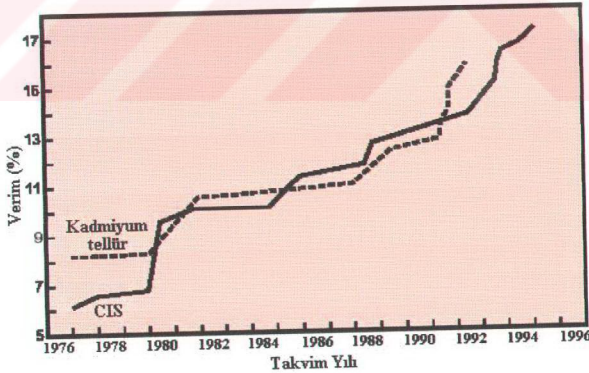
Cam gibi amorf katılarda atomlar belli bir düzende dizilmemişlerdir. Ayrıca bir kristal kafes oluşturmazlar ve büyük ölçekte yapısal ve bağsal eksikliklere sahiptirler. Bu organize olmamış yapı, polikristallere oranla, elektriğin madde içinde akışını zorlamakta ve verimini limitlemektedir. Hidrojen eklemesi iletkenliği önemli ölçüde artırır, ancak bununla beraber amorf silikonlar %10 düzeyinde hidrojene sahiptirler. Amorf silikonlardaki potansiyel dezavantaj, verim düşümüne yol açan, atomik eksikliklerinin sayısının gün ışığına çıktığında fazlalaşmasıdır. Bununla beraber araştırmacılar, bir ön alıştırma periyodundan sonra dönüştürme oranların stabil hale getirildiği amorf silikon modülleri oluşturma yollarını bulmuşlardır. Verimdeki ön düşüş yaklaşık %10'dan %20 değerine değişmektedir ve bugünlerde amorf silikonun verimi stabilize edilmiş verim olarak nitelendirilmektedir. Amorf silikon içinde elektronların zayıf hareketliliği katkılama ile daha kötü bir hale getirilebilir. Bunun önüne geçmek için, amorf silikon hücreleri katkılanmamış bir tabaka halinde, katkılanmış p ve n tipi iki tabaka arasına yerleştirilerek üretilir. Üst p tabakası, serbest elektronların çok daha kolay bir şekilde üretilebileceği aradaki tabakaya fazla ışığın geçebilmesi için, çok ince ve bağıl olarak saydam bir şekilde üretilir. Üst p tabakası ve alt n tabakası, ara tabaka üzerinde, kristal silikon hücrelerde p-n ekleminde olduğu gibi bir elektrik alanının oluşumuna neden olur.

Bu gözle görülür dezavantajlarına rağmen amorf silikon, popüleritesini açıklayan bazı avantajlara da sahiptir. Örneğin tek kristallilere oranla gelen ışığı 40 kat fazla soğururlar ve bu da yalnız 1 mikron kalınlığındaki bir filmin kullanılabilir güneş enerjisinin %90'ını alabileceği anlamına gelir. Amorf silikon ince filmler bu yüzden, tek kristal veya polikristal cihazlar için gerekli olan pahalı yarı-iletken kaliteli silikonun %1'inden daha az miktarda kullanımı ile, yani çok büyük oranda malzeme kazanımı ile yapılabilir. Ayrıca kristal modüllere göre çıkış güçleri daha yüksektir ve örneğin çatı uygulamalarının meydana getirebileceği yüksek sıcaklıklara daha toleranslıdırlar. Gerçekte, amorf silikonların verimleri, kendi kendini tavlama etkisine bağlı olarak, yüksek işletme sıcaklıklarında biraz düşer. Amorf silikonların üretiminde kullanılan metodun diğer bir faktörü de, tek tabakalı hücrelere göre oldukça verimli olan çoklu tabakaya sahip hücre üretimlerine kolaylıkla adapte olabilmeleridir. Günümüzde artan sayıdaki amorf silikon modüllerinin üretiminde çoklu tabaka teknolojisi kullanılmaktadır.

8.9. Polikristal İnce Filmler

İnce filmler ayrıca, birçok sayıdaki değişik polikristal malzemeler kullanılarak da yapılabilir. Polikristal ince filmlerin bir örneği, silikon ve kadmiyum tellür, bakır indiyum diselenit gibi diğer uygun malzemeler kullanılan Silikon Film teknolojisidir.

Kadmiyum tellür ticari olarak mevcuttur ve üretimi kolay olduğundan ince film teknolojisinin uzun dönem amacına en uygun olanı olarak değerlendirilmektedir. Modüller, çok büyük sermaye cihazlarına ihtiyaç duymayan, elektrikle kaplama ve sprey piroliz (ısıl bozunma) gibi değişkenlik gösteren endüstriyel işlemler kullanılarak üretilebilir. Elektrikle kaplama, ihtiyaç duyulan elementlerin iyonları ile kaplı bir çözeltiliden elektrik akımının geçirilmesini ve iyonların bir elektroda kendilerini bağlamalarını kapsar. Bu işlem, mücevhere altın kaplamanın eklenmesi ile aynı işleme sahiptir. Sprey pirolizinde, gerekli elementleri kapsayan bir solüsyon, sıcak bir alt tabakaya püskürtülür. Isı daha sonra, kimyasalların reaksiyona girip, çözücü uçarken kendilerini alt tabakaya yapıştırmalarına neden olur. Kadmiyum kullanımındaki ilgi, nikel kadmiyum pillerde, artık modası geçen aynı toksik metalin kullanılması ile ilgilidir. Fotovoltaik modüllerde kullanılan kadmiyumun miktarı çok küçüktür ve mevcut üreticiler atıkları işleme stratejilerini uygulamaya koymuşlardır.



Şekil 8.6. Polikristal İnce-Film Güneş Pillerinin Verimliliği.

Bakır İndiyum Diselenit (Copper indium diselenide-CIS), oldukça iyi ışık soğurma yeteneği nedeniyle ümit verici bir fotovoltaik bileşiktir. Malzemenin ilk mikron

kalınlığında gelen güneş enerjisinin %99'u soğurur. Ayrıca, diğer filmlerde pek olmayan dış ortamdaki güvenilirlikleri hiçbir zaman sorun değildir. CIS modülleri, ticarileştirme için, uzun dönemde düzenli kayda değer dönüştürme verimleri sergilemektedirler. Çoğunlukla bakır, indiyum ve selenyumdan oluşan üç element kombinasyonuna sahiptirler ve üretim sırasında kimyasal bileşimde oluşabilecek değişimlere karşı hücrenin toleransını da geliştiren galyum elementinin de eklenmesi ile laboratuarda en yüksek verimlere ulaşılmıştır. CIS, ince film fotovoltaiklerinde performans lideridir ve en iyi laboratuvar hücreleri %17 verim değerinin üzerine çıkmıştır. Bu değer en iyi verimleri %18'in altında olan polikristal silikon hücrelerinin verimi kadar yüksektir. Bu da ince filmlerin kendilerini son derece iyi gösterebileceklerinin kanıtıdır. Göreceli olarak yeni olan teknolojilerinde de anahtar işlem laboratuvar kazançlarının ticari üretimlere aktarmada yatkındır. Kadmiyum tellürde kullanılan elektrikle kaplama ve spreyleme metotları gibi çok değişik üretim teknikleri kullanılabilir. Diğer popüler bir metot da her elementin küçük miktarlarını atomlarının buharlaşma değerine kadar ısıtmak ve daha sonra bunları CIS tabakası oluşturmak üzere, soğuk bir arka tabaka üzerinde yoğunlaştırmaktır. Bütün bu metotlar, bilgisayar ile ilgili ince film endüstrisinde gelişmiştir ve düşük maliyetli üretimler için hatırı sayılır potansiyele sahiptirler.

8.10. Tabakalar Halindeki Güneş Pilleri

Değişik fotovoltaik malzemeler güneş spektrumunun değişik kısımlarını soğururlar. Birçok güneş pili tek bir tip fotovoltaik yarı iletken malzemeden yapılır. Bu durumda güneş pilinin soğuramadığı, spektrumdaki ışıkların enerjileri israf edilmiş olur. Fotovoltaik elektriğinin maliyetini düşürmek için bir yaklaşım da, hücre verimini yükseltmek için daha fazla güneş enerji spektrumunu yakalamaktır. Bu da, herbirinin ışığın değişik dalga boylarına duyarlı olduğu yarı-iletkenlerin değişik kombinasyonları kullanılarak çok tabakalı hücreler oluşturularak başarılabılır.

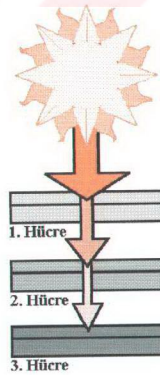
Spektrumun mavi tarafının sonundaki ışık daha kısa dalga boyuna sahiptir ve spektrumun kırmızı tarafının sonundaki ışıktan daha çok enerjiye sahiptir. Fotovoltaik hücre üstüne bir ışık düştüğünde, sadece bazı fotonların enerjisi elektronları kendi atomlarından ayırabilecek enerjiye sahiptir. Bu serbest elektronların iletim bandında olduğu bilinir, çünkü bunlar malzemeyi elektriği

iletebilir hale getirir. Bir elektronu, kendi atomundan iletim bandına hareket ettirmeye ihtiyaç duyulan enerjiye bant aralığı enerjisi denir.

Düşük bant genişliği enerjisine sahip fotovoltaik malzemeler güneşin enerji spektrumunun geniş bir sahasını kullanabilir. Çünkü bağıl olarak düşük enerjili (kırmızı) fotonlar bile, hücrenin elektrik enerjisi üretimini sağlayacak elektronları kendi atomlarından koparacak yeterli enerjiye sahiptir. Ama düşük bant aralıklı malzemeler ayrıca, her zaman cazip olmayan düşük voltajları üretirler.

En verimli hücreler, hem yüksek hem de düşük bant aralığı enerjisine sahip malzemeleri içerirler. Çoklu tabakaya sahip hücrelerin her biri, birbirinin üzerinde iki veya daha fazla hücreye sahiptirler. Her hücre bileşeni, elektrik alanının üzerinde olduğu, kendi eklemelerine (ara yüzey) sahiptir. Dolayısıyla bir çoklu tabakalı hücre genelde çoklu eklemeli hücre veya cihaz olarak da tanımlanır.

Çoklu eklemeli hücreler iki yolla yapılabilir. Bunlar, yekpare veya mekaniksel olarak yığılma şeklidir. Yekpare çoklu eklemeli hücreler, iki hücre için malzemenin gerekli tabakalarının sıralı bir şekilde koyulması ile yapılır ve hücreler arasındaki bağlantı bir tabakanın diğerinin üzerinde olması şeklindedir. Mekaniksel olarak yığılmalı çoklu eklemeli hücrelerde ise farklı hücreler birbirinden ayrı olarak yapılır ve saydam bir yapışkan ile birleştirilir.



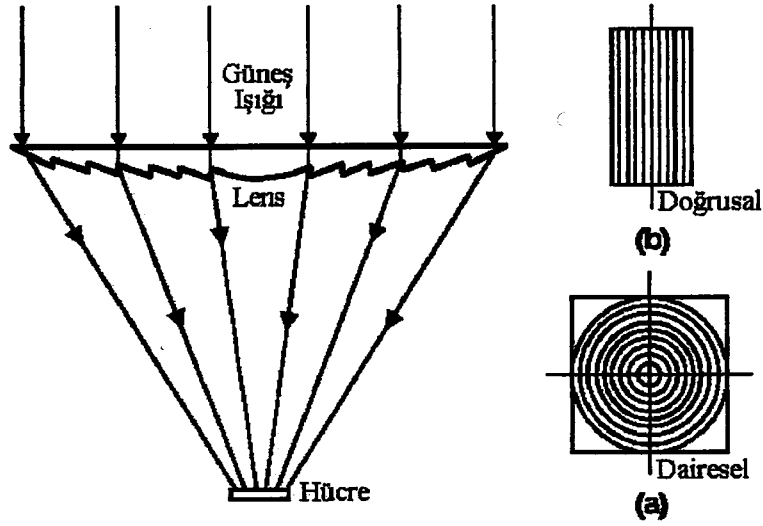
Şekil 8.7. Çoklu eklem yapısındaki sistem.

İnce-film çoklu eklemli cihazlar genellikle yekpare olarak yapılır. İşlem bağıl olarak açık bir şekildedir ve çok küçük enerjilere ihtiyaç duyarlar. Dolayısıyla bu tür cihazların üretimi bağıl olarak ucuzdur ve tipik olarak tekli eklemli hücrelerin üretimine oranla yalnızca %10 veya %20 daha pahalı üretimleri vardır. Performans gelişimleri, masraflardaki ılımlı artışlara göre oldukça baskın gelmektedir.

Bazı durumlarda, yüksek verim değerlerine, üst ve alt hücrelerde aynı yarı-iletken malzeme kullanıldığında da ulaşılır. Bu, normal amorf silikon ince filmlere göre daha yüksek düzenli verimlere sahip olan, amorf silikon çoklu eklemli hücrelerdeki durumdur. Bu kısmi olarak böyledir, çünkü kendine özgü oldukça ince tabakalara sahip, çok ince amorf silikon hücrelerinde daha az ışık endüklenme olumsuzluğu vardır ve bunlar çoklu eklemli cihazların yapımında kullanılırlar. Böylece daha yüksek istikrara sahip verimlere ulaşılır. Verimde çok daha büyük gelişimlere, her hücre bileşeninin bant aralığını değiştirmek için, amorf silikonun karbon veya nitrojen gibi malzemelerle alaşım oluşturması ile ulaşılabilir.

8.11. Yoğunlaştırıcılar

Fotovoltaik elektriğin maliyetini düşürmek için bir yaklaşım da optik lensler ve/veya yansıtıcılar kullanarak güneş pili üzerine düşecek ışığı yoğunlaştırmaktır. Daha büyük güneş ışığı yoğunluğu demek, hücre tarafından üretilen gücün o kadar büyük olması demektir. Dolayısıyla istenilen güç değerine daha küçük miktarda yarı-iletken malzemesi kullanılarak ulaşılabilir. Bu maliyeti düşüren bir etkidir, çünkü güneş pili bir fotovoltaik sistemdeki en pahalı bileşendir. İkinci derece öneme sahip, yoğunlaştırıcıların diğer bir avantajı da, hücre veriminin yoğunlaştırılmış ışıkta az miktarda artmasıdır.



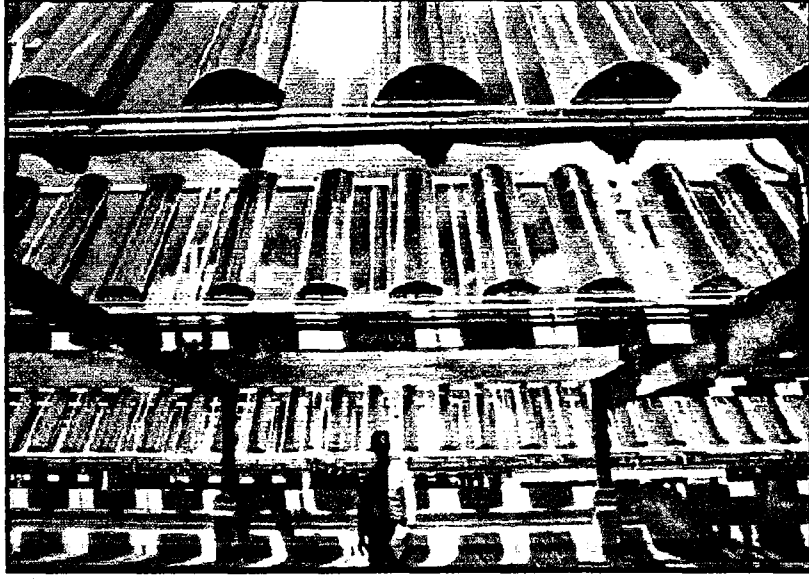
Şekil 8.8. Yoğunlaştırıcı sistemlerde en fazla kullanılan Fresnel lensleri.

a) Doğrusal bir odaklanma istendiğinde.

b) Işığın noktasal odaklanması istendiğinde.

Galyum arsenit bazlı çoklu eklemli güneş pilini içeren yoğunlaştırıcı sistemlerinde laboratuvar verimi %33 değerine ulaşmıştır. Bu herhangi bir fotovoltaik cihaz için doğrulanan en yüksek verim değeridir. Birçok yoğunlaştırıcı sistemler, ucuz Fresnel lensleri kullanırlar. Bu plastik lensler hafiftirler ve kabul edilebilir maliyetlerle, belli döküm kalıplarında komple ve seri olarak üretilebilir. Doğrusal odaklamaya sahip Fresnel lensleri güneş ışınımı 50 kata kadar şiddetlendirebilir, bununla beraber nokta odaklı yoğunlaştırıcılar 500 kat yoğunlaştırma oranına erişebilirler.

Düz-plaka sistemleri ile karşılaştırıldıklarında, yoğunlaştırıcıların güneşe odaklı kalabilmeleri için bir izleme sistemine sahip olmaları gerektiğinin dezavantajı karşımıza çıkar. Yoğunlaştırma oranı yükseldikçe odaklamadaki kesinlik daha fazla kritikleşir ve bu da izleme sisteminin çok daha kusursuz olması gerekliliğini doğurur. Yukarı-aşağı hareket ettiği gibi bir köşeden diğer köşeye de hareket eden iki eksenli izleme sistemleri birçok yoğunlaştırma sistemlerinde kullanılır. Modern iki eksenli izleme sistemleri oldukça güvenilirdir ve çok az bakıma ihtiyaç duyarlar, ancak nispeten pahalıdırlar.



Şekil 8.9. Texas'ın Austin şehrinde 3M şirketinin kurduğu 300 kWp gücündeki doğrusal yoğunlaştırma sistemi.

Yoğunlaştırıcılardaki diğer bir olumsuzluk da sadece direkt güneş ışığını kullanabilmeleridir. Bulutlu bir havada gözlemlenebilecek, ışığın dağılma oranı yoğunlaştırıcılar için bir kaynak olmaz, çünkü bunlar optik olarak odaklanamaz. Bu yüzden yoğunlaştırıcı sistemler, çok az bulutlu güne sahip, güneşli ve kuru iklimlerde en etkin biçimde işletilebilir.

8.12. İleri Fotovoltaik Teknolojileri

1990'larda fotovoltaik araştırmaları, teknolojiyi yeni sınırlara taşımıştır. Hücre verimlerinin çarpıcı bir biçimde artışı ve tamamen yeni uygulamalar, günümüzdeki laboratuvar avantajlarıyla yapılabilmektedir. İki yeni teknoloji, çok uzak olmayan bir gelecekte ticari kullanımlar için önemli hale gelebilecek gibi görünmektedir.

8.13. Yüksek Verimli Piller

Silikon, fotovoltaik malzemeler içinde bugünkü kullanımda hala en popüler malzeme olduğu sürece, güneş pillerinin geleceği "III-V" malzemeler olarak bilinen madde gruplarının kullanımı şeklinde olacaktır. Bu malzemelerin kapsadığı elementler, kimyadaki periyodik tabloda üçüncü ve beşinci grupta olan galyum (Ga), indiyum (In), arsenik (As) ve fosfor (P) elementlerini kapsadığı için bu ismi almışlardır.

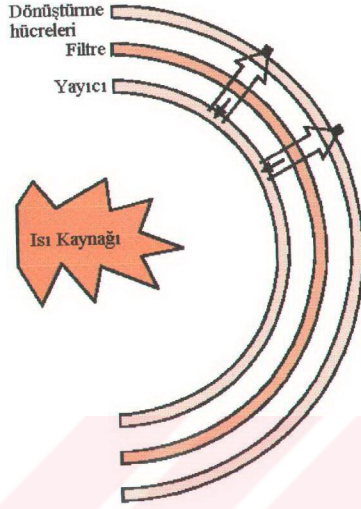
Galyum arsenür (GaAs) ve galyum indiyum fosfit (GaInP₂) gibi, III-V alaşımlarının gelişimi çoklu eklemlerli cihazlar ve yoğunlaştırıcılar için rekor verimleri mümkün kılmaktadır. Bu malzemelere sahip hücreler laboratuarda tek güneş ışığı altında %30 ve yoğunlaştırılmış ışıkta yaklaşık %33 verimliliğe ulaşmışlardır. Işık-elektrik dönüşümünde, normal bir güneş ışınımında %35 ve yoğunlaştırma ile %40 değerlerine ulaşmak mümkündür.

III-V bileşiminin en önemlisi olan Galyum arsenür birçok sayıda yararlı özelliklere sahiptir. Tek eklemlerli güneş pillerinde kullanılması için ideal bant genişliğine sahiptir, yüksek oranda bir soğurucudur, güneş ışığını soğurabilmek için yalnızca birkaç mikron kalınlığında bir hücreye ihtiyaç duyar, ısıya karşı nispeten duyarsızdır, bu da onu hücre ısısının çok yüksek değerlere ulaşabildiği yoğunlaştırma sistemlerinde kullanımını mümkün kılar. Ayrıca radyasyon zararına çok dirençlidir ve bu da uzayda kullanımında çok önemli bir avantaj sağlar.

Halen çok pahalı olmalarına karşın, bu malzemeler uzayda kullanım için, yüksek enerji radyasyonuna dayanıklılıkları ve ağırlıklarına oranla ürettikleri gücün büyüklüğü nedeniyle maliyet avantajı sunarlar. Gerçekten de en son iletişim uyduları III-V güneş pilleri ile donatılmıştır. Dünyada bu malzemeler, çok küçük fotovoltaik hücrelerin kullanıldığı ve performansa oranla malzeme fiyatının ikinci önem sırasında tutulduğu yoğunlaştırıcı sistemlerde fiyat avantajlıdır.

8.14. Isıdan Elektrik Üretimi

Isıdan elektrik enerjisi üretimi işlemi geleneksel olarak bazı kademelere ihtiyaç duyar. Su gibi bir akışkan öncelikle buhar üretmek için ısıtılır. Daha sonra buhar, manyetik alan jeneratörünü döndüren mekanik bir türbine yönlendirilir. Alternatif olarak ısı enerjisi fosil yakıtların yakılması ile elde edilip, bir içten yanmalı motorda mekaniksel enerjiye dönüştürülebilir. Ama artık elektriği üretmek için bu ara kademelerin kullanımına ihtiyaç olmadan daha temiz, daha sessiz ve daha basit bir yol vardır.



Şekil 8.10. TPV sisteminin genel çalışma prensibi.

Termo-fotovoltaikler (Thermophotovoltaics-TPV), güneş pillerinin ışığı elektrığe çevirdiği gibi, ısıyan ısı enerjisini elektrığe çevirmek için katı-hal elektronik cihazları kullanır. Sıradan fotovoltaik cihazlar aslında görülebilen ışığı kullanırken, bir TPV dönüştürücü, akkorlaşan bir cisim tarafından yayılan görünmeyen, uzundalga boylarına sahip kızılötesi ışınımını da kullanır. Cisim, doğal gaz ya da propan gibi yakıtların yakılması ile veya diğer yüksek derecedeki bir ısı kaynağı ile ısıtılabilir. Yukarıdaki şekilde TPV sistemi, yayıcı kısmı ısıtıp, kızılötesi ışın yaymasını sağlayabilmek için bir ısı kaynağına ihtiyaç duyar. Aradaki filtre kullanılabilir ışınımı dönüştürücülere geçirmek ve daha uzun dalga boylarını geri yansıtıp, yayıcıyı sıcak tutmak için kullanılır.

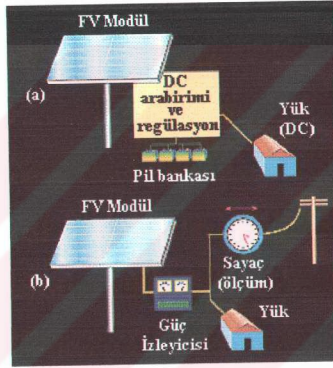
Araştırmacılar, gelen ışın ile hücrenin bant aralığı uyumunu dikkatli bir biçimde geliştirdiklerinde, TPV bağımsız olarak varlığını sürdürebilecek güç üretim teknolojisi haline gelebilir. Bu, cihazın ısının elektrik enerjisine dönüşümünü önemli oranda geliştiren, dönüştürücü hücrelerin yayıcının ısısına uyumunu mümkün kılar.

Tüm yakıt-elektrik dönüşüm oranları verimlilikleri olarak %10-%20 değeri kolayca kazanılabilir. Bu değer küçük boyuttaki gaz ve dizel jeneratörlerle karşılaştırılabilecek düzeydedir, ama TPV bazı önemli avantajlara sahiptir. Hiçbir hareketli parçaya sahip olmayan TPV sistemleri, portatif jeneratörlerle karşılaştırıldığında nispeten bakıma ihtiyaç duymazlar ve sessizdirler ve devamlı yanan alevde tam tutuşmayı kullanırlar. TPV cihazları ayrıca çok az hidrokarbon atıkları ile karbonmonoksitsiz olarak çalışarak daha temiz bir işletme sunarlar.

Aktif olarak gelişen birçok film ürünleri TPV teknolojisi bazlıdır. Yakın-dönem potansiyel kullanımları, kendinden ateşleme için kendi elektriklerini üreten gaz ocaklarını (dolayısıyla güç kesilmelerinde çalışmalarına devam edebilirler), uzak mesafedeki evler, eğlence ve askeri alanlar için kullanılan portatif jeneratörleri ve şarj cihazlarını kapsamaktadır (DOE 1996, <http://www.nrel.gov>, <http://www.sandia.gov>).

BÖLÜM 9. SİSTEMİN DENGELENMESİ (BOS-BALANCE OF SYSTEM)

Sistemin çalışabilmesi için sistemi dengelemek gereklidir. FV sistemler üç ayrı grupta toplanır. Birincisi güneş enerjisini doğru akım elektrik enerjisine çeviren grup; hücreler, modüller grubu. İkincisi enerjiyi kullanan grup; makineler, elektrikle çalışan tüm ekipmanlar. Üçüncü grup ise enerji üretimiyle tüketimi arasında kalan ve sistemi dengeleyen araçlardır.



Şekil 9.1. a) DC enerji kullanımı.

b) AC enerji kullanımı.

FV modüllere ek olarak sistem dengeleyici gereçler belirlenmelidir. Bunlar; akü şarj kontrolörleri, aküler, inverterler (alternatif akım ihtiyacı olan yükler için), kablolar, kablo kanalları, bir topraklama devresi, sigortalar, kesiciler, çıkışlar, modülleri destekleyecek metal yapılar ve FV sisteminin parçası olan diğer bileşenlerdir. Aşağıda FV sistem ve sistem dengesi konfigürasyonları önce doğru akım için, sonra alternatif akım için tanımlanmıştır.

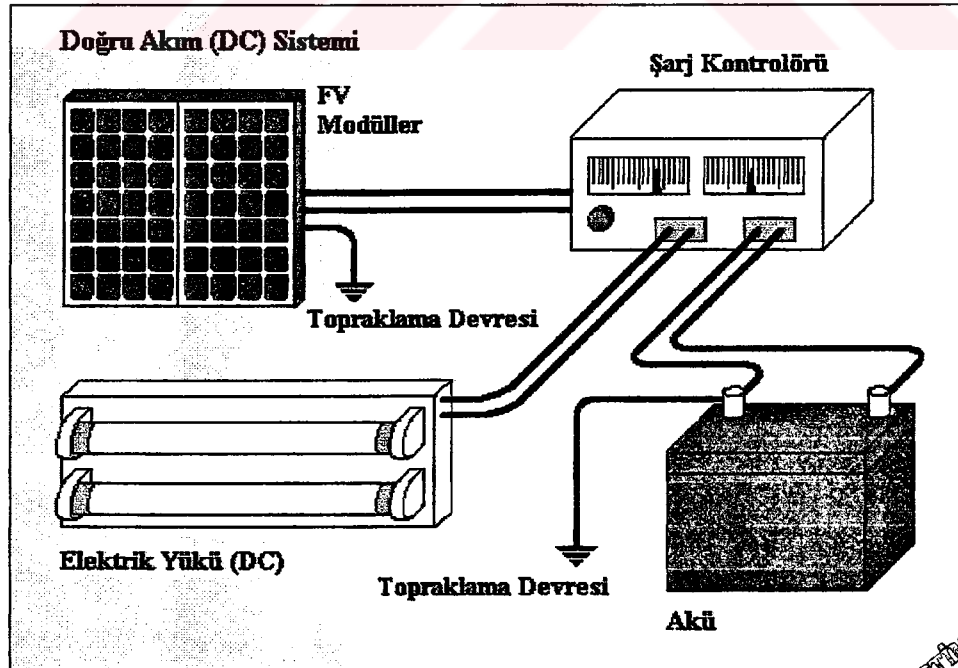
Bilinmesi gerekir ki, bir çok sistemde sistem dengeleyici teçhizatın maliyeti FV modüllerin maliyetine eşit veya daha fazladır. FV modüllerin maliyeti araştırıldığında bu maliyetin sistem dengeleme maliyetini kapsamadığı bilinmelidir.

9.1. Doğru Akım Sistem Teçhizatı

9.1.1. Şarj kontrolörü

Şarj kontrolörü FV modüllerden aküye ve yüke akan elektriği düzenler. Kontrolör aküyü aşırı şarj etmeden sürekli tam şarjlı vaziyette tutar. Yük güç çekmeye başladığı zaman kontrolör şarjın modüllerden aküye, yüke veya her ikisine birden akışına izin verir. Kontrolör akülerin tamamen şarj olduğunu hissettiği zaman modülden gelen şarj akışını durdurur. Birçok kontrolör ayrıca yüklerin aküden çok fazla akım çektiğini de hisseder ve akü yeterli şarja sahip olana kadar akımı durdurur. Bu özellik akü grubunun ömrünü önemli ölçüde artırır.

Kontrolörlerin maliyeti genellikle FV sistemin çalışacağı amper kapasitesine ve denetim özelliklerine bağlı olarak değişir. Kontrolör seçerken ihtiyaç duyulan özelliklere sahip olduğundan emin olunmalıdır. Maliyet dikkat edilmesi gereken ikinci husus olmalıdır.



Şekil 9.2. Doğru akım sisteminin yapısı.

9.1.2. Akü

Akü grubu, geceleri kullanım için veya gündüzleri modüller yük ihtiyaçlarını karşılayacak yeterli gücü üretmediği zamanlar için elektrik depolarlar. Elektriği uzun periyotlar boyunca sağlamak için, FV sistemler derin-çevrim akülere ihtiyaç duyarlar. Bu aküler genellikle kurşun-asit tiplerdir, yavaş yavaş deşarj olurlar ve yüzlerce kez kendi kapasitelerinin %80'i oranında şarj olabilirler. Otomotiv aküleri sıg-çevrim akülerdir ve FV sistemlerde kullanılmamalıdır. Çünkü kapasitelerinin %20'sine kadar deşarj olacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Eğer onlarca kez kapasitesinin %20'sinin çok altına inerlerse akü zarar görebilir ve bir daha hiç şarj edilemez duruma gelir.

Derin-çevrim akülerinin maliyeti tipine, kapasitesine (amper-saat), çalışacağı iklimsel durumlara, bakım aralığına ve elektriği depolarken ve verirken kullanıldığı kimyasalların tipine bağlıdır. Bir FV sistemi, birkaç bulutlu gün boyunca talep edilen gücü karşılaması için akülerde yeterli güç depolayacak biçimde boyutlandırılmalıdır. Bu "özerklik günleri" olarak da bilinir.

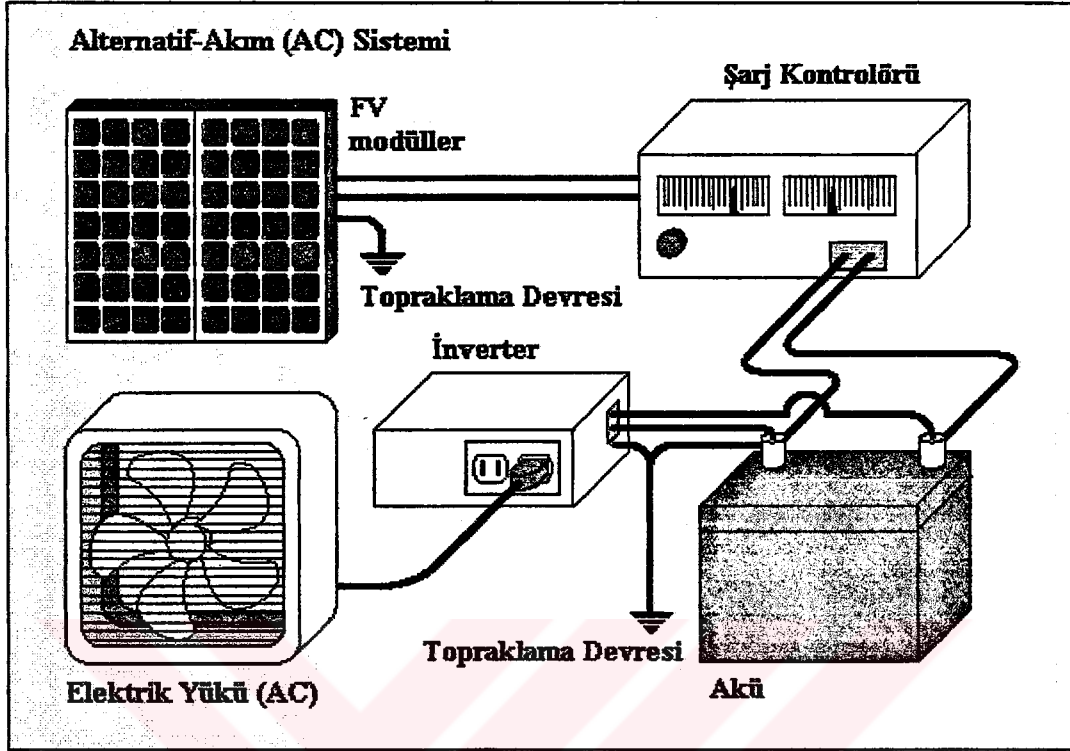
Birçok akü tipi, önemli sağlık ve güvenlik problemleri ortaya çıkarabilen zehirli maddelere sahiptir. Akü şirketleri ve FV sistem dizayncıları, deşarj olurken patlayıcı hidrojen gazı çıkaran kurşun-asit ve ıslak hücreli aküleri sistemin diğer elektriksel bileşenlerinden ve oturma alanlarından uzak, iyi havalandırılan alanlara yerleştirilmesini tavsiye ederler. Bakımda, tamirde ve değiştirmede kolay ulaşılabilirliği sağlamak için yeterli alan sağlanmalıdır. En önemlisi aküye imalatçının talimatnamesine göre bakım yapılmalı ve aküler tükendiğinde düzenli olarak değiştirilmelidir.

9.2. Alternatif-Akım Sistem Teçhizatı

9.2.1. İnverter

AC sistemleri ayrıca, FV modüller tarafından üretilen ve akülerde depolanan DC elektriği AC elektriğe çeviren inverter sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Değişik tip inverterler değişik kalitede elektrik üretirler. Örneğin lambalar, televizyonlar ve güç

aletleri düşük kaliteli elektrikle çalışabilirler ama bilgisayarlar, lazer yazıcılar ve diğer gelişmiş elektronik teçhizatlar en üst kalitede elektrige ihtiyaç duyarlar.



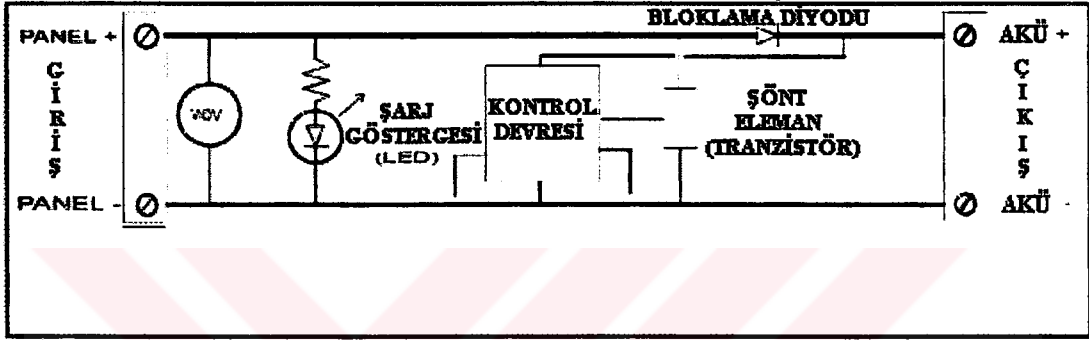
Şekil 9.3. Alternatif akım sisteminin yapısı.

Bağımsız uygulamalar için kullanılan inverterler (örneğin genel şebekeye bağlı olmayan sistemler), her 1W'lık çıkışa oranla 1 Amerikan Doları'ndan daha az maliyete sahiptirler. Maliyet birçok faktörden etkilenmektedir. Bunlar arasında ihtiyaç duyulan elektrigin kalitesi, gelen DC voltajın 12, 24, 36 veya 48 V olup olmaması, yüklerin normal olarak çalışırken ihtiyaç duydukları AC watt gücü, AC yüklerin küçük periyotlarda ihtiyaç duydukları ekstra dalga gücü toplamı ve inverterin sayaç, gösterge ışıkları gibi ek özelliklere sahip olup olmaması vardır.

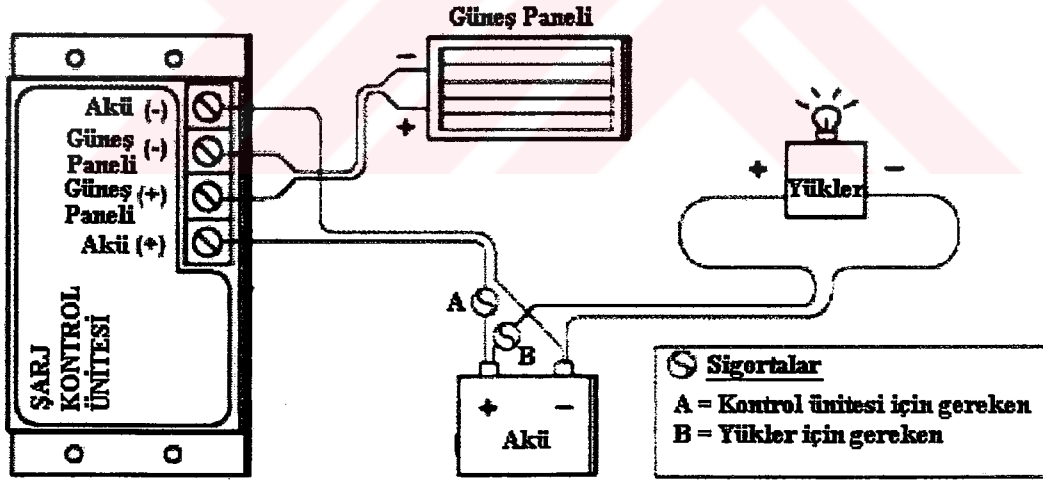
Eğer gelecekte ek AC yükler eklenmesi planlanıyorsa bu daha önceden planlanmalıdır. Ek odalar yapılması veya yeni elektriksel yüklerin ilave edilmesi düşünülüyorsa, o anki ihtiyaca oranla daha büyük giriş ve çıkış gücüne sahip bir inverter düşünülmelidir. Bu, sistemin sonra daha büyük ölçekteki bir sistemle yenilenmesinden daha az bir maliyete neden olacaktır.

9.3. Şarj Kontrol Üniteleri

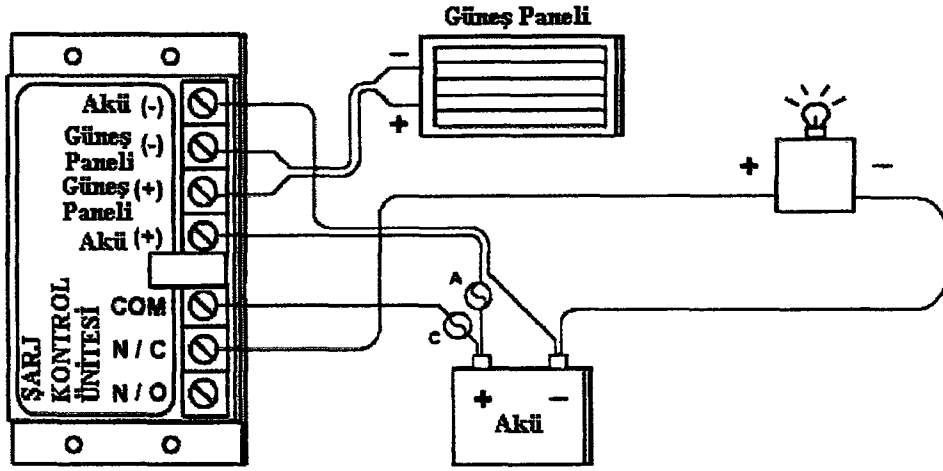
Şarj regülatörleri güneş panellerinden gelen enerjiyi akülerde depolamak için yapılmış cihazlardır. Amacı akülerin fazla şarjda kalmasını ve akünün düşük voltajda çalışmasını engellemektir. Böylelikle akünün uzun ömürlü olması sağlanır. Bu cihazlar üzerindeki diyotlar sayesinde, gece akımın güneş panellerine kaçması önlenir. Bazı modellerinde düşük voltajda akünün çalışmasını engelleyen devreler de ilave edilmiştir. Dış şartlara göre tasarlanırlar (<http://www.orjinsolar.com>, <http://www.eren.doe.gov>).



Şekil 9.4. Şarj kontrol cihazının iç yapısı.



Şekil 9.5. Şarj kontrol cihazının bağlantı şeması.



Şekil 9.6. Düşük voltajda akünün çalışmasını engelleyen bağlantı şeması.

BÖLÜM 10. FOTOVOLTAİKLERİN TEMEL DİZAYN PRENSİPLERİ

Kendi elektriğinizi kendiniz üretmek istiyorsanız, güneşteki enerjiyi kullanarak elektrik üretme yollarından biri olan FV sistemini de düşünmek zorundasınızdır. Bu sistemlerin birçok avantajı vardır. Bu sistemler, insanlar için enerjiyi taşıyacak güç hatlarının oluşturulmasının çok pahalı olduğu yerler için, maliyet bakımından daha uygun alternatiflerdir. Hareketli hiçbir parçaları yoktur, bu yüzden çok az bakıma ihtiyaç duyarlar ve çevreyi kirletmeden elektrik üretirler.

Bu konu başlığı altında FV sistemlerin temel dizayn prensipleri ve bileşenleri tanıtılacaktır. Böylece bu sistemlerin teçhizatları ve sistem kurumu ile ilgili ön bilgilere sahip olunacaktır.

10.1. FV Teknolojisi

Tek FV piller, sistemin yapı blokları olan FV modülleri oluşturmak için elektriksel olarak bağlanırlar. Modül en küçük FV ünite olup, önemli büyüklükte fotovoltaik güç üretebilir. Bununla beraber özel FV piller yalnız küçük ölçekte elektrik üretirler. FV modüller, doğru akım olarak birkaç watt'tan 100 watt'ın üzerindeki güçlere kadar değişen çıkışlarda üretilirler. Modüller, çok geniş çeşitlilik gösteren elektriksel cihazlara güç vermek için FV dizilere bağlanabilirler.

FV teknolojilerinin ticari olarak mevcut olan en önemli iki tipi kristalleştirilmiş silikon ve ince filmidir. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi kristalleştirilmiş silikon teknolojisinde FV piller, büyük tek kristallerin veya kristalleştirilmiş silikon külçesinin kesilmesiyle elde edilir. İnce film FV teknolojilerinde, FV materyal, pili veya modülü mekaniksel olarak destekleyecek olan camın veya ince metalin üzerine koyulur. İnce film bazlı modüller, belirtilen elektrik çıkışları için şekillendirilen levhalar biçiminde üretilirler. FV modüllerine ek olarak, bir FV sistemi tamamlamak için ihtiyaç duyulan bileşenler içinde, bir akü şarj kontrolörü, aküler, bir inverter

veya güç kontrol ünitesi (alternatif akım yükleri için), güvenlik kesicileri ve sigortalar, topraklama devresi ve kablolama vardır.

10.2. FV Sistem Uygulamaları

Birçok insan, en çok bilinen küçük ölçekteki FV uygulamalardan olan FV ile enerjilendirilmiş hesap makineleri ve saatlere aşınadır. Bununla beraber geniş ölçekte sayısız maliyet avantajlı FV uygulamaları vardır. Bunlar arasında;

- Küçük ölçekteki uzaktan sulama, su depolama, uzak köyler ve deniz kullanımlarında su pompalaması amacı ile,
- Yerleşim ihtiyaçlarında, ilan tahtalarında, güvenlikte, otoyol işaretlemelerinde, sokak ve park alanlarında, patikalarda, uzak köy ve okullarda ve denizdeki yön şamandıralarında aydınlatma amacı ile,
- Uzaktaki posta istasyonlarında, acil radyolarda, uyduların yörüngelenmesinde ve hücresel telefonlardaki iletişim için,
- Tıbbi ve eğlence kullanımlarındaki soğutmada,
- Boru hatlarının ve rıhtımların, petrol ve su kuyularının, yeraltı tanklarının korozyon korumasında,
- Ticari ölçekteki elektrik enerjisi veya kamu elektriği üreten şebekelerde,
- Havalandırma fanları, soğutucular, televizyonlar, müzik setleri ve diğer gereçler gibi ev aletlerinde kullanımı vardır.

FV sistemlerin maliyetlerindeki inişin ve FV teçhizat imalatçılarının ve satıcıların sayısındaki artışın bu teknolojinin çok yaygın bir biçimde kullanımında payı vardır. FV'lerin ilk zamanlarında kendin oluştur sistemcileri (do it yourself), FV modüllerin imalatı için şirketler aramak ve genellikle FV sistemi olmayan diğer sistemlerin bileşenlerini FV sistemine uyarlamak ve tekrar dizayn etmek zorundaydı. Bugün satıcılar kullanıma hazır sistemleri ve FV sistemleri için özel olarak dizayn edilmiş çağdaş teçhizatları sunmaktadırlar. Birçok satıcı sistemin dizayn edilmesine yardım eden ve uygun bileşenleri belirten bilgisayar yazılımlarına sahiptir. FV pazarları genişlediği oranda satıcılar FV uygulamalarla ilgili daha büyük deneyimler kazanmakta, FV sistemlerinin alınmasını daha kolay ve daha ucuz yapmaktadırlar.

10.3. FV Sistemler Ne Zaman Uygun Olabilir?

İnsanlar FV sistemleri çok değişik nedenlerden dolayı seçerler. FV sistemlerin en önemli seçim nedenlerinden bazıları aşağıdaki gibidir.

- **Maliyet** – Bir güç hattını genişletme maliyetinin veya uzak bir yerde başka bir elektrik üretim sistemi maliyetinin yüksek olduğu durumlarda, bir FV sistem, elektrik kaynağını sağlamak için maliyet bakımından genellikle çok daha avantajlı olur.
- **Güvenirlilik** – FV modüller, hiçbir hareketli parçaya sahip değildir ve diğer elektrik üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında çok daha az bakıma ihtiyaç duyarlar.
- **Modülerlik** – FV sistemler, artırılmış güç ihtiyaçları için, varolan sisteme daha çok modül eklenerek genişletilebilir.
- **Çevresel faktör** – FV sistemler çevreyi kirletmeden ve gürültü meydana getirmeden elektrik üretirler.
- **Diğer sistemlerle birleşme yeteneği** – FV sistemler aküleri şarj etmek ve ihtiyaç olduğunda güç sağlamak için diğer elektrik üreteçleri ile kombine çalışabilir (rüzgar, hidro, dizel vb).

FV sistemler tüm uygulamalar için maliyet avantajlı değildir. Aşağıda bu sistemlerin hangi durumlarda uygun, hangi durumlarda uygun olmadığına dair bazı genel noktalar verilmektedir.

Öncelikle eğer sistemin kurulması düşünülen bölge zaten bir şebeke sistemine bağlıysa veya bu şebekeye çeyrek mile (400 m) kadar yakınsa, büyük bir ihtimalle FV sistemler maliyet bakımından avantajlı olmayacaktır. Tüm kamu şirketleri enerji santrallerinin maliyetlerini ve yakıt maliyetlerini tüketicilerine yayarlar. Bir FV sistemi kurduğunuzda esasen kendi mini ihtiyaç sisteminizi kuruyorsunuzdur. Tükettiğiniz elektriğin tüm üretim maliyetlerini ödersiniz. Güneş enerjisi bedava olmasına rağmen FV gereçler bedava değildir. Şimdiki modüllerde FV sistemler ile üretilen elektrik ve sistem dengesi kurulum maliyeti, yoğunluk ve o bölgedeki gün ışığının zamanına bağlı olarak değişmektedir.

İkinci olarak, küçük FV sistemler, alan ısıtma sistemlerine, su ısıtıcılarına, klimalara, elektrikli fırınlarına veya elektrikli kuru temizleme sistemlerine güç vermek için pratik değildir. Bu yükler çalışmak için çok büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyarlar ve bu da FV sistemin boyutunun ve fiyatının artmasına neden olacaktır. Örneğin, eğer FV sistem ışıkları enerjilendirecekse, enerji verimliliği en yüksek lambalar seçilmelidir. Eğer sistem tuvaletler ve banyolar için su pompalayacaksa su koruması en yüksek sistemlere bakılmalıdır.

10.4. Bölgelerin FV Sistemler İçin Elverişliliği

Bir FV sistem dizayncısı detaylı bir bölge takdir edebilir. Ama gene de sistemin verimli olup olamayacağını sistemi kurmayı düşünen tüketiciler de düşünmek zorundadır. Böylece bu sistem için yapılacak harcamaların ne kadar yerinde olup olamayacağı anlaşılabilir. Bu yüzden bu sistemin kurulmasını istediğiniz bölgenizin FV potansiyele sahip olup olmadığını tespit etmek için bir önyargıya sahip olabilirsiniz. Makul yargılara sahip olabilmek için Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile ilgili kurumlara başvurulabilir. Bir bölgenin uygun olup olmadığını belirlerken üç faktör düşünülmelidir.

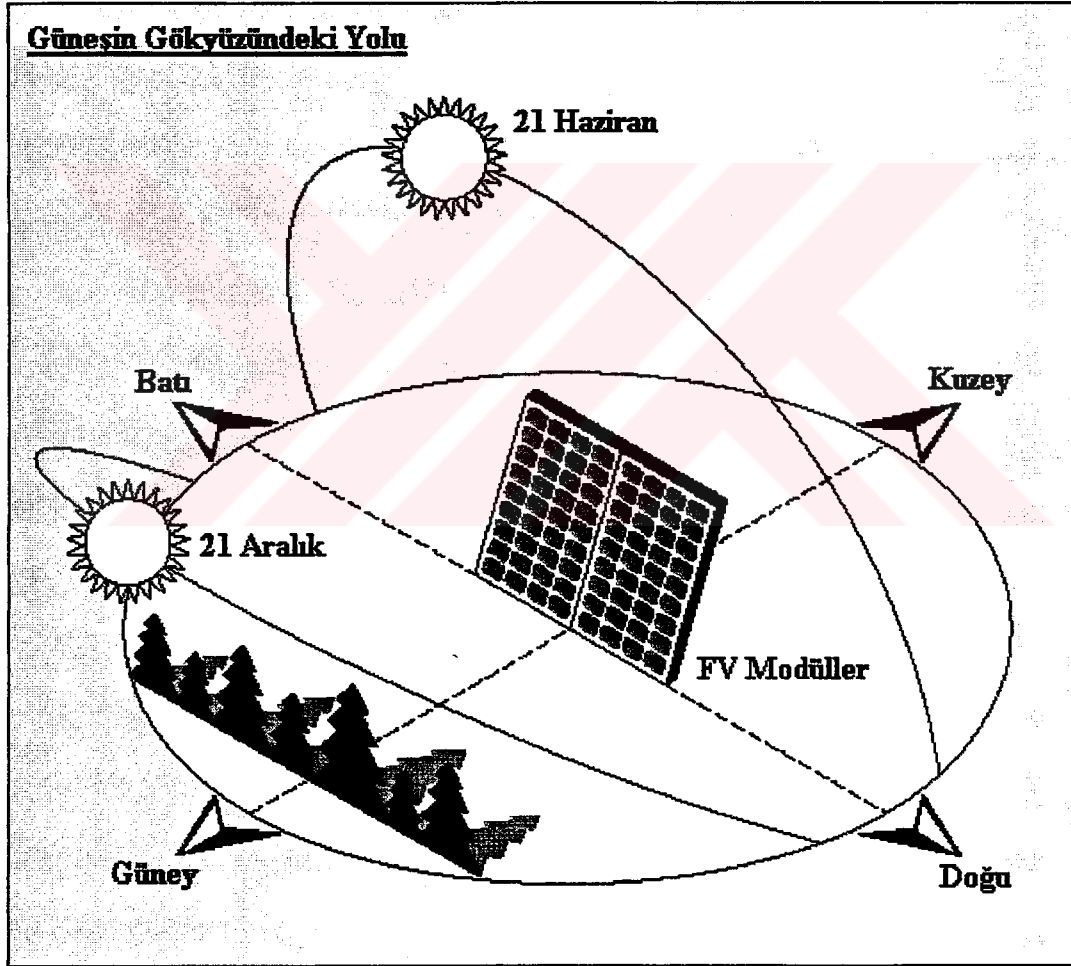
Birincisi, kurulacak sistemin görüş yönüdür. Maksimum günlük güç çıkışı için FV modüller gün içinde mümkün olduğu kadar fazla güneşe doğru tutulmalıdır (özellikle güneşin tepede olduğu sabah 10, öğleden sonra 3 saatleri arası).

İkinci olarak, belirlenen görüş yönü içinde ağaçlar, dağlar, binalar gibi, modüllere gölge düşürecek engeller olmamalıdır. Yazın ve kışın güneşin yörüngesi, ağaçların büyümesi ve gelecekte olabilecek yapılaşmalar, konstrüksiyonlar gibi gölgeleme ile sonuçlanacak problemler düşünülmelidir.

Son olarak, engellenmeyen bir görüş ayrıca uygun bir araziye ve FV sistemin kurulması için yeterli alana sahip olmalıdır. Düz ve çimenli olan, sarp ve kayalı bir yamaç olmayan yer uygun bir arazidir.

10.5. Hava Durumunun FV Modüller Üzerindeki Etkisi

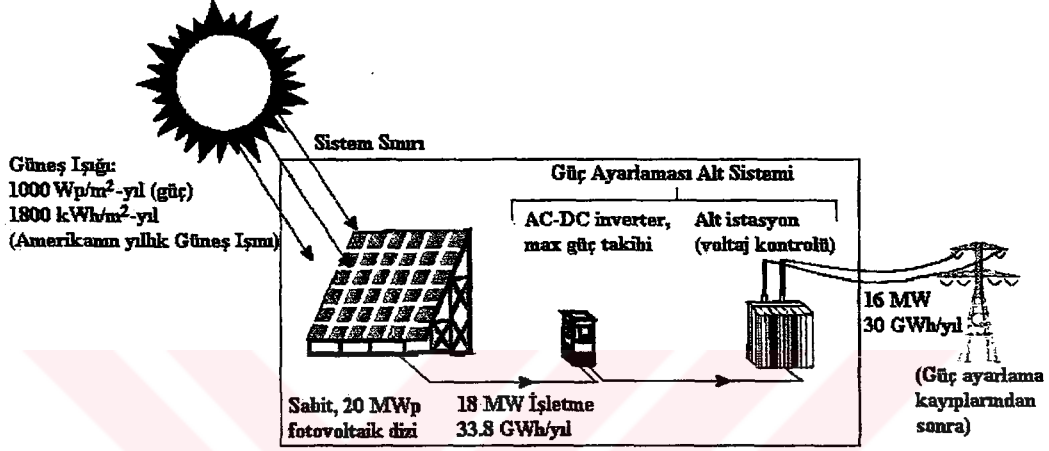
Elektrik üretimi, günün ve yılın zamanına veya havaya bağlı olmayan enerji santrallerinin tersine, FV modüllerin çıkışı direkt olarak bu iki faktörle ilişkilidir. Yaşanılan mekan, güç için ihtiyaç duyulan FV modüllerin sayısına etki eder. Çünkü değişik coğrafi bölgelerin değişik hava kalıpları vardır. Mevsimsel değişimler bir FV sistemi enerjilendirmek için mevcut olacak gün ışığı toplamını etkiler. Modül ısı da çıkışı etkilemektedir. Bir FV sistemi dizayn edilirken genel verilere güvenmek yerine sistemin kurulacağı bölgeye ait spesifik verilere sahip olunmalıdır. (<http://www.eren.doe.gov>)



Şekil 10.1. Güneşin mevsimsel olarak değişen ufku üzerindeki öğlen vakti yüksekliği.

BÖLÜM 11. ŞEBEKE ÖLÇEKLİ FOTOVOLTAİKLER

11.1. Düz Plaka İnce Film Fotovoltaikler



Şekil 11.1. Düz plaka, ince film fotovoltaiklerin şebeke uygulaması

İnce film fotovoltaik sistemleri büyük bir alan kullanarak gün ışığını DC elektriğe dönüştürürler. Buradaki sistem, en iyi gelişmiş üç adet ince filmin bileşkesi bazlıdır. İnce filmlere ek olarak fotovoltaik sistemler diğer bileşenlere de sahiptirler. Bunlar destekleyici yapılar, AC elektriğin ihtiyaç duyulduğu yerde inverterler, gerekirse bir güneş izleyici, kablolama-iletme ve alandır. Şekil 11.1, fotovoltaik enerji iletim sistemindeki her parçanın kendi aralarındaki kayıpları göstermektedir. Bu kayıplar, gün ışığının toplamı, modül seviyesindeki güç ve enerji üretimi (tepe güç), güç düzenleyici yardımcı sistem ile birlikte kablolama ve DC-AC dönüşümündeki kayıplardır. Tepe güç sadece başlangıç noktasıdır. Elektriğin baralara gittiği süreçte, kayıplar, sistemin tepe toplam değeri olan başlangıç değerinin %20'si civarındadır. Kayıplar enerji ve maliyet hesabında ele alınır.

Sistemin girişi güneş ışığıdır. Gelen güneş ışığının miktarı yerel iklime ve enleme bağlıdır. İzleme sistemine sahip olmayan bir dizi için Amerika'nın yıllık güneş enerjisi girişi 1800 kWh/m²-yl'dır ve bu değer %30 değişim payı vardır. Tek

eksende izleme sistemine sahip dizide ortalama çıkış yaklaşık 2200 kWh/m²-yıl seviyesine çıkar ve çift eksenli sistem için bu değer 2400 kWh/m²-yıl'dır. Daha yüksek enerji imkanına rağmen, izleme sistemleri muhakkak tercih edilmez çünkü maliyet artırırlar, hareketli parçalara sahiptirler ve bakım gerektirirler.

11.2. Sistem Uygulamaları, Yararları ve Etkileri

Fotovoltaikler şebeke ağı gücü de dahil olmak üzere birçok çeşitli uygulamalarda kullanılacaktır. Burada bahsedilecek sistem gelecekte düşünülen şebeke bağlantılı uygulamalar içindir. Bu sistemler bugünün daha küçük sistemlerinden gelişip, yakın zamanda 20 kWp-10MWp değerlerinden 2010 yılında 20 MWp değerlerine ulaşım ölçülendirilebilecektir. Gerçek boyutları bireysel şebeke bağlantılı uygulamalara bağlıdır. Bununla beraber fotovoltaik sistemler yüksek modülariteye sahiptirler (örneğin modüller ve kısmi diziler fabrikalarda küme halinde üretilebilirler) ve maliyetler sistem büyüklüğüne değil genelde üretim miktarına bağlıdır.

Çok çeşitli kullanılabilirliği olan bu sistem için Amerika'da, elektriği ileten dağıtım sistemlerindeki ihtiyacın tepe değer periyotlarında kullanılması, ana uygulamayı oluşturacaktır. Gün içindeki bazı orta ölçekli yükler ise daha sonraki uygulama olabilecektir. Gelişmekte olan ülkelerde, şebeke bağlantısı olmayan sistemler, ihtiyaç duyulan gücü, elektrik şebekesi olmayan yüzlerce, hatta binlerce köye sağlayabilir. Her iki pazarda da fotovoltaik sistemlerin sağlayabileceği güç önemli değerlerdedir. Amerika'da fotovoltaik çıkışları, tepe değeri oluşturan, birçok birimin gün içindeki ticari ya da soğutma amaçlı çektiği güçlerle uyum içindedir. Bu, birimlerin üretmek zorunda olduğu en pahalı elektriktir. Bununla beraber fotovoltaikler, bir şebeke ağı üzerinde dağıtılan merkezlerde, banliyolarda oturan halkların ihtiyacına bağlı olarak iletim hatlarının kapasite arttırımı ihtiyacını azaltır. Modülerlik bağlı olarak yerleşim kolaylığı ve hızlı kurulum sağlar. Gelişen milletlerde fotovoltaiklerin tarımsal kullanımı için, dizel jeneratörlerle direkt rekabete girebilen birkaç alternatif vardır. Bununla beraber, fotovoltaikler kullanım alanlarında çok zahmet vermeyip çok az bakıma ihtiyaç duymalarına karşın, dizeller sabit bir yakıt kaynağına ve sağlam bir bakıma ihtiyaç duyarlar. Fotovoltaiklerin gelişen ülkelerde kullanımı, geleneksel enerji kaynaklarına daha fazla bir bağlılık oluşturmayı ve bunların zararlı emisyonlarını engellemektedir.

Amerika'nın güneş kaynağı 10^{16} kWh/yıl değerinin üzerindedir. Elektrik kullanımı ise 2.5×10^{12} kWh/yıl'dır. Bu da yıllık enerji tüketiminin 4000 katı kadar bir enerjiyi yıllık olarak güneşten aldığını göstermektedir. Dünya çapında bu değer 10000'e kadar çıkar. Bu yüzden fotovoltaikler prensip olarak tüm yerkürenin elektriğini sağlayabilir. Özel olarak yerleşim alanının %1'i fotovoltaikler için kullanılırsa, suyu ve diğer önemli kaynakları etkilemeden, yerkürenin ihtiyaç duyduğu enerjinin 10 katı üretilir. Fotovoltaiklerin, çok büyük çaptaki geleneksel enerji kaynaklarının yerini alabilmesi, maliyet açısından rekabetçi fotovoltaik teknolojilerinin teknik olarak uygulanabilirliğine, depolama ve iletme özelliklerine direkt olarak bağlıdır. Gelecekteki fotovoltaik pazarlarının boyutu doğrudan fotovoltaik sistemlerin ekonomisi ile belirlenecektir. Maliyet barajlarının üstesinden gelinip, ince film bazlı fotovoltaikler gibi hücreler üretildiği sürece, dünyaca çok büyük potansiyellerin çok büyük ölçeklerde kullanılabilirliği uygulanabilir hale gelecektir.

İnce film fotovoltaiklerin çevresel etkileri minimumdur ve genelde hiçbir emisyonu sahip değildir. Bazı etkiler sistem imalatı sırasında beklenebilir ama bunlar yakıt bazlı enerji sistemleri ile karşılaştırıldıklarında küçük bir orandır. Enerji kullanımı açısından fotovoltaik bazlı sistemler tüm enerjinin geri ödenmesi de dahil olmak üzere, geleneksel sistemlerin toplam yakıt çevrimi atıklarını, normal değerinin %5'ine düşürebilirler. Hesaplar, ince filmlerin, yoğunlaştırıcı sistemler gibi diğer fotovoltaik alternatifleri ile karşılaştırıldığında üretimleri esnasında daha az enerji harcadıklarını göstermektedir. İnce filmlerin üretilmesi sırasında oluşan CO₂ miktarı çok azdır (engellenen miktarın %5 ila %10'u arası). Fotovoltaiklerin uzun yıllar genişlemeye devam edeceklerini düşünürsek, engellenen bu CO₂ emisyonları uzun dönem CO₂ düşüm periyodunun başlangıcı kabul edilebilir.

11.3. Teknoloji Varsayımları ve Sonuçları

İnce film fotovoltaik cihazlar bugünün bilinen kristal yapıdaki silikondan yapılmış cihazlarına göre çok farklıdır. İnce filmler, kristal-silikon fotovoltaikleri kullanmak için ihtiyaç duyduğu maddenin 1/20 ila 1/100'üne ihtiyaç duyarlar ve otomasyona daha yatkın gibi görülmektedir ve daha az pahalı üretilere sahiptirler. Büyük ölçekteki fotovoltaik sistemler için kanıtlanmış iyi potansiyele sahip 3 adet ince film yapısı vardır. Bunlar amorf-silikon (a-Si), bakır indiyum diselenit (CIS) ve

kadmiyum tellür (CdTe)'dür. Diğerleri ise olgunlaşmanın erken evrelerindedir (film-silikonlar ve boya ile duyarlaştırılan hücreler). Bugünkü üretilen ince-film fotovoltaik modüller amorf-silikon bazlıdır. Polikristal bazlı ince filmler ise pilot üretim aşamasındadır. İnce filmlerin üretiminin yükselmesine ait oldukça zengin ticari bir ilgi bulunmaktadır. İnce filmler daha fazla miktarda üretildiği ve kabul edilebilir performans kazançlarına ulaştıkça büyük ölçekli elektriksel şebeke kullanımlarında ve gelişen ülkelerdeki şebekeye bağlı olmayan büyük ölçekli kullanımlarda daha ekonomik olabileceklerdir. İnce filmler ticari olarak bulunsa da gerçek önemli ticari etkileri 3-10 yıl arasında beklenebilir. Bunun ötesinde genel kullanımlarının ise, teknoloji seviyelerinin ve üretimlerinin iyileşmesine bağlı olarak 2005-2015 yılları arasında olacağı beklenmektedir. Aynı periyot içinde de bu fotovoltaik sistemlerdeki laboratuvar başarılarının ticari başarıya dönüşmesine ihtiyaç vardır. Büyük ölçekteki kullanımlar için ekonomik hedefler yerine daha fazla tekniksel gelişim gerekmektedir. Şebeke bağlantılı sistemler, önümüzdeki 10 yıl içinde geleneksel sistemlerle yarışabilecek kadar ucuz olmayacaktır. Teknolojik gelişimler, büyük alan modüllerindeki fotovoltaik hücre verimini %18 değerinin üzerine çıkarabilecektir.

11.4. Gelişim Tahminleri

Önümüzdeki yıllarda (2005 yılına kadar) ticari anlamda yalnız amorf silikon doğrudan kristal-silikon hücrelerle yarışabilecektir. Maliyetler düzenli olarak düşmelidir. Maliyet düşüşleri, üretim hacimlerinin artmasıyla, daha çok standartlaştırılmış pazarlara ulaşım ile ve proses teknolojilerindeki gelişimler ile sağlanabilecektir. Aynı periyotta en az bir ince film (büyük ihtimalle CdTe), maliyet düşümü için rekabet yaratabilecek konumda ciddi bir şekilde pazara girecektir. CdTe teknolojisi daha yüksek verimlilik için yakın dönemde yüksek bir potansiyel sumaktadır ve amorf silikondan daha ucuza imal edilebilmektedir. Bu da fiyat düşüşlerinin hızlanabileceği anlamına gelir.

11.5. Performans ve Maliyet Tartışması

Burada karakterize edilen şebeke bağlantılı AC sistemler 20 kW'tan 20 MW'a kadardır. Tüm sistemler kullanım ve dizayn basitliği amacıyla sabit, düz plaka

şeklindedir. “Kapasite Faktörü” izleme ve sistem kayıp varsayımlarına bağlı olduğundan bu faktör periyot boyunca sabit kabul edilmiştir (ortalama gün ışığı için %21, yüksek gün ışığı için %26). Sistemin konstrüksiyon periyodu, kurulmuş bulunan bu tür sistemlerin süreleri göz önüne alınarak 1 yıldan daha kısa düşünülmüştür.



Tablo 11.1. Performans ve Maliyet Göstergeleri.

GÖSTERGE ADI	Birim	Temel Durum		2000		2005		2010		2020		2030	
		1997		+/-%		+/-%		+/-%		+/-%		+/-%	
Tesis Büyüklüğü (DC)	MW/p	0.02		3		10		20		20		20	
Tesis Büyüklüğü (AC)	MW	0.016		2.4		8		16		16		16	
Tesis Büyüklüğü (modül alanı)	m ²	333		33.50		91.00		143.00		125.00		118.50	
Fotovoltaik Modül Performans Parametreleri													
Verim													
-Laboratuvar hücresi (en iyisi)	%	18		19		20		21		22		23	
-Yardımcı Modül (en iyisi)	%	13		15		17		18		19		20	
-Güç Modülü (en iyisi)	%	10		12		15		17		18		19	
-Ticari Modül	%	6		9		11		14		16		17	
-Ticari Modül Çıkışı	Wp/m ²	60		90		110		140		160		170	
-Sistem Verimi	%	4.8		7.2		8.8		11.2		12.8		13.6	
Ortalama güneşlemeye sahip yerdeki sistem performansı (düzlendeki global gün ışığı, 1800 kWh/m ² -yıl)													
AC Kapasite Faktörü	%	20.7		20.7		20.7		20.7		20.7		20.7	
Enerji/Alan	kWh/m ² -yıl	86		130		158		202		230		245	
Üretilen Enerji	GWh/yıl	0.029		4.4		15		29		29		29	
Yüksek güneşlemeye sahip yerdeki sistem performansı (düzlendeki global gün ışığı, 2300 kWh/m ² -yıl)													
AC Kapasite Faktörü	%	26.4		26.4		26.4		26.4		26.4		26.4	
Enerji/Alan	kWh/m ² -yıl	110		166		202		258		294		313	
Üretilen Enerji	GWh/yıl	0.037		5.6		18.6		37		37		37	

Yukarıdaki Tablo Hakkında Notlar:

1. Her altı zaman süreci için (+/-%) belirsizliği sağlanmıştır.
2. Çıkış enerjisi (kWh/m²-yıl), modül ve sistem DC tepe watt (Wp) değerleri ile karşılaştırıldığında işletme kayıplarını kapsamaması için %20 indirgenmiştir. Çıkış enerjisi bara enerjisi maliyetini hesaplamak için kullanılmıştır. Sistemin AC sınıflaması bu %20'lik indirimle sahiptir. Modüllerin tepe değerlerinden indirgenen %20'lik kısım şu şekildedir: yüksek işletme sıcaklıklarındaki modül performans kaybı olarak %8 (25° yerine 50°), toz birikimi için %2, kablolama ve dizideki modül uyumluluğu için %5, DC-AC dönüşüm ve şebeke ihtiyaçlarının güç ayarlaması için %5 şeklindedir. Belirtilmelidir ki işletme sıcaklığı kayıpları bugünkü dizi kayıplarından daha düşüktür çünkü CdTe ve amorf silikon gibi yüksek bant genişliğine sahip materyaller kristal silikonlarla karşılaştırıldığında esas olarak daha az sıcaklık duyarlılığına sahiptirler ve yüksek sıcaklıklarındaki çalışmalarında kristal silikonun kaybının yarısına veya daha azına sahiptirler.
3. Fotovoltaik gelişimi kritik olarak, devam eden geliştirme çalışmalarına bağlı olduğundan, bu gösterimin zamanlamasında ve büyüklüğünde büyük miktarda belirsizlik vardır. Uzun dönem gösterimleri (2030), pratik olarak gözükken, günümüz teknolojisi ve anlayışına bağlı olarak maliyete ve performansa ulaşılması bazındadır. Muhtemelen 2030 yılındaki başarılar burada düşünüldenden daha fazla olacaktır, çünkü o zamanki buluşlar bizim tasavvur ettiğimizin ötesindedir.
4. Enerji iletimi, AC kapasite faktörünün tesis boyutu (AC) ve 8.760 saat/yıl'ın çarpımına eşittir. Bu değer ayrıca, sistem verimliliğinin sistem alanı ve birim alan başına mevcut olan gün ışığı ile çarpımına da eşittir çünkü izleme sistemine sahip olmayan bu tip basit bir sistemde arıza süresi ihmal edilebilir.

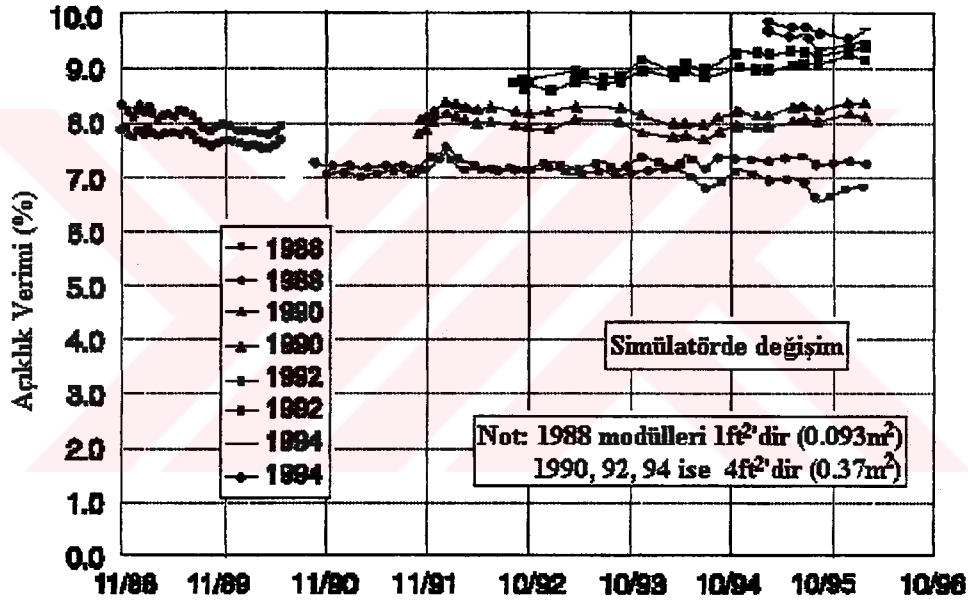
Tablo 11.1. (Devam) Performans ve Maliyet Göstergeleri.

GÖSTERGE ADI	Birim	Temel Durum 1997		2000 +/-%		2005 +/-%		2010 +/-%		2020 +/-%		2030 +/-%	
Sermaye Maliyeti (1997\$)													
Dogrudan Modül Üretim Maliyeti	\$/m ²	150-200	25	135-185	30	85-105	30	50-80	30	48-62	30	40-50	30
Güç ile ilgili BOS (\$/Wp'dan \$/m ² 'ye)	\$/m ²	60	25	54	30	44	30	35	30	32	30	25	30
Alan ile ilgili BOS (Alansız)	\$/m ²	109	25	100	30	78	30	48	30	42	30	39	30
Alan Maliyeti (baz, toplam sistem alanı)	\$/m ²	0.4	50	0.6	50	0.8	50	0.8	50	1.2	50	1.2	50
Direkt ilgili olmayan Maliyet Faktörü (modüllerde ve sistemde)	çeşitli	1.3	50	1.21	50	1.16	50	1.1	50	1.1	50	1.11	50
Direkt ilgili olmayan Maliyet (modüllerde ve sistemde)	\$/m ²	100	50	66	50	35	50	15	50	13	50	11	50
Sistem Toplamı	\$/m ²	445	30	380	35	252	35	163	35	142	35	120	35
DC Birimi Maliyeti													
Modül Maliyeti (w/ genel gider)	\$/Wp	3.8	30	2.2	35	1.0	35	0.5	35	0.38	35	0.29	35
BOS Maliyeti	\$/Wp	3.7	30	2.1	35	1.3	35	0.7	35	0.53	35	0.43	35
(w/ genel gider & \$0/02/Wp alanında)													
Sistem Toplamı	\$/Wp	7.5	30	4.3	35	2.3	35	1.2	35	0.91	35	0.72	35
Sistem Toplamı	\$/M	0.148	30	12.7	35	23	35	23	35	18	35	14	35
AC Birimi Maliyeti													
Sistemin Toplam Sermaye Maliyeti	\$/Wp	9.3	30	5.3	35	2.9	35	1.5	35	1.11	35	0.88	35
İşletme ve Bakım Giderleri													
Bakım (yıllık)	\$/m ² -yıl	2	30	1	30	0.5	50	0.4	50	0.3	50	0.3	50
O&M (AC birimi maliyeti)	sent/KWs	2.30	30	0.77	30	0.31	50	0.20	50	0.13	50	0.12	50
Toplam Yıllık Maliyet	\$/yıl	666	30	33.000	30	46.000	50	57.000	50	38.000	50	36.000	50
Toplam İşletme Maliyeti	\$/yıl	666	30	33.000	30	46.000	50	57.000	50	38.000	50	36.000	50

Yukarıdaki Tablo Hakkında Notlar:

1. Her altı zaman süreci için (+/-%) belirsizliği sağlanmıştır.
2. Tesis süresinin 1 yıldan az olacağı düşünülmüştür.
3. Modül üretimi ve BOS maliyeti $\$/m^2$ olarak verildiğinde genel giderleri kapsamaz. Bununla beraber son maliyetler $\$/Wp$ cinsinden verildiğinde tamamen yüklenmiştir. Aradaki fark ayrı bir çizgi şeklinde verilen “direkt ilgili olmayan maliyetler”dir. Bu genel gider tam yüklenmiş BOS'u, modülü ve inşa edilmiş sitem maliyetlerini belirtmek için kullanılmıştır.
4. Birçok doğrudan ilgili maliyetler $\$/m^2$ cinsinden verilmiştir, çünkü birçok maliyet alanı cinsinden vermek teknik zorlukların ve değişimlerin güçlü bir göstergesidir. Örneğin ürün, kullanılan materyal ve işletme oranı gibi kritik parametrelerin tümü, üretilen modül alanı ile doğrudan ilgilidir.
5. Fotovoltaik gelişimi kritik olarak, devam eden geliştirme çalışmalarına bağlı olduğundan, bu gösterimin zamanlamasında ve büyüklüğünde büyük miktarda belirsizlik vardır. Uzun dönem gösterimleri (2030), pratik olarak gözükken, günümüz teknolojisi ve anlayışına bağlı olarak maliyete ve performansa ulaşılması bazındadır. Muhtemelen 2030 yılındaki başarılar burada düşünüldenden daha fazla olacaktır, çünkü o zamanki buluşlar bizim tasavvur ettiğimizin ötesindedir.

Anahtar gösterge ticari modüllerin tasarlanan verimleridir. Fotovoltaik modüllerin çıkışı yaklaşık olarak gelen gün ışığı ile doğru orantılıdır ve bu orantısallık da sistem verimi olarak tanımlanır. Verim, hem güç hem enerji için tanımlanabilir. Güç ayrıca, bir dizideki anlık gün ışığı miktarı ölçümü veya dizinin ürettiği elektriksel güç miktarı gibi de kullanılabilir (watt). Enerji bilindiği üzere bir periyot zamanı boyunca güçtür (kWh). Verim, fotovoltaiklerin en kritik değeridir, çünkü hem çıkış hem de maliyet güçlü bir şekilde verime bağlıdır. Maliyet verimle ters orantılıdır. Örneğin tesis edilmiş 100W üreten bir sistemin yaklaşık 1000\$ maliyeti olduğunu düşünelim. Watt başına maliyet 10\$'dır. Yine 1000\$ maliyete sahip ancak 200W üreten yani iki kat verimli bir sistemi düşündüğümüzde watt başına değer 5\$ olmaktadır.



Şekil 11.2. Dış ortamda yapılan sekiz yıllık ince film modül testleri sonuçları.

İnce filmler üzerine odaklanan 10 yıldan fazla bir teknolojik gelişme, mükemmel performans şeklinde kendini geri ödemeye başlamıştır. Tablo 11.2 en iyi, öncü ticari ince film portatip modülleri göstermektedir. Bu modüller, maliyet ve performans projeleri için güven vericidir.

Temel alınan 1997 yılındaki ince film durumu, bu gösterim seviyelerini destekleyici niteliktedir. Örneğin hücre düzeyindeki verimlilik iki farklı polikristal ince filmde (bakır indiyum diselenit ve kadmiyum tellür) %16-18'e yükselmiştir. Alt modüllerin

ve modüllerin verimliliği, aktif alan ve bazı elektriksel direnç kayıpları gibi küçük kayıplarla birlikte, hücre verimliliği ile çok yakın ilişkilidir. Bugünün en iyi laboratuvar düzeyindeki modülleri %8-10 verimlidir. Üretim seviyesi teknolojisi (üretim için gerekli olan tüm işlem gelişimini kapsar) teknik kapasitenin tümüne adapte edilebildiğinde, en iyi laboratuvar modülleri en iyi modüllerin %90'ı kadar verimliliğe sahip olabilecektir. Ticari modüller ise en iyi prototip modüllerin %90'ı kadar verimli olabilecektir.

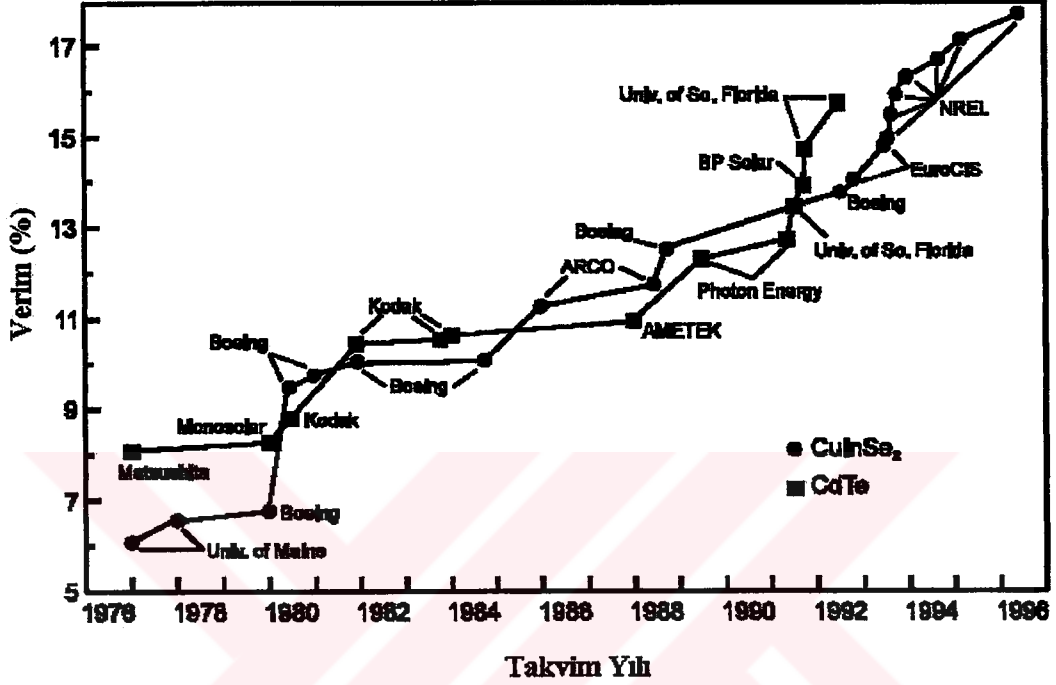
Tablo 11.2. 1997'nin en iyi ince film modülleri.

İnce Film Materyali	Boyutu (cm ²)	Verimliliği (%)	Güç (watt)	Şirket & Yorum
CdTe	6,728	9.1	61.3	Solar Cells Inc.
a-Si	7,147	7.6	56.0	Solarex (Amoco Enron Solar)
CIS	3,859	10.2	39.3	Siemens Solar Industries
CdTe	3,366	9.2	31.0	Golden Photon Inc.
a-Si	3,906	7.8	30.6	Energy Conversation Devices
a-Si	3,432	7.8	26.9	United Solar Systems (USSC)
a-Si	1,200	8.9	10.7	Fuji (Japan)
CIS	938	11.1	10.4	ARCO Solar (Siemens Solar oldu)
CdTe	1,200	8.7	10.0	Matsushita (Japonya)
a-Si	902	10.2	9.2	USSC

Not: Verimler NREL (National Renewable Energy Laboratory) laboratuvarlarında onaylanmıştır.

Ticari modüllerde büyük performans hedefi olan %15 değerlerine ulaşılabilir. Şekil 11.2, altı adet CIS bazlı ince fil modüllerinin NREL'de dışarıda yapılan testlerini göstermektedir. Bu modüller sekiz yıldan beri dışarıda bulunmaktadır. Performanslarında gözle görülür bir değişiklik olmamıştır. Modül ve sistem maliyetleri, birçok fotovoltaik modül maliyetinin, modül alanı ile ilgili olmasının bir göstergesi olarak \$/m² olarak verilmektedir. Bazı maliyetler, örneğin inverter gibi sistemlerin maliyeti güç ile orantılıdır ama her birim alan başına çıkışa bağlı olarak \$/m² bazına çevrilebilir. Bugünün fotovoltaik modül maliyetleri birçok fotovoltaik sistemin toplam maliyetinin yaklaşık yarısına denktir ve bunlar maliyet düşümleri

için birinci derece elverişliliğe sahiptirler. Modül fiyatlarına ek olarak, modül performansları sistem çıkışı tanımlar. Bununla beraber modül verimleri ve modüllerin üretim maliyetleri fotovoltaik sistem maliyetlerine odaklanırken anahtar faktörleri oluştururlar.



Şekil 11.3. Polikristal ince filmlerin günümüzdeki laboratuvar hücre verimleri.

Tablo 11.3. İnce film üretici maliyetleri özeti: uzun dönem indirgemeleri.

İnce film üretici maliyetleri özeti	Maliyet (\$/m ²)
Materyaller	
Cam (2 yaprak, \$5/m ²)	10
Cilt (cam ve modül arasında)	5
Aktif Materyaller (ince film fotovoltaikler için)	5
Ara toplam: Materyaller	20
Sermaye gereci (üretim tesisi)	10
Üretimde kullanılan enerji	2
Hizmet	1
Laboratuvar	10
TOPLAM	43

11.6. Materyaller

Birçok ince film, bir ya da iki parça, pahalı olmayan (yaklaşık \$5/m²) kireçlenmiş sodyum bikarbonatlı cam kullanırlar. Bir cilt yaprağı da (modül ve cam arasında konan) \$5/m² civarındadır. Mikron kalınlığındaki materyalin bir metrekaredeki miktarı 1 cm³'tür. Değişik filmlerde 3-10g/cm³ materyal vardır. Film kalınlığı dizayna bağlı olarak 1-10µm civarındadır, dolayısıyla materyalin tipik miktarı 25g/m² olacaktır. İnce filmlerdeki değişik materyaller için (yüksek saflıkta), tipik materyaller \$20'dan \$200/kg'a kadar çeşitlilik gösterir. 50 gram yaklaşık \$5/m² tutarındadır. Bunlar ince filmlerdeki aktif materyallerin toplam maliyetidir. Toplam materyal maliyeti ise yaklaşık \$20/m²'dir (aktif materyaller, cilt ve iki parça cam katıldığında).

11.7. Tesisin Üretimi

İnce film üretim tesisleri şu anda yapılmakta ve planlanmaktadır. Sermaye maliyetleri 10 MW yıllık üretim kapasitesi için \$10M değerine düşmektedir (%6.5 verimliliğe sahip yaklaşık 150,000 m² modüller ile). Bu da ilk yıl için \$1-\$3/Wp değerindedir. Bu maliyet kendini beş yılda amorti ederse bu değer üretim maliyetleri için \$0.3-0.8/Wp değerine gelir (paranın zaman içindeki hareketine göre belirli bir

indirim oranı düşünülerek). Bu maliyet eğilimlerdeki görüşü görmek için $\$/m^2$ şekline çevrilmelidir.

11.8. Enerji, Laboratuar ve Hizmet

Doğrudan üretim maliyeti bileşenlerinden kalan, enerji, laboratuar ve hizmetlerdir. Modül enerji girişlerine ait birçok analiz, modüllerin kendi enerjilerini dışarıdaki işletmede bir yıl içinde geri ödediklerini göstermiştir. Tüm bu maliyetleri toplarsak ortaya $\$32/m^2$ değeri çıkmaktadır. Hizmet maliyetleri 10 MW'lık bir tesis için yaklaşık $\$200000/yıldır$ veya $\$0.02/Wp'$ dir, bu da $\$1.3/m^2$ anlamına gelir (neredeyse önemsizdir). Laboratuar maliyetleri en az öneme sahip maliyetlerdir.

Sistem Dengesinde (BOS-Balance Of System) maliyetler modül ve genel giderler dışındaki her şeydir. Bunlar arasında, yer, destekleyici yapılar, modül kablolaması, güç düzenlemesi ve DC-AC inverter, kurulum ve nakletme işlemleri vardır. Toplam maliyet, modül maliyeti, BOS maliyeti ve genel giderlerin toplamıdır. Genel giderlerin ve BOS maliyetinin düşüşe geçeceği beklenmektedir, çünkü bugünkü sistemlerin maliyeti, oldukça düşük materyal maliyeti, çok yüksek DC-AC inverter maliyeti, çok sağlam dizayn, mühendislik ve değişik küçük sistemleri bir seferde yapma maliyetlerinin toplamıdır. İnverterlerdeki gelişmeler, inverterlerin büyük boyutlarda olduğu rüzgar gibi diğer yenilenebilir kaynaklarda gözlemlenmiştir. Düşük maliyetli fotovoltaikler için ihtiyaç duyulan inverterlerin maliyetleri de aynı doğrultuda düşmüştür. Aynı şekilde sistem maliyetinin diğer yönleri de hacimler ve uyarılama sayısı arttıkça tatmin edici şekilde düşecektir.

Tablo 11.4. Kaynak İhtiyaçları

Gösterge İsmi	Birim	Temel Yıl					
		1997	2000	2005	2010	2020	2030
Alan	ha/MW	5	4	3	2.5	2.5	2.5
	ha	0.08	9.6	24	40	40	40
Kritik Elementler (In, Se, Ga, Te gibi)	kg/MW		50	30	20	10	3
Su	m ³	0	0	0	0	0	0

Yer alanı, ihtiyaç duyulan çıkışı üretmek için gerekli dizi alanına bağlı hesaplanır. Dizideki her metrekaare için enerji miktarı bulunur ve sonra bu değer, dizilerin gölgeleme olmadan dolgulanması düşünülerek 2.5 değeri ile çarpılır. %10 sistem veriminde bir fotovoltaik sistem, dizinin her metrekaresi için 100W güç elde eder. Dolgulama faktörü hesaba katıldığında bu değer 40W/m² olur. Bu yüzden MW boyutundaki bir sistem 25,000 m² (0.025 km²) bir alana ihtiyaç duyar. Bazı durumlarda fotovoltaikler çatı üstlerinde veya diğer ikili kullanım uygulamalarında kullanılır, böylece bu yaklaşımlardaki alan miktarı düşer.

Bugünkü fotovoltaik teknolojileri tellür, indiyum, selenyum ve galyum gibi önemli elementlere ihtiyaç duyarlar. Bu materyallerin bulunabilirliği ekonomik ve jeolojik faktörlerle sınırlanmıştır. Bununla beraber ince filmler bu materyallerden çok küçük miktarda kullanırlar. Fotovoltaik karışımında bu elementlerin tipik miktarları, tabaka kalınlığının her mikron değeri için 3 g/m²'dir. Tabaka kalınlığı da 1-3µm aralığında değişir. Performans arttıkça ve diğer maliyetlerin üstesinden gelindiği zaman materyal maliyetleri önem kazanacaktır ve katmanlar daha ince olacaktır. İnce filmlerin teorik limiti, birçok yansımayla ışık yakalama gibi, cihazların tasarımlarına bağlı olarak 1-3µm aralığında değişebilir. Fotovoltaiklerin büyük ölçekli kullanımı bu materyallerin bulunabilirliği üzerinde hiçbir baskı yapmaz. Bu da ayrıca, bileşik yarı-iletkenlerin (CdTe'nin içindeki kadmiyum gibi) aşırı kullanımları olmayacağı

anlamına gelir ve böylece bu materyallerin yerküresel düzeyde çevresel etkilerinin önüne geçilmesi anlamına gelir.

Eninde sonunda fotovoltaikler durgun bir duruma geçtiğinde, zamanı geçmiş ince filmlerin tekrar kazanılması, fotovoltaiklerden yıl başına GWp değerinde sistemler yapmak için yeni materyal ihtiyacını yarı yarıya azaltacak diğer bir etkidir. Zaten bu materyallerin fotovoltaikler içinde kullanılması son derece kontrollü bir şekilde yapılmaktadır. Yarı-iletkenler çevreden 30 yıl için yalıtılmıştır ve geri kazanılabilir. Fotovoltaik sistemler işletilmeleri esnasında su kullanmazlar.

11.9. Yapı Bütünleşik Güneş Pilleri

Yukarıda güneş pillerinin çeşitli uygulama şekilleri sıralanırken şebeke-üstü bina uygulamalarından söz edilmiş, bu uygulamanın Japonya, ABD ve Avrupa'da büyük bir hızla geliştiğine, teşviklerin bu alana yöneldiğine işaret edilmişti. Yeni binaların tasarımı yanında eski binaların yeniden giydirilmesinde, hatta çatılarının donatılmasında gündeme gelen Yapı Bütünleşik Güneş Pili (YBGP) uygulamalarının, güneş pillerinin çevre dostu temiz enerji üretimi özellikleri yanında aşağıda sıralanan olumlu yanları olacaktır.

- Etkin bir şekilde kullanıldığı takdirde herhangi bir kentin enerji gereksiniminin üçte ikisi YBGP uygulamaları tarafından sağlanabilecektir.
- YBGP uygulamaları mevcut bina stokunda cephelerde, cam çatılarda, parapet ve camlı merdiven boşluklarında kullanılabileceği gibi yeni yapılan konut ve işyerlerinde güneşi gören her noktada kullanılabilir.
- Özellikle ticari binalarda enerji ihtiyacının azami olduğu süre sabah 9.00 ila akşam 17.00 arasında olduğundan, bu zaman aralığı güneş pillerinin enerji üretebildiği zaman dilimine denk düşmektedir.

- Ticari bir binada yıllık elektrik tüketiminin üçte biri yalnızca cephede uygulanan YBGP ile sağlanabilir. Şebekeye bağlı olunması sayesinde arz fazlası şebekeye verilebilecek, talep olduğunda bu geri alınabilecektir.

- Enerjisinin yüzde yüzünü güneş enerjisinden sağlayan okullar, spor salonları, gökdelenler, kamu binaları, üniversiteler, oteller, fabrikalar, kütüphaneler, tren istasyonları Avrupa'da on yıllardır işletilmekte ve zengin bir işletme deneyimi sağlamaktadır.

- YBGP uygulamalarında Avrupa pazarı büyük bir hızla gelişmektedir. Bu alanın devlet teşviklerinden bağımsız bir karakter kazandığını büyük inşaat, müteahhitlik firmalarının, dev petrol şirketlerinin (Shell, BP) ve bu arada cam şirketlerinin bu sektöre duydukları ilgiden anlamaktayız.

- YBGP uygulamaları mimari tasarımcılara yaratıcılıkların doğa ile uyum ve temiz enerji üretimi gibi temalarla birleştirebilecekleri yeni bir fırsat, ticari bina sahiplerine, büyük firmalara ve hatta kent planlarına, topluma, çevre ve doğa dostu bir mesaj verme olanağı sağlamakla kalmamakta, orta vadede enerji faturalarını küçültmektedir. Bugün ulaştığı verimlilik düzeyleri itibarıyla YBGP uygulamalarının maliyetleri mermer vb. pahalı cephe giydirme elemanlarının maliyetlerine yaklaşmıştır. Geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında YBGP maliyetleri toplam bina maliyetlerine %2-5 arası bir etki yapmaktadır.

- Yapılarda uygulanan her metrekare güneş pili, 20 yıl kadar olan ömrü süresince yaklaşık bir ton CO₂'in atmosfere atılmasını önlemektedir.

Güneş pili maliyetlerinin verimlilik artışları ve ölçeklerdeki büyümeye koşut olarak düştüğü de göz önüne alınırsa konunun çekiciliği açıklığa kavuşmaktadır. Bu arada YBGP'de toplam maliyetin içinde fotovoltaik modülün yanı sıra cephe giydirme yardımcı sistemi, kablolama ve inverterin bulunduğu da belirtilmelidir.

Genelde mimarlar ve mühendisler açısından YBGP uygulamalı yapılar planlanırken dikkat edilmesi gereken temel başlıklar aşağıda verilmektedir.

- Modüller esas olarak güneş ışığını en çok görebilecekleri bölgelere yerleştirilirler. Çevredeki binaların yaratacağı gölge, ağaç ya da doğa parçalarının gölgeleri azami enerji üretimi için hesaba katılmalıdır. En iyi etki için modüllerin dikeyle 30'lik bir açı yapmaları gerekmektedir. Cephelerde zor olsa de çatıda bu açı rahatlıkla gerçekleştirilebilir.
- Soğuk cephelerde, yani binanın ısıtılan bölgelerine temas etmeyen yalıtılmamış cephelerde güneş pili modülleri orada kullanılan bina kabuğunun yerini alabilir.
- Sıcak cephelerde, yani koruma, ses ve ısı yalıtım gibi işlevlerin yerine getirildiği cephelerde ise modüller çift cam sistemleri ile birlikte ya da herhangi bir tür giydirme elemanına uyumlu biçimde yerleştirilebilirler.
- Camlı çatılarda yarı-saydam amorf silis kullanan boşluklu güneş pili modülleri ışığın geçmesinin istenildiği mekanlarda kullanılabilir.

GP modüllerin uzun ömürlü olması ve verimli bir şekilde çalışması için bazı temel tasarım ve inşaa kriterlerinin uygulanması, binaya takılma, su tahliyesi, buhar basıncı dengeleri, sağlıklı kablolama, bakım-onarım için tasarım gibi noktaların da baştan göz önüne alınması gerekmektedir. Bu bağlamda en can alıcı elemanlar modülleri tutan çerçeve elemanları, bunların tasarımı ve malzemesidir. Bu çerçeveler;

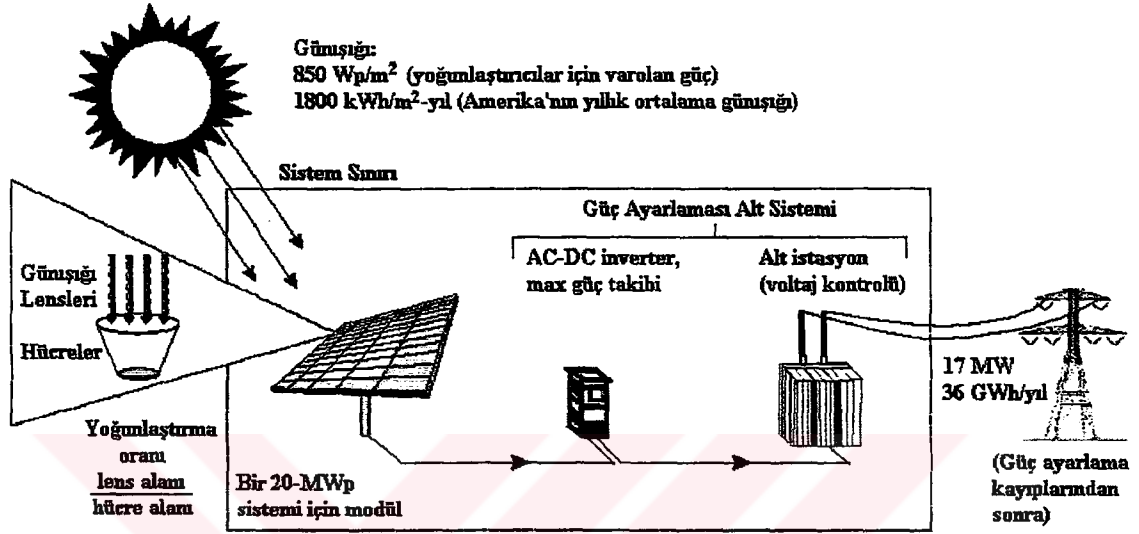
- Modüllerin üzerine herhangi bir yük uygulamadan onları çekmeli,
- Kara, kış şartlarına, güneşe, rüzgara dayanıklı olmalı,
- Sağlıklı kablolama için tasarlanmış olmalı,
- Yağmur suyu tahliyesi sağlanmalı, yoğunlaşma sorunu yaratmamalı,
- Elektrik sistemine ve modüle kolay ulaşılabilir şekilde tasarlanmalı,

- Gerekli ısı ve akustik özelliklere sahip olmalı,
- Yeterli soğutma sağlayacak havalandırma için tasarlanmalıdır.

Güneş pilleri verimlilikleri açısından sıcaklıkların artmasının pil verimliliklerini olumsuz etkilediği laboratuvar testleri ile gösterildiğinden havalandırma olgusu büyük önem taşımaktadır. YBGP alanındaki uygulamalar yaygınlaştıkça, şantiye deneyimi de dahil sağlanan birikim bu alanda çok değerli bir havuz yaratmakta, çok önemli olan sistemin elektrik bileşenleri sürekli geliştirilmekte ve teknik montaj için gerekli iş gücü yeteneği ortaya çıkmaya başlamaktadır. Şebekeye bağlantı gibi bir boyutu da içerdiğinden elektrik teknisyenleri ya da mühendisleri tasarım süresince yerlerini almaktadır (KUBAN 2001, <http://www.eren.doe.gov>)



BÖLÜM 12. ŞEBEKE ÖLÇEKLİ YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK SİSTEMLER



Şekil 12.1. Yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistemlerin şebeke uygulaması

Yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistemler, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek üzere, güneş pilleri üzerine odaklayan optik yoğunlaştırıcı sistemleri kullanırlar. Şekil 12.1, tüketiciye güç sağlayacak şebeke ağına bağlı bir yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistemini göstermektedir. Tüm sistem, yoğunlaştırıcı modülleri, destekleyici ve izleyici yapıları, bir güç işleme merkezini ve araziyi kapsar. Yoğunlaştırıcı fotovoltaik modül bileşenleri güneş pillerini, montaj ve pillerin iç bağlantıları için bir elektriksel izole ve termal iletim muhafazasını ve optik yoğunlaştırıcıları kapsar. Bugünkü yoğunlaştırıcılardaki güneş pilleri genelde silikondur. Bununla beraber ileride galyum arsenür (GaAs) pilleri de yüksek dönüştürme verimlilikleri nedeniyle kullanılabilir. Güneş pillerinin yerleşimi optik yoğunlaştırıcının odak noktasında olacağından güneş pillerinde aşırı ısı üretimi olacaktır.

Optik yoğunlaştırıcılar genellikle Fresnel lenslerindedir ama bunlar reflektör de olabilirler. Düşük yoğunlaştırma işlemi dışında optik yoğunlaştırıcılar saçılan ya da yayılan ışının parçalarını değil, normal direkt ışığı kullanırlar. Modüller destekleyici bir düzlem üzerine monte edilir ve gün ışığının olduğu sürelerde güneşe karşı olacak şekilde motorlarla, dişli sistemleri ve bir kontrolör tarafından döndürülür (takip sistemi). Güneşi takip sistemleri yüksek yoğunlaştırma seviyeleri (yaklaşık 10 katın üstünde bir yoğunlaştırma seviyesi) için yararlı olabilir ve yayılmış ışığın elektrik enerjisine çevrilme zorluğundan dolayı oluşan kayıplara bağlı olarak günlük yakalanan enerji miktarını artırır. Yoğunlaştırıcı modülün çıkışı, doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için donanım, güvenlik cihazlarına sahip ve şebeke ağı veya diğer bir yük için oluşabilecek arabirimleri düzenli olarak kontrol eden bir güç işleme merkezine gönderilir.

Direkt gün ışığını güneş pillerine yoğunlaştırmak için optik yoğunlaştırıcıların kullanılması, pil hücresi alanını, sonuç olarak güneş pili maliyetini binde bir oranına kadar düşürebilir (1000x yoğunlaştırma faktörü ile). Güneş pili maliyeti, toplam yoğunlaştırıcı sistem maliyetinin %5'i ve %10'u arasında oluşur. Düz levha sistemine sahip güneş pillerindeki maliyet yüzlerce, hatta binlerce dolar olabildiğinden, daha pahalı piller için bile yoğunlaştırıcı sistemler fiyat avantajlı olabilmektedir. Bunun da ötesinde düzenli dizayn edilmiş yoğunlaştırıcı hücreler diğer hücrelere göre önemli ölçüde daha verimlidir ve yoğunlaştırıcılar fotovoltaik seçimlerinde her zaman yüksek verimliliği sunmaktadırlar.

12.1. Sistem Uygulamaları, Yararları ve Etkileri

Yoğunlaştırma teknolojisinin önemli bir karakteristiği, hızlı ölçeklendirmeler için potansiyel olmasıdır. Güneş pilleri dışında yoğunlaştırıcı bileşenleri metal, plastik, cam ve elektriksel imalatçılar ve parça sağlayıcılar tarafından mevcut bulunmaktadır. Yoğunlaştırıcılar ayrıca işletilmeleri sırasında hiçbir atık ve emisyon oluşturmama yararlarına sahiptirler. Güneş hücresi üreticileri tarafından oluşturulan atıklar, yoğunlaştırıcı sistemlerde yoğunlaştırma faktöründen dolayı düz plaka sistemlere göre daha düşüktür. İleride eğer poli-silikon stoklanması kristalli silikon fotovoltaik endüstrisi için bir mesele olmaya başlarsa, düz plaka sistemlerden 100 ila 1000 kat daha az silikon kullanan yoğunlaştırıcı sistemlerin önemi daha da açığa

çıkabilecektir. Yoğunlaştırıcı sistemlerin satış oranı tüm diğer fotovoltaik sistemlerin %1'inden daha azdır. Yoğunlaştırıcılar, bu FV satışlarının gerçekleştiği küçük uygulamalara tam uymazlar ve şebekenin güç santralleri gibi çok büyük yoğunlaştırıcı uygulamaları başlangıçta düşük maliyete ihtiyaç duyarlar. Yoğunlaştırıcılar, düz plaka sistemleri ile karşılaştırıldıklarında ek yüklemelere sahiptirler. İzleme sisteminin, göze batan görünüşleri ve montaj seçeneklerinin kısıtlılığının yanında, güvenilirliği ile ilgili güvensizlikler eklenmiştir. Örneğin bu sistemleri çatılarla bütünleştirmek çok zordur.

12.2. Teknoloji Varsayımları

Değişkenlik gösteren yoğunlaştırıcı sistem teknolojileri aşağıdaki şekildedir.

- 1 eksenli 50x yoğunlaştırma değerli parabolik izleme sistemi: Silikon fotovoltaik alıcı üzerinde 50 kat yoğunlaştırma olacak şekilde yansıtıcı yüzeye sahip, kutupsal eksen izleme sistemli bir sistemdir.
- Statik (izleme olmayan) yoğunlaştırıcı sistem: Bir statik yoğunlaştırıcıdan beklenen yoğunlaştırma değeri 4 kattır. Güneye bakacak şekilde belli bir enlem açısıyla yerleştirilir. Bu konsept ayrıca düz plaka fotovoltaikleri ve diğer yüksek konsantrasyonlu fotovoltaikler ile karşılaştırıldığında daha az maliyetli bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Japonya'nın fotovoltaik programında bugünlerde statik yoğunlaştırıcılar ile ilgili yeni araştırmalar yapılmaktadır.
- Nokta odaklanmalı veya 400x kapasiteye sahip GaAs kullanılan çanak tipi yoğunlaştırıcılar: Yansıtıcı bir çanak veya Fresnel lensi ile yüksek verimli 400x değerinde çalışan silikon yoğunlaştırıcı hücreler elde edilir.
- Bir nokta odaklanmalı veya 1.000x kapasiteye sahip GaAs kullanılan çanak tipi yoğunlaştırıcılar: Bu yukarıdaki sisteme çok benzeyen bir sistemdir, ama silikon hücresi yerine, çok daha yüksek verimli, 3 ila 5 materyalden oluşan multijonksiyon bazlı hücrelerle değiştirilmiştir.

Tablo 12.1. Bugünkü yoğunlaştırıcı teknolojisi ve gelişimi için yapılan çalışmalar.

Yoğunlaştırıcı Tipi	Yoğunlaştırma Faktörü	Hücre Tipi	Açıklamalar
Doğrusal Fresnel Lensleri	20x	Silikon	Olgunlaşan 4.jenerasyon dizaynı
Doğrusal Fresnel Lensleri	15x	1-güneş Si	Bazı dağılmış ışınları toplar ve basit izleme sistemi kullanır.
Nokta-odaklı Fresnel Lensleri	250x	Yüksek Verimli Si	Yüksek ölçekte \$2/W değerinden daha düşük değerler elde edilebilir.
Nokta-odaklı Fresnel Lensleri	250x	Yüksek Verimli Si	Cam lenslidir ve 500 kW değerinin üzerindeki alanlar için \$3/W değerine ulaşır.
Nokta-odaklı Fresnel Lensleri	300x	Si	230 W gelişmiş modülden oluşur ve düz plakalar ile yarışabilir.
Çanak	2400x	Si veya GaAs	Kojenerasyon yaklaşımı termal ve elektrik enerjisini üretir, 1 kW sistem bitmiştir.
Çanak	500x	Si	Kojenerasyon konseptinin ispatını kanıtlar.
Yansıyan Parabolik Çukur	25x ve 32x	Si	İki değişik üretici
Değişken Optikler	10x	Si veya diğer	Spektral olarak ışığı seçer, takip sistemi yoktur.
Doğrusal Odaklama	2-10x	CuInSe ₂	Değişken güneş hücresi filamentleri, izlemeli veya izlemesiz sistemler.

1 eksenli izleme sistemine sahip 50x değerindeki çanak sistemler bugünün pazarlarında bulunan sistemlere çok benzer. Nokta odaklamalı yoğunlaştırıcılar, diğer yoğunlaştırma teknolojilerine göre maliyet açısından bazı avantajlar gösterirler ve bugün birçok üretici tarafından geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Tablo 12.2. Performans ve Maliyet Göstergeleri.

GÖSTERGE ADI	Birim	Temel Durum	2000	2005	2010	2020	2030
		1997	+/-%	+/-%	+/-%	+/-%	+/-%
Fotovoltaik Yoğunlaştırıcı		1 eksen - Si	Nokta-odak Si	Nokta-odak Si	Nokta-odak GaAs	Nokta-odak GaAs	Nokta-odak GaAs
Yoğunlaştırma	x-güneş	50	400	400	1,000	1,000	1,000
Tesis Büyüklüğü (DC)	MWp	0.02	3	10	20	40	80
Tesis Büyüklüğü (AC)	MW	0.017	2.55	8.5	17	34	68
Tesis Büyüklüğü (modül alanı)	m ²	0.145	20	58.5	92.2	164.6	304.2
Performans							
Hücre Verimi	%	20	23	26	33	37	40
BOS Verimi	%	85	85	85	85	85	85
Optik Verim	%	90	85	85	85	85	85
Sıcaklık	%	90	91	91	91	91	91
Sistem Verimi	%	13.8	15.1	17.1	21.7	21.7	26.3
Ortalama Güneş Enerjisi Yeri (normal doğrudan güneşleme)							
Yıllık Güneş Enerjisi	kWh/m ² -yıl	1,674	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
AC Kapasite Faktörü	%	22.5	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2
Yıllık Sistem Enerjisi/Alan	kWh/m ² -yıl	231	272	308	391	437	473
Yıllık Toplam Enerji İletimi	GWh/yıl	0.033	5.4	18	36	72	144
Yüksek güneşlemeve sahip yerdeki sistem performansı (düzlendeki global gün ışığı, 2300 kWh/m²-yıl)							
Yıllık Güneş Enerjisi	kWh/m ² -yıl	2,219	2,397	2,397	2,397	2,397	2,397
AC Kapasite Faktörü	%	29.5	32.2	32.2	32.2	32.2	32.2
Yıllık Sistem Enerjisi/Alan	kWh/m ² -yıl	306	360	410	520	582	630
Yıllık Toplam Enerji İletimi	GWh/yıl	0.044	7.2	24	47.9	95.8	191.6

Tablo 12.2. (Devam) Performans ve Maliyet Göstergeleri.

GÖSTERGE ADI	Birim	İlk Durum 1997	2000		2005		2010		2020		2030	
			+/-%	Nokta-odak Si	+/-%	Nokta-odak Si	+/-%	Nokta-odak GaAs	+/-%	Nokta-odak GaAs	+/-%	Nokta-odak GaAs
Fotovoltaik Yoğunlaştırıcı		1 eksen - Si										
Sermaye Maliyeti												
Fotovoltaik Modül Maliyeti	\$/m ²	160		160		90		90		80		80
İzleme Maliyeti	\$/m ²	40		67		35		35		25		25
Güç ile ilgili BOS	\$/Wp	.7		.6		.3		.3		.2		.15
Alan ile ilgili BOS w/o Alan Maliyeti	\$/m ²	200		140		70		70		50		50
Her Hücre Alanı için Hücre Maliyeti	(\$1000)/m ²	15		20		15		30		20		15
Modül ve sistemler üzerinde doğrudan olmayan maliyetler (alanı kapsamadan yukarıdaki maliyetlere % olarak eklenir)	%	30		20		20		15		15		10
Alan Maliyeti	\$/m ²	0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5
Toplam Sermaye Maliyeti	\$M	.151		12.2		20.1		31		44		71
Ölçülen her tepe değer için Toplam Sermaye Maliyeti	\$/Wp	7.55		4.01		2.01		1.55		1.1		.89
DC Güç	\$/Wp	8.88		4.78		2.36		1.82		1.3		1.04
Ölçülen her tepe değer için Toplam Sermaye Maliyeti												
AC Güç												
İşletme ve Bakım Giderleri												
Bakım (yıllık)	\$/m ² -yıl	0.047		.02		.01		.008		.006		.004
O&M (AC birimi maliyeti)	sent/kWs	14		7		4		4		3.5		2.5
Toplam Yıllık Maliyet	\$/yıl	2.03		140		234		369		576		761
Toplam İşletme Maliyeti	\$/yıl	119		56		28		23		17		11

NOT: Tesis süresinin 1 yıldan az olacağı düşünülmüştür.

Yoğunlaştırıcı sistemlerin hızlı gelişimini destekleyen diğer bir faktör de yüksek verimli silikon güneş pilleridir. Bu piller yeni gelişmiştir ve yüksek verimli galyum arsenür güneş pilleri ve bu güneş pillerindeki verimin yükseliş ihtimali devam etmiştir. Yoğunlaştırıcılar için en önde gelen sorun pazarın yavaş bir şekilde gelişimidir ki bu da düşük maliyetli sistemleri engeller. Yoğunlaştırıcı hücrelerin gelecekteki gelişimini etkileyecek olan diğer bir faktör de şiddetli ilgi ve fotovoltaiğin uzaya ait yatırımlarıdır. Yoğunlaştırma firmaları teknolojik yaklaşımları çok geniş bir alanda takip etmektedirler. Yoğunlaştırıcı optikler statik yoğunlaştırıcılardan, tek eksenli veya iki eksenli izleme sistemli yoğunlaştırıcı sistemlerine, 1000 kattan daha fazla yoğunlaştırabilen yüksek yoğunlaştırılabilir sistemlere kadar değişiklik göstermektedirler. Işığı yansıtan ve kıran optikler kullanılmaktadır. Hücre materyalleri dağılımı endüstrinin standart silikonlarından, galyum arsenür veya bakır indiyum diselenit gibi yeni materyallere kadar çeşitlilik gösterir. Bu faktörler teknolojilerinin hala gelişmekte olduğunun bir göstergesidir. Yoğunlaştırıcılarının gelecekteki gelişimlerinin diğer bir yönü de daha az hammaddeye ihtiyaç duyulacağıdır. Çünkü birçok sistem şu an mevcut bulunan metal, cam ve plastik gibi yapı malzemelerini içermektedir. Fotovoltaiğin yoğunlaştırıcı sistemlerin teknolojisi, fotovoltaiğin güç santralleri ihtiyacında daha çabuk bir artışa imkan verebilecektir (<http://www.eren.doe.gov>).

Tablo 12.3. Kaynak İhtiyaçları.

Gösterge İsmi	Birim	Temel Yıl					
		1997	2000	2005	2010	2020	2030
Alan	ha/MW	4.3	3.9	3.4	2.7	2.4	2.2
	ha	0.07	10	29.3	46.1	82.3	152.1
Silikon	kg/MW	245	28	25	-	-	-
GaAs	kg/MW	-	-	-	18	16	15
Su	m ³	0	0	0	0	0	0

BÖLÜM 13. FOTOVOLTAİKLERİN GELECEĞİ

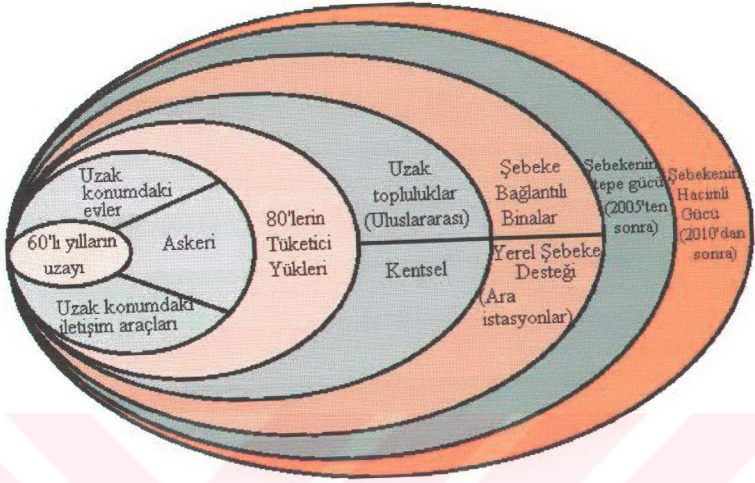
Üretim arttıkça ve uluslararası pazarlar genişledikçe, malzemeler geliştikçe, hücre dizaynı ve üretim işlemleri artan verimler sunabilecek ve daha ucuz fotovoltaik modüller olabilecektir. Aynı zamanda, son kullanıcı ihtiyaçları ve sistem dizayncılarının yaratıcılıkları, ev ve diğer sistemler için genişleyen uygulama alanları ile beslenecektir.

13.1. Büyüyen Pazarlar

Gelişen dünyada insanlara sunulan temel servislerin genişletilmesinde fotovoltaikler çok önemli rol oynayabilirler, ama uygun finans mekanizmalarının varlığı, pazar etkisinin oranını belirlemede kritik bir rol oynayacaktır. Hizmet açısından talepteki en büyük genişleme şebeke sektöründen gelecektir. Fotovoltaik sistemler günümüzde, binalardaki bağlantıları ile yerel elektrik şebekelerini desteklemede ve fotovoltaik destekli ara istasyonlarda kullanılmaktadır. Açıktır ki fotovoltaik sistemler gelecekte şebeke şirketlerine tepe güç istasyonları için ciddi alternatifler sunacaklardır. Birçok bilim adamı tarafından fosil yakıtların yakılması ile kötüleşen global ısınma ile ilgili bugünkü endişeler, fotovoltaiklerin, şebekenin hem tepe hem temel güç ihtiyaçları için tanıtımını hızlandıracaktır.

13.2. Anahtar Teknolojiler

1970'lerdeki petrol krizinin oluşturduğu cevap niteliğindeki yerküresel fotovoltaikler, 20 yıldan daha kısa bir sürede ticarileşmiştir. Bu teknoloji hala çok gençtir ve fotovoltaiklerin daha çok yer kaplayacağı önümüzdeki 20 yıl için değişimleri doğru bir şekilde tahmin etmek zordur. Ama gelecekteki gelişimlere muhtemelen şekil verecek faktörler belirlenebilir.



Şekil 13.1. Fotovoltaik Uygulamalarının Yayılma Modeli.

Malzeme kullanımı, teknoloji olgunlaştıkça önemini arttıracak bir faktördür. Çok çeşitli sayıda olgunlaşan endüstrilerin analizi son maliyet limitinin malzeme maliyeti ile ilgili olacağını göstermektedir. Bu durum ince filmlerin az malzeme kullanması kesinliğini akla getirmektedir ve bu teknolojinin parlak geleceğine işaret etmektedir.

Bazı önemli engellere rağmen amorf silikon kendini, dilim bazlı kristal silikon cihazlarına karşı bir rakip olarak ispatlamıştır. Ticari alanda daha iyi kurulduğunda, amorf silikon muhtemelen iyi işlemler sunacaktır ve fotovoltaik pazarında baskın bir hale gelebilecektir. Bu arada ince filmlerin bundan sonraki jenerasyonu olan CIS ve kadmiyum tellür verimlilik ve stabilite açısından daha kuvvetli tekniksel performans göstermekte ve amorf silikona yakın veya daha düşük bir üretim maliyetine ulaşabileceklerinin sinyallerini vermektedirler. Gerçek anlamda ucuz olan fotovoltaikler için ulaşılacak istenen değerler modül ömrü için 30 yıl, %15 verimlilik ve her watt başına \$0.50 değerleridir ve ince filmler bu amaçlara ulaşabilmek, hatta geçebilmek için yeterli kapasiteye sahip olarak görünmektedirler.

Fotovoltaikler şebekelerde temel güç ihtiyacı için kullanılmadan önce elektriğin depolanmasında önemli adımlar atılmalıdır. Fotovoltaik sistemler gün ışığının olduğu zamanda, 24 saatte ihtiyaç duyulan tüm gücü üretmek zorundadırlar ve bu da muazzam miktardaki enerjinin, boylama ve mevsime bağlı olarak 12-16 saat gibi uzun bir süreç için depolanması gerektiği anlamına gelir. Artan şebeke gücü geleneksel şekilde elektrokimyasal olarak (akülerde) depolanmakta veya tepe güç ihtiyacının oluşabileceği zaman aralıklarında suyu kullanarak elektrik üretmek için, yukarıda bulunan depo haznelere su pompalamakta kullanılmaktadır. Akü teknolojisinde önemli gelişmelerin olamayacağı gözükmekte ve bugün, sudan elektrik akımı geçirilerek elde edilen hidrojen yakıtının, gelecekte fotovoltaik enerjisinin depolanmasında orta ölçekli en iyi depolamayı sağlayacağı düşünülmektedir.

Burada, fotovoltaik modüllerin maliyetini düşürmek ve yüksek verimlilik elde etmek için yapılan yaklaşımlara yer verilmiştir. Ancak geleceğin ticari modülleri düşüncenin gerçeğinin dışında, henüz mevcut olmayan teknoloji bazlı olabileceklerdir. Buna bir örnek de verilebilir. İsviçre’de araştırmacılar fotosentez (bitkilerin güneş enerjisini kullanma şekilleri) işlemini taklit eden bir fotovoltaik sistemi geliştirmektedirler. Bu yeni hücrede, ışığı soğurma işlemi elektriksel yükün iletiminden farklıdır. Sıradan hücrelerde, yarı-iletken malzeme tüm fonksiyonları bir anda doldurmakta, malzemenin saflığında çok önemli talepler yaratmakta ve bu yüzden çok yüksek fiyat etiketlerine sahip olmaktadır. Biyolojik sistemleri taklit etme gibi orijinal yaklaşımlar geleceğin anahtarı olabilir. Ne var ki bunu bize gösterecek yalnızca zamandır. Bir şey çok açıktır ki, insanoğlu yeni bin yıla artan enerji ihtiyaçları ile girse de, fotovoltaik teknolojisi dünya uygarlığının ağırlığını çekmede önemli bir katkı sağlayacaktır (DOE 1996, <http://www.nrel.gov>).

BÖLÜM 14. TÜRKİYE’NİN ENERJİ KAYNAKLARI ARASINDA GÜNEŞ ENERJİSİNİN YERİ VE ÖNEMİ

Elektrik Enerjisi tüketiminin gelişmişliğin bir göstergesi halini aldığı çağımızda, birincil enerji kaynaklarının sürekli tükenmekte oluşu ve bu kaynakların enerji üretimi için yakımları esnasında ortaya çıkan ekolojik bozulmalar, bugün enerji konusunu acil olarak çözülmesi gereken bir problem olarak ortaya koymaktadır. Bu problemin çözümlerinden birincisi yeni ve temiz enerji kaynaklarının bulunması, ikincisi ise tüketimin ekonomik olarak kabul edilebilecek en alt düzeye indirilmesi biçiminde özetlenebilir.

Dünyanın gelecek dönemleri için önem taşıyan enerji sektörü, ülkemizin kalkınmasında da enerji kaynaklarının güvenilir, temiz, verimli ve kaliteli olarak değerlendirilmesi gereği nedeniyle özel bir değer taşımaktadır. İçinde bulunduğumuz dönemde ve önümüzdeki yıllarda gerek yurdumuzda gerekse çevre ülkelerde, enerji sektöründeki faaliyetlerin yoğunlaşacağı görülmektedir.

Sanayileşme süreciyle birlikte hızla artan enerji ihtiyacının karşılanması için geliştirilen ve uygulanan yeni teknolojiler bir çok problemi de beraberinde getirmiştir. Dünya ekolojisinin etkilenmesi bakımından büyük önem taşıyan, enerji ve çevre etkileşiminde ortaya çıkabilecek çevresel bozulmaların minimumda tutulabilmesi, bu problemlerin en büyüğüdür. Günümüzde kullanılmakta olan enerji kaynaklarının çevre üzerindeki olumsuz etkileri bilinmekte ve çevre üzerindeki bu tahribatın durdurulmasına çalışılmaktadır. Çevre dostu alternatif enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, dünyanın geleceği bakımından çok önemli bir adım olacaktır.

Alternatif enerji kaynakları grubundan olan güneş enerjisi ile rüzgar enerjisinin çevreye verdikleri zarar, günümüz enerji üretim sistemleriyle karşılaştırılmayacak kadar azdır. Ancak dünya genelinde bu enerji kaynaklarına, ülkelerin enerji

politikaları veya bu kaynakların yetersizliği gibi nedenlerle gerekli önem verilmemektedir.

14.1. Türkiye’de Enerji Sektörü

Bu ülkede Ton Eşdeğer Petrol (TEP) cinsinden hesaplanan toplam enerji tüketimi ile Gayri Safi Milli Hasıla (GSMH) arasındaki ilişki, ekonomide enerjinin rolü hakkında bilgi verir. Bu iki değer arasındaki oran enerji yoğunluğu olarak adlandırılır. 1950’lerden sonra bol ve ucuz enerji, teknolojik devrimin gerçekleşmesine yardımcı olurken, ekonomilerin enerji bağımlılıklarının da artmasına neden olmuştur. Ancak 1970’li yıllardaki petrol krizleri sonucu ortaya çıkan büyük fiyat artışları ve ikmal zorlukları, özellikle endüstrileşmiş ülkelerin enerji politikalarında değişikliğe yol açmıştır. Bu politikalar, ekonominin enerji ile olan ilişkisinin en aza indirilmesi yönünde geliştirilmiştir. Böylece, artık pahalı bir üretim girdisi olan enerjinin verimliliğinin artırılması, rasyonel kullanımı ve tasarrufu ön plana çıkmış ve sonuçta, enerji yoğunluğu azalma yoluna girmiştir. 1973’ten sonraki 22 yıl içinde bu oran çeşitli ülkelerde şu şekilde gelişmiştir.

Tablo 14.1. Ülkelere göre TEP/GSMH oranları.

Ülke	1973	1993	1995
İngiltere	0.32	0.23	0.21
Avusturya	0.21	0.16	0.15
Japonya	0.21	0.15	0.16
Norveç	0.23	0.19	0.17
Almanya	0.30	0.20	0.19
İtalya	0.19	0.14	0.14
Türkiye	0.34	0.34	0.35

Yıllardır enerjisini savurgan bir şekilde harcayan Türkiye’de enerji politikasının, tasarrufu öne çıkaracak şekilde planlaması gerekmektedir. Ancak geleceğe dönük enerji ve büyüme tahminlerine bakıldığında bunun tersinin gerçekleştiği görülür. 1995-2010 yılları arasında Türkiye’de GSMH normal büyüme hızı yıllık ortalama %6 oranında beklenmekte, ancak enerji kaynakları talep artış hızı yıllık ortalama

%6.2 olarak planlanmaktadır. Enerji kaynakları talep artış hızı 1995-2000 yılları arasında %7.4'e varacaktır. Bu israfın Türk ekonomisine maliyeti milyarlarca dolar olacaktır.

Tablo 14.2. Yıllara göre enerji talebi ve GSMH büyüme hızları tahminleri.

Yıllar	Enerji	GSMH
1995 – 2000	7.4	6
2000 – 2005	5.4	6
2005 – 2010	5.9	6
1995 – 2010	6.2	6

1995 yılında Türkiye 63 milyon TEP'lik birincil enerji tüketiminin yaklaşık %58'ini ithal etmiştir. İthal kaynaklara ödenen döviz miktarı yaklaşık 4.5 milyar dolardır. Bunun içinde, hemen hemen tamamı ithal edilen petrol ve doğalgaz yaklaşık olarak %46 ve %10'luk paylara sahiptirler. 2010 yılı için yapılan tahminlerde, enerji dışa bağımlılık oranının %62'lere kadar çıkacağı ve maliyetin 20 milyar dolar civarında olacağı öngörülmektedir. Diğer bir deyişle Türkiye, yıllık toplam ihracatının yaklaşık %25'ini enerji ithali için harcamaktadır.

14.2. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları

1970'li yıllarda petrol fiyatlarının hızlı yükselişle birlikte gündeme gelen ve kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların çevreyi giderek daha fazla kirletmesi nedeniyle gündemdeki önemini arttıran yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlileri su (hidrolik), biyomas, rüzgar, güneş ve jeotermal kaynaklardır. Başka bir alternatif de yeni enerji kaynakları sınıfındaki nükleer enerjidir.

Bugün dünyadaki ticari enerji tüketiminin %90'ı fosil, %7'si nükleer, %3'ü de hidrolik ve diğer kaynaklara dayanmaktadır. Dünyada kullanılan elektrik enerjisinin %80'i yenilenemeyen kaynaklardan (kömür, doğalgaz, petrol ve uranyum) üretilir. Bunlar kesintisiz olarak enerji üreten kaynaklardır. Geri kalan bölüm ise yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidroenerji %19'luk bir paya sahipken; güneş, rüzgar, biyomas ve jeotermal kaynaklardan elde edilen enerjinin toplam payı ise %1'den azdır.

Bugün için ülkemiz de dahil olmak üzere çoğu ülkelerde, farklı enerji santrallerinden elektrik üretiminin maliyetleri, ekonomik değerlendirmelerde göz önüne alınmaktadır. ABD’de 1991’de yapılan bir çalışma ile elde edilen, çeşitli enerji taşıyıcıları tarafından üretilen kWh başına maliyetler, sent cinsinden tablo 14.3’te gösterilmiştir.

Tablo 14.3. Çeşitli enerji taşıyıcıları tarafından kWh başına maliyetler.

Kullanılan Enerji Taşıyıcısı	Maliyet Aracılığı sent/kWh
Kömür	2.8 – 6.8
Petrol	3.0 – 7.9
Doğalgaz	0.78 – 2.91
Nükleer enerji	2.91 – 2.91
Rüzgar enerjisi	0.001 – 0.1
Güneş Pili	0.00 – 0.4

14.3. Türkiye’nin Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği ve potansiyeli bakımından zengin bir ülkedir. Mesela Türkiye birçok ülkede bulunmayan jeotermal enerjide dünya potansiyelinin %8’ine sahiptir. Ayrıca coğrafi konumu nedeniyle büyük oranda güneş enerjisi almaktadır. Potansiyel belirleme çalışmaları ile ülkemizin yıllık ortalama ışınım şiddeti 3.6 kWh/m^2 gün olarak tespit edilmiştir. Ülke genelinde yıllık ortalama güneş enerjisi 1315 kWh/m^2 ’dir. Buna göre Türkiye’nin tüm yüzeyine gelen enerji miktarı $1025 \cdot 10^{12} \text{ kWh}$ olmaktadır. Bu miktar Türkiye’nin 1996 yılında ürettiği toplam elektrik enerjisinin 11000 katına denk gelmektedir. Türkiye, hidrolik enerji potansiyeli açısından da dünyanın sayılı ülkelerindedir. Ortalama yağış koşullarında Türkiye’nin brüt hidrolik potansiyeli 433 TWh/yıl ’dır. Bu potansiyelin 216 TWh/yıl ’ı teorik olarak, 124 TWh/yıl ’da ekonomik olarak üretilebilir. Rüzgar enerjisi potansiyeli yaklaşık 160 TWh olarak tahmin edilmektedir. Rüzgar enerjisi hava koşullarına ve topoğrafik şartlara göre değişim göstermektedir. Rüzgar türbini ve rüzgar tarlaları kurulması sırasında, görsel ve estetik olarak kişileri ve çevreyi olumsuz etkilemesi, gürültü oluşturması, kuş ölümlerine neden olması, haberleşmede parazitler meydana getirmesi gibi olumsuz yanları da vardır. Bunların dışında, kayda

değer ölçüde biyogaz ve biyomas potansiyeli bulunmaktadır. Tüm bu enerji kaynaklarının hiçbir maliyeti yoktur, yenilenebilir olduklarından dolayı tükenmezler ve konvansiyonel yakıtların aksine çevre ve insan sağlığına hiçbir tehdit oluşturmazlar.

14.4. Güneş Enerjisi ve Türkiye'deki Durumu

Son yıllarda görülen yakıt fiyatlarındaki yüksek artışlar nedeniyle birkaç yıl öncesine kadar ekonomik görülmeyen güneş enerjisi, bazı kullanım alanlarında oldukça ekonomik duruma gelmiştir. Fizyon enerjisinin en büyük kaynağı, dünyaya zarar vermeyecek bir mesafede olan güneştir. Nitekim petrol, kömür ve atom enerjisi gibi birincil enerji kaynaklarına alternatif olarak güneş enerjisi çok umut vericidir. Güneşten dünyaya gelen enerjinin yoğunluğu, atmosferin üzerinde m² başına 1.35kW kadardır. Bu yoğunlukta dünya çapının kapladığı alana gelen güneş gücü 178-10⁹ MW düzeyindedir. Dünyanın tüm yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi, 1.22-10¹⁴ TET (Ton Eşdeğer Taşkömürü) ya da 0.814-10¹⁴ TEP gibi görkemli boyuttadır. Bir başka anlatımla, bir yılda gelen güneş enerjisi miktarı, bilinen kömür rezervinin 50 katı, bilinen petrol rezervinin 800 katı kadardır.

Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminin %34'ü fueloil ve motorin tüketilerek küçük kapasitelerde yapılmaktadır. 1 MW'dan küçük bu güç üniteleri ile 1500 MW güç üretilmektedir. Ülkemizin dağlık bir yapıya sahip olması ve yerleşim merkezlerinin birbirinden uzak olması, bu yerleşim merkezlerine elektrik enerjisinin iletimini güçleştirmektedir. Üretim ancak %3'ü böyle uzak yörelerde tüketilebilmektedir. Bu bölgelerin enterkonnekte sisteme bağlanma maliyetlerinin çok yüksek olması ve üretilen enerjinin önemli bir bölümünün iletim ve dağıtım hattında kaybolduğu göz önüne alınırsa, bölgesel ve bağımsız olarak çalışacak küçük güneş enerjisi elektrik santrallerinin önemi belirginleşecektir.

Türkiye'nin güneş enerjisi gücü ilk kez 1970 yılında, bir bilimsel araştırma kapsamında hesaplanmıştır. Belirlenen olgulara göre Türkiye'nin yıllık güneşlenme süresi 2608.8 saat olup, maksimum değer 361.8 saat ile Temmuz ayında ve minimum değer 97.8 saat ile Aralık ayında görülmektedir. Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölge yılda 3015.8 saat ile Güneydoğu Anadolu'dur. Karadeniz Bölgesi yılda

1965.9 saat ile en düşük değere sahiptir. Güneş radyasyon yoğunluğuna gelince, Türkiye ortalaması olarak yıllık değer 31.07 cal/cm^2 gün kadardır. En yüksek değer 503.13 cal/cm^2 gün ile yine Temmuz ayında ve en düşük değer de 132.04 cal/cm^2 gün ile yine Aralık ayında belirlenmiştir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi için yıllık ortalama güneş radyasyon yoğunluğu 341.23 cal/cm^2 gün düzeyinde iken, bu değer Karadeniz Bölgesinde 246.55 cal/cm^2 gün düzeyine düşmektedir. Yapılan değerlendirme sonuçları temel alınarak Türkiye'nin bütün yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi kuramsal biçimde hesaplanmış ve $1.2 \cdot 10^{11}$ TET bulunmuştur. Bir varsayım olarak, bu enerjinin binde birinin %30 verimle toplanması koşuluyla, yılda kullanılacak enerji miktarı $36 \cdot 10^6$ TET ya da $23 \cdot 10^6$ TEP olarak belirlenmiştir.

14.5. Güneş Enerjisinin Kullanım Alanları

Güneş enerjisinin kullanımı, gündelik yaşam yapısından ve konutlardan başlamakta; haberleşmeye, tarıma, endüstri kesimine, elektrik santrallerine, askeri hizmetlere ve uzaya kadar uzanmaktadır. Güneş enerjisinin günümüzde önem kazanan uygulamaları, oldukça yaygınlaşan güneşli su ısıtıcılarının dışında, güneşle ısınan binaların yapımı, güneş enerjisinin elektriğe çevrilmesi, güneş enerjili su pompalarının tarımsal sulamada kullanılması, geleceğin yakıtı olan hidrojenin sudan üretiminde güneş enerjisinden yararlanılması biçiminde sıralanabilir. Ayrıca güneş enerjisinin kullanıldığı alanlara hesap makineleri, radyo, TV ve uydu alıcıları, radar ve meteoroloji istasyonları, havaalanları ve helikopter pist ışıklandırmaları, denizcilik uygulamaları, karavanlar, sokak ve bahçe aydınlatmaları ilave edilebilir.

Güneş enerjisinin kontrollü ısı uygulamaları ise hızla gelişmektedir. Amerika ve Japonya'da yılda üretilen kollektör miktarı $1.800.000 \text{ m}^2$ düzeyini geçmiştir. Yine bir yılda Avustralya'da 176.000 m^2 , İtalya'da 80.000 m^2 , Avusturya'da 56.000 m^2 , Kanada'da 46.000 m^2 , Yunanistan'da 41.000 m^2 , Almanya'da 27.000 m^2 ve İsveç'te 25.000 m^2 kollektör üretilmiştir. 100 m^2 'lik kollektör yüzeyinin 70 kW ısıtma gücüne eşdeğer olduğu, %40 verimle 28 kW güç elde edebileceği düşünülürse sıralanan kollektör yüzeylerinin önemi vurgulanmış olur.

Bugün için güneş enerjisinin kullanılmasındaki genel amaç, alışlagelen birincil kaynak fosil yakıtların tutumlu ve ölçülü kullanımına yardımcı olmaktır. Dünya

yapay enerji bunalımı, güneş enerjisinin teknolojik gelişimini ve geleceğini büyük ölçüde etkileyerek özellikle üç uygulamaya ağırlık kazandırmıştır. Bunlar;

1. Yapıların ısıtılmasında güneş enerjisinin kullanılması,
2. Güneş enerjisinin elektrige dönüştürülerek kullanılması ve güneş elektrik santrallerinin geliştirilmesi,
3. Geleceğin yakıtı olan hidrojenin sudan üretilmesinde güneş enerjisinin kullanılması.

Hidrojen, güneş enerjisinden yararlanılarak elektrik ve termik yöntemlerle üretilmektedir. Suyun elektrolizi; hibrid elektrokimyasal ve termokimyasal işlevlerle suyun parçalanması, doğrudan termal ya da termokimyasal işlevlerle suyun ayrıştırılması teknolojilerini geliştirmiştir. Likit ya da hibrid biçiminde hidrojenle çalışan termik motorlu araçlar da piyasaya çıkarılmış bulunmaktadır. Uçakların gaz türbinlerinde de yakıt olarak kullanılabilen hidrojen, elektrik santralleri ve endüstri işletmelerinden konutlara kadar pek çok yerde çevreyi kirletmeyen temiz enerji olarak değerlendirilecektir.

10 MW'a kadar güçlerde yalnız güneş enerjisi ile çalışan termik elektrik santrallerin yapılmış olması yanında, 800 MW'lık güçlere kadar uzanan fosil yakıtlı büyük termik elektrik santrallerinde de güneş enerjisinin yardımcı kaynak olarak kullanılması üzerinde durulmaktadır. Yapılan projelere göre besleme suyu ısıtılması, doymuş buhar üretilmesi, buharın kızdırılması, buharlaştırma ve kızdırma kombinasyonu, buharın tekrar ısıtılması, besleme suyu ısıtması ve hava ön ısıtması kombinasyonu gibi birçok yollarla büyük santrallerin termodinamik çevrimine güneş enerjisinin katkısını sağlamak mümkündür.

Yeryüzü güneş santrallerinden başka uzay uydusu tipinde ve dünya bağlantılı güneş santrallerinin de projelendirilmesine çalışılmaktadır. Yeryüzünden 36 bin km uzaklıkta ve 10.000 MW güce sahip bir uzay santralinden üretilcek elektrik enerjisi, santralin 1 km çaplı anteninden mikrodalga ışınımı biçiminde iletilecek, dünyadaki 7 km çaplı bir anten de bu enerjiyi doğru akım biçiminde ve %55-75 verimle alabilecektir.

Enerji sektörüne ilişkin kararlar verilirken, ülkemizin mevcut enerji sisteminin tam anlamıyla tanınması, Türkiye'yi uzun vadeli sıkıntılara düşmekten kurtaracaktır. Gerekli enerji sistemlerinin ülkemiz şartları için ne ölçüde ekonomik ve uygulanabilir olduğunun araştırılması, acil derecede bir öneme sahiptir.

Yalnız yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı bir enerji politikası, bugün için gerçekçi olmayacaktır. Bu alandaki teknolojik gelişme, henüz yeterli miktar ve ucuzlukta enerji üretimi sağlamaktan çok uzaktır. Çevreyi kirleten ve ürettiği birim enerji başına yüksek enerji tüketen teknolojilerin olumsuzluklarını ortadan kaldırmaya aday olan güneş enerjisi santrallerinin, ülkemizde de kurulmasına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları, Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, TÜBİTAK ve Devlet Planlama Teşkilatı araştırma fonlarınınca desteklenmelidir. Türkiye'nin uzun vadeli elektrik enerjisi planlamalarında güneş enerjisi yer almamaktadır. Bunun nedeni olarak da yüksek maliyetler gösterilmektedir. Ancak 2020 yılına kadar Türkiye'nin elektrik planlaması yapılırken, bu süre içerisinde fiyatlarda oluşacak değişiklikler de dikkate alınmalıdır. Türkiye'de büyük bir güneş enerjisi potansiyeli mevcuttur. Güneş enerjisi teknolojisini uygun şekilde geliştirmek ve pazarlamak için gereksinim duyulan ana yatırımlar kararlı, uzun vadeli ve düzenleyici politikalarla desteklenmelidir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi hükümetlerin yaygın olarak kullanımını teşvik ettiği teknolojiler arasında değerlendirilmelidir (GENÇOĞLU 2000, Kaynak Elektrik Dergisi 2001).

BÖLÜM 15. ELEKTRİK ENERJİSİ DEPOLAMANIN ÖNEMİ VE YENİ GELİŞMELER

Enerjinin istenilen yer ve zamanda kullanılabilmesi için büyük miktarlarda depolanması gerekmektedir. Enerjinin büyük miktarlarda depolanabilmesi ile enerji sorunu büyük ölçüde çözülebilecektir. Ancak, bu konuda, iki yüzyıla yakın bir süre önce kullanılmaya başlanan ve sınırlı kapasiteye sahip kurşun aküler, günümüzde de hala enerji depolanmasında en çok kullanılan sistemler olmaya devam etmektedir. Geçen bu uzun süre içinde kurşun aküler üzerinde yapılan yoğun çalışmalarla bu sistemlerin teknik ve ekonomik özellikleri oldukça geliştirilmiş, ömürleri uzatılmıştır.

Kısıtlı depolama özelliği olan aküler dışında enerjinin çok büyük ölçekte depolanması için bugüne kadar bilinen iki yöntemden biri, üretilen enerjiyi hidrojene çevirmektir. Depolanan hidrojeni daha sonra istenilen yer ve zamanda kullanmak mümkündür. Burada en büyük engel, hidrojene dönüşüm ve daha sonra hidrojenin depolanması ile kullanımı sırasında ortaya çıkan yüksek maliyet olmaktadır. Bu engelin aşılması için güneş enerjisi kullanılarak hidrojen üretim maliyeti içindeki ilk enerji maliyeti düşürülmekte, böylece sistemler daha ekonomik hale getirilmektedir. Hidrojenin istenilen yerde kullanımı için geliştirilen yakıt pillerinde büyük ilerleme görülmektedir.

Enerji depolanmasında ikinci yöntem ise, güneş enerjisinin fotosentez yoluyla bitkilere depolanması olayıdır. Biyokütle olarak tanımlanan yakıtlar konusunda, özellikle Avrupa Topluluğu ülkelerinde yoğun çalışma yapılmakta olup, bitkilerden dizel, alkol ve doğrudan biyokütle yapan termik santraller yapılmaktadır. Ayrıca, daha çok biyokütle üretmek ve fotosentez verimini arttırmak için bitkiler üzerinde genetik çalışmalar yapılmaktadır.

15.1. Akü Sistemleri

Elektrik enerjisini depolamaya yarayan bu sistemler konusunda çok yoğun çalışma yapılmasına rağmen, eski tip kurşun-asit akülerin yerine geçebilecek depolama sistemleri hala tam olarak geliştirilebilmiş değildir. Ancak, kurşun-asit daha iyi hale getirilmiştir. Bunun yanı sıra, Nikel-Kadmiyum, Nikel-Hidrojen, Nikel-Metal Hidrat, Çinko, Çinko Bromür, Çinko-Manganez dioksit, Çinko-Hava, Sodyum-Sülfür, Lityum ve redox piller üzerinde de çalışmalar devam etmektedir.

Daha ziyade son yirmi yıl içinde geliştirilen ve yenilenebilir enerji sistemleri içinde gittikçe artan oranda yer alan kuru (yalıtılmış) akülerde ise, elektrolitik sıvı jöle emdirilmiş halde olup, su kaybı yoktur. Yeni geliştirilmekte olan rekombine ve bi-polar aküler üzerinde araştırma-geliştirme çalışmaları devam etmektedir ve henüz ticari hale getirilmiş değildir.

15.2. Hidrojen ve Yakıt Pilleri

15.2.1. Hidrojen yakıt teknolojisi

Dünyamıza gelen foton enerjisini, istediğimiz zaman ve istediğimiz miktarda tüketmek isteriz. Işık enerjisini elektrik enerjisi haline dönüştürdükten sonra, bu elektrik enerjisi aküler yardımıyla saklanır. Ancak aküler küçük elektrik enerji birimlerini saklayabilmek için idealdir. İstenen güç arttıkça akü ebatlarında katlanarak büyür. Kapladıkları yer ve ağırlıkları arttıkça kullanılabilirliği azalır. Bunun için foton enerjisinin bir başka şekilde saklanabilmesi gerekir.

Bazı malzemelerin enerji yoğunluğu (kWSaat / Kg) olarak aşağıdaki şekildedir.

Hidrojen	38
Benzin	14
Sıkıştırılmış hava	2 (m ³)
Pompalanmış su	0.3 (m ³)
Kurşun Asit Akü	0.04

Kabaca bir kilo kurşun asit akü saatte 40 Watt elektrik enerjisine eşdeğer enerjiye sahipken, bir kilo Hidrojen 38000 Watt elektrik enerjisine eşdeğer enerjiye sahiptir.

Zamanımızda en kolay enerjiyi istediğimiz zaman ve büyüklükte elde edebilmemiz için petrol oldukça kullanışlıdır. Gelişen motor sanayi istediğimiz anda istediğimiz güçte enerjiyi bize sağlamaktadır. Hidrojen, petrolün bitmeye başladığı 2000'li yıllarda yerine geçebilecek tek yakıt tipidir. Tüketildiğinde egzozundan su çıkan, çevreye hiç zarar vermeyen, üretilirken güneş enerjisinden faydalanan bir madde olma yolundadır. Dünyamızda hidrojen bol miktarda vardır. H₂O'dan elektroliz yoluyla %67 verimlilikle ayrışır. Fakat hidrojeni yakıt gibi kullanabilmek için saklamak gerekir. Hidrojen saf halde -253°C derecededir. Problem ise hidrojeni saklanabilir hale sokmak, ve hidrojeni tüketerek , enerji elde etmektir.

15.2.2. Hidrojenin depolanması

Büyük miktarda enerji depolanması için en uygun madde hidrojendir. Bilindiği üzere, günümüzde büyük miktarlarda enerji depolamak için hala uygun bir yöntem bulunmuş değildir. Eğer bugün hidroelektrik santrallerinden üretilen elektrik enerjisini depolamamız mümkün olsaydı, enerji sorununu bir ölçüde çözmek mümkün olabilirdi. Ancak, elektrik enerjisi için en iyi depolama yöntemleri akülerle sınırlıdır.

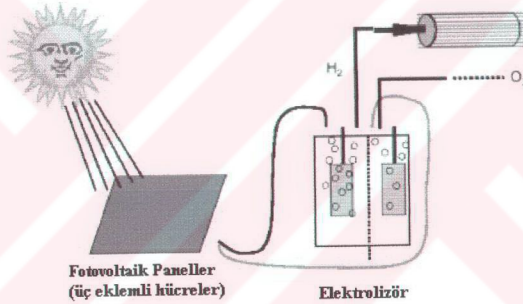
Hidrojen gazını depolamanın belki de en ucuz yöntemi, doğal gaza benzer şekilde yer altında, tükenmiş petrol veya doğal gaz rezervuarlarında büyük miktarlarda depolamaktır. Maliyeti biraz daha yüksek olan bir depolama şekli ise maden ocaklarındaki mağaralarda saklamaktır.

Orta veya küçük ölçekte depolamak için en çok kullanılan yöntem sıvılaştırılmış hidrojenin yüksek basınç altında çelik tüpler içinde tutulmasıdır. Ancak bu uygulama, büyük miktarlar için oldukça pahalı bir yöntem olarak görülmektedir. Bir diğer pratik çözüm ise, sıvı hidrojeni düşük sıcaklıktaki tanklarda saklamaktır. Uzay programlarında, roket yakıtı olarak sürekli şekilde kullanılan hidrojen bu yöntemle depolanmaktadır. Dünyadaki en büyük sıvı hidrojen tankı, Kennedy Uzay Merkezi'nde olup, 3400 metreküp sıvı hidrojen kapasitesindedir. Bu miktar hidrojenin yakıt olarak değeri, 29 milyon Mega Joule veya 8 milyon kW saate karşılık gelmektedir. Devamlı soğuk tutulan bu tanklarda ısı kaybını, daha doğrusu

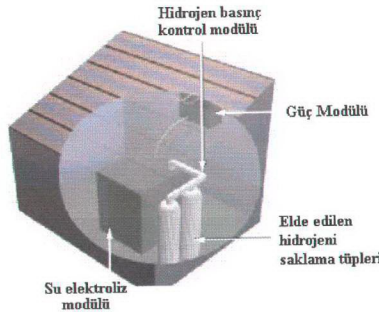
dışarıdan içeriye ısı kaçığını önlemek için, termos şeklinde iç içe geçmiş ve aralarında vakum bulunan çift çeperli malzeme kullanılmaktadır.

Hidrojenin bir diğer önemli özelliği de ekzotermik kimyasal reaksiyonla, bazı metal ve alaşımlarla kolayca büyük miktarlarda hidrat biçimine dönüşebilmesidir. Bu özellik hidrojenin, metal veya metal alaşımlarla metal hidrat olarak depolanmasını sağlar. Metal hidrat ısıtıldığı zaman hidrojen gazı buradan ayrılır ve metal veya alaşım, tekrar depolama için yeniden kullanılabilir. Hidrojeni daha iyi şekilde depolamak için çeşitli metal alaşımları üzerindeki çalışmalar halen devam etmektedir.

15.2.3. Güneş ışığından elektroliz



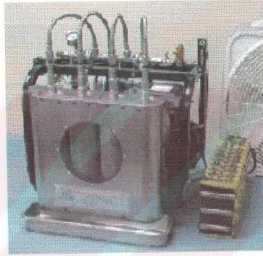
Şekil 15.1. Elektroliz cihazı.



Şekil 15.2. 1KW enerji üreten saklanabilir hidrojen tüpün prototipi.



Şekil 15.3. Hidrojen tüpleri.



Şekil 15.4. Jeneratör seti.

15.2.4. Yakıt pilleri

Yakıt pilleri aynı zamanda, sürekli enerji değişimi yapan araçlar (üreteçler) olarak da tanımlanabilir. Yakıt pili ile hidrojen üretimi için kullanılan bir elektroliz hücresi beraber kullanıldığında ideal bir fotovoltaik enerji depolama sistemi oluşur. Çünkü güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik pillerin ürettiği doğru akımı kullanarak suyu elektrolizle hidrojen ve oksijene ayırmak, daha sonra da bu hidrojeni, yakıt pillerinde istenildiği zaman ve yerde enerjiye dönüştürmek mümkündür.

Yakıt pilleri, akü sistemlerinden oldukça farklı bir yapıya sahip olup, tekrar şarj edilmesi söz konusu değildir. Son yıllarda büyük gelişme gösteren yakıt pillerinin de değişik tipleri bulunmaktadır. Bunların aralarında alkin, fosforik asit, polimer, katı oksit yakıt pilleri sayılabilir (<http://www.orjinsolar.com>, ÇOLAK 1995, TÜRE 2000).

BÖLÜM 16. SERA GAZI EMİSYONLARI

Güneşin gün boyu dünya atmosferine verdiği ısının önemli bir kısmının, atmosferin ısısının sabit kalması için, atmosferin dışına yansması gerekmektedir. İnsanların enerji gereksinimlerini karşılamak için atmosfer içinde yaktıkları (atmosferin içinde varolan oksijenle reaksiyona soktukları) karbon içeren kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar, bu reaksiyon sırasında, bir yandan enerji sağlarken bir yandan da atmosferin içinde ek karbondioksit üremesine ve birikmesine neden olmaktadır. Karbondioksit, bir karbon ve iki oksijen atomunun birleşmesinden oluşmaktadır.

Karbondioksit dünyada insan etkinliklerinden dolayı zaten üretilmektedir. Bitkiler ve ağaçlar büyürken atmosferden aldıkları karbondioksitin karbonunu bünyelerinde tutarlar ve oksijeni atmosfere verirler. İnsan yaşamı için ormanların önemi buradan kaynaklanmaktadır. Bir yandan ormanlar kesilirken diğer yandan insanlar yaktıkları fosil yakıtlarla ek karbondioksit üreterek, atmosfer içinde kendilerinin soluk alabilecekleri hacimleri daraltmaktadırlar. Yeryüzünde insanların yaşamasına elverişli koşullar, kömür, doğal gaz ve petrolün yeraltında depolandığı durumda oluşmuştur. Bugün bu dengeye insanoğlunun müdahalesi söz konusudur.

Karbondioksit gazının özelliklerinden biri ısıyı bünyesinde tutmasıdır. Atmosfere verilen ek karbondioksit, metan ve diğer gazlar sera etkisine yol açmaktadırlar. Sera gazı etkisi, atmosfer içinde, ek karbondioksit tarafından tutulan ısının aynen bir serada olduğu gibi atmosferi ısıtması olayıdır. Atmosferin ısınması kutup buzlarının ve dağlardaki karların erimesine yol açmaktadır. Henüz deniz seviyelerinin görünür biçimde yükselmesine neden olmasa da, atmosfer içinde dolaşan serbest su miktarı giderek artmaktadır.

Sera gazı etkisi eskiden beri bilinmekte olsa da, 1990'lı yıllarda dünyanın yoğun olarak tartıştığı bir konu haline dönüşmüştür. Sera gazı etkisinin dünyanın iklimini

değiştireceği ve yeryüzünün insanlar için yaşanabilir olmaktan çıkabileceği bilimsel çevrelerde genel kabul görmektedir.

Yerkürenin geleceği ile yakından ilgili birey ve kuruluşların girişimleri sonucu, 1992 yılında Rio'da Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi isimli bir belge tüm dünya ülkelerinin imzasına açılmıştır. Amaç dünya ülkelerini, dünyayı tehdit eden sera gazı etkisine neden olan karbondioksit, metan ve diğer gazların atmosferde birikimini önlemek üzere, ortak değerlendirmeler ve uygulamaların gerçekleştirilmesi için bir araya getirmektir.

Doğal çevrede enerji üretimi, rüzgar, güneş, biyokütle ve jeotermal gibi temiz ve tükenmez kaynakları kullanan teknolojilerin kullanıma sunulması ile mümkündür (UYAR 1997).

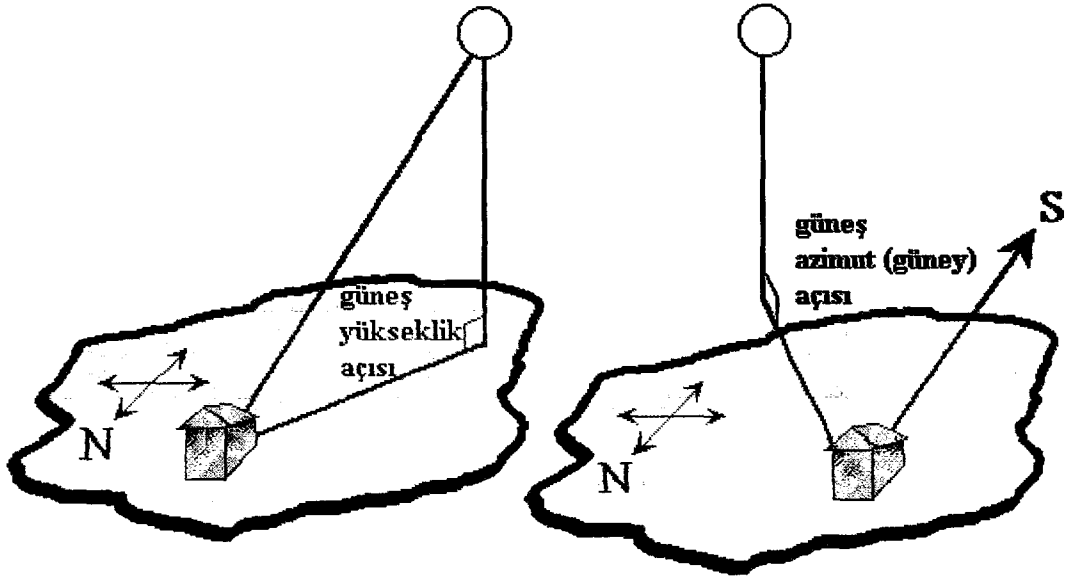


BÖLÜM 17. FOTOVOLTAİK PANELLERİN MONTAJ ŞEKLİ

Paneller ışığa temas ettirildiği zaman doğru akım gücü üretirler. Paneller seri bağlandığında gerilimi yükselir, paralel bağlandığında akımı yükselir. Tek başına bağlamalarda şok çarpması insanı pek etkilemese de, çoklu bağlamalarda elektrik çarpmasına karşı emniyet alınması gerekir. Montaj sırasında panellerin ışık geçirmeyen bir kağıtla kaplanmasında fayda vardır. Yapılacak ekler ve bağlantıların yakınında kaçak tüp gazı olmamasına dikkat edilmelidir. Akımın ters yönde akmaması için akü ile panel arasına, akımın sadece panelden aküye akacak şekilde diyot konulması unutulmamalıdır. Güneş ışığı büyüteçle bir noktaya odaklanıp panele yansıtılmamalıdır. Panelin bozulmasına sebep olunur. Panellerin üstünde yürünmemeli, keskin cisimlerle üzeri çizilmemelidir.

17.1. Montaj Sekli ve Güneş Açıları

Panelden maksimum verim alabilmek için güneş açıları bilgisinden faydalanılmalıdır. İzleyici denilen güneşi izleyen motorlu sehpa verimin arttırılması için idealdir, ancak sabit durmayan araçlar için geçersizdir. Genelde panellerin yerleştirilmesinde dikkat edilecek iki açı vardır. Hareket eden araçlarda paneli yatay olarak monte etmek yeterlidir.



Şekil 17.1. Güneşin gökyüzündeki durumuna göre hesaplanması gereken açılar.

Tablo 17.1. Güneş açılarının İzmir için hesaplanan değerleri.

		08:00	10:00	12:00	15:00	18:00
20 Nisan 1999	Enlem Açısı:	16	40		54	20
	Azimut Açısı:	91	71	35	-49	-88
20 Mayıs 1999	Enlem Açısı:	22	45		60	25
	Azimut Açısı:	98	79	44	-61	-96
20 Haziran 1999	Enlem Açısı:	23	46		63	28
	Azimut Açısı:	102	84	52	-65	-98
20 Temmuz 1999	Enlem Açısı:	20	44		62	27
	Azimut Açısı:	100	82	50	58	-95
20 Ağustos 1999	Enlem Açısı:	16	39		55	22
	Azimut Açısı:	93	73	38	-49	-88
20 Eylül 1999	Enlem Açısı:	11	34		44	13
	Azimut Açısı:	82	60	26	-42	-80
20 Ekim 1999	Enlem Açısı:	6	26		33	5
	Azimut Açısı:	73	50	18	-37	-73

Tablodan görüldüğü üzere, Ege bölgesi için paneller, ortalama güneyden 40 derece batıya doğru yönlendirilip, 40 derece kaldırılırsa, izleme olmayan bir sistemde güneş

ışınlarından en dik ve en verimli bir biçimde faydalanmış olunur. Tekne ve araçlarda panelleri güneşi en fazla gören yere monte etmekte fayda vardır.

17.2. Bakım

Panellerin temizlikten başka bir bakıma ihtiyacı yoktur. Kimyasal madde içeren temizlik maddeleri kullanılmamalıdır. Mümkünse güneş battıktan sonra sabunlu suyla yıkanıp durulanmalıdır.

17.3. Dikkat Edilmesi Gerekenler

Paneller ışığı gördüğü müddetçe elektrik üretirler. Çalışırken paneller kesilmemelidir, ön tarafından vida sıkılmamalıdır, ön tarafına çizici ve kesici alet bırakılmamalıdır. Aletlerin elektrik izoleli olmasına dikkat edilmelidir. Bağlantılar yapılırken, paneller ışık geçirmez kağıtla kapatılmalı, böylece kısa devre kontakları önlenmelidir. Panellere diyot bağlamadan montaj yapılmamalıdır.

17.4. Tekli Bağlantı

Eğer panel aküye bağlanırken arada şarj kontrol cihazı varsa, “+” kablo üzerine bloklama diyodu ve sigorta bağlanmaz. Bu emniyet birimleri zaten şarj kontrol cihazında olmalıdır. Eğer panel aküye doğrudan bağlanacaksa, “+” kablo üzerine uygun amperde bloklama diyodu ve uygun bir. sigorta bağlanır. Sigortayla bloklama diyodunu yan yana “+” kablo üzerine bağlanabilir. Sistemin 12V doğru akımda çalıştığı unutulmamalıdır. Burada bloklama diyodunun vazifesi akımın aküden panele akmasını engellemektir. Diyodu bağlarken akımın panelden aküye doğru gideceğini bilerek bağlanma yönüne dikkat edilmelidir.

Çoğu panellerin her hücresinde by-pass diyotları mevcuttur. Panelin bir bölümü gölgede kalsa dahi bu bölümdeki hücrelerin içinde mevcut olan by-pass diyotları sayesinde üretime devam ederler. Panelin çerçeveden topraklaması unutulmamalıdır. Paneller çalışmaya başladıktan 8 ile 10 hafta içinde yüksek değerler verebilir. Ancak bu müddet sonunda normal verilen değerlere döneceklerdir. Paralel bağlantı, sistemin

gerilimini sabit tutup, amper değerini yükseltmek için yapılır. Seri bağlantı ise, sistemin amperini sabit tutup, gerilim değerini yükseltmek için yapılır.

17.5. Montaj Anında Dikkat Edilmesi Gerekli Bilgiler

- 1) Akünün “+” ve “-” kutup bağlantılarına şarj kontrol ünitesi ters bağlanmamalıdır, zarar görebilir.
- 2) Güneş Panelleri aküye direkt olarak bağlıyken şarj kontrol ünitesi regülatörleri araya bağlanmamalıdır.
- 3) Şarj Kontrol Ünitesi ile ilk önce akü bağlantısı gerçekleştirilmelidir, sonra güneş panelleri bağlanmalıdır. Bu arada aküden veya şarj kontrol ünitesinden hiç bir yüklenme olmamalıdır.
- 4) Şarj kontrol ünitesi regülatörleri aküye 25 cm’yi geçmeyecek bir uzaklığa monte edilmelidir. Bu da şarj kontrol ünitesinin akünün gerilim seviyesini kontrol ederken yanılmasını engeller.
- 5) Şarj kontrol ünitesi direkt güneş ışığında kalabilecek şekilde monte edilmemelidir. Hava sirkülasyonu olmayan yerlere monte edilmemelidir.
- 6) Her ne kadar bağlantı yerleri korozyonu önleyici maddeyle yapılıyorsa da bağlantı bitip sistemin çalıştığı kontrol edildikten sonra bu tel giriş yerlerine silikon eritilerek dökülmeli ve böylece oksidasyon engellenmelidir.
- 7) Bağlantılara çok dikkat edilmelidir.

17.6. Oluşabilecek Normal ve Genel Problemler

- a) Akünün suyu azalabilir. Ancak bir ay içinde akünün suyu alabildiğinin ¼’ünden fazla azalırsa aküde problem var demektir.
- b) Aküden çok hafif buhar çıkarsa ve çok hafif kabarcıklar oluşuyorsa normaldir.
- c) Akü soğukta zor şarj olur. Bu durum normaldir.
- d) Akü düşük gerilim değerlerinde kalıyorsa eskimiştir, ya da yükler çok fazladır. Akü, yüklenmelerde gerilim değerini düşürüyorsa yenilenmelidir.
- e) Akünün aşırı şarjlandığı, sık sık suyunu eksiltmeyle ve sürekli baloncuklar çıkarmasıyla anlaşılır. Böyle bir durumda şarj kontrol ünitesi regülatörü çalışmıyor demektir.

17.7. Sıkça Sorulan Sorular

Soru: Güneş panelleri doğrudan cihazlara bağlanır mı?

Cevap: Evet, güneş panelleri doğrudan cihazlara bağlanabilir (Su pompaları, aspiratörler, vantilatörler vs.). Her ne kadar elektronik cihazlarına da doğrudan bağlanabilse de tavsiye edilmez. Radyo, TV, bilgisayar bağlantılarında akü kullanılmalıdır. Herhangi bir bulut o anda panelin üstünde gölge yaparsa ürettiği güç değişecektir. Bu tip elektronik cihazlar kaliteli ve düzgün enerji isterler.

Soru: Panellerin üzerindeki plastik kötü hava koşullarına dayanıklıdır?

Cevap: Genelde güneşi en fazla geçiren ve her türlü hava şartlarına müsait çok kaliteli malzeme kullanılır ve bu tür malzemeler kötü hava şartlarına dayanıklıdır. (Tefzel tipi kaplayıcı)

Soru: Panellerin performansı sabit midir?

Cevap: Paneller genelde uzun yıllar hizmet etmesi için imal edilirler. İlk 90 günde gerilim ve akım değerlerinde %15-20 artışlar olabilir. Ancak 90 gün kullanımdan sonra kataloglarında verilen değerler uzun yıllar geçerli olmalıdır. Kritik yükleri hesaplarken %10 emniyetli çalışılmasında fayda vardır.

Soru: Panellerin bağlantı kutusundaki diyotlar ne iş yapar ?

Cevap: Diyot genelde tek yönde enerji geçişini sağlar. Ters yönde geçişi engeller. Gündüz akım panelden akü veya cihaza akarken, gece aküden panele akımı engeller. Ancak “+” ve “-” ters bağlantı yanlışlıklarında panelleri korumaz. Uçlar aküye bağlamadan “+” ve “-” bağlantılara çok dikkat edilmelidir.

Soru: Bakım olarak panellere ne uygulanır?

Cevap: Panellerin bakımı yoktur. Ancak üst plastiği kirlenirse normal sabunlu bezle silinebilir. Çizici temizlik malzemeleri kullanılmamalıdır. Hiç bir kimyasal temizleme maddesi kullanılmamalıdır.

Soru: Pannelle akü arasına takılan şarj kontrol cihazı özelliği ne olmalıdır ?

Cevap: Şarj kontrol cihazı bağlama şartı;

Eğer kullanılan panelin işletim amperi, kullanılan akünün amperinden %1.5 kat fazlaysa şarj kontrol cihazı bağlanır. Örnek: 70 amp. aküye ($70 \times 0.015 = 1.05$ amp.) 1.05 den büyük işletme amperi olan panel şarj kontrol cihazsız bağlanmaz (<http://www.orjinsolar.com>).

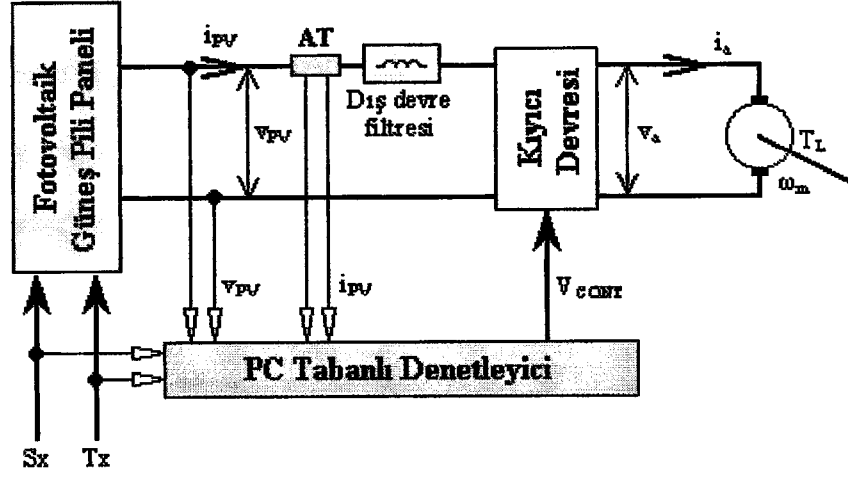


BÖLÜM 18. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİNDE GÜÇ DENETİMİ İÇİN BİR MODELLEME

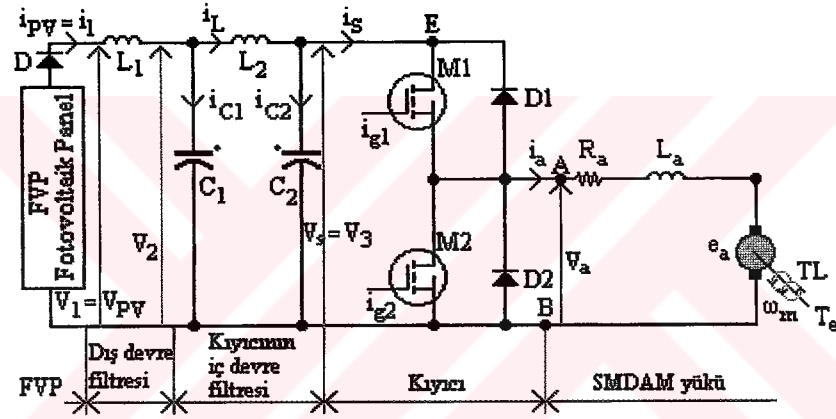
Bir FV güneş pili paneli, bir doğru gerilim kısıcısı (DGK), ve bir de sürekli mıknatıslı doğru akım motorundan (SMDAM) oluşan bir alternatif enerji üretim ve uygulama sistemi burada ele alınarak bilgisayarda incelenmek üzere modellenmektedir. FV güneş pili panelinin ürettiği elektrik gücü, denetlenebilen bir DKG üzerinden bir SMDAM'ye aktarılarak bu motorun çalışması sağlanmaktadır. Değişik ışık ve sıcaklık seviyeleri için FV panelde üretilen elektrik gücünü maksimum değerinde tutabilmek amacıyla DKG denetlenir. Üretilen maksimum gücün bir kısmı SMDAM'ye aktarılırken arta kalanı ya başka yüklere aktarılır ya da depolanır. Ele alınan sistemin modellenmesi, bilgisayarda simülasyonu ve simülasyon sonuçları ayrıca verilmektedir. Kullanılan elektrikli cihazlar belirli bir gerilim seviyesinde çalışacak şekilde üretilirler. Farklı gerilim genlikleri bu cihazlar için tehlikeli sonuçlar doğurur. Bu nedenle yüke aktarılan gerilim seviyesinin sabit bir değerde tutulması gerekir. Ancak bu yapılırken FV güneş pili ya da panelinin üretebildiği maksimum çıkış gücünde çalıştırılması pil ya da panelin verimliliği açısından önemlidir. Çünkü klasik elektrik enerjisi üretim sistemlerine kıyasla, kurulması daha pahalı olan bu sistemden alınabilecek maksimum elektrik gücünün tümünü kullanmak her yatırımcının atacağı ilk adımdır.

18.1. FV Güneş Enerjisi ile Çalışan Örnek Sistem

Burada ele alınan örnek sistem bir FV güneş pili paneli, bir DGK ve bir de SMDAM'den oluşmaktadır. FV güneş pili panelinin ürettiği elektrik gücü, denetlenebilen bir DKG üzerinden bir SMDAM'ye aktarılarak bu motorun çalışması sağlanmaktadır. Bu sistemin genel blok diyagramı şekil 18.1'de verilmiştir. Değişik ışık ve sıcaklık seviyeleri için FV panelde üretilen elektrik gücünü maksimum değerinde tutulabilmesi amacıyla DKG denetlenir. Üretilen maksimum gücün bir kısmı SMDAM'ye uygulanırken artakalanı ya başka yüklere aktarılır ya da depolanır.

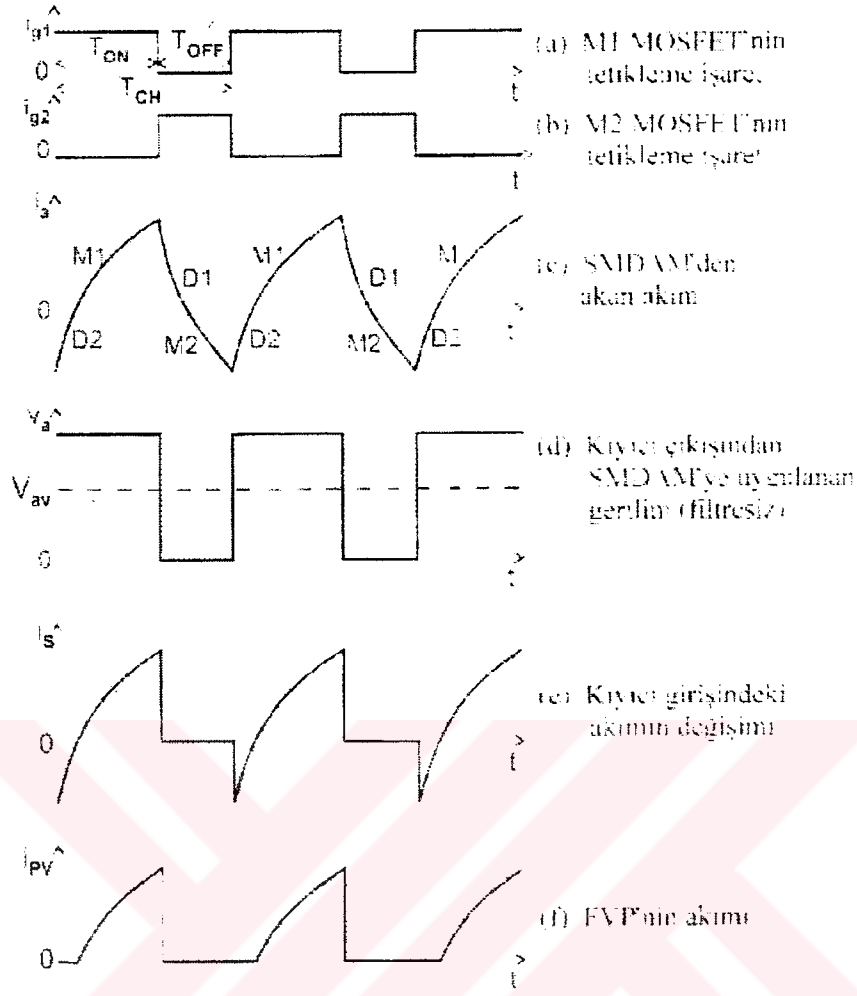


Şekil 18.1. Fotovoltaik güneş pili panelinden yüke güç aktarımı.



Şekil 18.2. Örnek sistemin açık devre şeması.

Yapısı gereği DKG belirli bir kıyıcı periyodunun bir kısmında iletimde iken diğer bir kısmında tıkama yapmakta, yani devreyi kesmektedir. Bu nedenle de yüke aktarılan doğru gerilimde kesiklikler meydana gelir. Yük geriliminde kesiklikler olması yük akımının da kesintili olmasına neden olur. FV güneş pillerinin ürettiği gerilim, yük tarafından çekilen akımla ilişkili olduğundan, yük akımındaki kesintiler FV panelin ürettiği gerilimin de kesintili olmasına neden olur. Bu durumu önlemek için, yük akımında meydana gelen kesintileri ve sıçramaları gidermek gerekir. Kıyıcı girişine konulacak bir filtre devresi ile bu problemin önüne geçilebilir. Bu nedenle sistem modellemesi yapılırken filtrenin de dikkate alınması gerekir.



Şekil 18.3. Kıyıcıdaki temel dalga biçimleri

Şekil 18.2'de verilen açık devre şemasında bu filtre de gösterilmiştir. Kıyıcı devresi ile birlikte tasarlanıp gerçekleştirilen iç devre filtresinin yanı sıra bir de dış devre filtresi kullanılmaktadır. Burada kullanılan kıyıcı genel amaçlı kullanım için imal edildiğinden, iç devredeki sabit filtre her sisteme cevap vermeyebilir. Bu nedenle başka sistemlere uyum sağlayabilmesi için dış devreye de bir filtre eklemek gerekir. Burada dış devrede filtre olarak kullanılan akım yumuşatıcı endüktans, farklı panel ve yükler için yeniden tasarlanabilir. Şekil 18.2'de verilen devre laboratuvar ortamında gerçekleştirilip, çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçları ile kıyaslanarak yapılan modellemenin doğruluğu gösterilmiştir.

18.2. Modelleme

Örnek FV güç aktarım sistemi modellenirken şekil 18.2’de verilen her elemanı ayrı ayrı ele alıp modellemek ve modelleri bir bütün halinde bileştirmek gerekir. Bu sistemin çalışması sırasında elde edilen önemli akım ve gerilim değişimleri şekil 18.3’de verilmektedir. Şekil 18.3’de görüleceği gibi, yük akımı sürekli bir değişime sahiptir. Bu akım, her biri M1 ve M2 mosfetleri ile D1 ve D2 diyotları tarafından iletilen dört kısımlı bir dalga biçimidir. Kıyıcının giriş terminallerindeki V_S geriliminin doğrudan yüke uygulanabilmesi için, T_{ON} süresince M1 iletimde M2 kesimdedir. M1 mosfetinin iletim süresi T_{ON} kıyıcı denetim işareti V_{CONT} değerine bağlı olarak denetleyici tarafından belirlenir. Değeri 0 ile 1 arasında değişen kıyıcı göre katsayısı C değeri denetleyici tarafından belirlenir. Öyle ki, bu görev katsayısı, değeri sabit olan T_{CH} gibi bir kıyıcı periyodu ile çarpıldığında T_{ON} iletim süresi elde edilmektedir.

$$T_{ON} = C T_{CH} = C T_{MAX} \quad (18.1)$$

Buradaki $T_{CH} = T_{MAX} = (1/50000)$ saniyelik sabit bir değer olup, kıyıcının yapısı gereği değiştirilemez. Dolayısıyla iletim süresi $0 < T_{ON} < T_{MAX}$ olmak zorundadır. Şekil 18.3’de verilen devredeki A ve B noktalarının potansiyel seviyelerine bağlı olarak yük akımı M1 veya M2 tarafından iletilir. M2 iletimde M1 kesimde iken A ve B yük terminallerindeki gerilim sıfır olur. Ancak enerji depolayan endüktans elemanlar ve motorun atalet momenti nedeniyle yük akımı i_a hemen sıfır olmaz ve D1 diyodu üzerinden akarak devresini tamamlar. M1 iletimde M2 kesimde iken, D2 diyodu i_a negatif yük akımını iletir. Bu çalışma sırası her T_{CH} kıyıcı periyodu süresince tekrarlanır. Kıyıcı iletimde değilken motor (yük) akımı negatif değerlere sahipken, FVP akımı FVP gerilimini pozitif yapacak şekilde daima aynı yönde akar. Bu nedenle FVP akımı yük akımından farklı değişimlere sahiptir. Kıyıcı iletimde değilken motor akımı filtre devreleri üzerinden akarak devresini tamamlar. Şekil 18.3’de verilen dalga biçimleri ideal biçimlerdir. Kıyıcı frekansının yüksek olması ve filtre elemanları kullanılması nedeniyle motor akımı aslında şekil 18.3’de verilene göre daha düzgün olup, negatif değere sahip değildir. Pozitif ortalama değerli küçük genlikte sıçramalara sahip olan bir akımdır.

Kıyıcının iletimde ve iletim dışı olduğu durumlar dikkate alındığında bu iki çalışma durumu olduğu görülür. Dolayısıyla bu çalışma durumlarına göre bir modelleme yapmak gerekir. M1 mosfetinin iletimde olduğu ve FVP'de üretilen elektrik gücünün yüke aktarıldığı durum birinci çalışma durumu olarak kabul edilmektedir. D2 diyodunun iletimde olduğu durum da birinci çalışma durumu olarak kabul edilebilir. Çünkü bu sürede jeneratör modunda çalışan SMDAM akımı filtre devresinden akışını sürdürecektir. M2 mosfeti ve D1 diyodunun iletimde olduğu durum ikinci çalışma durumu olarak ele alınmaktadır. Bu durumda motora uygulanan gerilim sıfırlanmakta, yani motor terminaleri kısa devre edilmektedir. İkinci çalışma durumunda motor akımı filtre devresinden akamaz. Bu yorumlara bağlı olarak şekil 18.2 iki farklı çalışma devresine ayrıştırılabilir.

18.2.1. Birinci çalışma durumu

Kıyıcı iletimdeyken, kıyıcı devresi ihmal edilerek FVP devresi, dış ve iç filtre devreleri ile yük olarak kullanılan SMDAM devresi dikkate alınır, şekil 18.4'de verildiği gibi daha basit bir devre diyagramı elde edilebilir.

$I_{PV} = i_1$ panel akımını, S_x gün ışığı seviyesini ve T_x FV pil sıcaklığının FVP modelinde giriş büyüklükleri olarak kullanılmasıyla FVP çıkış gerilimi $V_{PV} = V_1$ olarak denklem (18.2) deki gibi elde edilir.

$$V_{PV} = \frac{A \times k \times T_a}{e} \ln \left(\frac{I_{PH} + I_0 - I_{PV}}{I_0} \right) - R_s \times I_{PV} \quad (18.2)$$

Burada FVP gerilimi $V_{PV} = V_1$ 'in bütün durumlarda bilindiği kabul edilmektedir. Bu koşullar altında aşağıdaki altı denklem elde edilir.

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{v_1 - v_2}{L_1} \quad (18.3)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_2 - v_3}{L_2} \quad (18.4)$$

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{i_1 - i_L}{C_1} \quad (18.5)$$

$$\frac{dv_3}{dt} = \frac{i_L - i_a}{C_2} \quad (18.6)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{v_3 - R_a i_a - K_v \omega_m}{L_a} \quad (18.7)$$

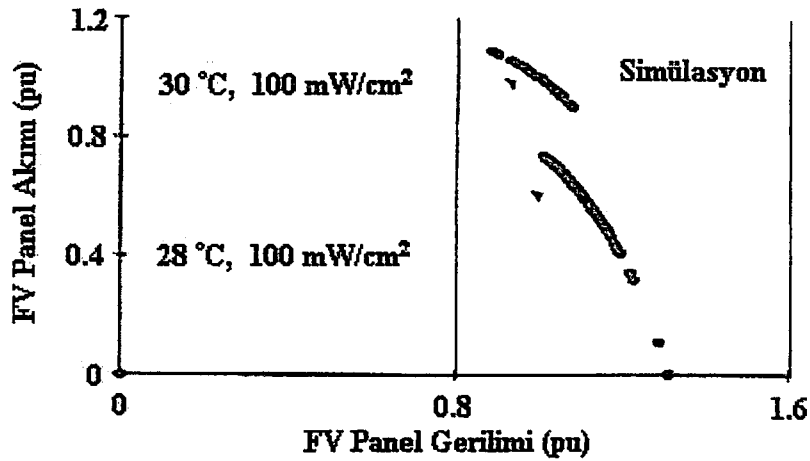
$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_v i_a - B_m \omega_m - T_L}{J_m} \quad (18.8)$$

Burada;

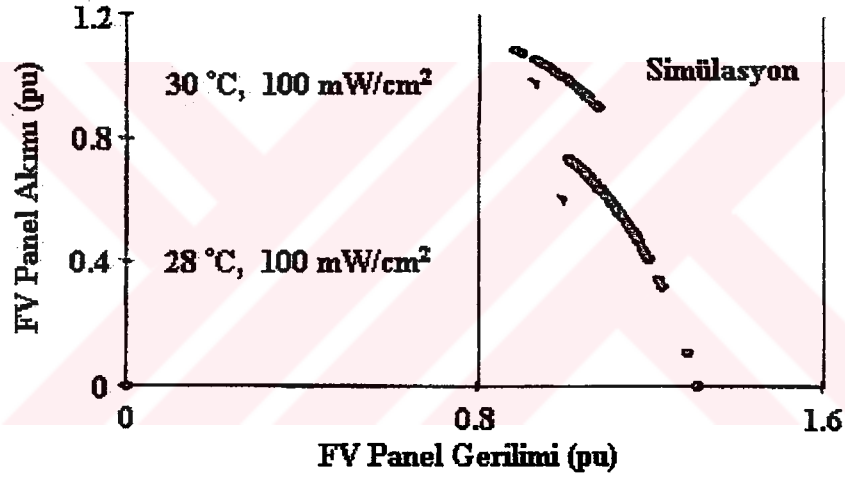
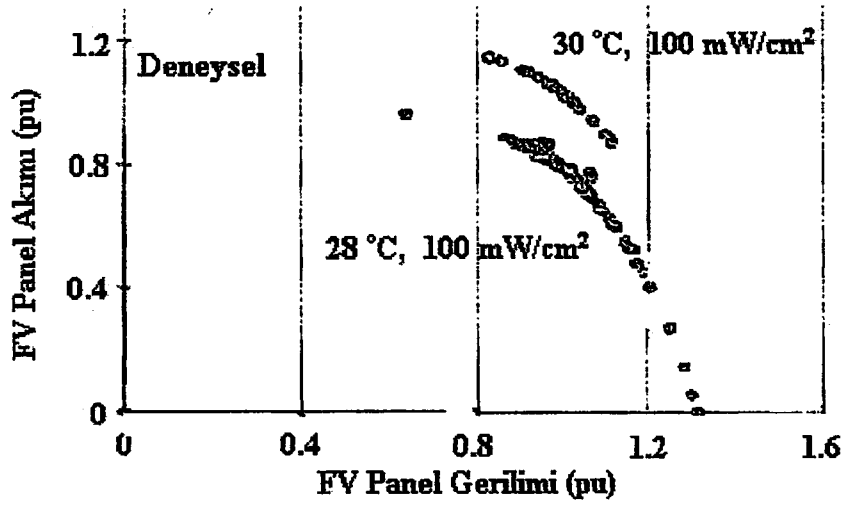
$$T_L = K_0 + K_1 \omega_m + K_2 \omega_m^2 \quad (18.9)$$

olup, K_0 , K_1 ve K_2 sabitleri motor miline bağlı sistemin hız-moment karakteristiğinden eğri uydurma yöntemi ile belirlenebilirler.

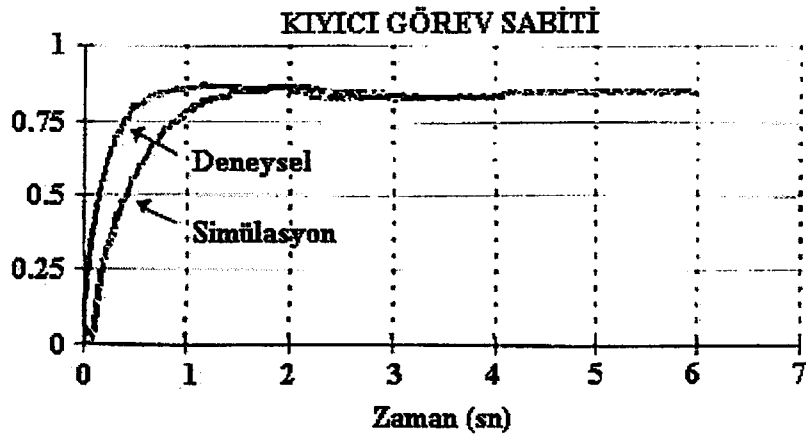
Yukarıda verilen denklemlerin çözümü sonunda elde edilen FVP akımı $i_1 = i_{PV}$ denklem (18.2)' de kullanılarak FVP'in yeni çıkış gerilimi elde edilir. Kıyıcının neden olduğu akım dalgalanmalarını yumuşatmak ve kıyıcının çalışmasını iyileştirmek için kullanılan dış devre filtresi uygulamaya göre gerekmebilir. Daha önce de belirtildiği gibi dış devre filtresi olarak kullanılan bu endüktans sadece iç filtre devresine destek olarak kullanılmaktadır.



Şekil 18.4. Değişik ortam koşulları için başlangıç ve sürekli çalışma durumlarında FPV'nin simülasyonla elde edilen akım-gerilim (I-V) karakteristikleri



Şekil 18.5. Değişik ortam koşulları için başlangıç ve sürekli çalışma durumlarında FPV'nin deneysel olarak elde edilen akım-gerilim (I-V) karakteristikleri.



Şekil 18.6. Kıyıcı görev sabitinin deney ve simülasyon sırasındaki değişimleri

18.2.2. İkinci çalışma durumu

Kıyıcı kesimde iken, yani M2 ve D1 iletimde iken, E ve A noktaları arasındaki bağlantı açık devre yapılırken A ve B noktaları da kısa devre olur. Bu durumda şekil 18.2 ile verilen devre şeması şekil 18.2'deki basit biçime dönüşür. Bu yeni eşdeğer devre kullanıldığında aşağıdaki iki denklem elde edilir.

$$i_{C2} = i_L \quad (18.10)$$

$$0 = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (18.11)$$

Böylece (18.6) ve (18.7) denklemlerini düzenlenerek ikinci çalışma durumu için aşağıdaki biçimde yeniden yazılmaları gerekir.

$$\frac{dv_3}{dt} + \frac{i_L}{C_2} \quad (18.12)$$

$$\frac{di_a}{dt} + \frac{-R_a i_a - K_v \omega_m}{L_a} \quad (18.13)$$

Birinci çalışma durumu için elde edilen diğer bütün denklemler ikinci çalışma durumu için de geçerlidir.

18.3. Sonuçlar ve Modelin Geçerliliği

Yapılan modellemenin doğruluğunu göstermek için simülasyon ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmaktadır. Deneysel sonuçlar elde edilirken kaydedilen ışık ve sıcaklık seviyeleri simülasyon sırasında da kullanılarak aynı çalışma ortamı ve koşulları sağlanmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışma ve simülasyon sırasında sistem belirli bir ışık ve sıcaklık seviyesinde çalışırken bu ışık ve sıcaklık değerleri aniden değiştirilerek sistemin ve denetleyicinin tepkisi gözlenmiştir. Başlangıç ve sonradan değiştirilen ışık ve sıcaklık değerleri şekiller üzerinde işaretlenmişlerdir. FV panelin Akım-Gerilim ve Kıyıcı Görev Sabiti-Zaman

değişimlerinin deney ve simülasyonla elde edilen sonuçları diğer şekillerde verilmektedir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarındaki uyumluluk yapılan modellemenin geçerliliğini göstermektedir. Kıyıcı görev sabitinin zamana bağlı değişiminde ilk saniyelerde bir genlik farkı gözlenirse de bu fark kısa sürede kapanmaktadır. Bu genlik farkı, aslında sayısal denetleyicide kullanılan AD ve DA işlemleri ile sayısal denetim sırasındaki zaman kaybından kaynaklanmaktadır. Çalışmanın 4. saniyesinde meydana gelen ışık ve sıcaklık değişimlerinin etkileri kıyıcı görev sabitinin zamanla değişiminde de görülmektedir (ALTAŞ 1999).



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fotovoltaikler, 20 yıllık bilgi ve tecrübe birikimine sahiptirler. Verimin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi için dünyanın birçok yerinde sürekli araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Burada, bu çalışmalar sonucu fotovoltaiklerin bugün geldikleri teknoloji düzeyleri ve çeşitliliklerine değinilmiş, gelecekte alabilecekleri görevler tanımlanmıştır.

İlerlemekte olan teknoloji ile birlikte enerji tüketimi de hızla artmaktadır. Nitekim çağımızda, fert başına elektrik enerjisi tüketimi gelişmişliğin bir göstergesi haline almıştır. Ancak, birincil enerji kaynaklarının sürekli tükenmekte oluşu ayrıca bu kaynakların enerji üretimi için yakılmaları esnasında ortaya çıkan ekolojik bozulmalar ve hatta klimatolojik denge bozulmaları, bugün enerji konusunu, hiç vakit kaybedilmeden çözülmesi gereken bir problem olarak ortaya koymaktadır. Bu problemin çözümlerinden birincisi yeni ve temiz enerji kaynaklarının bulunması, ikincisi ise, enerji tüketiminin ekonomik olarak kabul edilebilecek en alt düzeye indirilmesi biçiminde özetlenebilir.

Dünyadaki genel duruma paralel olarak yurdumuzda da enerji sorunu, toplumun gündeminden düşmeyen en önemli konulardan birisidir. 2000 yılı birincil enerji tüketimimizin 78,7 milyon TEP, ulusal kaynaklarla üretimimizin ise 27,6 milyon TEP olması, enerjideki dışa bağımsızlığımızın büyüklüğünün çok açık bir göstergesidir. 2000 yılı sonu itibariyle ülkemizdeki mevcut genel enerji tüketiminin %87'sinin fosil kaynaklardan sağlanması, yenilenebilir enerji kaynaklarına vermemiz gereken önemin açık bir göstergesidir. Yenilenebilir enerji kaynakları konusunda, dışarıdan teknoloji alan bir ülke değil, teknoloji üreten bir ülke konumuna gelmemiz temel hedefimiz olmalı, bu amaçla araştırma-geliştirme için gerekli destekler sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

1. ALTAŞ, İ.H., 1999. Fotovoltaik güneş pilleri. Güç denetimi için bir modelleme. 3e Dergisi, Kasım 1999, Sayfa 145.
2. ALTAŞ, İ.H., 1998. Fotovoltaik Güneş Pilleri. 3e Dergisi, Mart 1998, Sayfa:86, KTÜ Elektrik Elektronik Müh. Bölümü.
3. ATACA, D., Orjin-Solar LTD.
<http://www.orjinsolar.com>
4. ÇOLAK, M., 1995. Güneş Pilleri İle Elektrik Üretiminde Sağlanan Kaynak Tasarrufu Ege Üniversitesi/Güneş Enerjisi Enstitüsü
5. DOE – U.S Department Of Energy, May 1996. Photovoltaics: Advancing Toward the Millennium
DOE GO-10095-241
DE96000486
http://www.nrel.gov/ncpv/pdfs/pv_millennium.pdf
6. GENÇOĞLU, M.T., CEBECİ, M., 2000
Türkiye'nin Enerji Kaynakları Arasında Güneş Enerjisinin Yeri ve Önemi.
Kaynak Elektrik Dergisi, Eylül 2000, Sayfa:110, Fırat Üniversitesi Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, ELAZIĞ.
7. KILINÇ, S., 1993. Güneş Pilleri ve Uygulaması. Lisans Bitirme Tezi, KOCAELİ.
8. KUBAN, B., 2001. Güneş Pillerinin Yapılardaki Uygulamaları
Kaynak Elektrik Dergisi, Nisan 2001, Sayfa 100.
9. NREL, EREC, DOE/GO-10097-377 FS 321, March 1997. Basic Design and Principles of Photovoltaics
<http://www.eren.doe.gov/erec/factsheets/pvbasics.pdf>
10. Sandia National Laboratories. <http://www.sandia.gov>
11. TREBLE, F.C., 1991. Generating Electricity From The Sun. Renewable Energy Series – Pergamon Press.
12. TÜRE, İ.E., 2000 Elektrik Enerjisi Depolamanın Önemi ve Yeni Gelişmeler.
Kaynak Elektrik, Haziran 2000 Sayfa:140, Mimar Sinan Üniversitesi.
13. Utility-Scale Photovoltaic Concentrators
http://www.eren.doe.gov/power/pdfs/pv_concentrators.pdf
14. Utility-Scale Flat-Plate Thin Film Photovoltaics
http://www.eren.doe.gov/power/pdfs/thinfilm_pv.pdf

15. UYAR, T.S., 1997. Sera Gazı Emisyonları ve Enerji Sektöründe Karar Verme. Kaynak Elektrik, Ağustos 1997, Sayfa 95.
16. UYAR, T.S., 1993. Güneş Pili Teknolojileri Kaynak Elektrik Dergisi, Nisan/Haziran 1993, Sayfa 65
17. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Kapanış Bildirgesi., 2001. Kaynak Elektrik Dergisi, Şubat 2001, Sayfa 16



ÖZGEÇMİŞ

22.10.1975 yılında Kocaeli’nde doğdu. Ortaokul ve lise öğrenimini Kocaeli Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 1993 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 1998 yılında mezun oldu. Mezun olduğu yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği’nde lisansüstü eğitimine başladı.

1999 yılından sonra ÖZ ASANSÖR İnşaat San. Tic. Ltd. Şti’nde Elektrik Mühendisi olarak 2001 yılından bu yana da, KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

