

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

128\$70

**GÜNEŞ ENERJİSİNDEN DİREKT ELEKTRİK  
ÜRETİMİ( FOTOVOLTAİK )**

**YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Makina Mühendisi Alper KORKMAZ

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR**

Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR  
*Şükrü*

Prof. Dr. Alihan DEMİR  
*Alihan*

Doç. Dr. U. KESEKİN  
*U. Keskin*

**İSTANBUL, 2001**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv-v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 ENERJİ ÜRETİMİNİN ÇEVREYE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....	11
1.1 Oluşacak Çevre Zararlarının Tahmini.....	11
1.2 Fotovoltaik Sistemin Çevre Zararları.....	13
2 DÜNYADA TEMİZ ENERJİLER.....	15
2.1 Türkiye de Temiz Enerji Kaynakları.....	16
2.2 Güneş Enerjisi.....	16
2.2.1 Güneş Enerjisinin Önemi.....	17
2.2.2 Türkiyede Güneş Enerjisi.....	21
3. GÜNEŞ PİLLERİ.....	22
3.1 İletken, Yalıtkan ve Yarıiletkenler.....	23
3.1.1 Yarıiletkenler.....	25
3.1.1.1 Has Yarıiletkenler.....	25
3.1.1.2 Katkılı Yarıiletkenler.....	27
3.1.1.2.1 N Tipi Yarıiletkenler.....	28
3.1.1.2.2 P Tipi Yarıiletkenler.....	28
3.1.1.3 Yarıiletkenin Elektriksel Alanları.....	29
4. GÜNEŞ PİLLERİNİN TASARIMI.....	33
4.1 Güneş Pilinin Modelinin Oluşturulması.....	34
4.2 Fotovoltaik Jeneratör.....	43
4.2.1 Fotovoltaik Üniteler.....	43
4.2.2 Fotovoltaik Ünite ile Uygulamalı Örnek.....	45
4.2.3 PV Ünitelerinin Bağlanması.....	46
4.2.4 Enerjinin Depolanması.....	47
4.3 Güneş Aküleri.....	49
4.4 Şarj Kontrol Cihazları.....	50
4.5 İnverterler ( Dönüştürücüler ).....	51
5. PV SİSTEM EKONOMİSİ.....	52
5.1 PV Sisteminin Ekonomiklik Kriterleri.....	53
5.2 PV Sisteminin Uygulama Alanları.....	53

5.2.1	PV Sistemi İle Kırsal Yörelerde Elektrik Eldesi .....	55
5.2.2	PV Sistemi İle Aydınlatma .....	55
5.2.3	PV Sistemi İle Pil Şarjı .....	55
5.2.4	PV Sistemi İle Profesyonel Uygulamalar .....	56
5.2.5	PV Sistemi İle Katodik Koruma .....	56
5.2.6	PV Sistemi İle Uzayda Elektrik Gücü.....	56
6.	PV SİSTEMİ ENERJİ MALİYETİ .....	57
6.1	Güneş Kollektörünün Performansı .....	57
6.2	Enerji Üretim Maliyeti Hesabı.....	57
6.3	PV Enerji Maliyeti .....	58
6.4	Generatör Enerji Maliyeti.....	61
7.	SONUÇLAR.....	64
KAYNAKLAR.....		65
ÖZGEÇMİŞ.....		66

## SİMGE LİSTESİ

$PV$	Fotovoltaik
$NOCT$	Nitelik indeksi ( Normal pil çalışma sıcaklığı )
$FF$	Dolgu faktörü ( Verim )
$G$	Lineer ışım
$iB$	İletkenlik bandı
$VB$	Valans bandı
$YB$	Yasak band
$E_G$	Malzemenin band aralığı
$K$	Boltzman sabiti
$E_F$	Fermi enerji seviyesi
$P_n$	n tipi yarıiletken difüzyon potansiyeli
$P_p$	p tipi yarıiletken difüzyon potansiyeli
$E$	Gelen ışığın foton enerjisi
$h$	Frekans
$\lambda$	Dalga boyu
$V_{OC}$	Açık devre gerilimi
$I_{SC}$	Kısa devre akımı
$kl$	Açık devre gerilimi
$P_C$	Çıkış gücü
$\eta$	Verim
$R$	Yansıma
$V_e$	Geçiş bölgesi
$e$	Elektron yükü
$T$	Sıcaklık
$g_p$	Isıl üretim oranı
$r_p$	Dengesiz durumlarda yeniden birleşme oranı
$\tau_p$	Delik ömür süresi
$p$	Dengesiz delik sayısı
$G_p$	Işık hüzmelerinin emilmesi suretiyle deliklerdeki net üretim
$I_p$	Yayıma akımı
$D_p$	Yayıma sabiti
$I_m$	Maksimum çıkış gücü için akım değeri
$V_m$	Maksimum çıkış gücü için gerilim değeri
$P_m$	Maksimum çıkış gücü için güç değeri
$\eta_{max}$	p-n jonksiyon pilinin maksimum enerji dönüştürme verimi
$Q$	Jonksiyon biriktirme etkinliği
$r$	Pilin optik yansıtma katsayısı
$\alpha$	Emme katsayısı
$I$	pr kalınlığı
$e^{-\alpha I}$	İletilen radyasyon miktarı
$\eta_{ph}(E_G)$	Jonksiyon birim yüzeyinden bir saniyede geçen foton sayısı
$R_S$	Seri rezistansı
$DC$	Doğru akım
$N_S$	Ünite adedi
$i$	Enflasyon
$d$	Faiz katsayısı
$P_a$	Eskolasyon katsayısı
$I$	Ortalama yıllık ışım
$A$	Heliostat alanı

$E_M$	Ünite verimi
$E_S$	Sistem verimi
$\dot{O}YM$	Özgül yakıt maliyeti
$be$	Özgül yakıt sarfiyatı
$YF$	Yakıt fiyatı
$TÖM$	Toplam ömür maliyeti



## ŞEKİL LİSTESİ

ŞEKİL 2.1	Güneş enerjisinin kullanım alanları.....	18
ŞEKİL 3.1	Katı kristalin enerji-band diagramı.....	23
ŞEKİL 3.2	İletken, yalıtkan ve yarıiletkenin enerji band diagramı .....	24
ŞEKİL 3.3	Germanyumun kristal yapısı .....	26
ŞEKİL 3.4	Bir kovalent bağı çözülmüş olan germanyum kristali.....	26
ŞEKİL 3.5	Bir has iletkenin enerji-band diagramları .....	27
ŞEKİL 3.6	Fermi Dirac dağılım fonksiyonu .....	27
ŞEKİL 3.7	P tipi ve N tipi yarıiletkenin enerji-band diagramları.....	29
ŞEKİL 3.8	Bir p-n jonksiyonunun kavramsal gösterimi .....	30
ŞEKİL 3.10	PV etkiden yararlanılarak elektrik enerji üretiminin şematik gösterimi.....	31
ŞEKİL 4.1	p-n jonksiyon modeli .....	35
ŞEKİL 4.2	Fotovoltaik güneş pilinin eşdeğer devresi .....	38
ŞEKİL 4.3	Seri rezistans kaybının pil I-V diagramına etkisi .....	41
ŞEKİL 4.4	Slikon güneş pillerinde meydana gelen güç kayıpları .....	42
ŞEKİL 4.5	Heliostadların oluşum aşamaları .....	43
ŞEKİL 4.6	I-V diagramı .....	44
ŞEKİL 4.7	PV generatörü.....	46
ŞEKİL 4.8	Sıcak nokta oluşumu.....	47
ŞEKİL 5.1	Tek PV sisteminin konfigürasyonu .....	49
ŞEKİL 6.1	PV ve jeneratör sisteminin güç-maliyet ilişkisinin karşılaştırılması .....	63

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Yakıt çevriminin zararları .....	12
Çizelge 1.2 Slikon ömür çevrimi .....	13
Çizelge 1.3 PV üretimine CO <sub>2</sub> emisyonları.....	14
Çizelge 4.1 Depolama metodları .....	48
Çizelge 4.2 Kurşun asidik pil tipleri .....	49
Çizelge 5.1 AB ülkeleri termi programı 1979-1990 da PV uygulamaları.....	52
Çizelge 6.1 PV sistemin güç-maliyet ilişkisi.....	60
Çizelge 6.2 Jeneratör sisteminin güç-maliyet ilişkisi.....	62



## **ÖNSÖZ**

Bu tezi hazırlamamda yardımcı olan Tera Enerji'den Mehmet Aydemir'e, YTÜ Araştırma Görevlisi Hasan Hüseyin Erdem'e, Yardım Mühendislikten Nizamettin Yardım'a, Mehtap Kekeç'e, Tekin Mühendislikten Hüseyin Tekin'e, Türkan Tekin'e, aileme ve Sayın Doç. Dr. Şükrü Bekdemir'e teşekkür ederim.



## ÖZET

Hızla gelişmekte olan dünyamızda teknolojinin ve insanların enerji taleplerini karşılamak gittikçe zorlaşmaktadır. Daha önceden mevcut bulunan enerji kaynaklarını araştırmak ve geliştirmek zorundayız.

Güneş sonsuz ve temiz bir enerji kaynağıdır. Fotovoltaik sistemler, geleceğin enerji taleplerini karşılamak üzere en önemli alternatif enerji kaynağıdır.

Bu çalışma güneş enerjisinin faydalarını ve elektrik enerjisi üretimi için kullanılan PV sistemini anlatmak için yazılmıştır.

Çalışmanın içerdiği konular birkaç ana başlık üzerine temellendirilmiştir. Öncelikle enerji kaynaklarının dağılımı ve de çevreye etkileri açıklanmıştır. Daha sonra güneş enerjisinden ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Fotovoltaik sistemin teorik olarak işlemsel prensipleri anlatılmıştır. Son olarak enerji maliyeti planlaması yapılmış ve fotovoltaik sistemin mevcut enerji kaynakları arasında yer alıp alamayacağı konusu sorgulanmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Güneş enerjisi, fotovoltaik, enerji, temiz enerji.



## **ABSTRACT**

In our world which improves every day, it's getting harder to fulfill the request of technology and people. We have to research and improve preexistent energy resources.

The sun is accepted as an endless and a clean source of energy photovoltaic system is important alternative energy resource in order to respond energy demand of the future.

To be able use this source efficiently this thesis is written. It's to help the search for the more productive use of the solar energy for electrical energy.

Subject included in my work are based on a few main titles. It is aimed at first to explain energy resources position and their effects on the environment. Then it is discussed about sun energy and their areas of use. It is explained functional and theoretical principles of photovoltaic system. It is finally made energy cost planning and discussed if the photovoltaic system can be existent among preexistent energy resources or not.

**Keywords:** Sun energy, photovoltaic, energy, clean energy.



## **1. ENERJİ ÜRETİMİNİN ÇEVREYE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Güç üretiminin çevresel zararları çok uzun süredir tartışılmakta ve her geçen gün bu tartışma daha ivme kazanmaktadır. Çevreye verilen zararlar, güç üretim artışı için gerekli yaygın olan enerji tesislerinin çoğalmasıyla aynı oranda artmaktadır. Günümüzde sistem ekonomisi içinde yer alan tesis maliyeti içine, güç üretme tesislerinin arıtma tesisleri alınmamakta ve bu sistemlerin maliyeti ve harcamaları vergi vasıtası ile vatandaşlar tarafından karşılanmaktadır.

Arıtma tesisleri maliyet ve harcamaların göz ardı edilmesi nedeniyle güç üretim kaynağının belirlenmesinde yaygın sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarına göre ekonomik açıdan daha cazip hale gelirler. Böylece genellikle fosil yakıt yakılan veya nükleer enerjiden elde edilen güç santral seçenekleri çevre için daha elverişli olan yenilenebilir enerji seçeneklerinden daha çok tercih edilirler.

Enerji üretim teknolojilerinin çevreye verdiği zararların seçim yapılmadan önce belirlenip, bunlara göre önlem alınması gereklidir. Bu yüzden çevresel zararların önceden hesaba katılmasının bir metodu uygulanmaktadır. Bu yöntemde dış zarar verileri, güç üretim detayları ve yakıt çevrimleri incelenmelidir. Yakıt çevrimi içinde tüketim, dağıtım, verim ve yok olma süresi yer almaktadır. Ayrıca yakıt çevriminin yol açtığı kirliliğinin temizlenmesi için gerekecek tahmini harcamalarında hesaba katılması gerekmektedir. Böylece seçim yapacak kişi ve kurumlar çevre ve toplum için optimum enerji teknolojisini seçeceklerdir.

### **1.1 Oluşacak Çevre Zararlarının Tahmini**

Bu metotta enerji üretim dış zararlarının açıklanması gerekmektedir. Metod için gerekli kriterler:

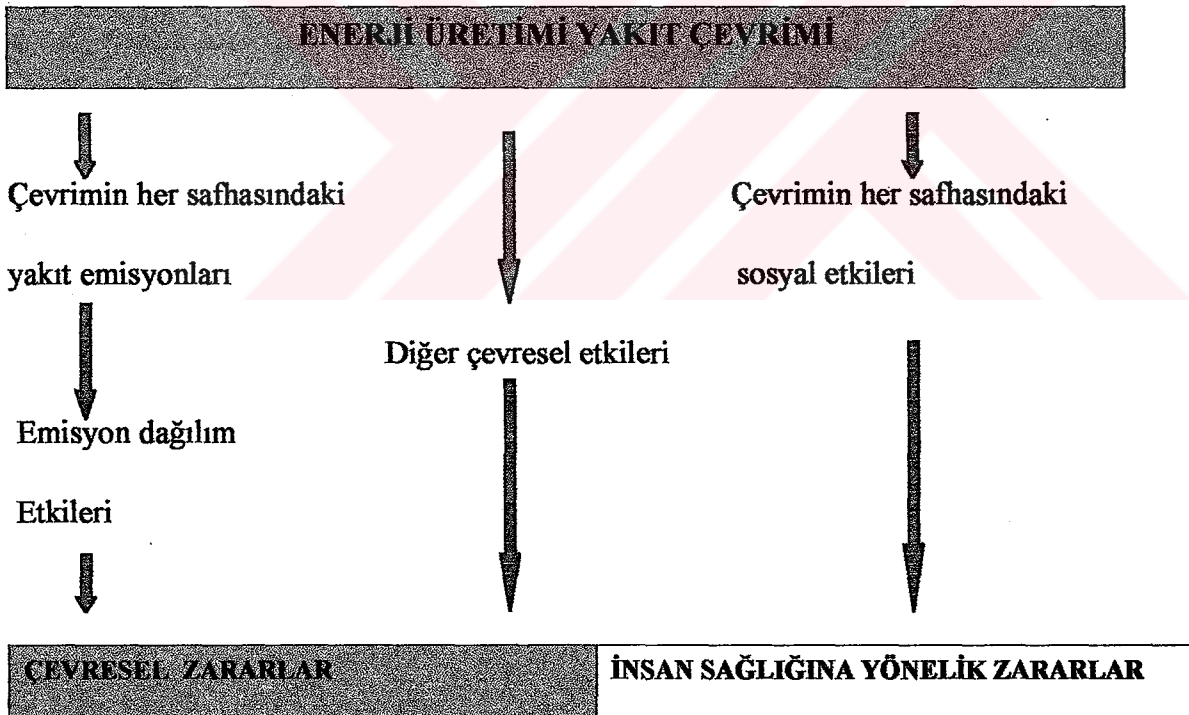
- a- Basit ve kolay anlaşılabilmesi.
- b- Uygunluk, modifikasyonlara veya yeni birim girişlerine uygun olması.
- c- Tüm enerji üretim teknolojilerinde uygulanabilirliği.

Dış zararlar çevresel ve çevresel olmayan olarak iki gruba ayrılır. Büyük çoğunluğu çevresel gruba dahildir, insan sağlığı ve yaşam değeri, asidin hava içinde çözülümü, sera etkisi ve global ısınma bunların en önemlilerindedir. Çevresel olmayan gruba güvenlik, doğal rezerv yöntemi ve işsizlik gibi sosyal konular dahildir. (OECD 1991)

Çevresel olmayan zararların hesaba katılması uygun görülmüştür. Çevresel zararlar, dış zarar ile aynı birimde hesaplanmalıdır. (FRİTSCHÉ 1991) Çevresel zararlar kendi içinde zarar miktarlarının büyüklüğü açısından sıralanır.

En önemli dış zararlar insan sağlığını tehlike altına alan fosil yakıt tüketilmesinden oluşan hava kirliliği ve nükleer enerji santrallerinin radyasyon riskidir. Sera etkisi CO<sub>2</sub> emisyonlarının fosil yakıt yakılması ile yoğunlaşması ile ortaya çıkar. (EC 1990) Global ısınmanın yol açtığı mevsimsel değişiklikleri şu anda dünyamızda gerçekleşen doğal felaketlerle yaşıyoruz. Asit yağmurlarıyla ormanların yok olması ve O<sub>2</sub> üretiminin durması kuşkusuz tüm dünya yaşamını önemli derecede olumsuz etkilemektedir. Radyasyon tehlikesi bilindiği gibi insan sağlığında geri dönülmez tahribatlar yaratmaktadır. Çevresel etkilerin önlenmesi, bu etkileri değerlendirme anlayışı ile ancak çözülebilir. Yakıt çevrimi ve çevresel etkisi; yakıt çevriminin her safhasında oluşacak etkilerin belirlenmesi ile tam olarak belirtilebilir.(Çizelge 1.1)

Çizelge1.1 Yakıt çevriminin zararları

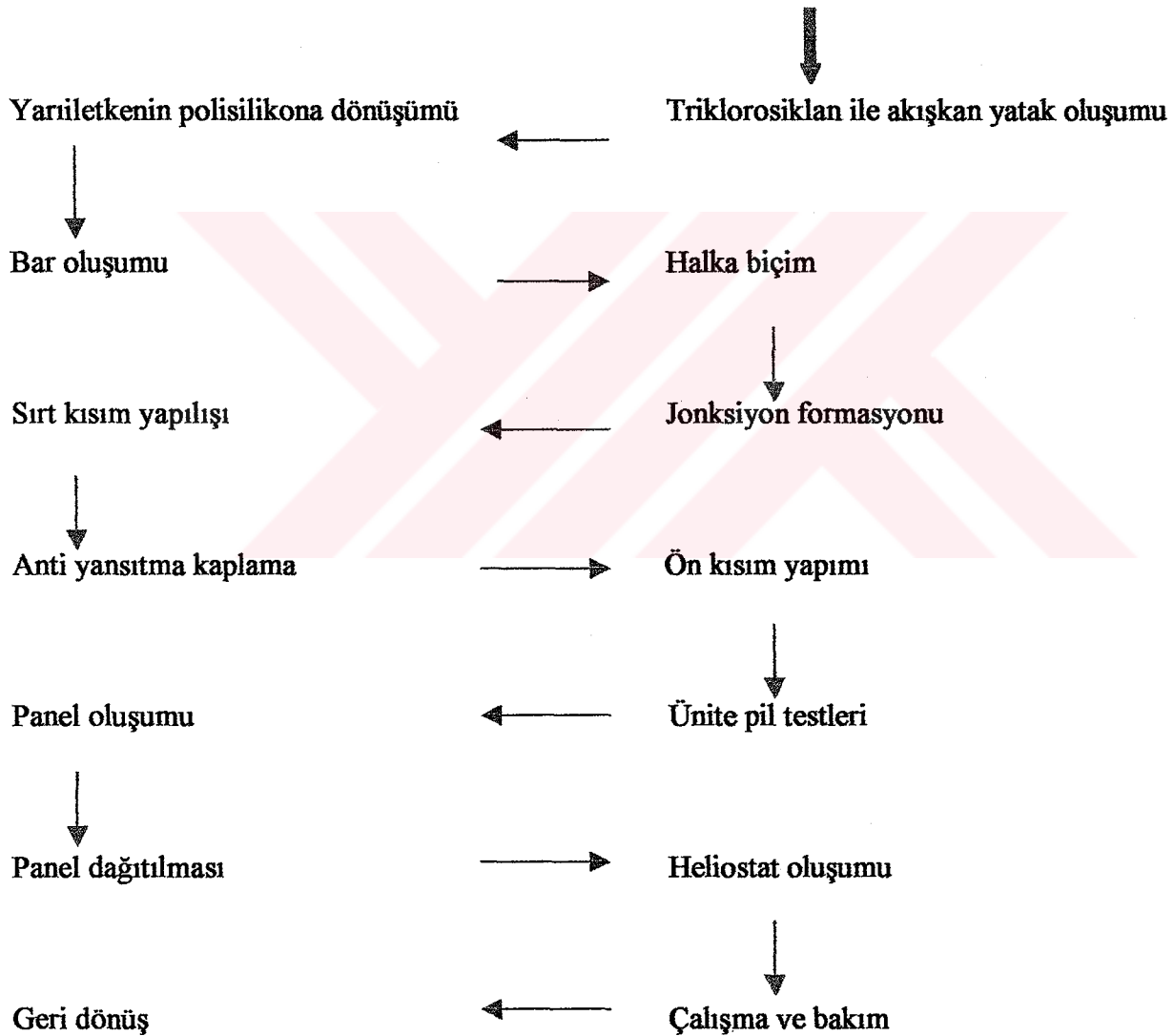


Çevresel etkilerin bazıları hesaplanabilir ve bir nevi önlenabilir. Fakat global ısınma gibi veya çeşitli türlerin yok olması gibi etkilerin hesaplanma olasılığı çok azdır. Örneğin, ozon (O<sub>3</sub>) oluşumundaki NO<sub>x</sub> ile hidrokarbonlar arasındaki fotokimyasal reaksiyon zincirinin bozulması gibi etki / tepki bağlantısı kolay hesaplanmaz.

## 1.2 Fotovoltaik Sistemin Çevre Zararları

PV (Fotovoltaik) üniteleri güneş pillerinden oluşur. Bu piller genellikle 0.3 mm kalınlığında 10 x 10 cm alanındadır. Slikon ve türevlerinden oluşmaktadır. (Çizelge 1.2) Slikon malzemenin yarıiletken olarak tercih edilmesi ekonomik nedenlere dayanır. İlk olarak madenden çıkarılması sonra metalurjik imali ( en çok çelik endüstrisi alanında kullanılır, düşük yüzdesi yarıiletken imalinde kullanılır ) safhasında ortaya çıkan slika tozu akciğer hastalıklarına yol açar. Ayrıca saflaştırma sırasında silan ve toksit karışımlar gibi tehlikeli materyaller içerir. (Stone, 1993)

Çizelge 1.2 Slikon ömür çevrimi



PV ünitesinin diğer elemanları çelik, alüminyum, bakır ve elektronik donanımlarıdır. Bu malzemeler standart endüstriyel tehlikeler arasındadır. PV yapımı sırasında kullanılan tesislerin çevreyi kirletme ve sera etkisi mevcuttur. Plaz ve Zibetta (1991)

1990 yılı teknolojisi için 1.5 MW yıllık üretim hızı olarak hesaplanmıştır. 1998 yılı içinse bu değer 3.6 MW'dır. 1990 yılı teknolojisi için CO<sub>2</sub> emisyonu, 400.000 ton / gigawatt yıl olarak modern kömür santralinde ölçümü yapılmıştır. Çizege 1.3' te 20 yılda pil üretiminde çıkan CO<sub>2</sub> emiyonları göstermiştir.

Çizelge 1.3 PV üretiminde CO<sub>2</sub> emisyonları ( kiloton / gigawatt yıl )

Pil Malzemesi	Üretim	Verim ( % )		Ömür ( yıl )	CO <sub>2</sub> ( kt GW <sup>-1</sup> yıl )
Monokristal sikon	Düşük	12	16	20	400
	Yüksek			30	150
Çok-kristalli sikon	Düşük	10	15	20	400
	Yüksek			30	100
İnce film sikon	Düşük	10	15	20	130
	Yüksek			30	50
İnce film çok kristalli sikon	Düşük	10	14	20	100
	Yüksek			30	40
20-20 çok-jonksiyon	Düşük	30		30	24

İnce kristalli film sikon seramik, Kadmiyumtellür ve İnduyumdiselenid ( CIS ) kaplama teknolojisi ileriki yılların düşük maliyetli pil çalışmaları arasındadır. (Stone 1993)

Sonuç olarak PV sistemleri çalışma sırasında ve yok olmasında çevresel tehlikelere yol açar, ancak sikonun işlenmesi esnasında olabilecek zararlar mikroelektronik endüstri ve kontrol üniteleri yapımında karşılaşılan zararlara eşdeğerdir.

Sikon çok stabil ve dengeli enerjiye sahip bir elementtir. Bu yüzden hiç bir tehlikeye neden olmaz. PV sistem yapımında kullanılan tesisin yol açtığı zararlar ise diğer santraller ile karşılaştırıldığında, çevre kirletilmesinde çok küçük bir orana sahiptir. On yıl içinde ince film kaplama teknolojisi gelişimi ile bu zararlar minimum değerlere inecektir.

Enerji tesislerinin çevre zararları çok değişik faktörlere bağlıdır. Elektrik üretiminde kullanılacak enerji kaynakları arasında karşılaştırmanın yapılmasında en önemli bölümü dış zararlar oluşturur. ( Hohmeyer ve Ottinger, 1991 )

## 2. DÜNYADA TEMİZ ENERJİLER

Dünyamızda enerji ihtiyacı her yıl yaklaşık % 4-5 oranında artmaktadır. Buna karşılık bu ihtiyacı karşılayan fosil yakıt rezervi ise çok daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. En iyimser tahminler bile önümüzdeki 50 yıl içinde petrol rezervlerinin büyük ölçüde tükeneceği ve ihtiyacı karşılamayacağını göstermektedir. (OECD, 1995)

Ayrıca fosil yakıtların kullanımı dünya ortalama sıcaklığını son bin yılın en yüksek değerlerine ulaştırmış, yoğun hava kirliliğinin yanı sıra milyarlarca dolar zarara yol açan sel/fırtına gibi doğal felaketlerin gözle görülür şekilde artmasına neden olmuştur. Bu nedenle insanoğlu fosil yakıt rezervlerinin bitmesini beklemeden temiz enerji kaynaklarına yönelmek zorundadır. Yoğun hava kirliliğinin tehdidi altındaki büyük şehirlerde yüzlerce kişi hava kirliliğinden dolayı indirekt olarak hayatını kaybetmektedir. Asit yağmurları yüzünden bir çok doğal ekosistem tamamen ölmüştür.

Bu durumda kendini sınırsız tekrarlayan yenilebilir ve hammadde bağımlısı olmayan enerji kaynakları, ( güneş, rüzgar, su, biyokütle gibi ) çok kısa bir süre içinde önem kazanacaktır. Dünyanın bir çok ülkesinde yeni enerji üretim yatırımları artık temiz enerji odaklı olmaktadır.

Birçok özel araştırma kurumunun hazırladıkları raporlara göre 2060 yılında dünya enerji ihtiyacının yaklaşık % 60 ı yenilenebilir kaynaklardan karşılanacaktır. (Lorenzo 1991)

Sosyal maliyet, fosil yakıtlı elektrik santrallerinin kullanımından dolayı (Seller, kasırgalar, hastalıklar, çevre kirliliği, kanser ve diğer hastalıklar, asit yağmurları vs. ) zarar gören insan, hayvan ve bitki örtüsünün uğradıkları zararların finansal karşılığıdır ve bu maliyet elektrik santralleri projelerinde veya elektrik bedelini faturalandırma çalışmalarında gözardı edilmektedir.

Bir fosil yakıt bazlı elektrik santralının sosyal maliyeti 0,27 USD/kwh dır. Bir rüzgar santralının sosyal maliyeti 0,01 USD/kwh dır. Bir güneş santralının sosyal maliyeti hemen hemen sıfırdır. (Markwatt, 1994)

## 2.1 Türkiye’de Temiz Enerji Kaynakları

Türkiye’nin temel enerji kaynakları petrol, linyit, kömür, doğalgaz, jeotermal, odun ve hidrolik enerji olarak gözükmektedir. Türkiye’nin kendi üretimi, tüm enerji ihtiyacının ancak % 48 ini sağlayabilmektedir.

Yenilenebilir olmayan fosil yakıtlar bakımından fakir bir ülke olan ülkemiz direkt elektrik, doğalgaz, petrol ve yüksek kalitede kömür alımı için her yıl milyarlarca dolar ithalat yapmaktadır. En çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları hidrolik enerji ve küçük ölçekli su ısıtma amaçlı kullanılan güneş kolektörleridir.

Güneş enerji sistemlerinin bir avantajı, herhangi bir enerji hammaddesinden tam bağımsızlık, doğal afetlere karşı güvenlik ( 17 Ağustos Marmara ve 12 Kasım Düzce depremlerinde yaşanan enerji problemlerine rüzgar ve güneş enerjisi ideal bir çözüm oluşturmaktaydı. ), enerji kaynağının çeşitlendirilmesi ve merkezi enerji üretiminden kurtulmak olarak sıralandırılabilir.

PV sisteminin, güneşi ve rüzgarı çok bol olan Türkiye için çok önemli kriterler olan taşınabilirliği, bakım ihtiyacı olmaması, ihtiyacın olduğu yerde üretimi, hiçbir atık çıkmaması, sessiz üretim ve modüler yapı özellikleri ile merkezci enerji üretimi ve dağıtımından uzak olması diğer avantajları arasındadır. Bu avantajlar yerel enerji üretimi modellerine geçişi sağlamakta önemli etkenlerdendir.

Sınırsız ve sorumsuzca enerji tüketiminin yerini bilinçli, çevreye saygılı ve ihtiyacı karşılamaya yönelik enerji kullanımı alacaktır. Böyle bir ortamda da, refah düzeyini en fazla enerji tüketen sistem yerine, en verimli enerji kullanan sistemler belirleyecektir. Türkiye’de de benzeri bir anlayışın hakim olması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artacaktır.

## 2.2 Güneş Enerjisi

Tükenmeyen, çevreyi kirliletmeyen, dış alım gerektirmeyen ve bir ölçüde de bedava sayılabilecek kaynak olan güneş enerjisi, yeni ve yenilenebilir alması enerji kaynaklarının başında gelenidir.

Kişi başına elektrik tüketiminin gelişmişliğin bir göstergesi sayıldığı çağımızda, birincil enerji kaynaklarının sürekli tükenmekte oluşu, ayrıca bu kaynakların 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 tüketimin ekonomik olarak kabul edilebilecek en alt düzeye indirilmesi olarak özetlenebilir.

Fizyon enerjisinin en büyük kaynağı ise, hem de dünyaya zarar veremeyecek bir mesafede olan güneştir. Nitekim, petrol, kömür ve atom enerjisi gibi birincil enerji kaynaklarına alternatif olarak güneş enerjisi çok umut vericidir. Çünkü güneş enerjisinden, örneğin güneş pilleri ile çevreyi kirletmeden ve klimatolojik dengeyi bozmadan elde edilen doğru akım elektrik enerjisi, evirici ve trafolar aracılığıyla doğrudan şebekeye verilebildiği gibi, elektroliz yoluyla hidrojen gazına dönüştürülerek depo edilmekte veya halen doğalgaz naklinde kullanılan boru şebekesiyle kullanılacağı yerlere nakledilebilmektedir.

Güneşten dünyaya gelen enerjinin yoğunluğu, atmosferin üzerinde ( $m^2$ ) başına 1,35 kw kadardır. Bu yoğunlukla dünya çapının kapladığı alana gelen güneş gücü  $178 \times 10^{15}$  W düzeyinde olup dünyadaki kurulu elektrik santrallerinin toplam gücünün 100 bin katı düzeyindedir. İnsanlığın enerji sistemi  $8-9 \times 10^{12}$  güçle karşılanabilir düzeydedir. Güneşten gelen güç bunun 20 bin katıdır.

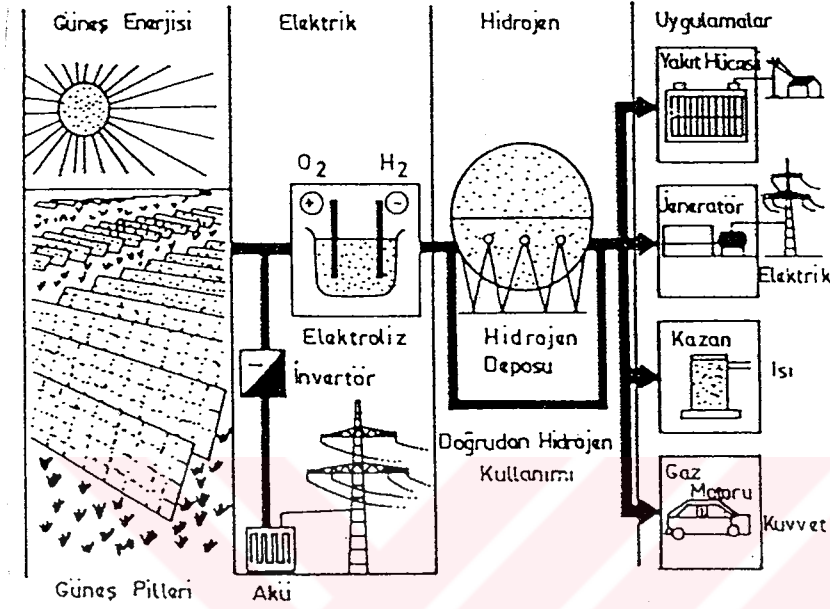
Dünyanın tüm yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi,  $1,22 \times 10^{14}$  ton eşdeğer kömürü ya da  $0,814 \times 10^{14}$  ton eşdeğer petrol gibi görkemli boyuttadır. Bir başka anlatımla, bir yılda gelen güneş enerjisi bilinen kömür rezervlerinin 50 katı ve bilinen petrol rezervinin 800 katı kadardır. (Zweibel, 1990)

### **2.2.1 Güneş Enerjisinin Önemi**

Enerji kullanım aşamaları sürecinde güneş enerjisinin önem kazanması, yüzyılımızın ikinci yarısında oluşmuştur. Gerçi bu enerjinin kullanımı daha önce başlamışsa da, güneş teknolojisindeki hızlı aşamaların 1970 lerin dünya yapay enerji bunalımıyla görüldüğü bir gerçektir.

Bugün için güneş enerjisinin kullanımı, gündelik yaşam yapısından ve konutlardan başlamaktadır. İletişime, tarıma, endüstri kesimine, elektrik santrallerine, askeri hizmetlere ve uzayda kullanımına dek uzanmaktadır. Güneş teknolojisi özellikle; alçak, yüksek sıcaklık ısıl uygulamalarına, ışıl elektrik ve güneş termik elektrik uygulamalarına, fotosentetik ve fotokimyasal işlemlere dayanmaktadır. (Tera, 2000)

Güneş enerjisinin günümüzde önem kazanan uygulamaları; hemen her ülkede yaygınlaşmaya başlayan güneşli su ısıtıcıları dışında, güneşle ısınan binaların yapımı, güneşli su pompalarının tarımsal sulamada kullanılması, güneş enerjisinin elektrığe çevrilmesi, geleceğin yakıtı olan hidrojenin sudan üretiminde güneş enerjisinden yararlanılması biçiminde sıralanabilir. (Şekil 2.1)



Şekil 2.1 Güneş Enerjisinin Kullanım Alanları

Bugün için dünya genelinde güneş teknolojisi, “güneş mühendisliği” denilen bir mühendislik dalını da doğuran biçimde oluşmuştur. ABD ve RUSYA bu teknolojiye önde gitmektedir. Onlarla yarışabilecek teknoloji birikimi bir ölçüde FRANSA ve JAPONYA’ nın elinde bulunmaktadır. Bu teknolojiye batı dünyasının çok uluslu tekelleri, özellikle petrol şirketleri el atmışlardır. Birleşmiş Milletlerin gelişme sürecindeki ülkelere, güneş teknolojisi yardım programı vardır. Uygulamalar için Dünya Bankası’ nın fonunda bulunmaktadır.

Batı dünyasında güneş teknolojisini geliştirmeye yönelik en önemli çalışma, şimdi OECD Uluslararası Enerji Ajansı ( IEA ) kapsamında, ABD, Avustralya, Avusturya, İtalya, Belçika, Danimarka, Hollanda, İngiltere, İspanya, İsveç, İtalya, Japonya, Kanada, Norveç, Yeni Zelanda ve Yunanistan’ ın katılımıyla yürütülmektedir. Ajansa üye olan, bu nedenle petrol dış alımında politik sıkıntılarla da karşılaşmış bulunan Türkiye’ nin kendisine yarar sağlayacak bu çalışmaya katılmamış olması büyük bir eksikliklerdir.

Dünya enerji bütçesinin geleceğini sağlıklı biçimde kestirmek olanaklı olmasa da, bazı ülkelerin güneş enerjisi için önemli hedefler saptadıkları gözlenmektedir. Örneğin ABD enerji tüketiminin 1985 yılında % 0,8 sini, 2000 yılında % 7 sini ve 2020 yılında % 25 ini ısısal, elektriksel ve biyokütleyle dayalı güneş enerjisi uygulamalarıyla karşılamayı çok önceden planlamıştır. 1985-1990 döneminde güneşle ısınabilen konut sayısının bir milyona ulaştırılması tasarımı ABD de 5 MWlık ve 10 MW lık güneş termik denem santralleri kurulurken, İtalya da 1 MW lık güneş termik santrali devreye sokulmuş, Fransa da 0,5 MW lık güneş termik santrali yapılmıştır. Bunların yanısıra Japonya da 1986-1990 dönemi için 10 MW lık termik elektrik ve 1 MW lık ışıllık elektrik güneş santrali hedefine ulaşmıştır.

Sanayileşmiş ülkelerde fotovoltaiik pillerin üretiminin gelişimi ise iklim koşullarına, PV kuruluşların termik santrallere göre mal oluş fiyatına ve bu ülkelerin çevre politikalarına bağlıdır.

Fotopil üretiminde ise başta gelen ülkeler, ABD ve Japonya dır. ABD nin üretimi dünya piyasasının % 30 unu oluşturmaktadır. Japonya ise hesapmakinelelerinde kullanılan fotopillerin %80 ininden çoğunu üretmektedir. Fransa dünyadaki yıllık üretimin%5 ini Avrupa'dakinin ise % 30 unu karşılamaktadır. Sonraki sıralarda ise % 20 lik pay Almanya ve % 10 luk payla İspanya gelmektedir.

Başta Hindistan ve Brezilya olmak üzere güney ülkeleri de dünyadaki üretime % 10 dan fazla katkıları ile dikkat çekmektedir. (Heiser, 1995)

Bugün için güneş enerjisinin kullanılmasındaki genel amaç, alışlagelen birincil kaynak fosil yakıtların tutumlu ve ölçülü kullanımına yardımcı olmaktadır. Güneş enerjisinin teknolojik gelişimi özellikle üç uygulamaya ağırlık kazandırmıştır. Bunlar;

a- Yapıların ısıtılmasında güneş enerjisinin kullanılması ( bu tür evlere güneş evleri denmektedir. )

b- Güneş enerjisinin elektriğe dönüştürülerek kullanılması ve güneş elektrik santrallerinin geliştirilmesi

c- Geleceğin yakıtı olan hidrojenin sudan üretilmesinde güneş enerjisinin kullanılması ( Bu yöntemle üretilecek olan hidrojene ve sentetik yakıtlara, güneş yapay yakıtları da denilmektedir. )

Binaların ısıtılmaları ve iklimlerinde düz yüzeyli kollektör sistemlerinden başka enerji yoğunlaştırıcı sistemler, güneşli ısı pompaları ve çatı tipi havuz kollektörlerinin kullanıldıkları görülmektedir. Ayrıca siteler için ısı ve elektriğin birlikte üretileceği, güneşli toplam enerji santralleri geliştirilmektedir.

Güneş enerjisinden yararlanılarak fotik, elektrik ve termik yöntemlerle hidrojen üretilmektedir. Suyun elektrolizi, hibrid elektrolitik-termokimyasal işlevlerle suyun parçalanması, direk termal ya da termokimyasal işlevlerle suyun parçalanması, direkt termal ya da termokimyasal işlevlerle suyun ayrıştırılması teknolojileri geliştirilmiştir. Likit ya da hibrid biçiminde hidrojenle çalışan termik motorlu araçlarda piyasaya çıkarılmış bulunmaktadır. Uçakların gaz türbinlerinde de yakıt olarak kullanılabilen hidrojen, elektrik santralleri ve endüstri işletmelerinden konutlara dek bir çok yerde çevreyi kirletmeyen temiz enerji olarak değerlendirilecektir.

Elektrik üretimi, için ısı elektrik panellerine dayalı 250 MW lık santral projesine girilirken ısı elektrik bataryalardan sağlanan elektrik motoruyla devitilen ilk pervaneli güneş uçağında yapılarak Fransa ve İngiltere arasında Manş denizini aşmıştır.

10 MW'a kadar güçlerde yalnız güneş enerjisi ile çalışan termik santrallerinin yapılmış olmasının yanında, 800 MW lık güçlere 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, ocaklarda kullanılmak üzere havanın ön ısıtması, besleme suyu ısıtması ve hava ön ısıtması kombinasyonu gibi yollarla büyük santrallerin termodinamik çevrime güneş enerjisini sokmak olanaklıdır.

Yeryüzü güneş santrallerinden başka uzay uydusu tipinde ve dünya bağıntılı jeosenkroniz güneş santrali projelenip geliştirilmesine çalışılmaktadır.

Yeryüzünden 36.000 km uzaklıkta ve 10.000 MW güçlü bir uzay santralinden üretilen elektrik enerjisi, satralin 1 km çaplı anteninden mikrodalga ışınımı biçiminde iletilecek, dünyadaki 7 km çaplı bir antende bu enerjiyi doğru akım biçiminde ve % 55-75 tesirlikle alabilecektir. Amerika nın "Apollo" uzay programı ve uzay mekiği çalışmaları bu projeyi kapsamaktadır.

### 2.2.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi

Elektrik enerjisinin konvansiyonel ve nükleer yolla üretimine alternatif olarak güneş enerjisinden yararlanılarak elde edilmesi konusundaki çalışmalar bir çok ülkede hızla sürdürülmektedir.

Ülkeler kendi ekonomik ve coğrafi şartlarında güneş enerjisini bu amaçla kullanma maliyetini, konvansiyonel ve nükleer kaynaklarla ne ölçüde rekabet edebileceğini ve fizibilitesini araştırmaktadırlar.

Bazı ülkeler bu amaçla kendi öz kaynaklarını zorlarken öte yandan büyük finans kuruluşları ve uluslararası organizasyonların mali destekleriyle araştırmalarına hız vermekte ve yeni sistemler geliştirmektedirler. Uluslar arasındaki bilimsel teknoloji transfer anlaşması gereği Almanya, İspanya, Yunanistan ve Sicilya’da güneş enerjisi elektrik santralleri kurulmuştur. Bunlar küçük güçlerde araştırma-geliştirme amacına yönelik çalışmalardır. Güneş radyasyonu değerleri açısından ekonomik ve fizibl olan ülkemizde konu üzerinde ciddi araştırmalar yapılması ihtiyacı doğmuştur.

Türkiye’ de elektrik enerjisi üretimi % 6,9’u petrol ürünleri,% 29,3’ü linyit, % 2,7’si taş kömürü, % 18,3’ü doğalgaz, % 0,1’i jeotermal ve % 42,7’si hidrolik enerjiden faydalanılarak karşılanmaktadır.( 5-7 Haziran 1997 Çevre ve Enerji Kongresi ) 1 MW dan küçük 550 den fazla bu güç üniteleri ile 1500 MW güç üretilmektedir. Burada önemli olan nokta küçük diesel ünitelerle elektrik üretimi maliyetinin diğer konvansiyonel kaynaklarla yapılan üretim maliyetinin 3-5 katı olduğudur. Ayrıca ülkemizin dağlık bir yapıya sahip olması ve yerleşim merkezlerinin birbirinden uzak olması sebebiyle bu yerleşim mekezeleine elektrik enerjisi götürmek güçleşmektedir. Bu yerleşim merkezlerinin yaklaşık olarak %75’i halen karanlıktadır. TEK üretiminin ancak % 3’ü bu bölgelerde tüketilebilmektedir. Bu bölgelerin enterkonekte sisteme bağlanma maliyetlerinin (TL/kWh) çok yüksek olması ve üretilen enerjinin bir bölümünün iletim ve dağıtımla tüketildiği göz önüne alındığında bölgesel ve bağımsız olarak çalışacak küçük güneş enerjisi elektrik santrallerinin önemi belirginleşecektir

Türkiye’nin gizli enerjisi; gizil gücü ilk kez 1970 yılında, bir bilimsel araştırma kapsamında hesaplanmıştır. Saptanan olgulara göre, Türkiye’nin yıllık güneşlenme süresi 2608,8 saat olup maximum değer 361,8 saat ile temmuz ayında minimum değer 97.8 saatle aralık ayında görülmektedir.

Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölgeyi 3015,8 saat ile Güneydoğu Anadolu kapsarken, en düşük değeri de yılda 1965,9 saat ile Karadeniz Bölgesi göstermiştir.

Güneş radyasyon yoğunluğuna gelince Türkiye ortalaması olarak yıllık değere 503.13 Ly/gün (cal/cm<sup>2</sup>xgün) kadardır.En yüksek değer 503.13 Ly/gün ile temmuz ayında en düşük değer de 132.04 Ly/gün ile yine aralık ayında saptanmıştır.Güneydoğu Anadolu Bölgesi için yıllık ortalama radyasyon yoğunluğu 341.23 Ly/gün düzeyinde iken, bu değer Karadeniz Bölgesinde 246.55 Ly/gün düzeyinde saptanmıştır.

Yapılan değerlendirme sonuçları temel alınarak Türkiye'nin bütün yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi kuramsal biçimde hesaplanmış ve  $1.2 \times 10^{11}$  TET (120 Milyar ton) taşkömürü eşdeğeri bulunmuştur. Bir varsayım olarak, bu enerjinin binde birinin % 30 tesirlikle toplanması koşulunda, yılda kullanılacak enerji miktarı  $36 \times 10^6$  TET (36 milyon ton) eşdeğer taşkömürü ya da 23 milyon ton eşdeğer petrol olarak saptanmıştır.

Bugün Türkiye'nin yerli mühendislik gücü ve ulusal teknolojisinden yararlanılarak önemli güneş uygulamalarının gerçekleştirilmesi olanaklı ise de, araştırma-geliştirme ödeneklerinin ülkemizdeki brüt ulusal kazanç içindeki payı çok düşük olduğundan Türkiye, güneş enerjisi uygulamaları içinde gelişmiş ülkelere pazar olmayı bekler durumdadır. Oysa, yerli güneş enerji teknolojisinin geliştirilmesi ve Ortadoğu ülkelerinden kazanç sağlanması olanaklıdır.

Türkiye'de ulusal enerji teknolojisinin ve güneş enerjisi teknolojisinin ileri boyutta oluşturulması, enerji sektörünün planlama kapsamında yöneltmesi ve geliştirilmesi için bazı yasal ve kurumsal düzenlemelere de gerek vardır. Türkiye'de planlı enerji politikası ilkesiyle 2000 yılı için yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından 20-30 MTEP ( 800-1200 PJ ) ısı enerjisi ile 15-20 TWh elektrik enerjisi hedef alınmalıdır. Bu hedef kapsamında, güneş enerjisinden en az 4-7 MTEP ( 160-280 PJ ) ısı enerjisi ve 2-3 TWh elektrik enerjisi üretim hedefleri seçilmelidir. ( 5-7 Haziran 1997 Çevre ve Enerji Kongresi )

### **3. GÜNEŞ PİLLERİ**

Güneş pilleri fotovoltaiik sistemin önemli güç toplama üniteleridir. Piller yarıiletkenlerden oluşmuşlardır, aynı şekilde diyotlar,transistörler ve entegre yapıları da aynıdır. Pratikte piller ünitelere ayrılmıştır. Piyasada çok değişik türde PV pilleri

vardır fakat daha fazla yüzdesi ise gelişme aşamaları için laboratuarlarda bulunmaktadır. Geliştirme aşamaları maksimum verimim en ucuz şekilde elde etmek üzerine yoğunlaşmıştır, ayrıca % 30 verim laboratuarlarda yakalanmıştır.

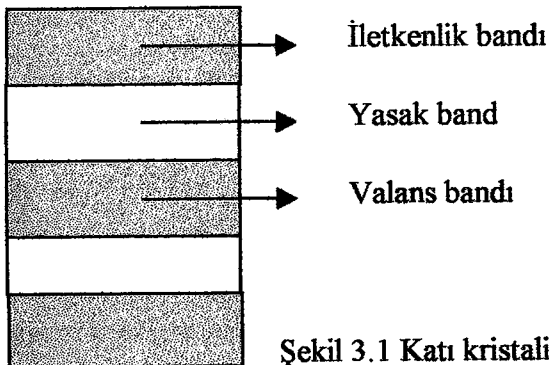
Slikon kristal pilleri pazarın büyük kısmını oluşturmaktadır. Maliyeti azaltmak amacıyla piller tek kristalli pahalı materyallerden ziyade çok kristalli materyalden yapılmaktadır. Piller uzun ömürlü ( 20 yıldan fazla ) ve çalışma verimleri % 18'lere yaklaşmaktadır. Düşük maliyetli slikon piller hesap makineleri gibi aletlerde kullanılmaktadır. Bu piller ince filmli piller olup genellikle Kadmiyumtellür'den oluşur. (Hill, 1981)

### 3.1 İletken, Yalıtkan ve Yarıiletkenler

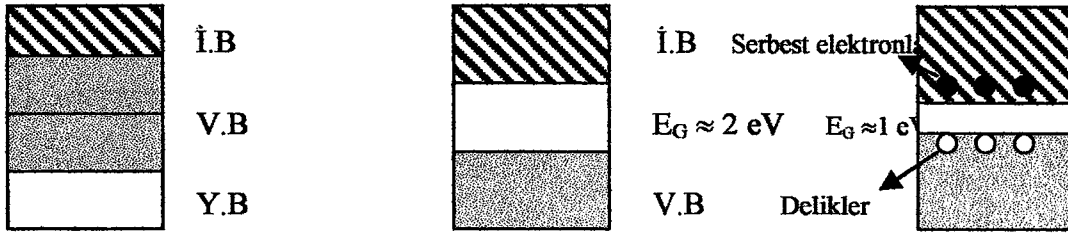
Katı maddeler elektriği iletme özelliklerine göre üç gruba ayrılır. Bunlar iletken, yalıtkan, ve yarıiletkenlerdir. Bu sınıflandırmayı özgül dirençlerine göre yaparsak; öz direnci  $10^2 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ 'den küçük olanlar iletken,  $10^{10} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ 'den büyük olanlar yalıtkan ve özgül dirençleri  $10^2$  ile  $10^2 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  arasında olan cisimler yarı iletken olarak tanımlanabilir.

Elektronlar, atomun enerji düzeyleri denen ve belirli enerji düzeyleri denen ve belirli enerji değerlerinde olan kararlı yörüngelerde bulunur. "Pauli Dışarılma İlkesi" nin bir sonucu olarak verilen enerji düzeyini yalnızca belli sayıdaki elektronlar doldurabilir. Bunun sonucu olarak da herhangi bir atomda elektronlar önce en düşük enerji seviyesini doldururlar.

Atomlarda, enerji bantlarını, enerji seviyelerini birbirini iterek genişlemesi sonucu oluştuğu kabul edilir. Aralarında elektron için yasak olan bantları ( yasak bantlar ) vardır. En dıştaki elektronların bulunduğu banda valans bandı, valans bandının hemen üstündeki enerji bandına iletkenlik bandı denir. (Şekil 3.1)



Şekil 3.1 Katı kristalin enerji-band diagramı



Şekil 3.2 İletken, yalıtkan ve yarıiletkenin enerji-band diagramı

Bir kristalin elektronları enerji seviyelerine, kuantum mekaniği kurallarına göre dağılır. Buna göre elektronlar, kristalin en alçak enerji seviyelerinden başlayarak, gittikçe yüksek enerji seviyelerini işgal ederek kristalin elektron kapasitesini dolduracaklardır. Mutlak sıfır sıcaklığında son elektronun yer aldığı en yüksek enerji seviyesine fermi enerjisi adı verilir.

Son yörüngesinde tek elektron bulunan ve elektriği iyi ileten metallerin yapıları nedeniyle valans ve iletkenlik bandları içiçe geçmiştir. Dolayısıyla valans bandındaki elektronlar, aynı zamanda iletkenlik bandı içinde de bulunurlar ve bir elektrik alan etkisiyle hareket etmeye hazırdırlar. Bu nedenle altın, gümüş, bakır v.s iyi iletkenlerdir.

Yalıtkan bir kristal geniş bir yasak band aralığına sahiptir. Valans bandı tamamen doludur ve iletkenlik bandı boştur. Valans bandındaki elektronların, iletkenlik bandına geçebilmeleri için 2 eV dan fazla enerjiye ihtiyaçları vardır. Bu nedenle iletkenlik bandına geçen elektronların sayısı çok azdır. Dolayısıyla bu tür maddeler elektriği çok kötü iletirler. Elmas yalıtkan cisimlere en iyi örnektir. ( $E_G$  yaklaşık 7eV )

Bir yarı iletken enerji-band modeli yalıtkaninkine benzer. Yalnız bunda yasak band aralığı daha da dardır. ( $E_G$  yaklaşık 1 eV ) Oda sıcaklığında kristal içindeki termal enerji nedeniyle birkaç elektron yasak bandı aşarak iletkenlik bandına yükselebilir. İletkenlik bandına yükselmiş olan elektronlar elektriksel iletkenliğe katılırlar. İletkenlik bandına geçen elektronların valans bandında bıraktığı boşluklar bu banttaki elektronların hareketine imkan verdiklerinden bunlar elektriksel iletkenliğe katılırlar. (Şekil 3.2)

Bir yarıiletkende yük taşıyıcılar metallerinkinden daha az olduğundan, metallerden daha az iletken fakat yalıtkanlardan daha iyi iletkenlerdir. Bir yarıiletken mutlak sıfır sıcaklığında iyi iletkenidir. Alçak sıcaklıktaki termal enerji elektronunun yasak bandı

aşabilmesi için yetersizdir. Aksine yeter derecede yüksek sıcaklıkta bazı elektronlar valans bandından, iletkenlik bandına geçebildiklerinden, yarıiletkenlerde iletkenlik sıcaklıkla artar. (Akpınar, 1979)

### 3.1.1 Yarıiletkenler

Yasak enerji bandı genişliği yaklaşık 1eV olan ve özgül dirençleri  $10^2 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  ile  $10^{10} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  arasında bulunan maddelere yarıiletken denilir. Burada yarıiletkenleri sınıflandırılmış, enerji band yapıları daha etraflıca incelenmiştir. Yarıiletken maddelere en iyi örnekler olarak germanyumu ve silisyumu verebiliriz. Yarıiletkenleri iki grupta inceleyebiliriz

#### 3.1.1.1 Has Yarıiletkenler

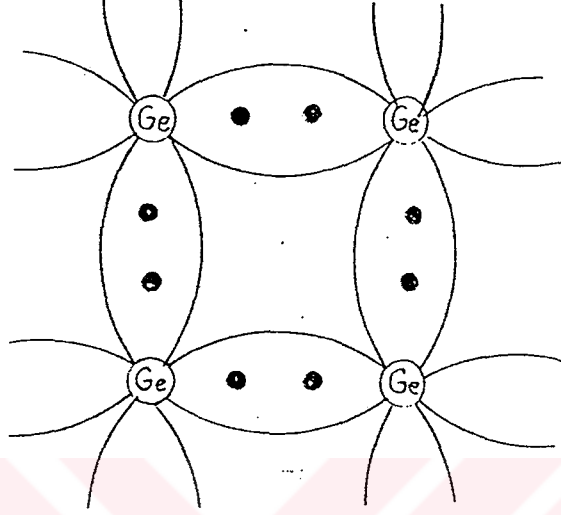
Has yarıiletkenler periodik sistemde 4.grupta yer alan yani son yörüngelerinde 4 elektronları bulunan (...s....p) katı elementleridir. Pratikte en önemli has yarıiletken malzemeler mutlak sıfır sıcaklığında Eg yasak enerji band genişlikleri sırasıyla 0,7858 eV ve 1,21 eV olan Germanyum (Z:32) ve silisyum (z:14) dür.

Sıcaklık arttırıldıkça, valans bandındaki valans elektronlarından bazıları, yasak band enerjisinden daha büyük bir ısı enerji kazanırlar ve iletim bandına geçerler. Bunlar artık serbest elektrondur ve dışarıdan uygulanan küçük bir alan etkisiyle bile hareket edebilirler. Valans bandından iletkenlik bandına geçen bir elektron, valans bandında bir boşluk bırakır. Bu boşluğun enerjisi elektronun enerjisinden daha küçüktür. Çok saf yarıiletkenlerde serbest elektronların yoğunluğu, pozitif yüklü boşlukların yoğunluğuna eşittir.

Has yarıiletkenlere iyi bir örnek olan Germanyum ve Silisyum kristal yapısını incelersek her köşesinde bir atom bulunan düzgün dört yüzlü şeklindeki bir hücrenin üç doğrultu boyunca düzgün bir şekilde tekrarlanmasıyla meydana geldiğini anlarız. (Şekil 3.3)

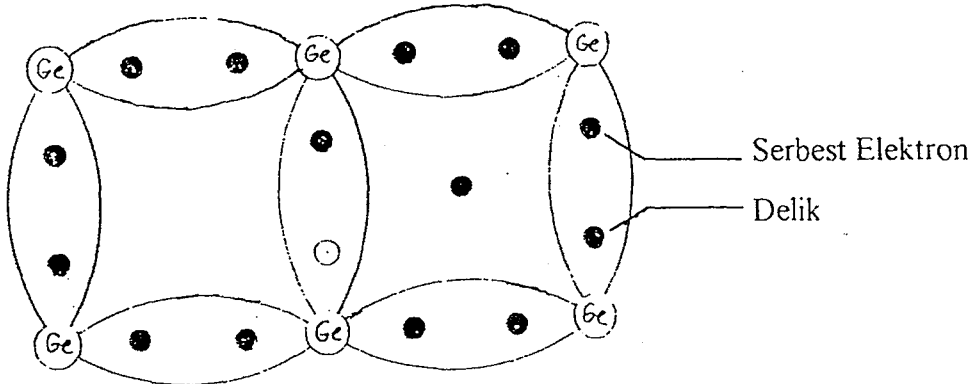
Germanyum atom yapısında, çekirdek etrafındaki kabuklara dağılmış 32 elektron vardır. Germanyum kristalinde her atomun 4 valans elektronu vardır. Atom (+4) değerliliklidir. Bir germanyum atomunda her valans elektronunun en yakın en aykın dört komşu germanyum atomu ile ortaklaşa kullanılması sonucu olarak komşu atomlar arasında bağlayıcı kuvvetler oluşur. Bunlara elektron çifti yada kovalent bağ

denir. Çok düşük sıcaklıklarda kristal içinde elektrik iletimi için serbest taşıyıcılar bulunmadığı için saf kristal yalıtkan özelliği gösterir. Oda sıcaklığında kristalin kazandığı ısı enerjisi nedeniyle bazı kovalent bağlar çözülecek ve iletim mümkün olacaktır, ayrıca çeşitli kusurlar nedeniyle kopmuş elektronlarda iletim katkısında bulunacaklardır. (Akpınar, 1979)

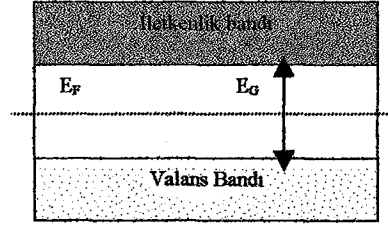


Şekil 3.3 Germanyumun kristal yapısı

Oda sıcaklığında böyle bir bağı çözmek için gereken enerji germanyum için 0,785 eV, silisyum için 1,21 eV kadardır. Silisyum kristalinde atomlar birbirleriyle kovalent bağ yaparak birarada tutulurlar yani iki Si atomu arasındaki iki elektron ortaklaşa kullanılır. Bu elektronlardan birisinin iletim bandına geçmesiyle oluşan boşluk, valans bandı içinde bir valans elektronu ile doldurabilir. Bu defa elektronun geldiği yerde boşluk oluşur.



Şekil 3.4 Bir kovalent bağı çözülmüş olan germanyum kristali



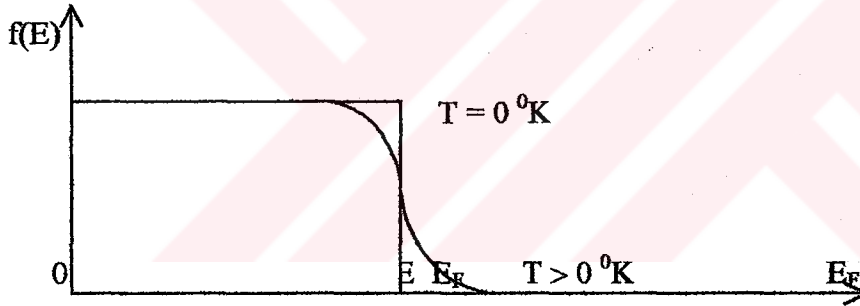
Şekil 3.5 Bir has yarıiletkenin enerji-band diagramı

Bir katı içinde bir E enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme ihtimali Fermi-Dirac dağılım fonksiyonuyla verilir. Burada k, Boltzman sabitidir.

$$k = 1,38 \times 10^{-16} \text{ erg / derece}$$

$$f(E) = 1 / (1 + (E - E_F) / kT)$$

Bu fonksiyon Fermi Seviyesi denilen bir ( $E_F$ ) parametresi ihtiva eder. Fermi enerji düzeyi bir katkıda  $0^\circ\text{K}$  sıcaklıkta elektronların bulunabildiği en yüksek enerji düzeyi olarak tanımlanmıştır.  $0^\circ\text{K}$  sıcaklıkta Fermi enerji düzeyinden ( $E_F$ ) büyük enerji durumunda bir elektronun bulunma olasılığı sıfırdır.



Şekil3.6 Fermi-Dirac Dağılım Fonksiyonu

Şekil 3.6'da verildiği gibi Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ( $E_F$ ) fermi seviyesinin etrafında simetriktir. Eğer iletkenlik bandındaki elektronların sayısı valans bandındaki boşlukların sayısına eşit ise Fermi seviyesi yasak bandın ortasında olmalıdır. Has bir yarı iletken halinde durum böyledir. (Şekil 3.5)

### 3.1.1.2 Katkılı Yarıiletkenler

Has yarıiletkenlerin iletkenliğini arttırmak için yarıiletken kristalini oluşturan atomlardan bir kısmının yerine farklı uygun atomların yerleştirilmesi işlemine katkılama denir. Yarıiletken kristale katkılanan elementler ya elektron verici (DONÖR) yada elektron kabul edici (AKSEPTÖR) olarak işlev yaparlar.

### 3.1.1.2.1 N Tipi Yarıiletkenler

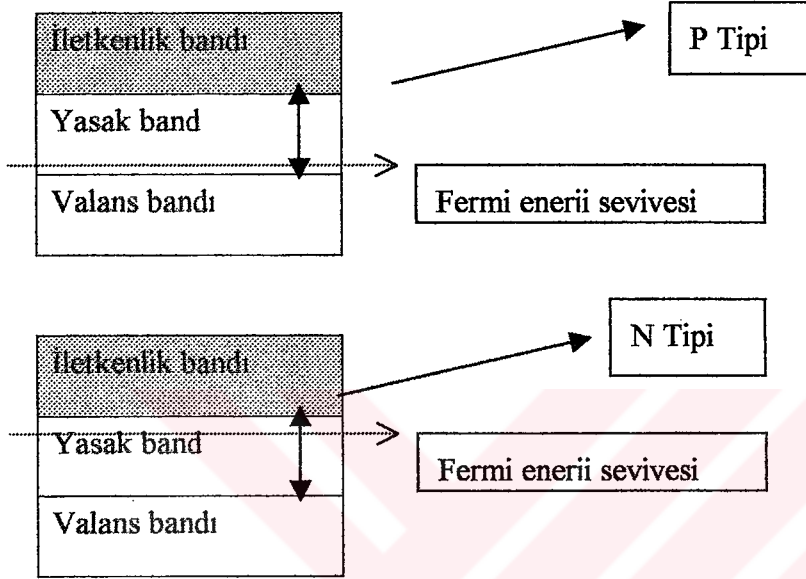
Donör katkıli yarıiletkenlerde katkı mazemesi olarak beşinci grup elementlerinden olan fosfor,arsenik ve antimuan kullanılır.Bu elementlerin beş valans elektronlarından dört tanesi silisyum atomlarıyla kovalent bağ yaparlar, fakat beşinci elektron çok zayıf elektrostatik kuvvetlerle katkı atomuna bağlıdır. Oldukça küçük bir enerji ile (fosfor için 0,044 eV) katkı atomundan kopabilir ve serbest duruma geçer,yani iletim bandına çıkmış olur.Bu enerji katkı atomunun iyonlaşma enerjisi olarak da bilinir. Bu duruma göre donör enerji düzeyi, yasak enerji aralığında ve iyonlaşma enerjisi kadar iletim bandının altındadır. Bir has yarıiletkene donör katkılanmak suretiyle elektron delik çiftinin oluşması için gerekli olan enerjiden (Si için 1.1 eV) çok daha az enerji vererek iletim bandındaki elektron sayısını arttırmış oluyoruz. Bununla birlikte donörün iyonlaşması sonucu iletim bandındaki elektron sayısını arttırmış oluyoruz. Bununla birlikte donörün iyonlaşması sonucu iletim bandına çıkan elektron karşılığında valans bandına boşluk oluşturmaktadır. Oda sıcaklığında bütün donörlerin iyonlaştığını kabul edersek donör yoğunluğuna bağlı olarak yarıiletken materyelde elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan büyük olacaktır. Bu durumda elektriksel iletkenliğe elektronlardan katkının daha fazla olacağı açıktır. Bu tür yarıiletkenlere N tipi yarıiletken denir. N tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunlukla olduğu için elektronlara çoğunluk taşıyıcıları,(Nn), boşluklar azınlıkta olduğu için boşluklara azınlık taşıyıcıları (Pn) denir. (Markwatt,1994) (Şekil 3.7)

### 3.1.1.2.2 P tipi Yarıiletkenler

Bir saf yarıiletken malzemeye periyodik sistemde 3.grupta (.....) bulunan bor ,galyum,indiyum gibi elementlerin eser miktarlarının katılmasıyla oluşan yarıiletkenlere P tipi yarıiletkenler denir.

Üç valans elektronuna sahip olan bu elementlerden herhangi biri,silisyum son yörüngesindeki dört elektronu ile kovalent bağ yapabilmesi için bir elektrona ihtiyaç duyarlar.Elektrik alan uygulamasıyla başka bir kopan elektron bu boşluğu doldurur, fakat onun yeri boş kalır.Bu olay böylece devam eder.Üçüncü gruptaki elemanlar katkılarındaki malzemenin atomlarından elektron aldıkları için akseptör olarak isimlendirilirler ve negatif yüklü iyon durumundadırlar.Valans bandında oluşan boşluk serbestçe hareket eder.Bu tür yarıiletkenlerde valans bandındaki boşlukların sayısı, iletkenlik bandındaki boşlukların sayısı iletkenlik bandındaki elektronların

sayısından fazla olduğu için P tipi yarıiletken olarak isimlendirilirler. Akseptörlerin valans bandından bir elektron kopararak iyonlaşmaları için gerekli enerji, silisyum materyalinde bor için 0,045 eV'dur. buna göre akseptörlerin Fermi enerji düzeyleri, yasak enerji bandı aralığında ve valans bandının hemen üstündedir. P tipi yarıiletkende delikler (Pp) yoğunluk taşıyıcıları, elektronlar (Np) ise azınlık taşıyıcılarıdır. (Şekil 3.7)

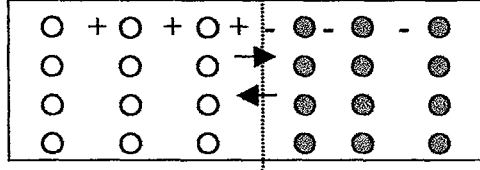


Şekil 3.7 P tipi ve N tipi yarıiletkenlerin enerji-band diagramları

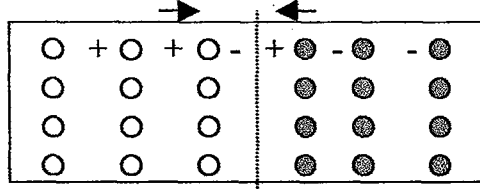
### 3.1.1.3 Yarıiletkenin Elektriksel Alanları

Güneş pilleri çalışma esası yarıiletken elektriksel alanlarıdır. Şekil 3.8'de çeşitli alanların band diagramını göstermektedir.

Bir yarıiletken parçasının bir bölgesi p tipi, bir bölgesi n tipi olacak şekilde katılır. p tipi bölgede çok sayıda bulunan elektronlar p tipi bölgeye doğru yayılmaya başlarlar. Hareket edebilen taneciklerin yüksek yoğunlukta buldukları yerden alçak yoğunlukta yerlere doğru bu şekilde yayılmalarına difüzyon denir. Bu yük hareketi Pn ve Pp difüzyon potansiyelleri ile gösterilebilir. Difüzyon başladıktan sonra p bölgesinin n bölgesi ile birleştiği bölgede negatif yük fazlalığı, n bölgesinin p bölgesine yakın kısımlarında ise pozitif yük fazlalığı oluşturur. Bunun sonucunda bu bölgelerin temas kısmına yakın yerlerde bir elektrik alanı meydana getirir. Alan difüzyon ile doğru orantılı olarak artar. Bir süre sonra alan tarafından elektron ve delik difüzyonu engellenir. Denge kurulduktan sonra p-n jonksiyonunun yapısı tamamlanmış olur. Bir p-n jonksiyonunda herhangi bir dış elektrik alan yardımı olmadan sürekli bir mikroskobik elektrik alanı mevcuttur.



Deliklerin difüzyon potansiyeli ( $P_p$ ) (d) ( $P_n$ ) Elektronların difüzyon potansiyeli



Denge durumunda  $P_p + P_n = V$  Elektriksel potansiyel  $V$

Şekil 3.8 Bir p-n jonksiyonunun kavramsal gösterimi

Bir p-n jonksiyonunun uçları dışarıdan kısa devre edilirse, denge durumunda akan akım sıfırdır. Bir fotonun p-n jonksiyonuna p tarafından girdiğini varsayalım.

Eğer fotonun enerjisi, malzemelerin band aralığından büyükse malzeme tarafından emilecektir. Bu durumda bir delik –elektron çifti oluşturacak ve elektron sağ taraftaki daha düşük enerji seviyeli bölgeye doğru hareket edecektir. Benzer şekilde yeterli enerjiye sahip bir foton n tipi malzemeye girecek olursa yaratılacak olan delik sola doğru hareket edecektir. Bu yük ayrılma mekanizması fotoelektrik olayının temelini oluşturur. Bu noktada önemli bir durum belirtilmelidir, Elektron-delik çifti oluşmaları ile elektriksel alandan ayrılmaları arasında geçen sürede tekrar birleşme fırsatı bulamamalıdır. Yani p tipi bölgedeki elektron ve n tipi bölgedeki delik, elektriksel alana ulaşabilmek için yeterli süreye sahip olmalıdır. Bu süre, önemli bir parametre olan elektron taşıyıcısı ömrüdür. Daha uzun bir elektron taşıyıcısı ömrü, delik-elektron çiftlerinin elektriksel alandan ayrılma olasılığını büyütür.

Oluşacak akımın şiddeti elektriksel alana birim zamanda gelen foton sayısı (dolayısıyla ışık şiddeti) ile orantılıdır.

Gelen ışığın foton enerjisi frekansa ve dalga boyuna,

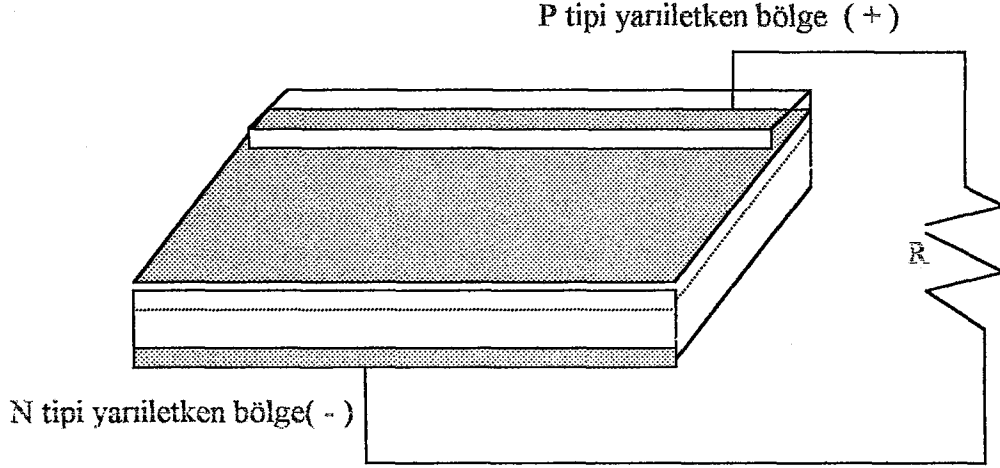
$$E = h \times f = h \times c / \lambda \quad (3.5.1)$$

Bağlantıları ile bağlı olduğuna göre, elektron-delik çiftleri doğabilmesi için bu enerjinin yarıiletkenin  $E_g$  enerjisinden daha büyük olması gereklidir. Örneğin silisyumda, oda sıcaklığında  $E_g=1.1\text{eV}$  olduğuna göre  $E \geq E_g$  şartını sağlayan  $\lambda$

değerleri hesaplanırsa;

$$\lambda \geq h \cdot c/E_g$$

$$\lambda \geq 1.128 \mu A^\circ \text{ bulunur.}$$



Şekil 3.10 PV etkiden yararlanarak elektrik enerjisi üretiminin şematik gösterimi

Görünen ışığın sınırları  $\lambda$  (kırmızı) =8000 A° ve  $\lambda$  (mor) =4000 A° olduğuna göre görünen ışık spektrumunun tamamı ile mor ötesi ışınlar ve kızıl ötesi ışınların bir bölümü ,fotovoltaik olaya katkıda bulunabilir.

Elemanın üzerine birçok foton düştüğü kabul edilirse yukarıda anlatılan işlem defalarca tekrarlanacak ve p bölgesinde pozitif yüklerin (delikler) , n bölgesinde de negatif yüklerin (elektronlar) birikmesine neden olacaktır.Bunun sonucunda daha önce anlatılan jonksiyonun oluşumu esnasında meydana gelen elektrik alanına (band aralığı) ters yönde bir alan meydana gelecek ve fotonlar düşmeye devam ettikçe kuvvetlenerek delik-elektron çiftlerini ayrı tutan elektrik alanı ortadan kaldıracaktır. (Şekil 3.10)

Artık elemanın uçlarında açık devre gerilimi belirmiştir.Bu gerilim doğrudan yarıiletken malzemenin band aralığı ile doğru orantılıdır.Yani büyük açık devre gerilimi için büyük band aralığına sahip yarıiletken malzeme kullanılması gerekmektedir.

Güneş pili artık çalışacak duruma gelmiştir.p ve n yüzeylerine elektron yerleştirilerek dışarı alınan gerilim bir elektrik devresine uygulanabilir.

Aşağıda sıradan bir güneş pilinin yapısı kısaca tanıtılmıştır. n tipi silisyum parçanın

etrafına yüksek sıcaklıktaki bir fırında difüzyon yoluyla birkaç mikron kalınlığında bir p tipi kabuk oluşturulmuştur. Daha sonra p tipi kabuk, n tipi parçanın etrafından üst kısım hariç temizlenmiştir. son adım olarak elemana bir çift elektrod yerleştirilerek uçları dışarı alınmıştır. (Markwatt, 1994)

Bir güneş pilinde yalnızca geçiş bölgesi içinde ve bu bölgenin yakın civarında doğan elektron ve delikler fotovoltatik akımı oluşturduklarından, ışığın zayıflamadan bu bölgeye erişebilmesi için jonksiyonun ışık gelen yüzeye çok yakın yapılması gerekir. Ayrıca ışık alan yüzeyin elektriksel bağlantısı ışığı kesmeyecek şekilde yapılmalıdır.



#### 4. GÜNEŞ PİLLERİNİN TASARIMI

Bir güneş pilinin temel fonksiyonu elektromagnetik enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesidir. Çevrim veriminin artması güneş pillinin kullanım alanını genişletir. Eşit çalışma şartları altında maksimum verim:

$$\eta_{\max} = \text{çıkış gücü} / \text{giriş gücü} = k \cdot 1 \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} / \text{giriş gücü} \quad (4.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $V_{oc}$  açık devre gerilimi,  $I_{sc}$  kısa devre akımıdır.  $k_1$  katsayısı 0.25 ile 1 arasında olup güç üreten sisteme bağlıdır. Burada  $k_1$  açık devre gerilimi ve kısa devre akımının en büyük değerleri için tanımlanmaktadır.

Daha önce açıklandığı gibi, malzemenin band aralığı  $E_g$ , pilin açık devre gerilimi  $V_{oc}$  ile doğru orantılıdır. Yani yüksek  $V_{oc}$  değerleri için büyük  $E_g$  gerekmektedir. Kısa devre akımı  $I_{sc}$  ise pil yüzeyine gelen radyasyonla yaratılan delik –elektron çifti sayısı ile orantılıdır. Egden daha büyük enerjiye sahip olan bu fotonlar delik-elektron çiftleri yaratırlar. Radyasyon kaynağı olarak güneş kullanıldığı zaman küçük  $E_g$  ve büyük  $I_{sc}$  elde edilir.

Çıkış gücü

$$P_c = k_1 \cdot V_{oc} \cdot E_g \cdot I_{sc} \cdot (1 / E_g) \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Bazı özel  $E_g$  değerleri,  $P_c$  gücünü maksimum değere ulaştırır.

Daha önce açıklandığı gibi, emilen fotonun oluşturduğu azınlık taşıyıcısı, jonksiyon tarafından toplanmadan önce yeniden birleşmemelidir. Yüzey civarındaki bir taşıyıcının yeniden birleşme olasılığı, malzeme içindeki taşıyıcıdan çoğu kez fazladır. Bu da demektir ki, jonksiyon arkasında yaratılan taşıyıcıların jonksiyona doğru yayılma olasılığı, jonksiyonun önünde yaratılan taşıyıcılardan daha fazla olacaktır. Fotonların emildiği ve delik-elektron çiftlerinin yaratıldığı bölge, pili oluşturmakta kullanılan malzemelerin emme spektrumunu tanımlar.

Bu spektrumlara göre fotonların birçoğu ya kısa bir yol aldıktan sonra ( $10^{-4}$  ile  $10^{-8}$  cm ) emilecek ya da hiç emilmeyecektir. Bu nedenle, emilme olayının jonksiyonun hemen arkasında olmasını sağlamak için, jonksiyonun söz konusu yüzeye mümkün yakın yerleştirilmesi arzu edilir. Bununla birlikte, jonksiyon yüzeye yaklaştıkça bir diğer etki önemli olmaya başlar. Pil içindeki akımın hareket yönü, n bölgesinin alt yüzeyine dik, p bölgesinin yüzeyine ise paraleldir. Jonksiyon, söz konusu yüzeye

yaklaştırıldığında, p bölgesindeki iletken kısmın kesidi azalmakta, olayısıyla da elektriksel direnci artmaktadır. Bu nedenle, jonksiyon yüzeye yaklaştırıldıkça jonksiyonun biriktirme etkinliği her ne kadar artsa da, bu artış p bölgesinin yüksek direnci nedeniyle oluşan joule kayıpları tarafından engellenmektedir. Bu, güneş pillerinin tasarlanmasında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.

Pil içinde üretilen akım, yaratılan delik-elektron çifti sayısına doğrudan bağlı olduğundan gelen fotonların mümkün olduğu kadar azının yüzeyden yansması istenir. Güneş pili malzemelerinin yüksek kırılma indislerine sahip olmaları (  $n \approx 3...4$  ), yansıtma problemini de beraberinde getirmektedir. Örneğin birim kırılma indisine sahip olan bir ortamda ( havada veya boşlukta ) bulunan güneş piline güneş radyasyonu gelmekte ise, R yansıtması

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = \frac{3^2}{5^2} = \%36 \quad (4.3)$$

şeklinde olur. Mevcut enerjideki bu büyük kayıplar, uygun yansıtma tabakaları konularak azaltılabilir. (Stone, 1993)

#### 4.1 Güneş Pili Modelinin Oluşturulması

Bu bölümde, bir p-n elektriksel alanı için akım, gerilim ifadeleri ölçülebilen parametreler cinsinden oluşturulacaktır. Gerekli ifadeler elde edildikten sonra güneş pilinin modeli oluşturulmaya çalışılacak ve verimi artıran malzeme parametreleri ele alınacaktır.

İncelenecek elektriksel alan modeli, aşağıdaki kabullerle tanımlanmaktadır.

Elektriksel alanın kalınlığı, p veya n bölgelerinin kalınlığı ile elektron taşıyıcılarının yayılma uzunluklarına göre küçüktür.

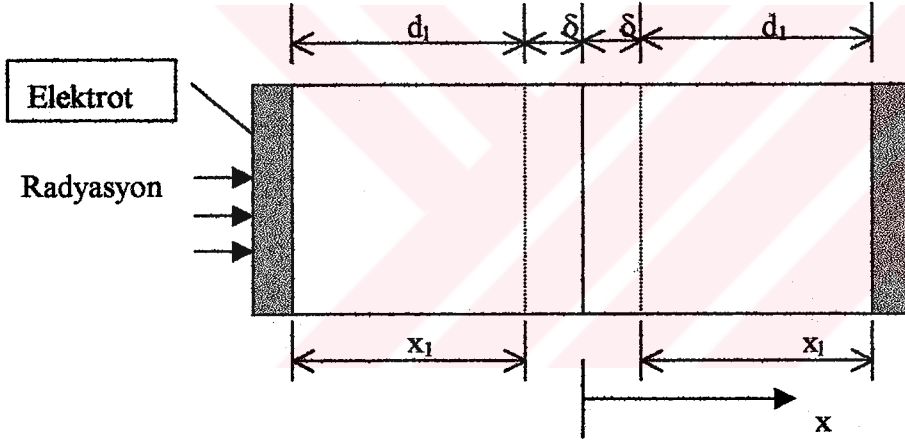
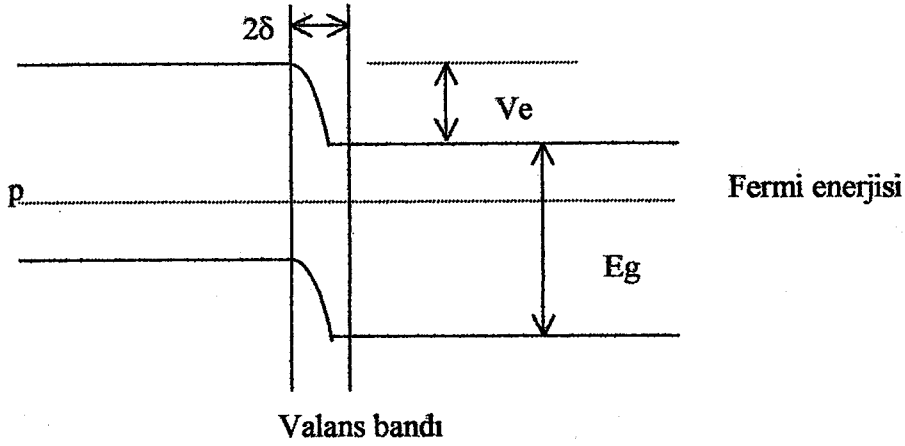
Taşıyıcı yoğunlukları, Boltzman istatistiklerinin kullanılabilceği ölçüde küçüktür.

Elektriksel alan,  $x = 0$ 'da genişliği  $2\delta_1$  olan bölge olarak gösterilir. Sınırın farklı kenarlarında toplanan taşıyıcı sayısı,

$$P_n = P_p \cdot \exp(-e \cdot V_e) / k \cdot T \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $p_n$  ve  $p_p$ , n ve p bölgesindeki deliklerin denge durumundaki değerleridir.  $V_e$ , geçiş bölgesi boyunca, elektrostatik potansiyel farkı

göstermektedir.  $e$ ,  $k$ ,  $T$  ise elektron yükü, Boltzman sabiti ve sıcaklıktır. (Şekil 4.1)



Şekil 4.1 p-n jonksiyon modeli

Jonksiyon boyunca bir  $V$  gerilimi, ya bir dış kaynak kullanarak veya radyasyon aracılığıyla sınır civarındaki dengesiz yüklerin üretimi şeklinde elde edilirse, yan denge denklemi:

$$P_n(0) = P_p \cdot \exp[-e \cdot (V_e - V)] / k \cdot T \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu denlemlerden;

$$P_n(0) = P_p \cdot \exp[-e \cdot V_e] / k \cdot T \quad (4.6)$$

elde edilir. Benzer bağıntı, p malzemesindeki elektronlar içinde verilebilir. n

malzemesindeki deliklerin ısı üretim oranı,

$$g_p = P_n / \tau_p \quad (4.7)$$

denklemini ile ve dengesiz koşullarda yeniden birleşme oranı da;

$$r_p = P / \tau_p \quad (4.8)$$

denklemini ile verilebilir.  $\tau_p$  delik ömür süresini,  $p$  ise dengesiz delik sayısını göstermektedir.

Işık hüzmesinin emilmesi sebebiyle de delikler üretiliyorsa net üretim  $G_p$ ;

$$G_p = g_p + g(x) - P / \tau_p \text{ dir.} \quad (4.9)$$

$$g_p + g(x) - P / \tau_p = 1 / e \cdot \partial P / \partial x \quad (4.10)$$

$I_p$  yayılma akımı olup,

$$I_p = -e \cdot D_p \cdot \partial P / \partial x \quad (4.11)$$

şeklindedir. Denkleminde  $D_p$  yayılma sabitidir. Denklemlerden;

$$g_p + g(x) - P / \tau_p + D_p \cdot \partial^2 P / \partial x^2 = 0 \quad (4.12)$$

elde edilir.

$P$  malzemesindeki elektronları tanımlatan denklemlerden biri olan yukarıdaki denklem aşağıdaki sınır değerler kullanılarak çözülebilen genel bir diferansiyel denklemdir.

$$X_r = 0' \text{ da } p = p_p \cdot \exp [ e \cdot V / k \cdot T ] \quad (4.13)$$

$$X_r = d_r' \text{ da } \partial P / \partial x = 0 \quad (4.14)$$

$d_r \rightarrow \infty'$  da  $P \rightarrow P_n$  için tüm  $x_r$  değerleri ile ifade edilir.

Yukarıdaki sınır değerler için çözümü;

$$I = e \cdot g_o \cdot L \cdot -e \cdot g \cdot L [ \exp [ e \cdot V / k \cdot T ] - 1 ] \quad (4.15)$$

şeklindedir.

Yukarıdaki denklemde ilk terim, fotonlar tarafından üretilen akımı, emilen fotonlar

cinsinden belirler.

İkinci terim, elektriksel alan uçlarına bir  $V$  potansiyel farkı uygulandığında ideal bir p-n jonksiyon diyodundaki akım ifadesini vermektedir. Terimdeki  $e \cdot g \cdot L$  katsayısı, ısı olarak üretilen taşıyıcıların oluşturduğu  $I_0$  ters doyma akım büyüklüğünü, sıcaklık ve jonksiyona ulaşma olasılığı cinsinden göstermektedir. (Şekil 4.2)

$V = 0$  ise önceki denklem yardımıyla kısa devre akımı,

$$I_{sc} = e \cdot g_0 \cdot L \quad (4.16)$$

Denklem de  $V$  yalnız bırakılırsa;

$$V = [k \cdot T / e] \ln [1 + (e \cdot g_0 \cdot L - I) / e \cdot g_0 \cdot L^1] \quad (4.17)$$

ve eğer  $I = 0$  ise, açık devre gerilimi,

$$V_{oc} = [k \cdot T / e] \ln [1 + (e \cdot g_0 \cdot L) / e \cdot g_0 \cdot L^1] \quad (4.18)$$

olarak elde edilir.

Pile dışarıdan bağlanmış bir  $R$  direnci üzerinde bir güç harcanmakta ise bu gücün değeri,

$$P = I \cdot V = I (k \cdot T / e) \ln [1 + (e \cdot g_0 \cdot L) / e \cdot g_0 \cdot L^1] \quad (4.19)$$

$dP / dI = 0$  yapılarak, maksimum çıkış gücü için akım değeri,

$$I_m = \{ e^2 \cdot V_m \cdot g \cdot L^1 [1 + (g_0 \cdot L) / (g \cdot L^1)] / (k \cdot T) \} / \{ 1 + e \cdot V_m / (k \cdot T) \} \quad (4.20)$$

olarak ve maksimum güç için  $V_m$  gerilimi de;

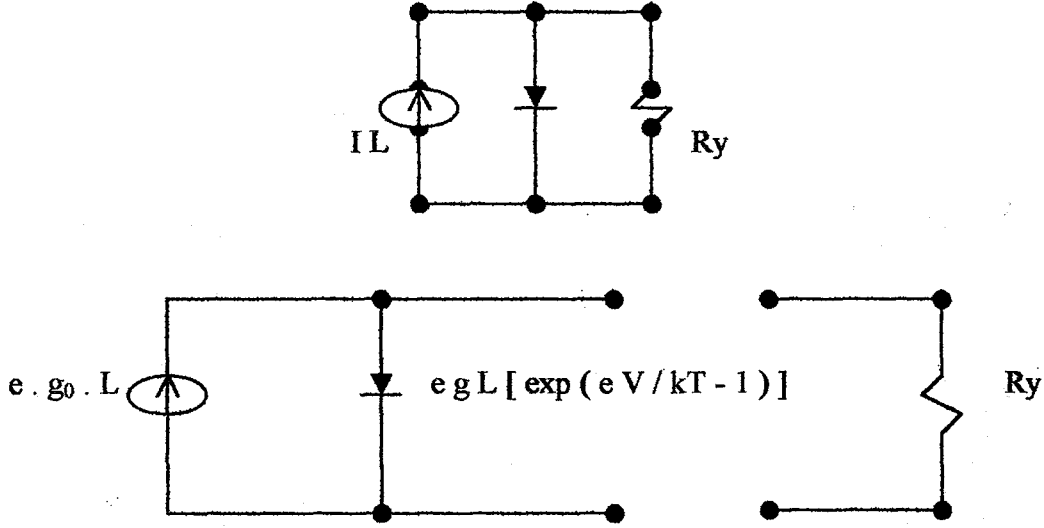
$$\exp [e \cdot V_m / k \cdot T] = \{ 1 + (g_0 \cdot L) / (g \cdot L^1) \} / \{ 1 + e \cdot V_m / (k \cdot T) \} \quad (4.21)$$

şeklinde ifade edilir.

Buradan da maksimum çıkış gücü  $P_m$ ,

$$P_m = \{ e^2 \cdot V_m \cdot g \cdot L^1 [1 + (g_0 \cdot L) / (g \cdot L^1)] / (k \cdot T) \} / \{ 1 + e \cdot V_m / (k \cdot T) \} V_m \quad (4.22)$$

şeklinde bulunur.



Şekil 4.2 Fotovoltaik güneş pilinin eşdeğer devresi

Yukarıdaki denklemlerden , verilen bir pil için  $g \cdot L^1$  ve  $g_0 \cdot L$  büyüklüklerinin deneysel olarak belirlenmesi açısından faydalıdır.

Yukarıdaki denklem kullanılarak ortalama enerjisi  $E_{\alpha V}$  olan  $N_{ph}$  adet foton tarafından uyarılan bir PV p-n jonksiyon pilinin maksimum enerji dönüştürme verimi,

$$\eta_{max} = [Q \cdot (1 - r) \cdot (1 - e^{-\alpha t}) \cdot \lambda \cdot V_m^2 \cdot e \cdot \eta_{ph} (E_G)] / [(1 + \lambda \cdot V_m) \cdot N_{ph} \cdot E_{\alpha V}] \quad (4.23)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

$$Q \cdot (1 - r) \cdot (1 - e^{-\alpha t}) \cdot e \cdot \eta_{ph} (E_G) = I_{sc} = e \cdot g_0 \cdot L \quad (4.24)$$

$$\exp (\lambda - V_m) = I_{sc} / I_0 + 1 \quad (4.25)$$

$$\lambda = e / k - T \quad (4.26)$$

olup,

$Q$  : Elektriksel alan biriktirme etkinliği,

$r$  : Pilin optik yansıtma katsayısı,

$\alpha$ : Emme katsayısını,

$I$ : Pil kalınlığını,

$e^{-\alpha d}$ : İletilen radyasyon miktarını ve

$\eta_{ph} ( E_G )$ : Elektriksel alanın birim yüzeyinden bir saniyede geçen foton sayısını ( yarı iletken içinde delik-elektron çifti yaratmaya yetecek enerjiye sahip olan fotonlar ) göstermektedir.

Q ve  $I_0$  dışındaki bütün terimler pil malzemesi ve radyasyon kaynağının özellikleri cinsinden ifade edilmiştir. Denklemden jonksiyon oluşumuna katkıda bulunan tüm harici parametreler, Q ve  $I_0$ ' in içinde toplanmıştır. (Van Gijsel, 1997)

Güneş piline gelen ışığın kaynağının güneş olması durumu çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. En yüksek verimli güneş pili elde etmede kullanılan en uygun malzemenin seçimi ile ilgili olan bu çalışmalardan ortaya çıkan sonuçlar, şu şekilde özetlenebilir.

Önlem alınmadıkça, söz konusu yarıiletken malzemeler için r katsayısı büyük olabilmektedir. Örneğin, temiz bir silisyum yüzeye gelen ışığın yaklaşık % 30'u yansır. Güneş pili yapımına uygun diğer malzemelerin de yansıtma oranları yüksektir. r katsayısını küçük tutabilmek için pil yüzeyi, yapım sırasında düşük yansıtıcılı olan bir malzeme ile kaplanır.

Pile giren ışık ya emilir, ya da belirli bir süre sonunda pil dışına gönderilir. Pile giren ışık fotonlarının yalnız malzeme tarafından emilen kısmı fotovoltaik yöntem kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu nedenle yalnız, iç emme sınırından daha kısa dalga boylarına sahip olan fotonlar yararlı olmaktadır. Gelen fotonlardan dalga boyları emme sınırı ile aynı olanlar, faydalı enerjiye ait ilave kayıplar meydana getirmeksizin bir delik-elektron çifti yaratırlar. İstenen minimum enerji miktarından daha büyük bir enerjiye sahip bir fotonun emilmesi olayı sırasında yaratılan her delik - elektron çifti, fazla enerjisini dış ortama ısı şeklinde verecektir. Bir güneş pilinde bu kayıplar güneş radyasyon spektrumu nedeniyle oluşmaktadır. Eğer pil, emme sınırı dalga boyunda tek renkli ( mono kromatik ) bir ışığa maruz bırakılırsa sözü edilen kayıplar olmayacaktır. Saf silisyum güneş pilleri için bu kayıplar, pile giren güneş enerjisinin % 50'sine ulaşmaktadır. Daha geniş band aralığına sahip olan malzemeler kullanılarak, bu spektrum kayıpları bir dereceye kadar azaltılabilir.

“Biriktirme etkinliği” olarak adlandırılan ( Q ) faktörü, jonksiyona ulaşıp emilen

fotonlar tarafından üretilen elektron taşıyıcısı sayısının bir ölçüsü olmaktadır. Elektron taşıyıcılarından bazıları jonksiyona doğru yayılırken diğerleri ise uzaklaşmakta ve pilin iç bölgesi veya pil yüzeyinde yeniden birleşmektedirler. Bir silisyum pilde biriktirme etkinliği % 60 ile % 70 civarındadır. Dolayısıyla pillerin arzu edilen teorik verime ulaşamamalarının en büyük sebeplerinden birinin, taşıyıcıların yeniden birleşmeleri olduğu söylenebilir. Silisyum dışında kullanılan diğer güneş pili malzemelerinde, yeniden birleşme kayıpları daha ciddi boyutlara ulaşmaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi, güneş pillerinin meydana getirdiği gerilim, jonksiyonun her iki tarafındaki elektron taşıyıcıları fazlalığından oluşmaktadır. Bununla birlikte gerilim, delik – elektron çiftlerinin enerjisinden oldukça küçüktür. Örneğin, silisyum malzemede bir delik – elektron çiftinin enerjisi yaklaşık 1,2 eV olup, bu da band aralığı enerjisidir. Maksimum güç şartlarında ve tamamen gün ışığı altında bir silisyum pilinin gerilimi ise 0.4 voltur. Bu nedenle pil, delik – elektron çiftleri tarafından depo edilen enerjinin sadece bir kısmını faydalı enerjiye dönüştürebilmektedir. Jonksiyon kaybı olarak adlandırılan bu ayıp, elektron taşıyıcı yoğunluğu, delik taşıyıcı yoğunluğuna yaklaştığında, sonsuz ışık şiddeti şartlarına uygun şekilde yok olmalı ve gerilim de enerji aralığı yaklaşmalıdır. (Van Gijsel, 1997)

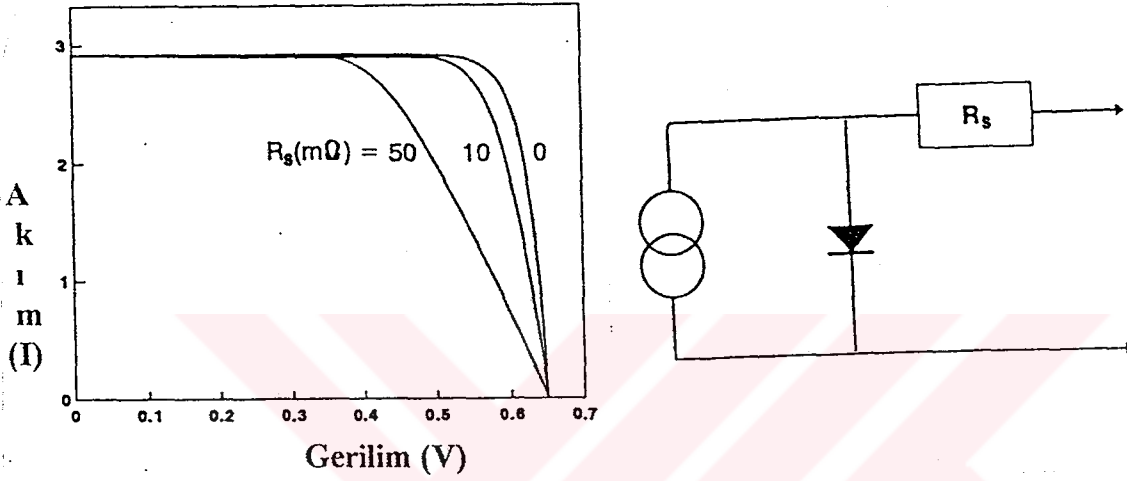
Şekil 4.3'teki eşdeğer devreden görüldüğü üzere, kısa devre akımı kısmen yük üzerinden kısmen de jonksiyon üzerinden ileriye doğru akmaktadır. Bu nedenle gerilim ve jonksiyon kayıpları, jonksiyonun ileri akım – gerilim karakteristiklerine bağlı olur. p-n jonksiyonlar teorisi, ileri akımın artan band aralığı ile üstel olarak azalması gerektiğini ifade eder. Bundan dolayı jonksiyon kaybı, artan band aralığı ile azalabilmektedir.

Kayıpların sonuncusu ise, akımın elektrodalara ulaşmak için alacağı yol üzerinde bulunan, jonksiyonun ardındaki çok ince yüzeyin direncinden meydana gelmektedir. Uygulamada, bir silisyum bu iç direnç, birkaç ohm'dur. Bu kayıp tamamı ile yok edilmiş olsaydı, pilin verimi yüzde birkaç artabilirdi. İncelenen diğer kayıplardan farklı olarak direnç kaybı pilde kullanılan malzemeye bağlı bir özellik olmayıp pil yapımında kullanılan geometrinin sonucudur.

Dikkat edilecek olursa son teorik sonuç, pil sıcaklığının verime olan etkisidir.

En büyük etki ise sıcaklığa karşı duyarsız olduğu çeşitli deneyler sonucu kanıtlanmıştır. En büyük etki ise sıcaklığa tamamen bağlı olan  $V_m$ 'in  $I_o$ 'ın bir fonksiyonu olmasından ileri gelmektedir.

Seri devre rezistansı, bu kayıp güneş pili tarafından oluşturulan elektrik akımının taşınması esnasında ohmik kayıplar söz konusudur. Bu kayıplar toplam, devre şemasındaki dirence ( $R_s$ ) eşdeğer sayılabılır. Bu kayıpları en çok pil Fill (Dolgu) faktörünün etkilediği saptanmıştır.

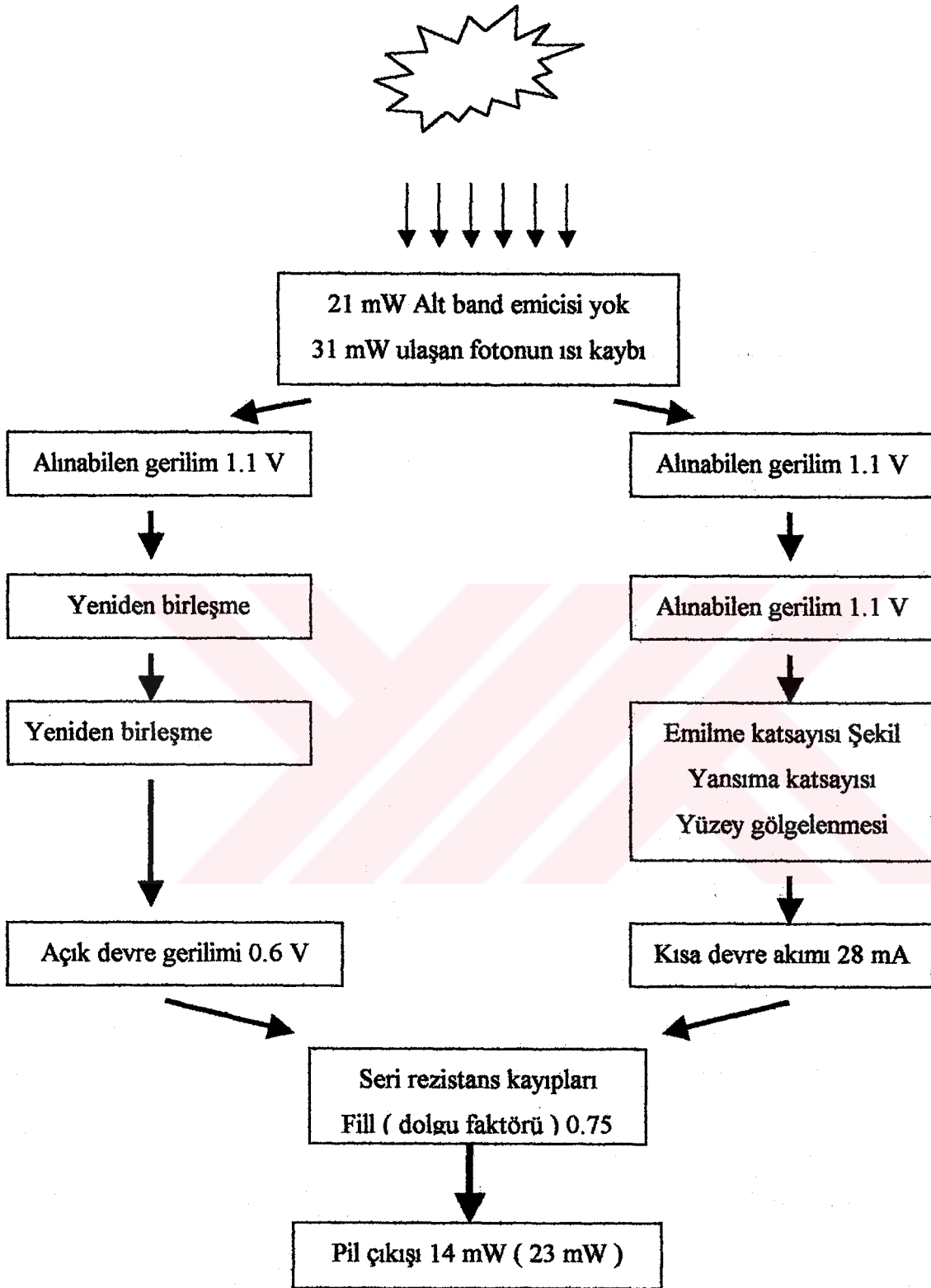


Şekil 4.3 Seri rezistans kaybının pil I-V diagramına etkisi

I-V karakteristiği bir eleman için alttaki denklem ile saptanmıştır.

$$I = I_L - I_o = [ \exp[ e \cdot V + I \cdot R_s / m \cdot k \cdot T ] - 1 ] \quad (4.27)$$

Bu denklemde seri rezistansı  $R_s$  ve  $m$  ampirik ideal olmayan faktördür. Bu denklem güneş pilinde meydana gelen tüm kayıpların, ışık jeneratör akımı ( $I - I_L$ ), bir parametresi olarak hesaba katılmıştır. (Şekil 4.4)

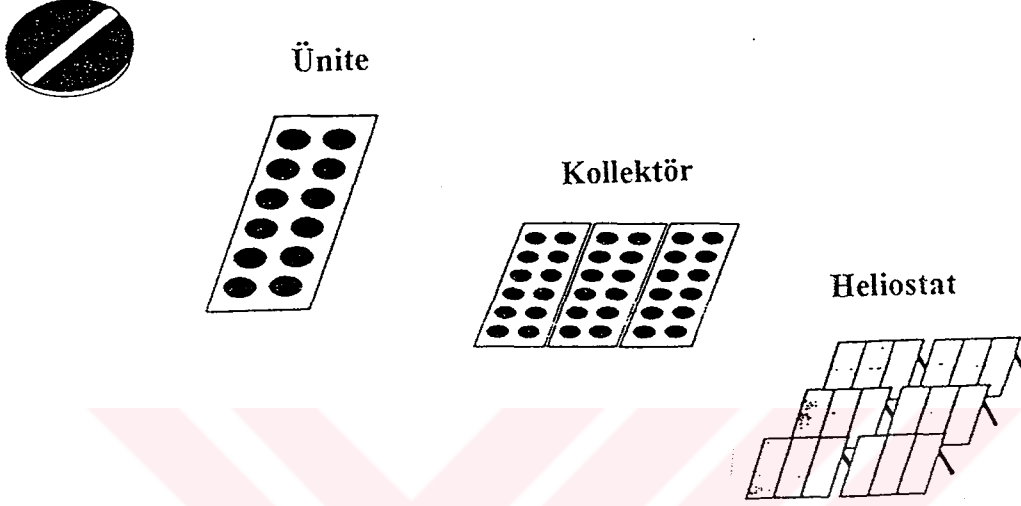


Şekil 4.4 Slikon güneş pillerinde meydana gelen güç kayıpları

## 4.2 Fotovoltaik Jeneratör

Sistemin kalbi PV (Fotovoltaik) jeneratörüdür. Jeneratör fotovoltaik ünitelerden oluşmuştur ve bu üniteler birbiri ile bağlantılı olup bir DC güç üretim sistemidir. Arkasından destekli olarak güneşi izleyen ünite topluluğuna heliostat denir.

### Güneş Pili



Şekil 4.5 Heliostatların oluşum aşamaları

### 4.2.1 Fotovoltaik Üniteler

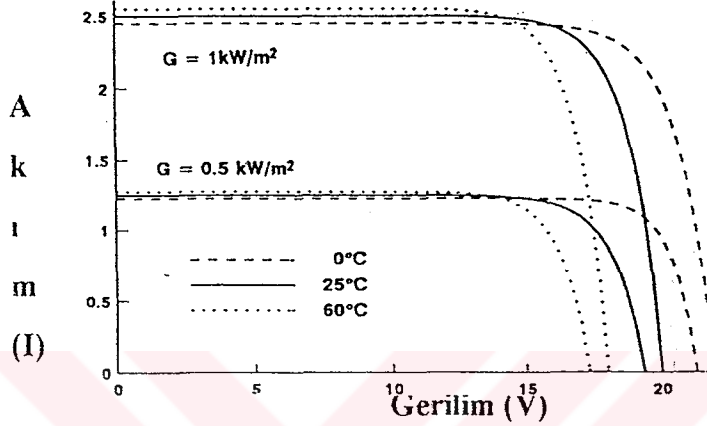
Üniteler, PV jeneratörünün basit konstrüksiyon elemanlarıdır.

Şekil 4.5’de görülen model yarı kristal model ve silikon pillerde uygulanır. Bu model pratikte en çok uygulanan tiptir. Üniteler devresi genellikle seri bağlanmıştır, bu tek bir pilin karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Standart koşullarda, tipik 4 ( inch ) çaplı kristal silikon pil veya 10 cm x 10 cm çok-kristalli piller, verimine bağlı olarak 1 ile 1.5 Watt arası güç üretirler. Bu güç 0.5 ile 0.6 V’da üretilir. Bu gerilimde çalışacak hemen hemen hiç alet olmadığı için piller seri bağlanmaktadır.

Ünite içinde yer alan pil sayısı ünite gerilimi tarafından kontrol edilmektedir. Sistemin nominal çalışma gerilimi, depolama yedek nominal gerilimi ile aynı olmalıdır. Araştırmalar göstermiştir ki, seri bağlı 33 ile 36 adet pil seti normal çalışma gerilimine uygundur. Ünite güçleri bu yüzden 40 ile 60 W arasındadır. Ünite parametreleri aşağıdaki standart koşullar altında üretilmektedirler. (Tera, 2000)

Ünitenin nominal çıkışı, pik yük güç noktası adı ile kullanılır. Ünitenin en önemli üç elektriksel karakteristiği sırasıyla; Kısa devre akımı, Açık devre gerilimi ve pik çıkış

gücü noktasıdır ki; bunlar sıcaklık ve ışın demetinin fonksiyonlarıdır. Bu karakteristikler ayrıca pilin I –V diagramını da etkiler. (Şekil 4.6) Sıcaklık PV sistem operasyonunda çok önemli bir parametredir. Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı yaklaşık olarak  $(-2.3) \text{ mV} / ^\circ\text{C}$  ( tek bir pil için ) Gerilim katsayısı bu yüzden negatif olur ve çok büyük bir değere ulaşır. Çünkü devrede seri şekilde bağlanmış olan 33-36 adet pil bulunmaktadır. Bu arada akım katsayısı ise pozitif ve küçük bir değerdir, bu değer yaklaşık olarak ünite  $\text{cm}^2$  si için  $(+6) \mu\text{a} / ^\circ\text{C}$



Şekil 4.6 I-V diagramı

Pratik hesaplamalarda gerilim varyasyonları sıcaklığın kontrolünde olup bir ünite de  $n_c$  adet pil seri bağlı bulunması durumunda,

$$dV_{oc} / dT = -2.3 \cdot m \text{ V} / ^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

Burada önemle vurgulanması gereken bağıntı sıcaklık-gerilim bağıntısıdır.

Tek pil için kısa devre akımı  $I_{sc}$ , ışın ile orantılıdır, bu yüzden gün içinde değişime uğrar. Gerilim akımın logaritmik fonksiyonu olduğundan, gerilim de ışın ile logaritmik bağıntılıdır. Gün içinde gerilimin değişimi, akım değişiminden daha az olacaktır. Bu yüzden PV pil tasarımında gerilim değişimi ihmal edilir ve kısa devre akımının, ışın ile orantısı kurulur,

$$I_{sc}(G) = I_{sc}(1 \text{ kW} / \text{m}^2) \cdot G (\text{kW} / \text{m}^2) \quad (4.29)$$

Ünite çalışma aralığı maksimum güç noktasına mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Pil karakteristiği olan gerilim maksimum güç noktası ışımadan bağımsızdır. Gün içinde standart ışın koşulları altında devre gerilimi, açık devre geriliminin % 80'I kadar olacaktır.

PV ünite karakteristikleri normal pil çalışma sıcaklığı (NOCT) ölçümü ile tamamlanmış olacaktır. Ünite aşağıdaki veriler ile çalıştığı kabul edilirse;

Işın demeti  $0.8 \text{ kW / m}^2$

Spektrum dağılımı AM 1.5

Kararlı sıcaklık  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Rüzgar hızı  $> 1 \text{ m / s}$

$$T_c - T_a = (\text{NOCT} - 20) \cdot G / 0.8 \text{ (kW / m}^2\text{) bulunur.} \quad (4.30)$$

NOCT ( genellikle 42 ile 46  $^\circ\text{C}$  arasındadır ) çalışma sırasında pil sıcaklığının  $T_c$  eldesi için kullanılır. Pil sıcaklığı ( $T_c$ ) ile kararlı çalışma sıcaklığı ( $T_a$ ) arasındaki fark lineer ışınma (G) ile orantılıdır:

Yukarıdaki denklem çalışma koşulları altında ünite parametrelerinin hesaplarını özetler. Kısa devre akımı bir önceki denklemle hesaplanır.

#### 4.2.2 Fotovoltaik Ünite İle Uygulamalı Örnek

34 adet seri pil ile çalışan ünitenin verilen değerler yardımıyla ünite parametrelerini bulunuz. Çalışma koşulları  $G = 700 \text{ W / m}$ ,  $T_a = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ . Üretici firma değerleri  $I_{sc} = 3 \text{ A}$ ,  $V_{oc} = 20.4 \text{ V}$ ,  $P_{max} = 45.9 \text{ W}$  ve  $\text{NOCT} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$

#### Cözüm

Kısa devre akımı denklem 4.29 kullanılarak

$$I_{sc}(G) = I_{sc} \cdot G = 2.1 \text{ A bulunur.}$$

Pil sıcaklığı 4.30 kullanılarak

$$T_c = 34 + 0.7 \times (43 - 20) / 0.8 = 54.12 \text{ }^\circ\text{C bulunur.}$$

Açık devre gerilimi

$$V_{oc} = (54.12 \text{ }^\circ\text{C}) = 20.4 - 0.0023 \times 34 \times (54.12 - 28) = 18.1 \text{ V}$$

Şimdi maksimum güç noktasının bulunması için, Fill ( dolgu ) faktörünün ışınma ve sıcaklıktan bağımsız olduğu kabul edilir ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa;

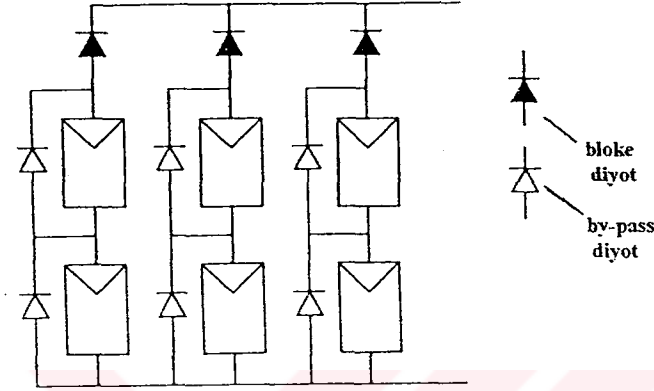
$$FF = 45.9 / (3 \times 20.4) = 0.75$$

$$P_{\max}(G, T_c) = 2.1 \times 18.1 \times 0.75 = 28.5 \text{ W}$$

Üretici firma verilerine bakılınca ünite % 62 performansla çalışmaktadır. Yani laboratuvar şartlarında alınan değerin %62 si oranında üniteden faydalanılabilmektedir.

#### 4.2.3 PV Ünitelerinin Bağlanması

Aşağıda birkaç üniteden oluşan bir PV jeneratörü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7 PV jeneratörü

Üniteler seri halde bir dizi oluşturacak şekilde bağlanırlar. Ünite adeti ( $N_s$ ) seçilen DC gerilimi ve paralel dizi pil adeti ( $N_p$ ) ise, jeneratör için gerekli olan akım ile seçilir. Şekil 4.7 deki jeneratör için  $N_s = 2$  ve  $N_p = 3$ 'tür. Çıkış gerilimi, ünite geriliminin iki katı ve çıkış akımı ünite akımının üç katı olacaktır. Pratikte üniteleri oluşturan piller tıpatıp aynı karakteristikleri taşımazlar ve bu parametreler iki şekilde değişebilir:

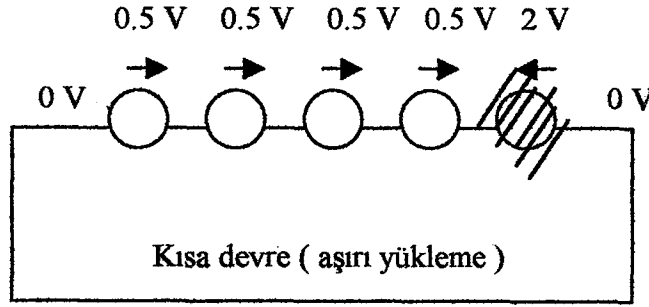
1. Üretici firma üretim aşamasındaki farklılıklar.
2. Değişik çalışma ortamları üniteler topluluğunu etkiler.

Bu parametre değişikliklerinin iki önemli etkisi bulunmaktadır.

İlk olarak jeneratör çıkış gücü toplam pil toplamı çıkış gücünden daha az olacaktır. Bu ise uyumsuzluk kayıpları yaratır, bu kayıpların azaltılması için üniteler aynı kısa devre akımı veren pillerin seri dizileri oluşturulur.

İkinci olarak, serinin en fakir pilinin fazla ısınma potansiyeli vardır. Bu piller diğerlerini şarj etmek için bir jeneratör gibi işlev görürler ve en çok ( $85^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklığına çıkabilir. Bu sıcaklıktan fazlası ise pile zarar verebilir. Bu da ünite performansını etkiler. Bu olaya sıcak nokta oluşumu denir. Bu etki Şekil 4.8 de gösterilmiştir, bu olay bir pilin gölgelenmesi olarak örneklenebilir. Şekildeki taranmış

pil güç üretmiyor ve bir diyot gibi çalışıyordur.



Şekil 4.8 Sıcak nokta oluşumu

Bu olayın önüne geçilebilmesi için by-pass diyotları kullanımı ile olur. Bu diyotlar, birkaç seri pil dizisi sonlarına yerleştirilir. (Şekil 4.8) Bu uygulama gücü limitler ve ünite akımına düşük rezistanslı bir yol sunar. (Tera, 2000)

#### 4.2.4 Enerjinin Depolanması

Güneş enerji kaynağı zaman içinde değişime uğradığı için enerjinin sürekli kullanılması için depolanması gereklidir. Değişik depolama metodları Çizelge 4.1 de gösterilmiştir. Son zamanlarda çoğunluk PV sistemleri, pil sistemini benimsemiştir. Diğer uygulamalar ise su pompalarındaki depolama uygulamasıdır. Bu sistemlerde yüksek basınçlı su depolanması tercih edilir. Pil depo uygulamalarında ise kurşun (Pb) asidik piller kullanılır çünkü kullanım rahatlığı ve ucuz maliyeti vardır. Nikel kadminyum piller ise kullanım alanı olarak daha azdır çünkü mekanik ve elektriksel arızalanması kolay ve maliyeti daha fazladır. (Tera, 2000)

Günlük çevrimde boşalma aralığı desteksiz sistemlerde çok yüzeyseldir. Günlük çevrimden başka birde mevsimsel çevrim vardır, bu çevrim gündüz pilin dolma esnasında PV generatörünün avarajgüç temini sırasında etki eder. Çevrim detayları sisteme ve PV generatörü depolama kapasitesi ve boyutlarına bağlıdır.

Kurşun asidik pilleri özetle iki elektrod seçimi ile karşımıza çıkar; kurşun ve kurşunoksit elektrodları ve suya batırılmış sülfürik asit elektroliti. Pratik uygulamalarda elektrodlar kurşun ızgara ( bazen kalsiyum vey antimon ile kaplı ) şeklinde olup kimyasal reaksiyonların çok olması için büyük aktif materyal yüzeyine sahiptir. Pil çalışması sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Şarj olurken kurşunoksit anod'da oluşur, saf kurşun ise katod'da oluşur. Boşalma sırasında kurşun sülfat her iki elektrodta oluşur, sülfürik

asit ise elektrolitten arınır.

Çizelge 4.1 Depolama metodları

DEPOLANAN ENERJİ	TEKNOLOJİ	ÖZELLİKLERİ
	Basınçlı Su	Genellikle geniş oranlı enerji depolanması PV Pompası
	Mekanik Basınçlı Hava	Yüksek Kapasitede Enerji Depolanması
Elektromagnetik	Süper İletken Elektrik Akımı	Yüksek Sıcaklık Süper İletken Uygulaması
Kimyasal	Piller	Pb asidik ve Ni kadmiyum Piller
	Hidrojen Üretimi	

Tipik gerilim davranışı olarak kurşun asidik pil boşalması sırasında pil kapasitesi yüksek boşalma hızında çok azalır. Bu karakteristik PV sisteminin enerji depolama sistemini dizayn ederken göz önüne alınmalıdır, çünkü üretici verileri standart koşullarda geçerlidir. Fakat piller çok değişik koşullarda işlev görürler. Pilin dolma işlemi sırasında, her eleman için ise 2.35 V'da kadar bir artış söz konusudur. Daha sonra gerilim eğiminde çok yüksek bir artış söz konusudur, bu değişim elektrodarda hidrojen ve oksijen oluşumudur. Bu olaya gassing ( gaz oluşumu ) denir.

Bu kimyasal reaksiyonlar pilin çalışmasını ve ömrünü veya gerekli dayanım emniyet değerlerini kırar. Kurşun çözülmesi, kurşun oksit oluşumu ve kurşun sülfat oluşumu tekrarlandığında elektrodarda "mekanik stress" yaşanmaya başlanır. Bu stress ise elektrodardaki aktif materyallerin yok olmasına yol açar. Sülfat oluşumu, elektrod yüzeylerinde büyük kurşun sülfat kristalleri biriktirmesi demektir, bu olay elektrodta geri dönüşümsüz etkilere yol açar. Bu olay daha çok pilin düşük şarjda çok uzun süre beklemesi ile hızlandırır.

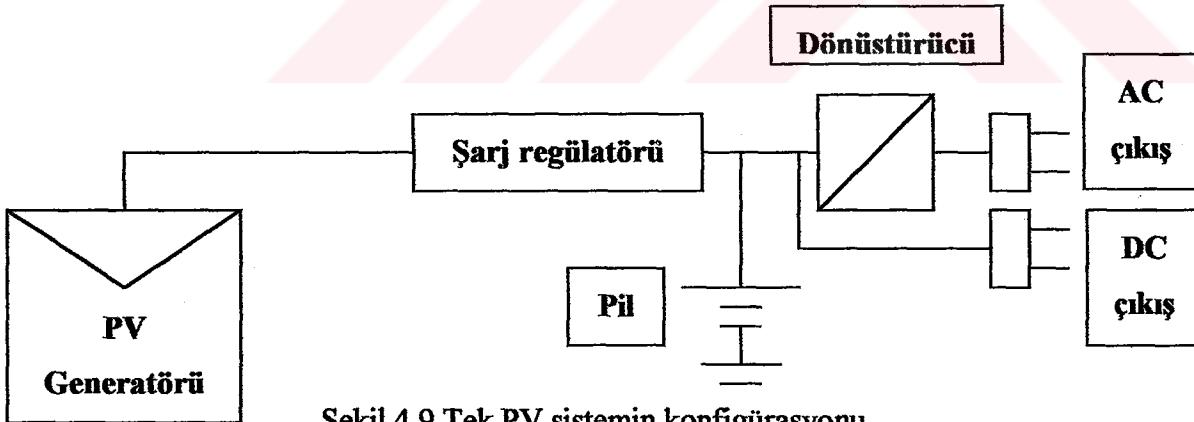
Pillerin eleman ömürleri açısından belli periyotlarda ( genellikle kış sonu ) dengeleyici şarj edilmesi gerekir. Bu şarj sonunda pil zayıf bir aşırı bir yükleme yaşar fakat pil elemanlarının tam şarj edilmesi gerkelelidir. Elektrod aşınması, pozitif kurşun

ızgara miktarının fazlalaşması ile oluşur. (Stone, 1993)

Çizelge 4.2 Kurşun asidik pil tipleri

TİP	UYGULAMA	ÇALIŞMA	KARAKTERİSTİK
SLI	Motor ilk hareket pilleri	Kısa zamanda maksimum güç üretimi	Çevrimde düşük rezistans
Yapışma	Elektrik Motorları	Derin ve devamlı çevrimler	Çevrime yüksek rezistans Yüksek su eldesi Dayanıklılık
İstasyon depolama	Emniyet güç temini	Yüksek düzeyde şarjda yzldürme	Çevrime ılımlı rezistans Düşük su eldesi

Pil depo dizaynı, çalışma sıcaklığın sıfırın altına düştüğü zamanlarda elektrolitin donmaması için önlem alınarak yapılması gerekir. Bunun önlenmesi için yüksek yoğunlukta bir elektrolitin kullanılması gerekir. Çünkü hızlı boşalma ve dolma esnasında elektrolit yoğunluğu azalır. Piyasada kullanılan pilerin hepsi artık depolma sistemlerini içerir, Çizelge 4.2 de özel PV enerji depo sistemleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Tek PV sistemin konfigürasyonu

### 4.3 Güneş Aküleri

Güneş ve rüzgar enerjili elektrik sistemlerinde aküler güneş panellerinden ve rüzgar türbinlerinden gelen 12 / 24 veya 48V DC akımın depolanmasında kullanılırlar. (Şekil 4.9)

Coğrafi şartların ağır olduğu ( yazın-aşırı sıcak, kışın-aşırı soğuk ) yerlerde kurulan güneş enerjili ( bilhassa telekom ) sistemlerde akülerin bu şartlara dayanıklı olarak seçilmesi gereklidir. Sıcaklardaki aşırı artış veya düşüşler akünün depolama kapasitesini ve deşarj özelliğini hızla yitirmesine neden olur.

Güç ihtiyacı düşük uygulamalarda 12V'luk tam bağımsız aküler kullanılmaktadır. Daha büyük güç ihtiyaçlarında ve telekom sistemlerinde 2V'luk stasyonere özel güneş aküleri kullanılmaktadır. Her iki akü tipinin de ortak özellikleri uzun ömürlü olmaları, gaz çıkışının olmaması veya minimum seviyede tutulması, yaklaşık olarak 300-1500 defa tekrarlanabilen derin deşarj özelliği, su ekleme ihtiyacının çok geniş zaman aralıkları ( min 1 yıl ) içinde ortaya çıkması olarak özetlenebilir.

Akü bankasının büyüklüğü tam rüzgarsız ve güneşsiz arka arkaya gelen günlerde sistemin kesintiye uğramayacağı şekilde tasarlanır. Genelde 3 ila 6 gün arasında verilen otonomi süresi sayesinde muhtemel bir arıza anında, bakım ve servis çalışmaları süresince de bir kesinti yaşanmaz.

Güneş panelleri ile aküler arasında mevcut kontrol üniteleri sayesinde aküler en uygun akım ve voltaj kombinasyonu ile şarj edilmektedir. (Tera, 2000)

#### **4.4 Şarj Kontrol Cihazları**

Kontrol ünitelerini fotovoltaik sistemin işlemcisi olarak düşünmek doğru bir yaklaşımdır.

Kontrol ünitesinin başlıca fonksiyonları akülerin en uygun şartlarda şarj ve deşarj edilmesi, sıcaklık ayarları, yıldırım kontrolü, farklı koruma / sigorta sistemleri, merkeze farklı alarmları yollaması, güneş panellerinden gelen tüm verileri kaydetmesi ve bunları istenildiği takdirde bir modem aracılığıyla merkeze yollaması olarak özetlenebilir.

Kontrol ünitesinin amperaj değeri güneş panellerinden gelecek maksimum akımın % 25 fazlasını tolere edecek şekilde tasarlanmalıdır. Güneş panelleri genelde ilk 2-3 yıl boyunca ortalama değerlerinin üzerinde üretim yaptıkları için bu kriter sağlıklı bir sistem tasarımı için çok önemlidir.

Şarj kontrol cihazlarının birçok özellikleri kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Örneğin akü voltajının istenilen değere geldiğinde şarjın kesilmesi, yine akü voltajının

belli bir değerin altına düşmesi durumunda akü ve yük sistemine zarar gelmemesi için yük bağlantısının otomatik olarak kesilmesi ve voltaj yükseldiğinde yine otomatik olarak güç vermeye başlaması gibi özellikler kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. (Tera, 2000)

#### **4.5 İnverterler ( Dönüştürücüler )**

Kurulmakta olan güneş kaynaklı bir enerji sistemi genelde beş parçadan oluşur. Güneş panelleri sistemin elektrik kaynağıdır. Elde edilen elektrik bir şarj kontrol cihazı tarafından akülerin şarj edilmesinde kullanılır. Daha sonra depolanan elektrik enerjisi eğer çalıştırmak istediğimiz sistem 220V AC akımla besleniyorsa bir inverter yardımıyla doğru akımdan alternatif akıma çevrilir.

Günlük hayatta pillerde kullandığımız ve depolanabilir akıma doğru akım (DC) denir. Voltaj olarak en yaygın 12 veya 24V'luk sistemler kullanılır. Çamaşır makinesi, buzdolabı, televizyon gibi elektrikli ev aletleri ise depolanması mümkün olmayan alternatif akım (AC) ile çalışır.

Inverterler doğru akımı (DC) 220V alternatif akıma çevirmek için kullanılan elektronik cihazlardır. Harici inverterlar 12V veya 24V'luk bir akü bankasından aldıkları doğru akımı evlerde kullandığımız 220V alternatif akıma çevirerek her türlü elektrikli cihazı sorunsuz çalıştırır. Senkronize inverterler ise bir güneş paneli veya rüzgar türbini çıkışına bağlanarak şebekeye geri besleme yapma özelliğine sahiptirler. Inverterler çıkış gücüne ve çıkış dalga boyuna özelliklerine göre gruplara ayrılırlar. Şu anda dünyada 100Watt'dan 10kW'a kadar farklı çıkış güçlerine sahip inverterler mevcuttur. Çıkış dalga özellikleri de kare dalga, düzeltilmiş sinus dalga olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Düzeltilmiş sinus dalga inverterler daha ekonomik olmalarına rağmen lazer printer, çok adımlı motor, floresan, lambalarda verim kaybına, müzik aletlerinde hissiyatıya sebep olmaktadır. Buna karşılık tam sinus inverter şebeke elektriği ile aynı kalitede hatta çoğu zaman daha yüksek kalitede çıkış verip hiçbir elektrikli aletin çalışmasında sorun çıkarmamaktadır. Şebekeye geri besleme yapabilmek için tam sinus inverter kullanmanız gerekmektedir. Birçok motorlu alet ilk çalışma anında nominal güç tüketiminin birkaç katı güç çektiği için kullanılan inverter kısa süreler için bu güçte çalışma özelliğine sahip olmalıdır. Kullanılan inverter kısa süreler için bu güçte

çalışma özelliğine sahip olmalıdır. Kullanılan inverterin verimi de bir başka önemli parametredir. Aküden aldığı akımın yüzde kaçını alternatif akıma çevirdiği verimi belirleyen unsurdur. Genellikle inverterlerde minimum verim % 91-92 civarındadır. (Tera, 2000)

## 5. PV SİSTEM EKONOMİSİ

Pv sistemini uygulandığı alanlarda en iyi elektrik elde etme seçimi olarak kabul edilmektedir. Bu sistemler genellikle tek olarak ve aşağıdaki avantajları için kullanılır.

- Yakıt gereksinimi ve maliyeti yoktur.
- Cihazların kontrol sistemlerine gerek kalmadan işlev görürler.
- Hemen her koşula uyumlu ve çok az bakım gerektirir.
- PV sistemleri başarısı reklama ve ekonomik tartışmaların geleceğine bağlıdır.

Çizelge 5.1 AB Ülkeleri THERMI Programı 1979-1990 da PV Uygulamaları

UYGULAMA	PROJE ADEDİ	%
Ev ve Kasabalar	42	43.8
Çiftlik ve Köylerde	10	10.4
Doğal rezervler	8	8.3
Işık evleri	5	5.2
Su pompaları ve Uygulamaları	10	10.4
Emniyet sistemleri	12	12.4
Telekomünikasyon ve yerel aydınlatma	9	9.4
<b>TOPLAM</b>	<b>96</b>	<b>100</b>

Uydu mekiği güç sistemlerinde maliyet önemli bir faktör sayılmadığından, tüm güç üniteleri güneş enerjisi ile çalışmaktadır. Son yıllarda ortaya çıkan tartışma konusu ise fotovoltaik sistemlerin maliyetinin çok azalması ve her alanda diğer uygulamalar ile yarış haline geçebilmesi konusundadır. (Çizelge 5.1) (Heiser, 1995)

## 5.1 PV Ssisteminin Ekonomiklik Kriterleri

PV sistemler Őu anda mevcut ve yaygın olan gűç sistemleri ile sadece az gűç gereksinimi gereken alanlarda yarışa girebilecek konumdadır. PV sistemlerinin dűŐűk gűç gereksinimleri için diĐerlerinden farklılıkları:

- İlk kuruluş maliyetleri yüksektir.
- Yakıt gereksinim yoktur.
- Bakım masrafları çok dűŐűktűr.
- Sistem ıkış gűcű kurulacak yere gűre deĐiŐir.

Sistem eĐer biriktirilmiş para hazırda duruyorsa veya hűkűmet tarafından toplanan vergi ile kuruluş maliyeti karŐılanacaksa kazançlıdır. Ekonomik kazançlar dıŐında sosyal ve çevresel kazançlarda sistem kurulma aŐamasında hesaba katılmalıdır. Elektriksel eldesine iki açıdan bakılması gerekir. Ekonomik olarak yaklaŐım hűkűmet tarafından bir bűtűn olarak ele alınmalıdır. Bunun içinde vergi ve diĐer alt gelirler yoktur. Finansal deĐeri alıcı tarafından gűz űnűne alınması gereken bir deĐerdir. Bu yűzden vergi ve diĐer gelirler tűm olarak hesaba katılmalıdır. Ekonomik deĐerlendirmede aŐaĐıdakiler genellikle dűŐűnűlűr.

- Toplam maliyeti: Sistemin tűm űmrű boyunca toplam masrafının bugűnkű deĐeri.
- Maliyeti geri kazanma sűresi.
- Geri dűnűŐ hızı: İlk kuruluş maliyetinin kazançlarla yıllık yűzde olarak geri dűnűŐű.

Maliyeti geri kazanma sűre ve yűzdesi iki tane dezavantajı barındırır. İlk olarak, belirli periodlar içinde kazançlarının tahmini çok zordur. İkinci olarak, sistemin ilerideki masraflarını ve űmrűnűn tam olarak ne kadar olacaĐını bilemeyiz. Toplam maliyeti sistem ekonomikliĐinin en belirleyici faktűrűdűr.

## 5.2 PV Sisteminin Uygulama Alanları

GűneŐ enerjisinin hayatın her alanında yaŐama geçirilmesi herkesin ortak isteğidir. Bu bağlamda Őu anda kullanılan sistemlerin bir baŐlangıç olduğu varsayılmalı ve ileride

daha büyük projeler ile enerji tüketiminde en sağlıklı seçim olacağı kuşkusuzdur. Şu anda dünyada kullanılan sistemlerin geniş özeti aşağıda belirtilmiştir.

#### **Ev ısıtılması**

Aydınlatma ve enterkonnekte şebekeye bağlı olmayan binalar için güç temini, pil şarj istasyonları, göçebeler için taşınabilir güç olarak uygulamalar mevcuttur.

#### **Su Pompası ve Uygulamaları**

İçme suyu pompası, sulama pompası, buz eldesi, tuzlu su ayırıştırma sistemleri, balık havuzlarında su dolaşımı için kullanılabilir.

#### **Sağlık bakımı sistemleri**

Klinik aydınlatmasında, klinikler arası UHF transformatörleri, ilaç buzlugu, sterilasyon aletleri, kan depolama dolapları için kullanılabilir.

#### **Kominikasyon**

Radyo istasyonları, taşınabilir TV ve radyo alıcıları, taşınabilir hava ölçüm cihazları, yersel telefon link hattı, acil telefonlar için kullanılabilir.

#### **Köylerde**

İçme suyu ve sulama projeleri, elektrik stoğu, stok buz tankı oluşturmak için kullanılabilir.

#### **Ulaşım gereçleri**

Trafik levha aydınlatması, demiryolu geçitleri ve levhaları, tehlike ışıkları, sis uyarı kornaları için kullanılabilir.

#### **Emniyet sistemleri**

Acil durum aydınlatması, taşınabilir alarm sistemleri kullanılabilir.

#### **Korozyon önleme sistemleri**

Köprüler, boru tesisatı, kaynak yeri, kilit, çelik eleman korumaları için kullanılabilir.

#### **Uydu elektrik gücü**

Telekominikasyon, dünyanın incelenmesi, bilimsel görevlerde, büyük uzay

istasyonlarında kullanılabilir.

### **Diğerleri**

Vantilasyon sistemleri, yenilenebilir motor gücü, hesap makineleri, otomatik balık şarj pilleri, deprem monitör sistemleri, pil şarjı, doğal felaketlerde acil güç için kullanılabilir.

#### **5.2.1 PV (Fotovoltaik) Sistemi İle Kırsal Yörelere Elektrik Eldesi**

Kırsal yörelere elektrik götürülmesi çok zor ve masraflardır. Bu bölgelere sadece o bölge insanının yararlanması için elektrik üretimi sağlanmalıdır. Ayrıca göçebe olarak hayatını sürdüren topluluklar için taşınabilir güç kaynağı çok kazançlı bir yoldur. Kırsal yörelere PV potansiyeli korkunç boyutlardadır. Birleşmiş Milletler, ortalama 20 °C hava sıcaklığında yaşayan iki milyon adet Ekvator Bölgesi köylerinin merkezi elektrik ya da fosil yakıt kullanımının olmadığını saptamıştır. Ayrıca BM; Dünya nüfusunun yarısının, bu sayının çoğunun PV sistemleri için elverişli iklimlerde yaşamalarına rağmen, elektrik elde edemediğini tahmin ediyordu.

Domestik PV (Fotovoltaik) sistemleri genellikle gelişmiş ülkelerde 50 W ile 5 MW arasında değişen değerlerde kullanılmaktadır. Daha büyük güç sistemleri adalardan oluşmuş gelişmiş ülkelerde kullanılmaktadır. Daha büyük güç sistemleri adalardan oluşmuş gelişmiş ülkelerde kullanılmaktadır. 5 MW'lık bu sistemler yerleşim birimi güç kaynağı olarak, küçük güçteki sistemler ise ev elektrik ihtiyacını karşılamak amaçlı kullanılmaktadır.

#### **5.2.2 PV Sistemi İle Aydınlatma**

Aydınlatma endüstriyel ülkelerde çözümlenmiş bir problemdir fakat kırsal kesimde halen mum, kerozen lamba veya pilli fenerlerle sağlanmaktadır. Aydınlatma amaçlı kullanılan PV sistemleri bütün sistemler içinde çok büyük bir yüzde oluşturur. Düşük voltajlı DC floresan lamba kullanımı önemli bir kazançtır. AC lambalarda kullanılabilir fakat dönüştürücüde kayıplar olacaktır.

#### **5.2.3 PV Sistemi İle Pil Şarjı**

Sayfiye yeri gibi belirli bir zaman için kullanılan yerleşim birimlerinde piller en önemli güç kaynağıdır. Piller araçlarda kullanıldığı gibi televizyon ve radyo gibi cihazlarda da kullanılır. PV pil şarj sistemi, bir kollektör, destek ve şarj kontrol

ünitesinden oluşur. 3 kWh / m<sup>2</sup>gün güçten büyük değerler için uygundur.

#### **5.2.4 PV Sistemi İle Profesyonel Uygulamalar**

PV sistemleri telekomünikasyon alanında diğer uygulamalara göre en çok başarı sağlayan alan olmuştur.

Taşınabilir monitör istasyonları en çok UHV-VHF radyo transformasyonlarında veri toplanması için elverişlidir. Ayrıca güç durumunda ana merkeze bildirerek pil bitme tehlikesini ortadan kaldırır. PV sistemleri bu uygulama için en ideal sistemdir çünkü ihtiyaç duyulan güç miktarına göre boyutları belirlenir ve hiç bir bakım gerektirmez. Burada PV sistemleri diğer güç seçenekleri arasında en ekonomik olanıdır; çünkü enerji iletimi metrelerce uzunlukta kablolar aracılığı ile iletilmez.

PV sistemlerinin uzun yıllar dayanması için çeşitli tehlikelerden korunması gereklidir. Mesela vahşi hayvan saldırısı, hırsızlık, üstünün karla kaplanması, gölgelenmemesi gibi olasılıklar gözönünde bulunmalıdır. (Heiser, 1995)

#### **5.2.5 PV Sistemi İle Katodik Koruma**

Katodik koruma metalleri paslanmaması için geliştirilen bir sistemdir. PV ise iki koruma için iki nedenle en iyi uygulamadır. Boru hattında değişik yerlerde güç gereksinimi vardır. Katodik koruma DC gerilim ile çalışır

#### **5.2.6 PV Sistemi İle Uzayda Elektrik Gücü**

PV güneş jeneratörleri, dünyanın herhangi bir yörüngesinde dolanan uydularında elektrik üretimi için en iyi sistem olmuş ve olmaya devam edecektir. 1958 yılında fırlatılan "Vanguard" isimli uydu da güneş pillerinin ilk uygulaması yapılmıştır. O günden itibaren uydularda ihtiyaca göre birkaç W ile birkaç kW arası gücü güneş pilleri ile sağlanmıştır. Yeni uydu projelerinde on yıl içinde 100 kW a yakın güç üreten kollektörler kullanılacaktır. Uzay güneş kollektörlerinin kesin uyması gereken kriterler bulunmaktadır.

- Uzay çalışma şartlarında max verim ile çalışma
- Yüksek güç / ağırlık oranı
- Ekonomiklik en son sırada yer almaktadır. (Maryland, 1986)

## 6. PV SİSTEMİ ENERJİ MALİYETİ

### 6.1 Güneş Kollektörünün Performansı

Sayfa 45'teki hesaplamalar kullanılarak yapılmıştır. Verilenler üretici firma verileridir. Üretici firma BP' dir.

$$I_{SC} = 4.72 \text{ A ( Kısa devre akımı)}$$

$$P_{max} = 85 \text{ W ( Maksimum güç )}$$

$$V_{OC} = 18 \text{ V ( Açık devre gerilimi )}$$

$$NOCT = ( 43-46 \text{ arası} )$$

$$25 \text{ }^{\circ}\text{C max}$$

$$G ( 1000 \text{ W / m}^2 ) ( \text{Lineer ışınım} )$$

$$P_{max}( G, T_c ) = I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF$$

$$I_{SC} = ( 1000 \text{ W / m}^2 ) = 4.72 \cdot 1 ( \text{kW / m}^2 ) = 4.72 \text{ A ( Kısa Devre Akımı )}$$

$$T_c = 34 + 1 \cdot ( 43 - 25 ) / 0.8 = 56.5 \text{ }^{\circ}\text{C Pıl sıcaklığı}$$

$$V_{OC} = ( 56.5 \text{ }^{\circ}\text{C} ) = 18 - 0.0023 \cdot 34 ( 56.5 - 25 )$$

$$= 15.536 \text{ V Açık Devre Gerilimi}$$

$FF = 85 / ( 4.72 \cdot 18 ) = 1$  ( Işınım ve sıcaklıktan bağımsız kabul edilen maksimum güç noktasının bulunması için, dolgu faktörünün bulunması gerekir. )

$$P_{max} = 4.72 \cdot 15.536 \cdot 1 = 73 \text{ W}$$

$$\text{Verim} = 75 / 85 = 0.86 ( \% 86 \text{ performansla çalışmaktadır.} )$$

### 6.2 Enerji Üretim Maliyeti Hesabı

Elektrik enerjisi üretim maliyetini hesaplayabilmek için tesise yapılan masrafların bilinmesi gerekir. Genellikle bu masraflar sırasıyla; tessi yeri masrafları, tesis inşaat masrafları, işletme başladıktan sonra bahis konusu yakıt masrafları, işletme ve bakım masraflarıdır. Belirli bir süre içinde bu masrafların tamamı, aynı sürede üretilen elektrik enerjisi miktarına bölünerek, üretilen birim enerji başına maliyet hesaplanabilir.

En basit şekilde, amortisman için ayrılacak yıllık sabit miktar biliniyor ise, buna yıllık işletme ve bakım masrafları ile yıllık yakıt masrafları eklenerek yıllık toplam masraf bulunur. Santralin her yıl yaklaşık aynı elektrik enerjisinin ürettiğini düşünürsek, birim elektrik enerjisi üretim maliyeti, yıllık toplam masrafların yıllık enerji üretimine oranı olarak;

$$g = (c_k + c_m + c_f) / E = c_T / E \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

$c_k$  = Yıllık sabit sermaye veya yatırım masrafları

$c_m$  = Yıllık işletme ve bakım masrafları

$c_f$  = Yıllık yakıt masrafları

$c_T$  = Yıllık toplam masrafları

$E$  = Yıllık elektrik enerjisi üretimini göstermektedir.

$$a = \text{Amortisman Katsayısı} = [i \cdot (1 + i)^n / (1 + i)^n - 1]$$

$n$  = Toplam ömür süresi

Amortisman katsayısı kullanılarak sabit bir yıllık sermaye masrafı bulunabilir. Yıllık sabit sermaye masrafında buna göre;

$$c_k = I_k \times a \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

$I_k$  = Kuruluş maliyeti ve montaj işleminin toplamı olarak ifade edilir.

$i$  = Faiz katsayısı ( %9.5 ) ve  $n = 20$  yıl için ;

$a = 0.11347$  bulunur. (Aybers, N, 1995)

### 6.3 PV Enerji Maliyeti

#### 1 kW için

Pil Verimi % 86 olarak bulunmuştu. Yani fabrika verileri aynen kabul edilmeyecektir. Bundan dolayı heliostat talebini aynı oranda artırmak zorunda kalınmıştır.

$$\text{Ünite Talebi} = (1 / 0.86) = 1.162 \text{ kW / gün}$$

$$1.162 / 0.085 = 13.67 \approx 14 \text{ Adet ünite gerekmektedir. ( BP 85 W )}$$

Ünite Fiyatı = 14 x 625 x 1.25 ( KDV oranı % 25 )

$$= 10937.5 \$$$

Panel fiyatları BP'nin internetteki sayfasından ve Tera Energy satış fiyatlarından derlenmiştir.

12 Adet üniteye kadar 1 Adet Şarj Kontrol Ünitesi kullanılmaktadır. Ancak 14 Adet olduğundan 2 Adet Şarj Kontrol Ünitesi kullanmak gereklidir. BP firma katalogundan ECK 8 M cihazlarından iki adet seçilmiştir.

$$\text{Şarj Kontrol Ünitesi} = 2 \times 125 \times 1.25 = 312.5 \$$$

Gerekli olan aküler, firma katalogundan seçilmiştir.

$$\text{Aküler} = 6 \text{ Adet (EBP 1500)}$$

$$= 6 \times 375 \times 1.25 = 2812.5 \$$$

$$\text{İnverter} = 1875 \times 1.25 = 2343.75 \$$$

$$\text{Kuruluş Maliyeti} = 10937.5 + 312.5 + 2812.5 + 2343.75 = 16406 \$$$

Montaj maliyeti, kuruluş maliyetinin % 20 si olarak belirlenmiştir. Tera Energy montaj fiyatlarından derlenmiştir.

$$= 16406 \times 0.20 = 3281.25 \$$$

Kuruluş ve montaj maliyetlerinin toplamı  $I_k$  olarak aşağıdadır.

$$I_k = 16406 + 3281.25 = 19687.25$$

Yıllık sabit sermaye veya yatırım masrafları;

$$C_k = I_k \times 0.11347 = 2234 \$'dır.$$

Yıllık işletme ve bakım masrafları;

$C_m$  = Her Yıl İçin 100 \$'dır. Tera Energy servis ve bakım anlaşmalarına görelerdir.

Yılda Elde Edilen Elektrik

$$E = I \times A \times E_M \times E_S \times 365 \text{ ( kWh )}$$

$$I = \text{Ortalama Yıllık Işıma} = 5.50 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{gün}$$

$$A = \text{Ünite alanı} = 8.75 \text{ m}^2 \text{ (BP 85)}$$

$$E_M = \text{Ünite Verimi} = 0.15$$

$$E_s = \text{Sistem Verimi} = 0.86$$

Yılda Elde Edilen Elektrik

$$E = 5.5 \times 8.75 \times 0.15 \times 0.86 \times 365$$

$$E = 2265 \text{ kWh}$$

Birim Güç Başına Maliyet ( \$ / kWh )

$$g = (c_k + c_m + c_f) / E \text{ dir.}$$

$$g = (2234 + 100) / 2265$$

$$= 1.03 \text{ $ / kWh}$$

Buna benzer şekilde 2-10 kW aralığı için değerler hesaplanarak Çizelge 6.1 hazırlanır.

Burada dikkat edileceği üzere  $c_f$  yani yıllık yakıt masrafının olmadığı görülecektir.

Çizelge 6.1 PV sisteminin güç-maliyet ilişkisi

KW	KM	Montaj	$I_k$	$c_k$	$c_m$	Y.E.E.E	\$ / kWh
1	16406	3281.25	19687.25	2234	100	2265	1.03
2	27495	5499	32994	3743.8	200	4530	0.870
3	37812	7562.5	45375	5148.7	300	6795	0.801
4	48906	9781.25	58687.25	6660	400	9060	0.779
5	60.000	12000	72000	8170	500	11325	0.765
6	70312	14062.5	84375	9574	600	13590	0.748
7	81406	16281.25	97687.5	11085	700	15855	0.743
8	91718	18343.75	110062.5	12489	800	18120	0.733
9	102812	20562.5	123375	14000	900	20385	0.726
10	114062	22812.5	136875	15531	1000	22650	0.725

## 6.4 Jeneratör Enerji Maliyeti

İncelenen yılda elde edilen elektrik değerleri aralığında diesel jeneratör bulunmadığından süper benzin yakıtlı AKSA jeneratörleri baz alınmıştır. Her bir jeneratörün onbin çalışma saati ömrü olduğu ve beşbin saat ömür sonunda da jeneratör fiyatının yarısı kadar bir bakım ve onarım maliyeti çıkaracağı kabul edilmiştir.

### 2.2 kVA ( 1.76 kW ) için;

$$\text{Jeneratör Fiyatı} = 2 \times 490 \times 1.25$$

$$= 1225 \$$$

$$\text{Şarj Kontrol Ünitesi} = 2 \text{ Adet ( Eck 8 M )}$$

$$= 2 \times 125 \times 1.25$$

$$= 312.5 \$$$

$$\text{Aküler} = 6 \text{ Adet (EBP 1500)}$$

$$= 6 \times 375 \times 1.25$$

$$= 2812.5 \$$$

$$\text{Kuruluş Maliyeti} = 1225 + 312.5 + 2812.5 = 4350 \$$$

$$\text{Montaj} = \text{Kuruluş Maliyetinin \% 20 si alınır.}$$

$$= 4350 \times 0.20 = 870 \$$$

$$I_k = 4350 + 870 = 5220 \$$$

$$c_k = I_k \times 0.11347 = 592.31 \$$$

Yılda elde edilen elektrikten gidilerek jeneratörün kaç saat çalışacağı bulunur. Yılda elde edilen elektrik değerleri olarak, PV ( Fotovoltaik ) sistem verileri kullanılmıştır.

$$t = \text{Çalışma saati ( h / gün )}$$

$$2265 = 2,2 \times t \times 365$$

$$t = 2.82 \text{ ( h / gün )}$$

20 sene periyot için 20586 çalışma süresi vardır. Bundan dolayı iki adet jeneratör gerkmektedir.

$c_m = 5000 \text{ h}$  çalışmada jeneratör fiyatının yarısı kadar masraf çıkardığından dolayı

$c_m = 122 \$$

$b_e$  ( Özgül Yakıt sarfiyatı ) = 1.2 lt yakıt / kWh

YF ( Yakıt Fiyatı ) = 0.8 \$ / lt yakıt

Yıllık yakıt masrafları;

$c_f = 1.3 \times 0.8 \times 2.82 \times 365 = 1070.47 \$$  dir.

Birim Güç Başına Maliyet ( \$ / kWh )

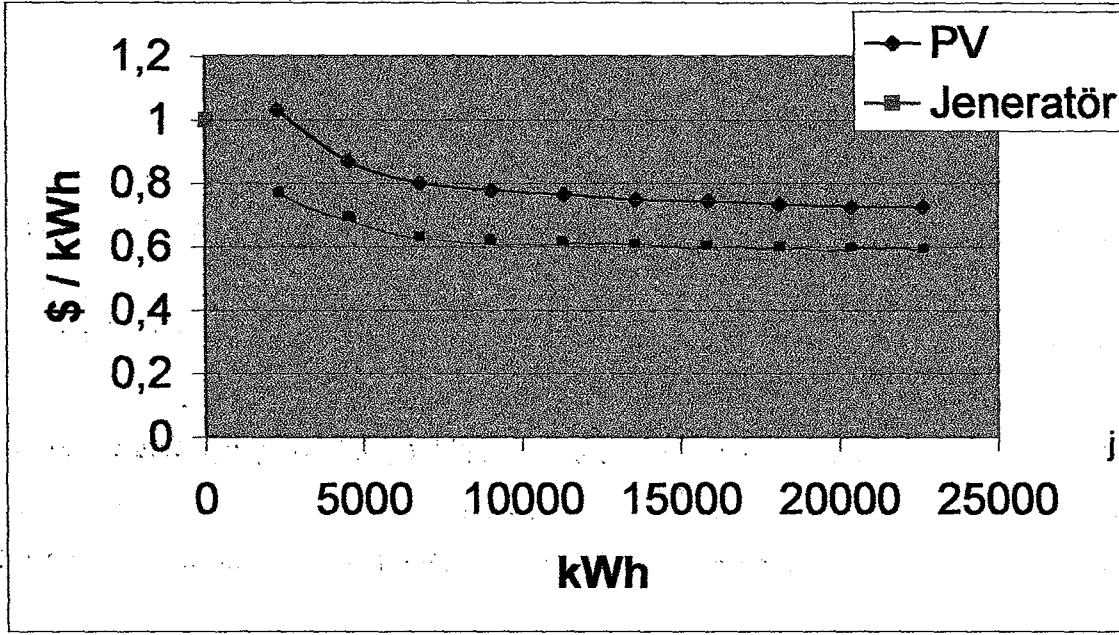
$g = ( 592.31 + 122 + 1070.47 ) / 2265$

= 0.788 \$ / kWh

Aksa tarafından üretilen generatörlerin kapasite aralığına göre bulunan değerleri Çizelge 6.2 de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 Jeneratör sisteminin güç-maliyet ilişkisi

kW	KM	Montaj	$c_k$	$c_m$	$c_f$	$b_e$ (lt yakıt/ h )	Y.E.E.E	\$ / kWh
2.2	4350	870	592.31	122	1070.47	1.3	2265	0.788
2.2	4350	870	759.11	125	2140.94	1.3	4530	0.680
2.2	6800	1360	925.91	183	3211.41	1.3	6795	0.626
10.8	7897	1579	1075.2	160	4436.36	6.8	9060	0.626
10.8	8537	1707	1162.4	213	570.46	6.8	11325	0.625
10.8	9619	1923.9	1309.8	270	6840.4	6.8	13590	0.619
10.8	9619	1923.9	1309.8	324	7986	6.8	15855	0.606
10.8	11250	2250	1531.8	361	9033.2	6.8	18120	0.603
10.8	11784	2356.8	1604.5	407	10273.5	6.8	20385	0.602
10.8	11784	2356.8	1604.5	431	11397.3	6.8	22650	0.593



Şekil 6.1 PV ve jeneratör sisteminin güç-maliyet ilişkisi karşılaştırılması

Çizelge 6.3'e göre PV sistemi ile jeneratör arasındaki \$ / kWh olarak fark, 0.15 gibi bir değeri göstermektedir. Bu durumda jeneratör avantajlı gibi görünmekte ise de daha önce bahsedilen sosyal maliyetler ( 0.27 \$ / kWh ) jeneratöre eğrisine eklendiğinde PV sistem avantajlı duruma geçmektedir.

## 7. SONUÇLAR

İncelemekte olduğum PV sistemi, bütün gelişmiş ülkelerinde araştırma yaptığı bir alternatif enerji kaynağıdır. Kaynağın güneş olması sebebiyle sonsuz olarak kabul edilmesi ve de sistem çalışması esnasında da herhangi bir çevresel zararında bulunmaması; üzerinde durulması gereken faktörlerin başında gelmektedir.

Dünya'nın 2060 yılında enerji ihtiyacının % 60'ının yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayacağı düşünülürse, PV sisteminin üzerine Türkiye olarak yeterince düşmediğimiz gözükmektedir.

PV sisteminin; diğer enerji üretim tesisleriyle çok rahat bir şekilde rekabet edebilmesinin tek yolu % 15'ler seviyesindeki verim oranının yukarılara çekilebilmesi ve de üretim maliyetinin düşürülmesi ile gerçekleştirilebilecektir.

Türkiye'de günümüz koşulları için yapmış olduğum karşılatırmalı maliyet analizinde bile; PV sisteminin, enterkonnekte sistemin bulunmadığı bölgelerimizde çok rahatlıkla uygulanabilir olduğu görülmektedir. Yalnızca devlet politikası haline gelmemesi ve de sistem yeterince tanıtılmadığından bu teknolojiye geri kalmaktayız.

Bu sistem üreticileri arasında olmakta, uzun vadede yurdumuz için getirisi olacak bir sektör yaratacaktır. Gelecek yıllarda bu teknolojiye girmemiz kaçınılmaz olacaktır. Fakat gelişmiş ülkelere Pazar olmaksızın, sistem üreticileri arasına girmemiz gerekmektedir.

Türkiye'nin bir güneş ülkesi ve Avrupa'nın iki katı kadar güneş enerjisine sahip olmasına rağmen; ülkemizde bu çalışmaların, hiçbir ilgi görmemesi ve çalışma olanağı sağlanmaması çok üzücüdür. Kaybolan doğal güzelliklerimizin daha çok tahribata maruz kalmaması ve enerji bağlamında dış ülkelere ekonomik yönden bağımsız olması için, evrenimizin ülkemize sunduğu bu fırsatı mutlaka kullanmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Akpınar, S. İ.Ü. Fen Fakültesi, (1979) "Yarıiletkenler Fiziği"
- Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, (6-10 Temmuz 1998), 2. World Conference and Exhibition On Photovoltaic Solar Energy Conversion"
- Aybers, N., Şahin, B., (1995), "Enerji Maliyeti"
- Çevre ve Enerji Kongresi, Bildiriler Kitabı,(5-7 Haziran1997)
- Duerinx, F., Szlufcik, J., Nijs, (1998), "High Efficiency Mechanically V-Textured Screen Printed Solar Cell Manufacturing
- Heiser, G., (1995), "Optimisation of Rear Contact Geometry Of High-Efficiency Si Solar Cells by Combining Measurements With Numerical Modelling", 13. Avrupa Fotovoltaik Güneş Enerjisi Konferansı
- Hill, M., ABD (1981) "Bell Laboratories, Incorporate Landsberg, P.T., Treble, F.C., Dostroisky, P.D., Mayrock, (1991) "Electricity From The Sun"d"
- Lorenzo, E., Sokorin, A., Egido, M.A., (1991) "Photovoltaic Engineering"
- Markwatt, t, (1994), "Solar Electricity)"
- Stone, J.L., (1993), "Photovoltaics: Unlimited Electrical Energy From The Sun"
- Technical Bulletin No:502, Maryland, ABD., (1986) "Integrated Power Corporation; System Design: PV Module Selection"
- Tera Energy Bilgi Notları,(2000)
- The Science Organisation, "Harnessing Direct Solar Energy"
- Van Gijssel, G., Verachten, S., (1997), "Catholic University Of Louvain"
- Zweibel, K., (1990), "Harnessing Solar Power, Plenum, New York"

## ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 09.02.1976

Doğum Yeri İstanbul

Lise 1989-1992 Sağmalcılar Lisesi

Lisans 1993-1998 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1998-2001 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri  
Enstitüsü Mak. Müh. Anabilim Dalı, Enerji

### Çalıştığı Kurumlar

1997-2001 Tekin Mühendislik Gaz Dönüşüm Sanayi Ltd. Şti