

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**GÜNEŞ TARLASI İLE ELEKTRİK  
ENERJİSİ ÜRETİMİ VE SDÜ KAMPÜS  
ALANINDA BİR UYGULAMA ANALİZİ**

**SEFER KUTLU**  
Yüksek Lisans Tezi

**MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA 2002**

T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

128312

GÜNEŞ TARLASI İLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ VE  
SDÜ KAMPÜS ALANINDA BİR UYGULAMA ANALİZİ

SEFER KUTLU

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ISPARTA, 2002

128312

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Ali Kemal YAKUT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kurtuluş BORAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Reşat SELBAŞ



ONAY

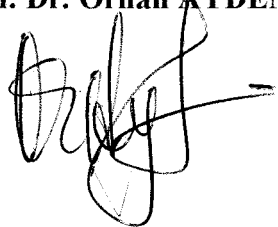
Bu tez 02 /02/ 2002 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu'na belirlenen yukarıdaki Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

...../...../ 2002

**S. D. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ**

**Adı Soyadı: Prof. Dr. Orhan AYDEMİR**

**İmza:**



## ÖZET

Bu tez çalışmasında Isparta'da fotovoltaik enerjiden yararlanma şansı; güneş pilleri vasıtasıyla, güneş tarlası modeli göz önünde bulundurularak araştırılmıştır. Bu araştırma esnasında bir güneş pili modülü ile çalışan sistem kurularak değişik koşullarda deneyler yapılmıştır. Deney düzeneği; bir güneş pili, şarj regülatörü devresi, akümülatör, DC-AC çevirici invertör devresi, transformatör, yük ve ölçü aletlerinden oluşmaktadır. Deneyler SDÜ Keçiborlu Meslek Yüksek Okulu'nda yapılmış olup, güneş pili tam güneşe ve 37° eğime yerleştirilmiştir.

Deneylerde elde edilen veriler kullanılarak güneş pili verimi, şarj regülatör verimi, akümülatör verimi ve invertör verimi çıkartılmıştır. Ayrıca Elektrik İdaresi Etüd İşleri Genel Müdürlüğü'nün Isparta Meteoroloji Bölge Müdürlüğünde konuşlandırılan güneş ışınımı ölçüm cihazlarının verilerinden de faydalanılmıştır.

Yapılan deneyler ve alınan değerler sonucunda bir elektrik kullanım senaryosunu göre fotovoltaik sistemin ilk yatırım maliyeti çıkartılmıştır. Elde edilen fotovoltaik sistem maliyeti aynı senaryoya bağlı olarak şehir elektriği kullanılması ve uzak hat çekimi ilk yatırım maliyeti ile karşılaştırılmıştır. Buradan güneş pili sisteminin elektriğin bulunduğu yerleşim birimlerinde ekonomik olmadığı, ancak uzak hat çekimine göre daha ekonomik olabileceği görülmüştür.

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan güneş pillerinin maliyeti oldukça yüksek ve verimleri oldukça düşüktür. Özellikle sistemin toplam maliyetinin % 91' lik bir kısmı pil maliyetini oluşturması, toplam maliyetin büyük olmasında önemli rol oynamaktadır.

Gelişen teknolojiyle önümüzdeki yıllarda % 20 civarında olan güneş pillerinin verimleri daha da artırılabileceği ve maliyetlerinin ucuzlayacağı beklenmektedir. Fotovoltaik sistemlerin uzun ömürlü olmaları, çevreyi kirletmemeleri, gürültüsüz çalışmaları ve en önemlisi enerji kullanımından dolayı para ödenmemesi gibi avantajları ile önümüzdeki yıllarda kullanımının artması beklenmektedir.

**ANAHTAR KELİMELER :** Güneş, Enerji, Elektrik, Fotovoltaik, Güneş pili, Güneş tarlası.

## ABSTRACT

In this thesis study, the chance of make use of photovoltaic energy in Isparta is investigated based on model of a solar farm. During this research, a system run by one solar cell is implemented and experemnts are done in various conditions. Experimental setup consist of a solar cell, circuit of charge regulator, battary, inverter, transformer, load and some measurement insturments. Experiments are done in Keciborlu Vocational High school of SDU. Solar cell is located exactly to the drection of south with slope of  $37^{\circ}$ .

By usase of data obtained in experiments, efficiency of solar cell, charge regulator and inverter is obtained. In addition, make use of data, obtained by measurement of local solar radiation an insturments, is done.

At the end of experiments and measurements cost of first foundation of photovoltaic system is obtained. This cost is compared with usage of city electric source and invesment of long power lines. The results are showed that it is more economical than foundation of long power lines but it is not practical when there is already power lines.

Cost of solar cell used in photovoltoic system is more expensive and efficiency is very low. Particularly due to %91 percent of total cost of system is for only cell overall cost becomes very large.

By the advance of technology not only the efficiency of solar cell, already %20, is expected to increase but also total cost is going to be cheap. Due to advantage. Of photovoltaic system, such as their long life, free from environmental pollution has quite operation and the most important are free usage, it is expected to increase more usage of it.

**KEY WORDS:** Solar, Energy, Electric, Photovoltoic, Solar cell, Solar farm.

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Azami derecede artan enerji ihtiyacını karşılamak üzere son yıllarda güneş enerjisinden elektrik üretip faydalanmak için bir çok çalışmalar yapılmış ve halen yapılmaktadır. Bu konudaki en büyük sıkıntımız fotovoltaiik sistemlerde kullanılan güneş pillerinin hem verimlerinin düşük olması hem de ülkemizde imal edilmemesidir. Temenni ederiz ki bundan sonraki çalışmalarda hem verimlilik artırılсын hem de ülkemizde daha ucuz imal edilebilsin. Böylece enerji ihtiyacını hiç tükenmeyecek kaynaktan çok daha ucuza temin edebiliriz.

Böyle bir konuda çalışmamı sağlayan ve bana her konuda yön gösteren danışman hocam Doç. Dr. Ali Kemal Yakut Bey'e teşekkür ederim.

Teknik bilgi ve deneysel çalışmalarında beni yönlendiren Yrd. Doç. Dr. Reşat Selbaş'a, Yrd. Doç. Dr. Hakan Çalış'a, Yrd. Doç. Dr. Akif Kutlu 'ya Şükranlarımı sunarım.

Materyal ve Metod konusunda katkılarından dolayı EİE Isparta Bölge Şefi Mustafa Özgündüz'e ve Mustafa Karaçorlu'ya , Erkan Dikmen'e teşekkür ederim.

Tezin anlatım dilinin düzeltilmesinde ve dizgi düzenindeki katkılarından dolayı Ramazan Kutlu'ya, Serkan Günaydın'a ve Ömer Karabıyık'a şükranlarımı sunarım.

Son olarak da beni her zaman manevi olarak destekleyen eşime, anneme, babama ve çocuklarıma teşekkür ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Enerji Kaynakları ve Kullanımları .....	1
1.2. Güneş Enerjisi .....	2
1.3. Güneş Enerjisinin Kazandığı Önem ve Kullanım Amaçları .....	3
1.4. Türkiye’de Güneş Enerjisi .....	7
1.5. Herhangi Bir Yerde Yüzeğe Gelen Güneş Enerjisinin Hesaplanması .....	9
1.5.1. Direkt Güneş Enerjisi .....	10
1.5.2. Diffüz Güneş Enerjisi .....	11
1.5.3. Yansıyan Güneş Enerjisi .....	11
2. GÜNEŞ PİLLERİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER .....	12
2.1. Güneş Pilleri .....	12
2.2. Güneş Pillerinin Tarihi Gelişimi .....	12
2.3. Güneş Pillerinin Özellikleri .....	13
2.4. Yarı İletkenler ve Fotovoltaik Etki .....	15
2.5. Güneş Pillerinin Tasarımı .....	22
2.6. Güneş Pili Modelinin Oluşturulması .....	25
2.7. Güneş Pili Karakteristikleri .....	33
2.8. Güneş Pili Modülü Seçimi .....	35
2.8.1. Tasarım Parametreleri .....	35
2.8.1.1. Yerel Güneşlenme Miktarı .....	36
2.8.1.2. Yerel Sıcaklık .....	36
2.8.1.3. Sistem Kayıpları .....	36
2.8.1.4. Diğer Güç Sistem Kayıpları .....	36
2.8.1.5. Enerji Depolama Ünitesinin Kapasitesi .....	37
2.8.2. Güç Seçimi .....	37
3. TEMEL FOTOVOLTAİK SİSTEMLER ve YARI İLETKENLER .....	39
3.1. Yarı İletken Maddeler .....	39
3.2. Güneş Pili Çalışma Prensipleri .....	40
3.3. Güneş Pili Yapım Esasları .....	41
3.4. Güneş Pili Türleri .....	42
3.4.1. Kristal Silisyum Güneş Pilleri .....	42
3.4.2. Tek-Kristal Silisyum Güneş Pilleri .....	42
3.4.3. Yarı-Kristal Silisyum Güneş Pilleri .....	42
3.4.4. Seris Silisyum Güneş Pilleri .....	43
3.4.5. Çok-Kristal Silisyum Güneş Pilleri .....	43
3.4.6. İnce Film Güneş Pilleri .....	43
3.4.7. Diğer Tip Güneş Pilleri .....	43
3.5. Güneş Pili Sistemleri .....	44

3.5.1. Şebekeye Bağlantılı Güneş Pili Sistemleri.....	46
3.5.2. Bağımsız Güneş Pili Sistemleri.....	47
3.5.2.1. Sistemin Yapısı ve Özellikleri.....	47
3.5.2.2. Sistemin Tasarımı.....	49
3.5.3. Güneş Tarlası Modeli.....	52
3.6. Güneş Pili Sistemlerinin Ekonomisi.....	55
3.6.1. Verim.....	55
3.6.2. Yatırım Maliyeti.....	55
3.6.3. Modül Ömrü.....	56
3.6.4. Güneş Pili Sistemlerine İlişkin Diğer Özellikleri.....	56
4. MATERYAL VE METOT.....	57
4.1. Materyal.....	57
4.2. Metot.....	58
4.2.1. Deneş Düzenegİ.....	58
4.2.1.1. Fotovoltaik Güneş Pili.....	58
4.2.1.2. Şarj Regülatör Devresi.....	61
4.2.1.3. Akümülatör.....	63
4.2.1.4. İvertör Devresi.....	63
4.2.1.5. Yük (Alıcı).....	65
4.2.1.6. Veri Toplama Ünitesi.....	65
4.3. Deneşlerin Yapılışı.....	66
5. DENEY SONUÇLARI.....	67
6. DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI.....	77
7. KÜÇÜK ÖLÇEKLI FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI.....	79
7.1. Enerji Sarfiyatı ve Maliyet Analizi.....	79
7.1.1. Tasarım.....	79
7.1.2. İlk Yatırım Maliyeti.....	85
7.2. Şehir Elektriğı Kullanılması ve Enerji Maliyeti.....	88
7.3. Uzak Hat Çekimi ve Enerji Maliyeti.....	89
7.4. Maliyet Karşılaştırması ve Gelecekte Güneş Pili.....	92
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
9. KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	100



## SİMGELER (KISALTMALAR) DİZİNİ

$\alpha$	Fotonun malzeme içinde aldığı yol
$\tau$	Geçirgenlik katsayısı
$\lambda$	Görünen ışığın sınırları
$\eta$	Verim
AC	Alternatif akım
Ah	Ampersaat
c	Foton sayısı
DC	Doğru akım
$D_p$	Yayıma sabiti
e	Elektron yükü
E	Gelen ışığın foton enerjisi
$e^{-\alpha l}$	İletilen radyasyon miktarı
$E_{cu}$	Ortalama enerji
$E_g$	Yasak bant aralığı
EİE	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
F	Frekans
Ge	Germanyum
$G_p$	Deliklerdeki net üretim
$g_p = \frac{P_n}{\tau_p}$	<i>n malzemesindeki deliklerin ısı üretim oranı</i>
h	Dalga boyu
$I_o$	Ters doyma akımı
$I_p$	Yayıma akımı
$I_{sc}$	Kısa devre akımı
k	Boltzman sabiti
km	Kilometre
KW	Kilowatt
KWh	Kilowatt saat
LDR	Fotodirenç
m	Metre

mm <sup>2</sup>	Milimetre kare
MW	Megawat
N <sub>ph</sub>	Uyarıcı foton sayısı
P <sub>c</sub>	Çıkış gücü
P <sub>m</sub>	Maksimum çıkış gücü
p <sub>n</sub>	Elektronların difzyon potansiyeli
Pn <sub>(o)</sub>	Yarı denge denklemi
P <sub>p</sub>	Deliklerin difzyon potansiyeli
PV	Fotovoltaik
Q	Jonksiyon biriktirme etkinliği
q <sub>dif</sub>	Diffüz güneş enerjisi
q <sub>dir</sub>	Direkt güneş enerjisi
q <sub>N</sub>	Günlük direk güneş enerjisi
q <sub>y</sub>	Yansıyan güneş enerjisi
q <sub>y</sub>	Yılda gelen güneş enerjisi
R	Güneş pilindeki radyasyon yansımaları
r	Pilin optik yansımaya katsayısı
$r_p = \frac{P}{\tau_p}$	Dengesiz koşullarda yeniden birleşme oranı
R <sub>y</sub>	Yük direnci
Si	Silisyum
T	Sıcaklık
TEP	Ton eşdeğer petrol
TET	Ton eşdeğer taş kömürü
V	Elektriksel potansiyel (Volt)
V <sub>m</sub>	Maksimum güçteki gerilim
V <sub>oc</sub>	Açık devre gerilimi
Wh	Watt saat

**ŞEKİLLER ve RESİMLER DİZİNİ****Sayfa**

Şekil 1.1.	Güneş enerjisinin kullanım alanları.....	4
Şekil 2.1.	Yarı iletken maddenin kristal yapıları .....	16
Şekil 2.2.	Bir p-n jonksiyonunun kavramsal gösterimi.....	18
Şekil 2.3.	Bir p-n jonksiyonunda enerji bölgelerinin şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.4.	Fotovoltaik etkiden yararlanarak elektrik enerjisi üretiminin şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.5.	Çeşitli güneş pili malzemelerinin emme spektrumları .....	24
Şekil 2.6.	p-n jonksiyon modeli .....	26
Şekil 2.7.	Fotovoltaik güneş pilinin eşdeğer devresi .....	30
Şekil 2.8.	Bir güneş pilinin V-I karakteristiği .....	33
Şekil 2.9.	Pilin ışık şiddetine bağlı I-V karakteristiği .....	34
Şekil 2.10.	Pilin sıcaklığa bağlı I-V karakteristiği .....	34
Şekil 2.11.	Pilin ışık şiddetine bağlı olarak P-I karakteristikleri .....	35
Şekil 2.12.	Pilin sıcaklığa bağlı P-V karakteristikleri.....	35
Şekil 2.13.	Çeşitli güneş pili modül sıcaklıklarında akümülatör-sistem geriliminin belirlenmesi .....	36
Şekil 3.1.	PN eklemının oluşturulması.....	40
Şekil 3.2.	Güneş pili yapısı.....	41
Şekil 3.3.	Temel güneş enerjisi sistemi .....	45
Şekil 3.4.	Bağımsız güneş pili sistemi .....	48
Şekil 3.5.	Küçük bir pv sistem tasarımı .....	50
Şekil 3.6.	Güneş tarlası modelinde ısı akışı.....	54
Resim 4.1.	Direkt güneş enerjisi ölçüm cihazı .....	57
Resim 4.2.	Diffüz güneş enerjisi ölçüm cihazı .....	58
Resim 4.3.	Deney düzeneğinin genel görünüşü.....	59
Resim 4.4.	Deney düzeneğinin yakından görünüşü.....	59
Resim 4.5.	UNI-SOLAR US5 tipi güneş pili .....	60
Şekil 4.1.	Güneş pilinin I-V karakteristik eğrisi .....	61
Şekil 4.2.	Şarj regülatör devresi.....	62
Şekil 4.3.	İnvertör devresi .....	64
Şekil 5.1.	Hesaplanan verimlerin şematik gösterimi.....	67
Şekil 5.2.	Gelen güneş ışınımı ve pil gücü .....	70
Şekil 5.3.	Güneş Pili verimi.....	70
Şekil 5.4.	Pil ve şarj regülatöründen alınan güç ve kayıp .....	71
Şekil 5.5.	Şarj regülatörü verimi .....	71
Şekil 5.6.	Şarj verimi.....	72
Şekil 5.7.	Akümülatörde depolanan enerji .....	72
Şekil 5.8.	Akümülatörden çekilen enerji .....	73
Şekil 5.9.	Akümülatör karakteristikleri .....	74
Şekil 5.10.	İnvertör karakteristikleri .....	75
Şekil 5.11.	İnvertör verimi .....	76
Şekil 7.1.	Tasarlanan senaryo için ilk yatırım maliyeti ve güneş ışınımının aylara göre değişimi.....	88
Şekil 7.2.	Uzak hat çekimi ilk yatırım maliyeti .....	92
Şekil 7.3.	Tasarlanan senaryo için ilk yatırım maliyetinin karşılaştırılması ..	93

Şekil 7.4.	Güneş pili ve uzak hat ilk yatırım maliyetlerinin güce göre değişimi .....	93
Şekil 7.5.	Güneş pili sistem ünitelerinin ilk yatırım maliyet içindeki Payları .....	94



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. L/d ve tesis gücü değişimleri.....	53
Çizelge 3.2. $P_p/P_c$ oranları .....	53
Çizelge 3.3. Bazı güneş tarlası elektrik santralleri.....	55
Çizelge 4.1. UNI-SOLAR US5 tipi güneş pilinin standart şartlarda elektriksel ve fiziksel özellikleri.....	60
Çizelge 4.2. Volta 1207 marka kuru tip akümülatörün özellikleri .....	63
Çizelge 4.3. KEITHLEY marka veri toplama ünitesinin özellikleri .....	65
Çizelge 6.1. Deneyler sonucu elde edilen invertör verimleri .....	78
Çizelge 7.1. Kurulu güç dökümü .....	79
Çizelge 7.2. Saatlere göre günlük tüketici güçleri .....	80
Çizelge 7.3. Elektrik kullanım senaryosu.....	80
Çizelge 7.4. Aylara göre günlük elektrik enerjisi kullanımı .....	81
Çizelge 7.5. Yıllık aylara göre günlük enerji tüketimi.....	84
Çizelge 7.6. Değişik eğimlere gelen günlük toplam güneş ışınımı miktarları ..	85
Çizelge 7.7. Tasarlanan senaryo için gerekli modül alanı.....	87
Çizelge 7.8. İlk yatırım maliyeti .....	87
Çizelge 7.9. Tasarlanan senaryo için elektrik maliyeti .....	89
Çizelge 7.10. Kullanılan malzemelerle ilgili birim fiyat listesi.....	90
Çizelge 7.11. Kısa mesafeler için uzak hat çekimi ilk yatırım maliyeti .....	91
Çizelge 7.12. Uzak mesafeler için uzak hat çekimi ilk yatırım maliyeti .....	91

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Enerji Kaynakları ve Kullanımları

Enerji üretimi ve tüketimi, çağımızda milletlerin refah seviyesini gösteren bir ölçü olmuştur ve ekonomik gelişme enerji tüketimiyle orantılı olarak değişmektedir. İnsanların kullandığı enerji kaynakları teknolojik gelişmelere paralel olarak değişmiştir. Önceleri, enerji kaynağı olarak sadece odun ve benzeri yakacaklar kullanılırken, uzun süre sonra kömür ve yakın tarihte de petrol ve tabii gaz bulunup kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde insanlığın ihtiyacı olan enerji çoğunlukla fosil yakacaklardan, hidrolik enerjiden ve çok küçük bir payı da nükleer enerjiden temin edilmektedir.

Enerji kaynakları, üretildiği miktarlar göz önüne alınarak, “birincil enerji kaynakları” ve “ikincil enerji kaynakları” olarak iki grupta incelenebilir (Kılıç, 1983), (Uyarel, 1987). Birincil enerji kaynakları, fosil kaynaklar (kömür, petrol, v.s.), hidrolik enerji ve nükleer enerji, ikincil enerji kaynakları ise güneş enerjisi, jeotermal enerji, gel-git enerjisi, dalga enerjisi, rüzgar enerjisi, fizyon enerjisi v.b. enerji kaynaklarıdır.

Günümüzde dünyada tüketilen enerjinin %80'ine yakını fosil kaynaklardan temin edilmektedir. Fosil kaynaklar içerisinde de en çok kullanılanı petroldür. Yapılan tahminlere göre fosil yakacaklar, bugünkü oranda tüketilmeye devam edilirse, yakın gelecekte tükenmeye başlayacaktır. Dünya hidrolik enerji potansiyelinin sadece %3'ünden faydalanmaktadır (Kılıç 1983). Bunun sebebi ise, hidrolik santrallerin ilk tesis masrafları fazla olması ve yapımı için uzun süre geçmesidir. Nükleer enerjinin üretilen toplam enerjiye katkısı son yıllarda artmaya başlamıştır. Birim enerji maliyeti düşüktür. Ancak yakıtın temin edilebilme ve nükleer radyasyon problemleri vardır.

Yenilebilir enerji kaynaklarının önemi, ülkelerdeki potansiyellere göre değişir. Gel-git enerjisinden, gel-git olayının sık şartlandığı Fransa, ABD, Kanada ve Avustralya gibi ülkelerde yararlanılırken, jeotermal enerji uygulamaları İzlanda, Yeni Zelanda, ABD, Japonya ve Sovyetler Birliği'nde mevcuttur. Türkiye'de de jeotermal enerjiden faydalanılmaya başlanmıştır ve kızıldere'de pilot bir türbinden elektrik enerjisi

retiminde rüzgar hızının 3 m/sn'den daha büyük olması istenir ve zemine yakın yerlerde rüzgar çevrili estiğinden, genellikle 10-100 m yüksekliklerde esen rüzgarlardan yararlanılır. Türkiye'de rüzgar enerjisi bakımından fakir sayılmamasına rağmen dünya rüzgar enerjisi kuşağının dışında kalmaktadır Dalga enerjisinden çok az ülkelerde faydalanılmaktadır. Biyogaz enerjisi ise küçük çaptaki enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir. Gerek dalga enerjisi, gerekse biyogaz enerjisi için uygun bölgeler sınırlıdır. Kuşkusuz yenileyebilir enerji kaynakları içerisinde en güncel olanı ve en çok uygulama alanı bulunan güneş enerjisidir.

## 1.2. Güneş Enerjisi

Tükenmeyen, çevreyi kirletmeyen, dışalım gerektirmeyen ve bir ölçüde de bedava sayılabilecek kaynak olan güneş enerjisi, yeni ve yenilenebilir almaşık enerji kaynakların başta gelenidir.

Fert başına elektrik enerjisi tüketiminin gelişmişliğin bir göstergesi halini aldığı çağımızda, birincil enerji kaynaklarının sürekli tükenmekte oluşu, ayrıca bu kaynakların enerji üretimi için yakılmaları esnasında ortaya çıkan ekolojik bozulmalar ve hatta klimatolojik denge bozulmaları, bugün enerji konusunda hiç vakit kaybedilmeden çözülmesi gereken bir problem olarak ortaya koymaktadır. Bu problemin çözümlerinden biricisi yeni ve temiz enerji kaynaklarının bulunması, ikincisi ise tüketiminin ekonomik olarak kabul edilebilecek en alt düzeye indirilmesi biçiminde özetlenebilir.

Yeni enerji kaynaklarından sayılabilecek olan atom enerjisi, reaktörlerinin yarattığı evre sağlığı riski ve yaydığı ısı ile buhardan kaynaklanan klimatolojik denge bozulmaları sorunlarıyla enerji problemine kalıcı bir çözüm getirmemektedir. 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 kilamotolojik dengeyi bozmadan elde edilen doğru akım elektrik enerjisi evirici ve trafolar aracılığı ile doğrudan şebekeye verildiği gibi, elektroliz yoluyla hidrojen gazına dönüştürülerek

depo edilebilmekte veya halen doğal gaz naklinde kullanılan boru şebekesi ile kullanılacağı yerlere nakledilebilmektedir.

Güneşten dünyaya gelen enerjinin yoğunluğu, atmosferin üzerinde m<sup>2</sup> başına 1.35 kW kadardır. Bu yoğunlukla dünya çapının kapladığı alana gelen güneş gücü 178 PW düzeyinde olup, dünyadaki korulu elektrik santrallerinin toplam gücünün 100 bin katı düzeyindedir. İnsanlığın enerji istemi 8-9 TW güçle karşılanabileceğinden güneşten gelen güç bunun 20 bin katıdır. Dünyanın tüm yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi,  $1.22 \times 10^{14}$  TET yada  $0.814 \times 10^{14}$  TEP gibi görkemli boyuttadır. Bir başka anlatımla, bir yılda gelen güneş enerjisi bilinen kömür rezervinin 50 katı ve bilinen petrol rezervinin 800 katı kadardır.

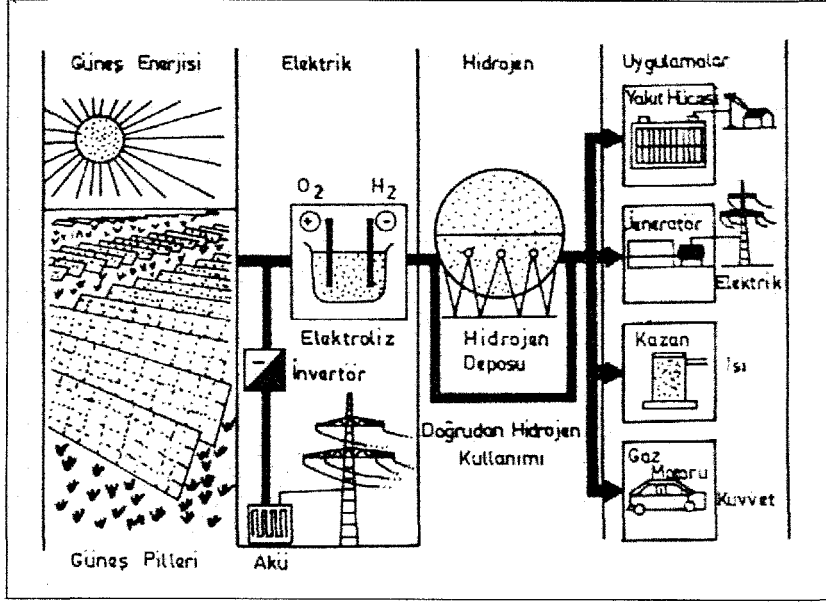
### **1.3. Güneş Enerjisinin kazandığı Önem ve Kullanım Amaçları**

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

Bugün için güneş enerjisinin kullanımı, gündelik yaşam yapısından ve konutlarından başlamakta, iletişime, tarıma, endüstri kesimine, elektrik santrallerine, askeri hizmetlere ve uzaya dek uzanmaktadır. Güneş teknolojisi özellikle, alçak sıcaklık ve yüksek sıcaklık ısı uygulamalarına, ıslık elektrik ve güneş termik elektrik uygulamalarına, fotosentetik ve fotokimyasal işlemlere dayanmaktadır.

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





Şekil 1.1. Güneş Enerjisinin Kullanım Alanları (Atagündüz, 1989)

Bugün için dünya genelinde güneş teknolojisi, “güneş mühendisliği” denilen yeni bir mühendislik dalını da doğuran biçimde oluşmuştur. Amerika Birleşik Devletleri ve Sovyetler Birliği bu teknolojide başı çekmektedirler. Onlarla yarışabilecek teknoloji birikimi bir ölçüde Fransa ve Japonya'nın elinde bulunmaktadır. Bunların hemen ardından Almanya ve İtalya gelmektedir. Bu teknolojiye batı dünyasının çokuluslu tekelleri, özellikle petrol şirketleri de el atmışlardır. Birleşmiş Milletlerin gelişme sürecindeki ülkelere, güneş teknolojisi yardım programı da vardır. Uygulamalar için Dünya Bankası'nın fonu da bulunmaktadır.

Batı dünyasında güneş teknolojisini geliştirmeye yönelik en önemli çalışma, şimdi OECD Uluslar arası Enerji Aşansı (IEA) kapsamında, Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Avusturya, Almanya, Belçika, Danimarka, Hollanda, İngiltere, İspanya, İsveç, İsviçre, 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 katılmaması büyük bir eksikliklerdir.

Dünya enerji bütçesinin geleceğini sağlıklı biçimde kestirmek olanaklı olmasa da bazı ülkelerin güneş enerjisi için önemli hedefler saptadıkları gözlenmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri enerji tüketiminin 1985 yılında %0.8'ini, 2000

yılında %7'sini ve 2020 yılında %25'ini ısısal, elektriksel ve biomasa dayalı güneş enerjisi uygulamalarıyla karşılamayı çok önceden planlamıştır. 1985-1990 döneminde güneşle ısınabilen konut sayısının bir milyona ulaştırılması tasarımı, Amerika'da bir ulusal atılım olarak benimsenmiştir. Yine Amerika'da Sandia National Laboratories tarafından 5MW'lık ve CRTF'in 10 MW'lık güneş termik deneme santralleri kurulurken, İtalya'da 1 MW'lık ADRANO güneş termik santrali işletmeye sokulmuş, Fransa'da da 0.5 MW'lık VIGNOLA güneş termik elektrik santrali yapılmıştır. Bunların yanısıra Japonya'da 1986-1990 dönemi için 10 MW'lık termik elektrik ve 1 MW'lık ısı elektrik güneş santral güçleri hedef alınarak çalışmalara girişilmiştir.

Güneş enerjisinin kontrollü ısı uygulamaları ise hızla gelişmektedir. OECD Uluslar arası Enerji Ajansı tarafından Kasım 1983'de yapılan açıklamalara göre, Amerika ve Japonya'da yılda üretilen kollektör miktarı 1.800.000 m<sup>2</sup> düzeyini aşmaktadır. Yine bir yılda Avustralya'da 176.000 m<sup>2</sup>, Yunanistan'da 41.000 m<sup>2</sup>, Almanya'da 27.000 m<sup>2</sup> ve İsveç'te 25.000 m<sup>2</sup> kollektör üretilmiştir. Bugün endüstriyel ve tarımsal uygulamalar ile yüzme havuzlarını ısıtmanın dışında yalnız evlerde kullanım suyu ısıtması için kurulu kollektör yüzeyi, Amerika'da 3.100.000 m<sup>2</sup>'yi ve Japonya'da 5.610.000 m<sup>2</sup>'yi aşmıştır. Bu tür kollektörlerden İtalya'da 150.000 m<sup>2</sup>, Almanya'da 130.000 m<sup>2</sup>, Yunanistan'da 85.000 m<sup>2</sup>, İngiltere'de 80.000 m<sup>2</sup>, İsveç'te 58.500 m<sup>2</sup>, İsviçre'de 46.000 m<sup>2</sup> kurulu yüzey bulunmaktadır. 100 m<sup>2</sup>lik kollektör yüzeyinin 70 kW ısıtma gücüne eşdeğer olduğu, %40 tesirlilikle bile 28 kW yararlı güç elde olunabileceği düşünülürse, sıralanan kollektör yüzeylerinin önemi vurgulanabilir.

Sanayileşmiş ülkelerde fotovoltaik pilerin üretiminin gelişimi ise iklim koşullarına, PV kuruluşların termik santrallere göre mal oluş fiyatına ve bu ülkelerin çevre politikalarına bağlıdır ve bu gelişimin gelecek yüzyılın başından önce tamamlanması beklenmektedir.

Fotopil üretiminde ise başta gelen ülkeler, ABD ve Japonya'dır. ABD'nin üretimi, dünya piyasasının %30'unu oluşturmaktadır. Japonya ise hesap makinelerinde kullanılan fotopillerin %80'inde çoğunu üretmektedir. Fransa Dünyadaki yıllık üretimin %5'ini, Avrupa'dakinin ise %30'unu sağlamaktadır. İtalya, Avrupa'daki %25'lik payı ise Fransa'yı izlemektedir. Sonraki sıralarda ise %20'lik pay ile

Almanya ve %10'luk pay ile İspanya gelmektedir. Başta Hindistan ve Brezilya olmak üzere güney ülkeleri de dünyadaki üretime %10'dan fazla katkıları ile dikkat çekmektedirler.

Bugün için güneş enerjisinin kullanılmasındaki genel amaç, alışlagelen birincil kaynak fosil yakıtların tutumlu ve ölçülü kullanımına yardımcı olmaktır. Dünya yapay enerji bunalımı, güneş enerjisinin teknolojik gelişimini ve geleceğini büyük ölçüde etkileyerek özellikle üç uygulamaya ağırlık kazandırmıştır. Bunlar;

Yapıların ısıtılmasında güneş enerjisinin kullanılması (bu tür yapılara güneş evleri ya da binaları adı verilmektedir.)

Güneş enerjisinin elektriğe dönüştürülerek kullanılması ve güneş elektrik santrallerinin geliştirilmesi,

Geleceğin yakıtı olan hidrojenin sudan üretilmesinde güneş enerjisinin kullanılması (bu yöntemle üretilen hidrojene ve sentetik yakıtlara, güneş yapay yakıtları da denilmektedir).

Binaların ısıtılmaları ve iklimlendirilmelerinde, 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 ayrıştırılması teknolojileri geliştirilmiştir. Likit ya da hibrid biçiminde hidrojenle çalışan termik motorlu araçlar da piyasaya çıkarılmış bulunmaktadır. Uçakların gaz türbinlerinde de yakıt olarak kullanılabilen hidrojen, elektrik santralleri ve endüstri işletmelerinden konutlara dek pekçok yerde çevreyi kirletmeyen temiz enerji olarak değerlendirilecektir.

Elektrik üretimi için, ışıl elektrik panellerine dayalı 250 MW'lık santral projelerine girişilirken ışıl elektrik bataryalardan sağlanan elektrik motoruyla devitilen ve Solar

Challenger adı verilen ilk pervaneli güneş uçağı da yapılarak 1981 yılında Fransa ve İngiltere arasında Manş Denizi'ni aşmıştır.

10 MW'a kadar güçlerde ve yalnız güneş enerjisiyle çalışan termik elektrik santrallerin yapılmış olmasının yanında, 800 MW'lık güçlere kadar uzanan fosil yakıtlı büyük termik elektrik santrallerinde de güneş enerjisinin yardımcı kaynak olarak kullanılması üzerinde durulmaktadır. Yapılan projelere göre besleme suyu ısıtılması, uygun buhar üretilmesi, buharın kızdırılması, buharlaştırma ve kızdırma kombinasyonu, buharın tekrar ısıtılması, ocaklarda hava ön ısıtması, besleme suyu ısıtması ve hava ön ısıtması kombinasyonu gibi ışık yollardan büyük santrallerin termodinamik çevrimine güneş enerjisini sokmak olanaklıdır.

Yeryüzü güneş santrallerinden başka, uzay uydusu tipinde ve dünya bağlantılı jeosenkroniz güneş santrali projelenip geliştirilmesine çalışılmaktadır. Yeryüzünden 36.000 km uzaklıkta ve 10.000 MW güçlü bir uzay santralından üretilecek elektrik enerjisi, santralin 1 km çaplı anteninden mikrodalga ışınımı biçiminde iletilecek, dünyadaki 7 km çaplı bir anten de bu enerjiyi doğru akım biçiminde ve %55-75 tesirlilikle alabilecektir. Amerika'nın Apollo uzay programı ve uzay mekiği çalışmaları bu projeyi kapsamaktadır.

#### **1.4. Türkiye'de Güneş Enerjisi**

Elektrik enerjisinin konvansiyonel ve nükleer yollarla üretimine alternatif olarak güneş enerjisinden yararlanarak 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 uluslar arası 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 santrallerdir. Güneş radyasyonu değerleri açısından ekonomik ve fizibel olan ülkemizde konu üzerinde ciddi araştırmalar yapılması ihtiyacı doğmuştur.

Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminin %34'ü fuel oil ve motorin tüketilerek küçük kapasitelerde yapılmaktadır. 1 MW'dan küçük 550'den fazla bu güç üniteleri ile 1500 MW güç üretilmektedir. Burada önemli olan nokta küçük dizel ünitelerle elektrik üretimi maliyetinin diğer konvansiyonel kaynaklarla yapılan üretim maliyetinin 4-5 katı olduğudur. Ayrıca ülkemizin dağlık bir yapıya sahip olması ve yerleşim merkezlerinin birbirinden uzak olması sebebi ile bu yerleşim merkezlerine elektrik enerjisi götürmek güçleşmektedir. Bu yerleşim merkezlerinin yaklaşık %75'i halen karanlıktadır. TEK üretiminin ancak %3'ü bu yörelerde tüketilebilmektedir. Bu bölgelerin enterkonnekte sisteme bağlanma maliyetlerinin (TL/kWh) çok yüksek olması ve üretilen enerjinin önemli bir bölümünün iletim ve dağıtımla tüketildiği göz önüne alınırsa bölgesel ve bağımsız olarak çalışacak küçük güneş enerjisi elektrik santrallerinin önemi belirginleşecektir.

Güneş enerjisi yönünden zengin olan köylere kurulacak küçük santraller, yöresel olarak aydınlatma ve sulama ihtiyaçlarını karşılayabileceklerdir.

Bu amaçlarla yapılması gerekli enerji sistemlerinin ne ölçüde ekonomik ve uygulanabilir olduğunun ülkemiz şartlarında en seri şekilde araştırılması gerekmektedir. Bu konuda devletin üniversiteleri ve özel sektörü araştırma yapmaya teşvik etmesi gerekmektedir.

Türkiye'nin güneş enerjisi gizli gücü ilk kez 1970 yılında, bir bilimsel araştırma kapsamında hesaplanmıştır.

Saptanan olgulara göre, Türkiye'nin yıllık güneşlenme süresi 2608.8 saat olup, maksimum değer 361.8 saat ile Temmuz ayında ve minimum değer 97.8 saat ile Aralık ayında görülmektedir. Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölgeyi yılda 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 değeri 316.07 Ly/gün (cal/cm<sup>2</sup>.gün) kadardır. En yüksek değer 503.13 LY/gün ile yine Temmuz ayında ve en düşük değer de 132.04 Ly/gün ile yine aralık ayında saptanmıştır. Güneydoğu Anadolu Bölgesi için yıllık ortalama güneş radyasyonun yoğunluğu 341.23 Ly/gün düzeyinde iken, bu değer Karadeniz Bölgesinde 246.55 Ly/gün düzeyine düşmektedir.

Yapılan değerlendirme sonuçları temel alınarak Türkiye'nin bütün yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi kurumsal biçimde hesaplanmış ve  $1.2 \times 10^{11}$  TET (120 milyar ton taşkömürü eşdeğeri) bulunmuştur. Bir varsayım olarak, bu enerjinin binde birinin %30 tesirlilikle toplanması koşulunda, yılda kullanılabilir enerji miktarı  $35 \times 10^6$  TET (36 milyon ton eşdeğer kömürü) 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 (GSMH) içindeki payı çok düşük olduğundan Türkiye, güneş enerjisi uygulamaları için de gelişmiş ülkelere Pazar olmayı bekler durumdadır denilebilir. Oysa yerli güneş enerjisi teknolojisinin oluşturulması, uluslar arası ilişkilerden yararlanılarak bu teknolojinin geliştirilmesi ve ortadoğu ülkelerinden kazanç sağlanması olanaklıdır.

Türkiye'de ulusal enerji teknolojisinin ve güneş enerjisi teknolojisinin ileri boyutta oluşturulması, enerji sektörünün planlama kapsamında yönetilmesi 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 (800-1200P) ısı enerjisi ile 15-20 TWh elektrik enerjisi hedef alınmalıdır. Bu hedef kapsamında, güneş enerjisinden en az 4-7 MTEP (160-280 P) ısı enerjisi ve 2-3 TWh elektrik enerjisi üretim hedefleri seçilmelidir.

### **1.5. Herhangi Bir Yerde Yüze Gelen Güneş Enerjisinin Hesaplanması**

Güneşin yaydığı ışınların dalga boyu 0.5-3 arasında değişir. Atmosfer dışında güneş ışınlarına dik bir yüzeye gelen birim zamanda güneş enerjisi  $q$  aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$q_0 = E/4\pi R_g^2 \quad (1.1.)$$

Denklem (1.1)'de, E, güneşin birim zamanda uzaya yaydığı radyasyonu,  $R_g$ , yer-güneş arasındaki uzaklığını göstermektedir.  $R_g$  değeri bir yıl içerisinde zamanla değiştiği için  $q_0$  değeri 1310-1398 W/m<sup>2</sup> olarak kabul edilmektedir.  $q_0$ 'a güneş sabiti denir. Ve değeri 1353 W/m<sup>2</sup> olarak kabul edilmektedir.

Bir yerde herhangi bir yüzeye gelen toplam güneş enerjisi, direkt güneş enerjisi, diffüz enerji ve yansıyan enerjilerin toplamına eşittir.

$$q_t^x = q_{dir}^x + q_{dif}^x + q_y^x \quad (1.2.)$$

### 1.5.1. Direkt Güneş Enerjisi

Bir yüzeye gelen direkt güneş enerjisi, güneş sabitinin  $q_0^x$ , güneş sabitinin aylara göre düzeltme katsayısının  $A_0$ , güneş ışınları ile yüzey normali arasındaki açının  $\beta$ , atmosferin geçirgenlik katsayısının  $\tau$  ve optik hava kütlelerinin  $m$  fonksiyonudur. (1.3.)

$$q_{dir}^x = A_0 \cdot q_0 \cdot \tau^m \cdot \cos \beta \quad (1.3.)$$

Denklem (1.3)'de  $q_0=1353$  W/m<sup>2</sup>'ye eşittir.  $A_0$  değeri aylara göre değişir. Atmosferin geçirgenlik katsayısı bulutsuz hava için hesaplanır. Ve ışınların dalga boyuna göre değişir.  $\delta$ , denklinasyon, S saat açısını,  $\tau$  yerin enlemini, h güneş yüksekliği ise, m optik hava kütlesi aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

$$m = 1/\sin b = 1/(\cos \delta \cdot \cos S \cdot \cos \tau + \sin \delta \cdot \sin Y) \quad (1.4.)$$

Günlük direkt güneş enerjisi, doğma ve batma saatleri arasında  $q_{dir}$  gelen enerjilerin integrali alınarak bulunur.

$$q_N = \int_{SD}^{SB} q_{dir}^x \cdot s \cdot d_s \quad (1.5.)$$

Yılda gelen güneş enerjisi aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$q_y = \sum_{N=1}^{365} q_N \quad (1.6)$$

### 1.5.2. Diffüz Güneş Enerjisi

Atmosferde saçılan güneş enerjilerinin bir kısmı yeryüzüne uzun dalga boylu ışınlar şeklinde ulaşır. Diffüz güneş enerjisini analitik olarak hesaplamak güçtür. Havanın bulutluluk durumuna göre değişmektedir. Eğik düzleme gelen diffüz enerji, yatay düzleme gelen diffüz enerji ( $q_{dif,y}$ ) yardımı ile hesaplanır.

$$q_{dif}^x = \frac{1 + \cos W}{2} q_{dif,y}^x \quad (1.7)$$

### 1.5.3. Yansıyan Güneş Enerjisi

Yere ulaşan direkt güneş enerjisinin bir kısmı yer tarafından yansıtılır. Yansıyan enerji yansıtma katsayısına göre değişir.

Eğik bir yüzeye gelen yansıyan enerji ( $q_y$ ), yerin yansıtma katsayısı ise aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır.

$$q_y^x = \frac{1 - \cos W}{2} \cdot (q_{dir}^x + q_{dif}^x)_y \cdot r_y \quad (1.8)$$

Toplam güneş enerjisi: direkt enerji, diffüz enerji ve yansıyan enerjilerin toplamına eşittir.



## 2. GÜNEŞ PİLLERİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Bu bölümde güneş enerjisinden faydalanma metotlarından birisi olan fotovoltaik sistemler hakkında bilgi verilecektir

### 2.1. Güneş Pilleri

Günümüzde güneşten doğrudan elde edilen elektrik enerjisi fotovoltaik (PV) güneş pilleri ile yapılmaktadır. Bu pillerin verimi henüz istenen düzeye çıkarılmış değildir. Fakat PV pillerinin geleceği parlak gözükmetedir. Tek başına olmasa bile, rüzgar generatörleri, gel-git enerji üreteçleri ve hidroelektrik generatörler gibi diğer yenilenebilir enerji kaynağı üreteçleri ile birlikte gelecekte dünya elektrik üretiminin önemli bir bölümünü oluşturacakları tahmin edilmektedir.

### 2.2. Güneş Pillerinin Tarihi Gelişimi

Fotovoltaik etki, ilk olarak 1837 yılında “Bequerel” tarafından bulundu. Bequerel’in yaptığı ilk PV pilde sıvı bir elektrolit içine daldırılmış elektrotlara ışık düştüğünde bir gerilim oluşuyordu. Selenyumunda benzer bir etki gösterdiği bundan 40 yıl sonra anlaşıldı. Daha sonraki yıllarda da PV pillerde bakır oksit (CuO) kullanılmaya başlandı (CuO bulunan ilk yarıiletken malzemelerdendir) Bu şekilde geliştirilen PV piller verimleri ve yapısal özellikleri bakımından bir enerji üretici olmaktan çok uzak olup ışık şiddeti ölçüm aracı olarak kullanılıyordu.

Yüksek verimli silisyum güneş pilleri ilk olarak 1954 yılında “Bell” laboratuvarında yapıldı. Silisyum yarı iletkenlerin kullanıldığı bu pillerden ortalama %6 verim elde edildi. Bu oran daha o günlerden PV etkinin güneş radyasyonundan elektrik enerjisi elde etmekte kullanılabilecek yararlı bir yöntem olduğunu göstermişti. 1950’lerin ikinci yarısında başlayan uzay çalışmaları bu tahminin ne kadar doğru olduğunu göstermiştir. 1959’da Amerikalılar, fotopil elektriği ile çalışan Vanguard adlı uydularını fırlattılar. Bu olaydan sonra, bütün büyük laboratuvarlar bu yeni uzay teknolojisi ile ilgilenmeye başladılar. 1969’da ilk Fransız ve Avrupa uydularının fotopillerle donatılması başarılı.

PV piller, uzay araçlarına uygunlukları bakımından bu tür araçların vazgeçilmez enerji kaynağı olmuşlardır. Doğal olarak, PV üzerindeki çalışmalar uzun yıllar boyunca bu alana kaymıştır.

1973'teki petrol bunalımı nedeni ile, fosil kökenli enerji kaynakları yerine başka kaynakların kullanılması gündeme geldi. Yenilenebilir enerji türleri arasında, fotovoltaik olay yardımı ile güneşten doğrudan elektrik üretimi baş sıralarda yer alıyordu. Bu enerji türü pahalı da olsa, hafif ve güvenilir olduğundan uzay uygulamalarında zaten önemli durumdaydı. 1973'ten başlayarak, Amerikalılar, yeryüzü kullanımı için de fotopiller geliştirme ile ilgili yoğun programlar hazırladılar.

1980'lere kadar PV pillerinin enerji üretiminde kullanılmamasının nedeni maliyetinin yüksek oluşu iken, 1989 yılı itibariyle yarıiletken teknolojisi ve güç elektroniğindeki gelişmeler sonucu bir PV enerji üreticinin watt başına maliyeti 500 \$ dan 10 \$ ile 30 \$ arasındaki bir değere inmiştir.

### **2.3. Güneş Pillerini Özellikleri ve Tarihi Gelişimi**

Güneş pillerinin olumlu ve olumsuz özellikleri şöyle özetlenebilir.

Olumsuz özellikler

- İlk yatırımı yüksektir.
- Üretilen akım doğru akım olduğundan, ya doğru akımla çalışan cihazlar ya da eviriciler kullanılmaktadır.
- Sürekli üretim yapamadığı için üretilen enerjinin bir akü ile depolanması gerekmektedir.
- Güneşleme yönünden zengin bölgelere ihtiyaç vardır.
- Beher kilovatt güç için yaklaşık 10 m<sup>2</sup> alana gerek vardır.
- Çok fazla güneş ışını alan bölgelerde, sıcaklık nedeni ile verimin azalması söz konusudur.

### Olumlu Özellikleri:

- Güneş radyasyonunun elektrik enerjisine çeviren tüm doğrudan enerji dönüştürücüleri içinde en yüksek verime sahip olanıdır. (Laboratuvarlarda özel olarak imal edilmiş deneysel piller %30 civarında bir verime ulaşabilmektedirler).
- İletim hattına gereksinim yoktur, ihtiyacın olduğu yere kurulabilir.
- Kurulması çabuk ve kolaydır. İhtiyaca göre kapasitesi kolaylıkla artırılabilir ya da azaltılabilir.
- Modüler yapısı nedeniyle bir modülü devre dışı kalsa bile diğerleri elektrik üretmeye devam eder.
- Bakım gereksinimi yoktur.
- Oldukça uzun ömürlüdür (teorik olarak sonsuz olmasına karşın ortalama olarak 20-25 yıl).
- Sessiz ve temizdir, çevre kirlenmesine neden olmaz.
- Seri üretim için uygundur.
- Birim ağırlık başına yüksek çıkış gücüne sahiptir.
- Ham maddesi silisyum dünyada en bol maddelerdendir. Petrol kömür, bakır gibi tükenen maddeleri kullanmaz.
- En uzak kırsal alanlara enerji sağlayarak şehirlere göçü ve çarpık şehirleşmeyi engelleyebilir.
- Sulamada kullanılarak Güneydoğu Anadolu gibi güneşli fakat çorak yörelerin tarımda ve toplumsal yönden gelişmesini sağlayabilir

Günümüzde güneş pilleri belli alanlarda kendilerini tam olarak kabul ettirmişlerdir. Bu alanlar daha çok, uzak tesislerdeki uygulamalardır. Belli başlıları şöyle sıralanabilir.

- Telekomünikasyon ve telemetre tesisleri (radyo link repertörleri, TV yansıtıcıları, telsiz istasyonları, telemetre ve telekomand terminalleri, hava seyrüsefer sistemleri, kırsal telefon sistemleri....)
- Katodik koruma tesisleri (petrol ve gaz boru hatları, su izole hatları ve arıtma sistemleri....)
- Seyrüsefer işaretleri (deniz fenerleri, duba ve şamandra ışıkları, karayolu işaretleri, kule ışıkları, demiryolu sinyalleri...)
- Bu tip "uzak tesisler, dünyanın hemen her ülkesinde kendini kanıtlamışlardır.

Su pompaları, su tasfiye cihazları, soğutucular, küçük tekneler, ev ve sokak aydınlatması, karavanalar, şalterler, fanlar ve aspiratörler güneş pillerinin kullanıldığı diğer alanlardır. Bunlardan su pompaları ve aspiratörler hariç hemen tüm uygulamalarda güneş pilinden elde edilen elektrik enerjisinin bir aküde depolanarak ihtiyaç anında kullanılmasına gerek vardır.

Özellikle ABD, İspanya ve Norveç'te güneş pilleri kırsal alanlardaki evlerin elektrifikasyonunda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Tüketim cihazları pazarında küçük boyutlu güneş pilleri yaygın bir şekilde elektronik hesap makinası ve saatlerde kullanılmaktadır. Daha yüksek verimli ve daha geniş alanlı ince film güneş pilleri geliştikçe kullanım alanları radyolara, ölçü aletlerine, bilgisayarlara, oyuncaklara yayılmaktadır.

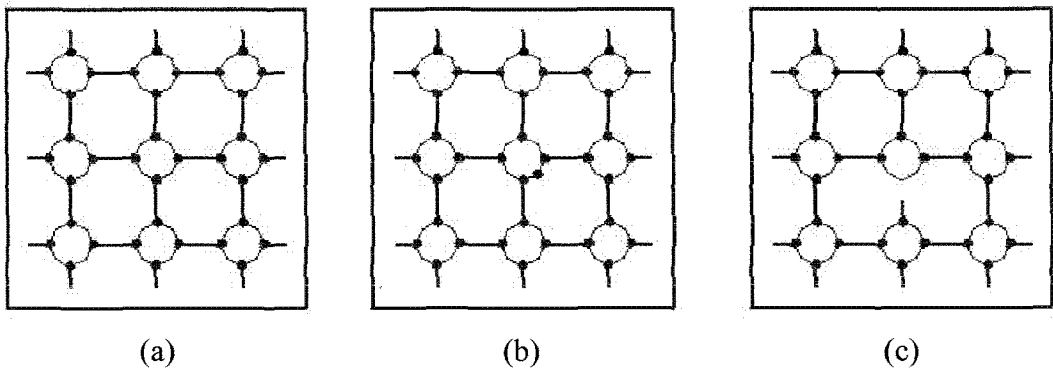
Güneş pillerinin kullanım alanlarından bir diğeri ise güneş enerjisi elektrik santralleridir. Özellikle merkezden uzak küçük yerleşim merkezlerinde küçük güçlü güneş enerjisi santralleri kurulması gereği ortaya çıkmaktadır. Uzun vadede ise tükenmekte olan enerji kaynaklarına alternatif olarak güneş enerjisi düşünülmeli ve güneş enerjisi santralleri oluşturulmalıdır.

#### **2.4. Yarı İletkenler ve Fotovoltaik Etki**

Yarıiletken devre elemanlarının yapımında kullanılan silisyum (Si) ve germanyum (Ge) atomlarının dış kabuklarında dörder valans elektronları bulunan elemanlardır.

Bu tipten bir malzeme, içindeki yabancı atomlardan arıtıldıktan sonra gerektiği şekilde kristalleştirilirse düzgün bir kristal yapı meydana getirir (has yarıiletken). Bu kristal yapıda bir Si atomunda (veya Ge), her valans elektronunun en yakın dört komşu Si (veya Ge) atomu ile ortaklaşa kullanılmasının sonucu olarak komşu atomlar arasında bağlayıcı kuvvetler oluşur. Her atomu komşusuna bağlayan bu elektron çiti veya kovalent bağ Şekil 2.1a'da gösterilmiştir. Isıl uyarma ile bu elektronlar yerlerinden koparak "serbest elektron" haline geçebilirler. Kristal yapı içinde rastgele dolaşan bu elektronlar bir elektriksel alan uygulandığında, bu alana zıt yönde yani negatif uçtan pozitif uca doğru sürüklenerek bir elektrik akımı akmasına sebep olurlar.

Isıl uyarma ile (yani başka bir şekilde enerji alarak) yerinden kopan bir elektronunun bu yerden ayrılması ile meydana gelen elektron noksanlığı, o yerde bir pozitif yükün bulunması şeklinde yorumlanarak bazı olayların açıklanması kolaylaştırılmış olur. Bu pozitif yüke "delik" denir. Delikler de komşu atomlardan çalınan elektronlarla doldurularak kristal yapı içinde rastgele hareket ederler. Bir elektriksel alan uygulandığında delikler de alanın belirlediği yönde yani pozitif uçtan negatif uca doğru sürüklenerek bir akım akmasına sebep olurlar. Deliklerle elektronların, alanının etkisi altında hareket yönleri zıt olduğu halde taşıdıkları yükler de zıt işaretli olduğundan, akıttıkları akım aynı yönde ve pozitiften negatife doğrudur.



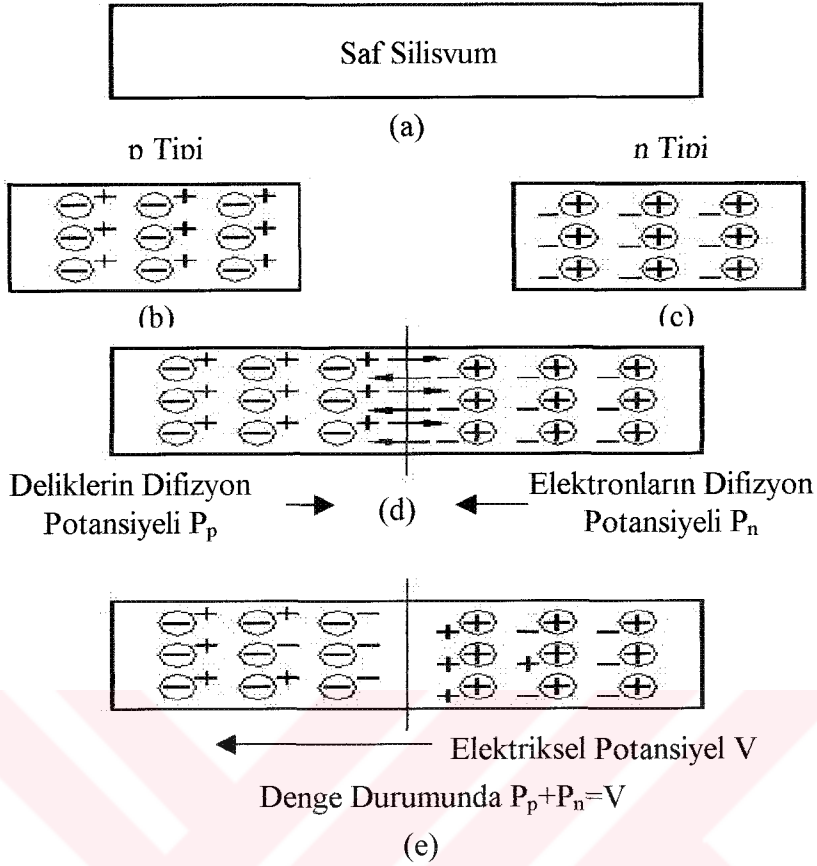
Şekil 2.1 a- Saf silisyumun kristal yapısı

b- Fosfor katkılanmış silisyumun kristal yapısı (n tipi)

c- Bor katkılanmış silisyumun kristal yapısı ( p tipi) (Anis, 1984)

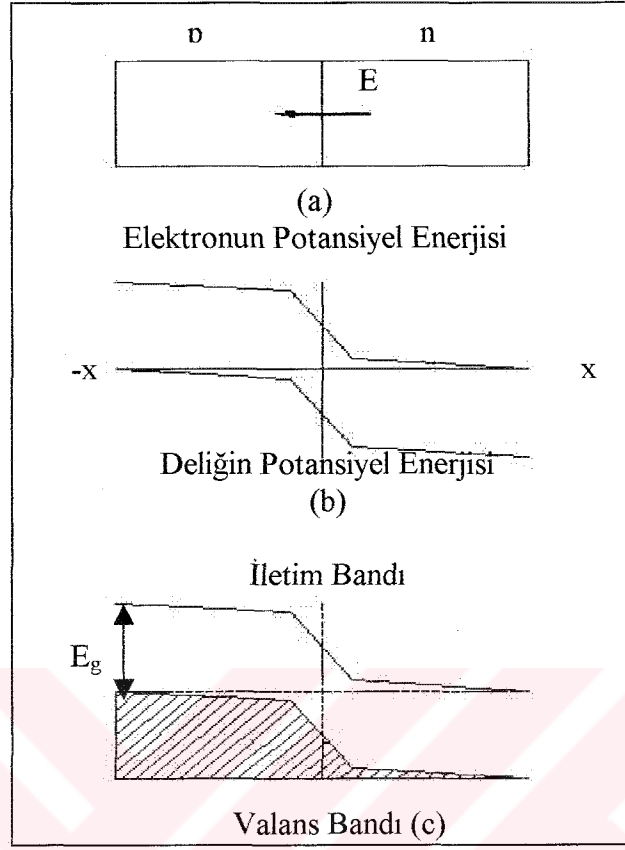
Düzgün kristal yapıya sahip bir has yarıiletkene dış yörüngelerinde beşer valans elektronu bulunan yabancı atomları (P, As,..) katılırsa bu “katkı atomları” kristal yapıya, sanki birer yarıiletken atomu imiş gibi, dört dış yörünge elektronları ile komşu atomlara bağlanarak yerleşirler. Açıkta kalan beşinci elektronlar kolaylıkla ait oldukları atomun çevresinden ayrılarak yapı içinde rastgele dolaşabilen birer “serbest elektron” haline geçerler (Şekil 2.1b). Bu yolla ortaya çıkan serbest elektronların sayısı, yapıya katılan 5 valans elektronlu atomların sayısı kadardır. Birer elektronlarını serbest bırakarak kristal yapıya yerleşmiş olan bu atomlar yerleri belirli ve sabit olan +1 pozitif yüklü iyonlar olarak yapı içinde kalırlar. Kristal yapı içinde bu serbest elektronlarla, hareketsiz pozitif iyonlardan başka, yarıiletken atomlardan ısı uyarma sonucu kopan elektronlarla, bunların kopması ile ortaya çıkan delikler de vardır. Öyleyse içine 5 valans elektronlu yabancı atomlar katılmış bir yarıiletkende akım taşıyıcısı olarak çok sayıda elektron ve az sayıda da delik bulunacaktır. Çoğunlukta bulunan taşıyıcıları ve bu taşıyıcılar negatif yüklü olduğu için bu tip bir yarıiletkene “n tipi yarıiletken” denir.

Has yarıiletkene dış yörüngesinde üçer valans elektronu bulunan yabancı atomlar (Al, B,..) katılırsa bu atomların kristal yapıya yerleşebilmeleri için yakınlarındaki yarıiletken atomlarından birer elektron almaları gerekir. Böylece, kendileri yapı içinde yerleri belirli ve sabit olan birer negatif iyon haline geçerlerken aldıkları elektronlardan kalan delikler pozitif yükler olarak kristal içinde rastgele dolaşmaya başlarlar (Şekil 2.1c). Böylece ortaya çıkan pozitif akım taşıyıcıları ısı uyarma ile doğmuş olan serbest elektron ve deliklere eklenirler ve bu defa pozitif taşıyıcılar çoğunlukta olduğu için bu tip bir yarıiletken p tipi yarıiletken olarak adlandırılır.



Şekil 2.2 Bir p-n jonksiyonunun kavramsal gösterimi (Bein, 1989)

Bir yarı iletken parçasının bir bölgesi p tipi, bir bölgesi n tipi olacak şekilde katkılanırsa p tipi bölgede çok sayıda bulunan delikler n tipi bölgeye doğru ve n tipi bölgede çok sayıda bulunan elektronlar p tipi bölgeye doğru yayılmaya başlarlar. Hareket edebilen taneciklerin yüksek yoğunlukta buldukları yerden düşük yoğunlukta buldukları yerlere doğru bu şekilde yayılmaları olayına difüzyon denir. Bu yük hareketi  $P_n$  ve  $P_p$  difüzyon potansiyelleri ile gösterilebilir. (Şekil 2.2). Difüzyon başladıktan sonra p bölgesinin n bölgesi ile birleştiği bölgede negatif yük fazlalığı, n bölgesinin p bölgesine yakın kısımlarında ise pozitif yük fazlalığı oluşur. Bunun sonucu bölgelerin temas kısmına yakın yerlerde bir elektrik alanı meydana gelir. Alan difüzyon ile doğru orantılı olarak artar. Bir süre sonra, alan tarafından elektron ve delik difüzyonu engellenir. Denge kurulduktan sonra p-n fonksiyonunun yapısı tamamlanmıştır. Bir p-n fonksiyonunda herhangi bir dış elektrik alan yardımı olmadan sürekli bir makroskopik elektrik alanı mevcuttur.



Şekil 2.3 Bir p-n jonksiyonunda enerji bölgelerinin şematik gösterimi (Erdiş, 1989)

Şekil 2.3a'da hareket eden yük sembolleri ve sadece iç elektriksel alan belirtilmiştir. Şekil 2.3b'de ise elektriksel potansiyel ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Burada üst kısım elektron, alt kısım delik potansiyeline karşı gelmektedir. Tüm fiziksel sistemler en düşük enerji seviyesinde olma eğilimi gösterdikleri için elektronlar sağa, delikler ise sola hareket ederler. Şekil 2.3b ve 2.3c'de elektronun potansiyel enerjisi yukarı yönde, deliğinki ise aşağı yönde artmaktadır.

Şekil 2.3c bir p-n jonksiyonunun klasik gösterimidir. Geçiş bölgesinde potansiyel elektrik büyüklüğü artarken sol tarafın p tipi kirliliği, sağ tarafın da n tipi kirliliği artmaktadır. Bu olay sağ tarafın elektron potansiyeli sol tarafına eşit olana kadar sürecektir. Sağ ve sol taraflar arasındaki potansiyel farkı eşit olduğu zaman yarı iletken malzemede tünel olayının etkisi ile yasak bant aralığı ( $E_g$ ) oluşur. Yasak bant aralığı, bir bağı kopartarak serbest elektron-delik çiti elde etmek için verilmesi gereken enerji miktarıdır.



Bir p-n jonksiyonunun uçları dışardan kısa devre edilirse, denge dorumunda akan akım sıfırdır. Bu enerjili bir fotonun pn jonksiyonuna p tarafından girdiğini varsayalım (Şekil 2.4a). Eğer fotonun enerjisi malzemenin bant aralığından büyükse malzemenin tarafından emilecektir. Bu durumda bir delik – elektron çifti oluşacak ve elektron sağ taraftaki daha düşük enersi 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 jonksiyonda ayrılmaları arasında geçen sürede tekrar birleşme fırsatı bulamamalıdır. Yani p tipi bölgedeki elektron ve n tipi bölgedeki delik, jonksiyona ulaşabilmek için yeterli süreye sahip olmalıdır. Bu süre önemli bir parametre olan azınlık taşıyıcısı ömrüdür. Daha büyük bir azınlık taşıyıcısı ömrü, delik – elektron çiftlerinin jonksiyonunda ayrılma olasılığını büyütür.

Oluşacak akımın şiddeti fonksiyona birim zamanda gelen foton sayısı (dolayısı ile ışık şiddeti) ile orantılıdır.

Gelen ışığın foton enerjisi frekansa ve dalga boyuna,

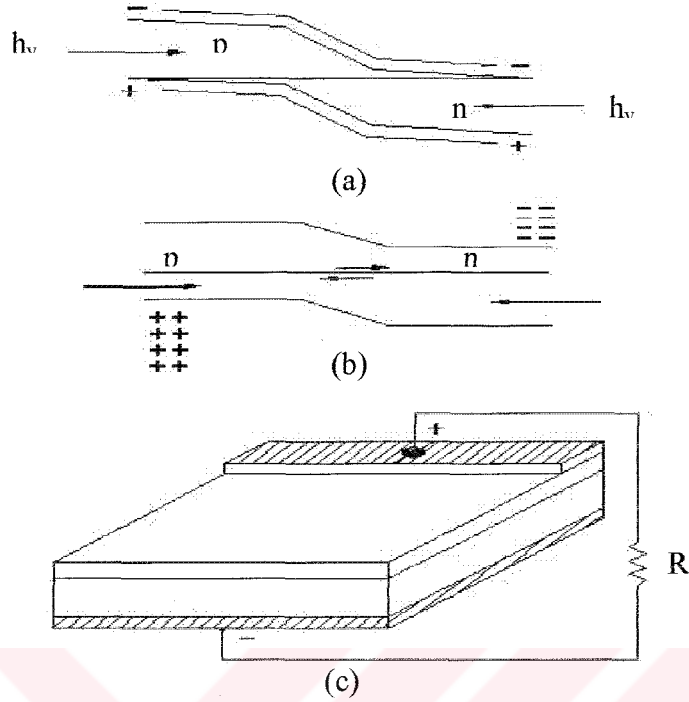
$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

bağlantıları ile bağlı olduğuna göre, elektron delik çiftleri doğabilmesi için bu enerjinin yarıiletkenin  $E_g$  enerjisinden daha büyük olması gerektiği bir kez daha vurgulanabilir. Örneğin silisyumda, oda sıcaklığında  $E_g=1,1$  eV olduğuna göre  $E \geq E_g$  şartlarını sağlayan  $\lambda$  değerleri hesaplanırsa,

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$$

$$\lambda \leq 1,28 \mu m = 11280 \text{Å} \quad (2.2)$$

bulunur. Görünen ışığın sınırları (kırmızı)=8000 Å ve (mor)=4000 Å olduğuna göre görünen ışık spektrumunun tamamı ile mor ötesi ışınlar ve kıslı ötesi ışınların bir bölümü, fotovoltaiik ile olaya katkıda bulunabilir.



Şekil 2.4 Fotovoltaik etkiden yararlanarak elektrik enerjisi üretiminin şematik gösterimi (Tarıcan,1994)

Elemanın üzerine birçok foton düştüğü kabul edilirse yukarıda anlatılan işlem defalarca tekrarlanacak ve p bölgesinde pozitif yüklerin (delikleri) n bölgesinde de negatif yüklerin (elektronlar) birikmesine neden olacaktır. Bunun sonucunda, daha önce anlatılan fonksiyonun oluşumu esnasında meydana gelen elektrik alanına (bant aralığı) ters yönde bir alan meydana gelecek bir fotonlar düşmeye devam ettikçe kuvvetlenerek delik-elektron çiftlerini aynı tutan elektrik alanı ortadan kaldıracaktır. Artık elemanın uçlarında açık devre gerilimi belirtilmiştir. Bu gerilim doğrudan yarıiletken malzemenin bant aralığı ile orantılıdır. Yani büyük açık devre gerilimi için büyük bant aralığına sahip yarıiletken malzeme kullanılması gerekmektedir.

Güneş pili artık çalışacak duruma gelmiştir. P ve n yüzeylerine elektronlar yerleştirilerek dışarı alınan gelirim 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 (şekil 2.4).

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

## 2.5. Güneş Pillerinin Tasarımı

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

$$\eta_{mx} = \frac{\text{çıkış gücü}}{\text{giriş gücü}} = \frac{k_1 \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{\text{giriş gücü}} \quad (2.3)$$

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 değeri için tanımlanmaktadır.

Daha önce açıklandığı gibi, malzemenin bant 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.  $E_g$ 'den 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.

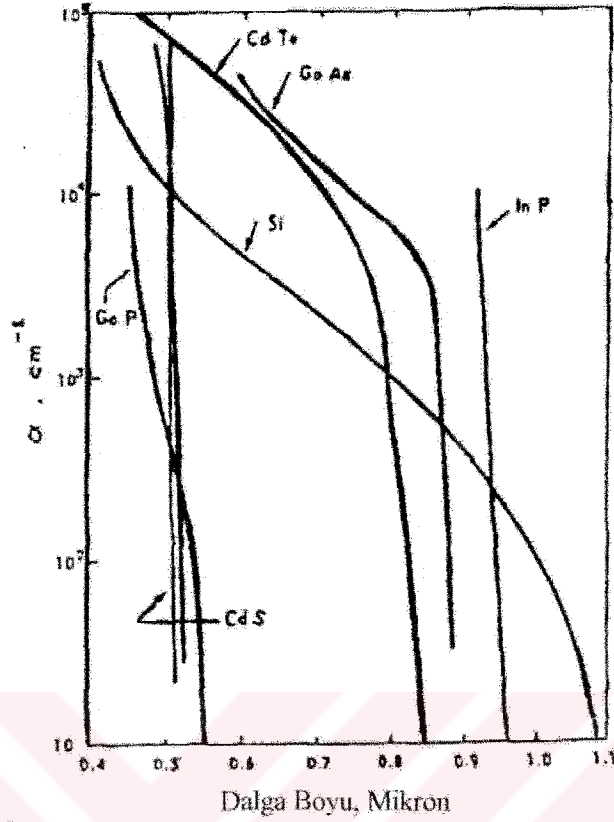
Çıkış gücü

$$P_c = k_1 \cdot V_{oc} \cdot (E_g) \cdot I_{sc} \cdot \left( \frac{1}{E_g} \right) \quad (2.4)$$

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 daha 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, Çeşitli güneş pili malzemelerinin emme spektrumları Şekil 2.5'da gösterilmiştir.

Bu eğrilerden görüldüğü gibi fotonların bir çoğu ya kısa bir yol aldıktan sonra (10-4 ile 10-8 cm) emilecek ya da hiç emilmeyecektir. Bu nedenle emilme olayının jonksiyonunun hemen arkasında olmasını sağlamak için, jonksiyonun söz konusu yüzeye mümkün olduğu kadar 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 kesiti azalmakta, dolayısıyla da elektriksel direnci artmaktadır. Bu nedenle, jonksiyon yüzeye doğru yaklaştırıldıkça jonksiyonun biriktirme etkinliği her ne kadar artsa da bu artış p bölgesinin yüksek direnci nedeni ile oluşan joule kayıpları tarafından engellenmektedir. Bu, güneş pillerinin tasarlanmasında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.



Şekil 2.5 Çeşitli Güneş Pili Malzemelerinin Emme Spektrumları  
( $\alpha$  = fotonun malzeme içinde aldığı yol) (Tarıcan, 1994)

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 ( $n=3\dots 4$ ), yansıtma problemini de beraberinde getirmektedir. Örneğin, birim kırılma indisine sahip olan bir ortamda (havada veya boşlukta) bulunan güneş piline bir güneş radyasyonu gelmekteyse, R yansıtması

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = \frac{3^2}{5^2} = \%36 \quad (2.5)$$

Şeklinde olur. Mevcut enerjideki bu büyük kayıplar, uygun yansıtma tabakalar olarak azaltılabilir.

## 2.6. Güneş Pilinin Modelinin Oluşturulması

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

İncelenecek jonksiyon modeli, aşağıdaki kabullerle tanımlanmaktadır.

- 1- Jonksiyon bölgesinin kalınlığı, p veya n bölgelerinin kalınlığı ile azınlık taşıyıcılarının yayılma uzunluklarına göre küçüktür.
- 2- Elektrostatik alan, jonksiyon bölgesinde sınırlanmaktadır.
- 3- Taşıyıcı yoğunlukları, Boltzmann istatistiklerinin kullanılabileceği ölçüde küçüktür.

Jonksiyon,  $x=0$ 'da genişliği  $2\delta_1$ , olan bölge olarak gösterilir. (Şekil 2.6)

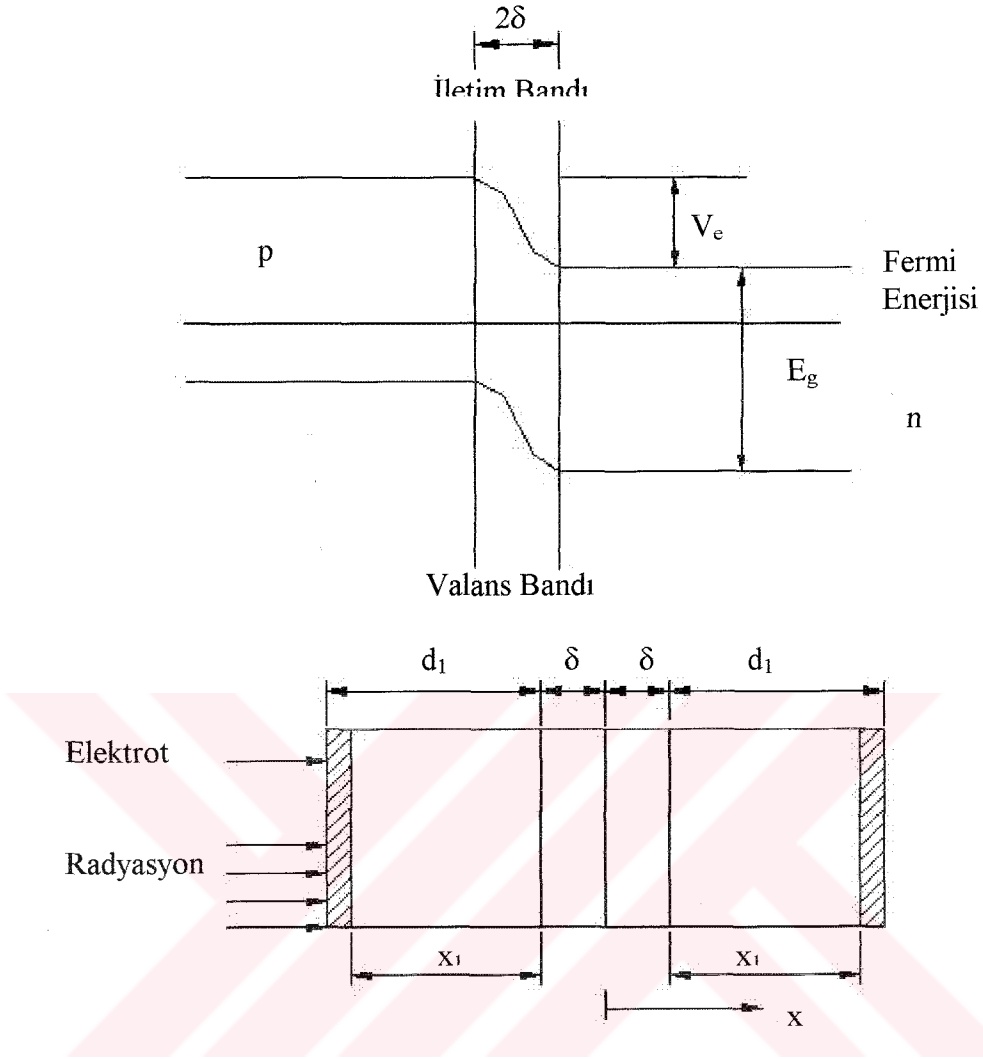
Sınırın farklı kenarlarında toplanan taşıyıcı sayısı,

$$P_n = P_p \cdot \exp \left[ \frac{-e \cdot V_e}{k \cdot T} \right] \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $P_n$  ve  $P_p$ , n ve p bölgelerindeki deliklerin denge durumundaki değerleridir.  $V_e$  geçiş bölgesi boyunca, elektrostatik potansiyel farkı göstermektedir. E, k, T ise elektron yükü, Boltzmann sabiti ve sıcaklıktır.

Jonksiyon boyunca bir V gerilimi ya bir dış kaynak kullanılarak veya radyasyon aracılığı ile sınır civarındaki dengesiz yüklerin üretimi şeklinde elde edilirse, yarı denge denklemi

$$P_n(0) = P_p \cdot \exp \left[ \frac{-e \cdot (V_e - V)}{k \cdot T} \right] \quad (2.7)$$



Şekil 2.6 p-n Jonksiyon modeli (Leblebici, 1990)

Şeklinde yazılabilir. Burada  $P_n(0)$ ,  $P_n$ 'in  $x=Q_1$  veya  $x_r = 0$ 'daki değeridir

(2.6) ve (2.7) denklemlerinden

$$P_n(0) = P_n \cdot \text{Exp} \left[ \frac{-e.V}{k.T} \right] \quad (2.8)$$

Elde edilir. Benzer bağıntı, p malzemesindeki elektronlar için de verilebilir.

n malzemesindeki deliklerin ısı üretimi oranı

$$g_p = \frac{P_n}{\tau_p} \quad (2.9)$$

Denklemleri ile ve dengesiz koşullarda yeniden birleşme oranı da;

$$R_p = \frac{P}{\tau_p} \quad (2.10)$$

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

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

$$G_p = g_p + g(x) - \frac{P}{\tau_p} \quad (2.11)$$

Şeklinde olup, bu değer deliklerin terk etmekte olduğu alandaki net orana eşittir.

$$g_p + g(x) - \frac{P}{\tau_p} = \frac{1}{e} \cdot \frac{\partial I_p}{\partial x} \quad (2.12)$$

$I_p$  yayılma akımı olup,

$$I_p = -e \cdot D_p \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.13)$$

Şeklinde olup. Denklemde  $D_p$  yayılma sabittir. (2.12) ve (2.13)'den

$$G_p + g(x) - \frac{P}{\tau_p} + D_p \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (2.14)$$

elde edilir.

$P$  malzemesindeki elektronları tanımlatan denklemlerden biri olan (2.14) ifadesi, aşağıdaki sınır koşulları kullanılarak çözülebilen genel bir diferansiyel denklemdir.

Bu sınır koşulları;

$$X_r = 0 \text{ da } p = p_n \cdot \exp \left[ \frac{e \cdot V}{k \cdot T} \right]$$



$$X_r = d_{r'de} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2.15)$$

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

(2.14) denkleminin yukarıdaki sınır koşullar için çözümü;

$$I = e \cdot g_o \cdot L - e \cdot g L' \left[ \exp\left(\frac{eV}{k.T}\right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

şeklindedir.

(2.16) denkleminde akım kaynağı gibi davranan ilk terim, fotonlar tarafından üretilen akımı, emilen fotonlar cinsinden belirler ve bu emilme sonucunda yaratılan azınlık taşıyıcılarının yayılma olasılıklarının içerir.

İkinci terim, jonksiyon uçlarına bir  $V$  potansiyel farkı uygulandığında ideal bir p-n fonksiyon diyotundaki akım ifadesini vermektedir. Terimdeki  $e.g.l'$  katsayısı, ısı olarak üretilen taşıyıcıların oluşturduğu  $I_n$  ters doyma akım büyüklüğünü, sıcaklık ve jonksiyona ulaşma olasılığı cinsinden göstermektedir.

$V = 0$  ise, denklem (2.16) yardımı ile kısa devre akımı,

$$I_{sc} = e.g_o \cdot L \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir.

Denklem (2.16)'da  $V$  yalnız bırakılırsa

$$V = \frac{k.T}{e} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{e.g_o \cdot L - I}{e.g_o \cdot L'} \right] \quad (2.18)$$

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

$$V_{oc} = \frac{k.T}{e} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{e.g_o \cdot L}{e.g_o \cdot L'} \right] \quad (2.19)$$

olarak elde edilir.

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

$$P = I \cdot V = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{e \cdot g_o \cdot L - I}{e \cdot g \cdot L'} \right] \quad (2.20)$$

şeklindedir.

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

$$I_m = \frac{e^2 \cdot V_m \cdot g \cdot L' [1 + (g_o \cdot L) / L'] / (k \cdot T)}{1 + e \cdot V_m / (k \cdot T)} \quad (2.21)$$

olarak ve maksimum güç için  $V_m$  gerilimi de

$$\exp \left[ \frac{e V_m}{k \cdot T} \right] = \frac{1 + (g_o \cdot L) / (g \cdot L')}{1 + e \cdot V_m / (k \cdot T)} \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir.

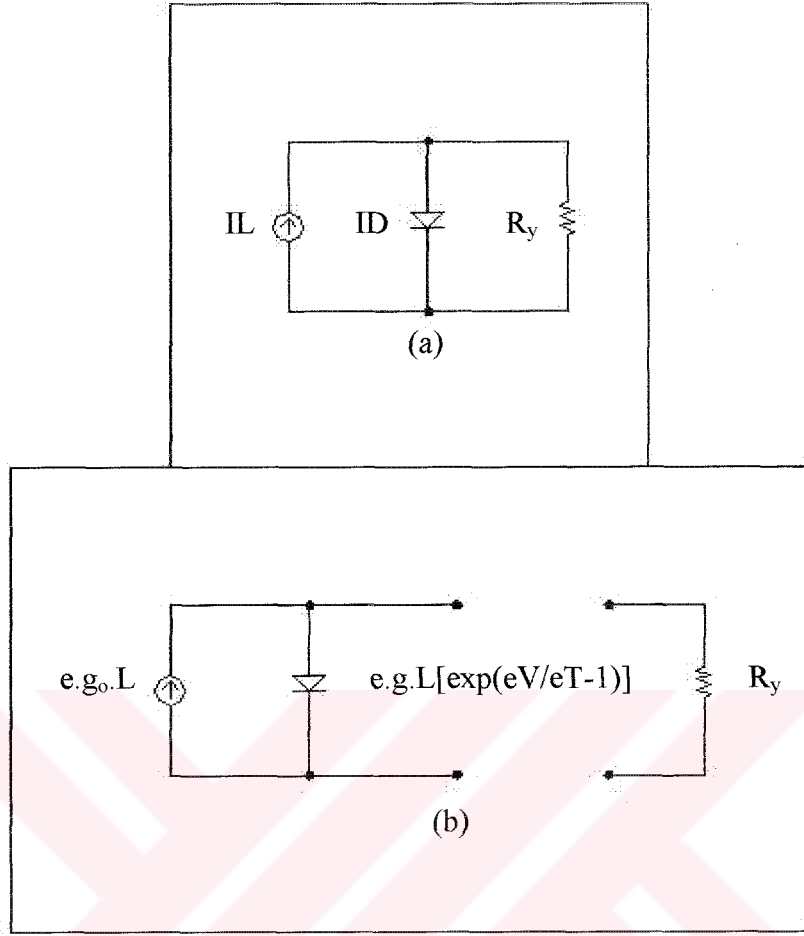
Buradan da maksimum çıkış gücü  $P_m$ ,

$$P_m = \frac{e^2 \cdot V_m \cdot g \cdot L' [1 + (g_o \cdot L) / (g \cdot L') ] / (k \cdot T)}{1 + e \cdot V_m / (k \cdot T)} \cdot V_m \quad (2.23)$$

şeklinde bulunur.

(2.17) ve 2.19) denklemleri, verilen bir pil için  $g \cdot L'$  ve  $g_o \cdot L$  büyüklüklerinin deneysel olarak belirlenmesi açısından faydalıdır.

(2.16) denklemi de ifade edilen eşdeğer devre, şekil 2.7a'da gösterilmektedir. Bu eşdeğer devre, ideal bir diyotla buna paralel bağlı bir sabit akım kaynağından oluşmaktadır. Daha kapsamlı bir eşdeğer devre Şekil 2.7b'de gösterilmiş olup burada  $R_s$  ve  $R_{sh}$  pratikte ideal bir diyot oluşturulmaması sebebi ile bu durumu ifade eden iç kayıp dirençleridir.



Şekil 2.7 Fotovoltaik Güneş Piliin Eşdeğer Devresi (Leblebici, 1990)

Denklem (2.23) kullanılarak ortalama enerjisi  $E_{av}$  olan  $N_{ph}$  adet foton tarafından uyarılan bir PV p-n jonksiyon pilinin maksimum enerji dönüştürme verimi,

$$\eta_{max} = Q \cdot (1-r) \cdot (1-e^{-\alpha t}) \cdot \frac{\lambda \cdot V_m^2 \cdot e \cdot \eta_{ph}(E_g)}{(1+\lambda \cdot V_m) \cdot \eta_{ph} \cdot E_{av}} \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$Q \cdot (1-r) \cdot (1-e^{-\alpha t}) \cdot e \cdot \eta_{ph} \cdot E_g = I_{sc} = e \cdot g_0 \cdot L \quad (2.25)$$

$$\text{Exp}(\lambda - V_m) = \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \quad (2.26)$$

$$\lambda = \frac{e}{k-T} \quad (2.27)$$

olup;

Q: jonksiyon biriktirme etkinliği,

R: pilin optik yansıtma katsayısı,

A: emme katsayısını,

l: pr kalınlığını

$e^{-\alpha l}$  iletilen radyasyon miktarını ve

$n_{pn}(E_g)$  : Jonksiyonun birim yüzeyinden bir saniyede geçen foton sayısını (yarıiletken içinde delik – elektron çifti yaratmaya yetecek enerjiye sahip fotonlar) göstermektedir.

(2.24) denkleminde, Q ve  $I_0$  dışındaki bütün terimler pil malzemesi ve radyasyon kaynağının özellikleri cinsinden ifade edilmiştir. Denkleminde jonksiyonun oluşumuna katkıda bulunan tüm harici parametreler, Q ve  $I_0$ 'in içinde toplanmıştır.

(2.24) denklemi, uyarma kaynağının güneş olması durumu için çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. En yüksek verimli güneş pili elde etmede kullanılan en uygun malzemenin seçimi ile ilgili olan bu çalışmalardan çıkan sonuçlar, şu şekilde özetlenebilir.

1 - ) 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 bırakabilmek için pil yüzeyi, yapım sırasında düşük yansıtıcılığı olan bir malzeme ile kaplanır.

2 - ) Pile giren ışık ya emilir, yada belirli bir süre sonunda pil dışına gönderilir. Pile giren ışık fotonlarının yalnız malzeme tarafından emilen kısmı fotovoltaiik yöntem kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu nedenle yalnız, iç emme sınırından daha kısa dalga boylarına sahip olan fotonlar yararlı olmaktadır. Gelen fotonlardan dalga boyları eme 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 nedeni ile oluşmaktadır. Eğer pil, emme sınırı dalga boyutunda tek renkli (monokromatik) bir ışığa maruz bırakılırsa sözü edilen bu kayıplar olmayacaktır. Saf silisyum güneş pilleri için bu kayıplar pile giren güneş enerjisinin %50'sine ulaşmaktadır. Daha geniş bant aracılığına sahip malzemeler kullanılarak, bu spektrum kayıpları bir dereceye kadar azaltılabilir.

3 - ) “Biriktirme etkinliği” olarak adlandırılan Q faktörü, jonksiyona ulaşip emilen fotonlar tarafından üretilen azınlık taşıyıcısı sayısının bir ölçüsü olmaktadır. Azınlık 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.

4 - ) Daha önce de belirtildiği gibi, güneş pillerinin meydana getirdiği gerilim, jonksiyonun her iki tarafındaki azınlık 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 bant 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 kayıp, azınlık taşıyıcı yoğunluğu çoğunluk taşıyıcı yoğunluğuna yaklaştığında sonsuz ışık şiddeti şartlarına uygun şekilde yok olmalı ve gerilim de enerji aralığına yaklaşmalıdır. 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 bant aralığı ile üstel olarak azalması

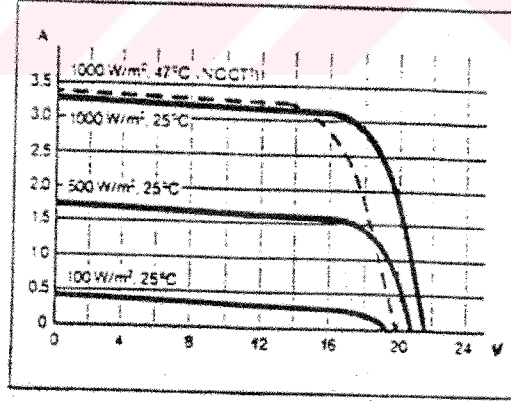
gerektiğini ifade eder. Bundan dolayı jonksiyon kaybı, artan bant aralığı ile azalabilmektedir.

5 - ) Kayıplar sonucusu ise, akımın elektrotlara ulaşmak için alacağı yol üzerinde bulunan, jonksiyonun ardındaki çok ince yüzeyin direncinden meydana gelmektedir. Uygulamada, bir silisyum pilde 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 bir sonucudur.

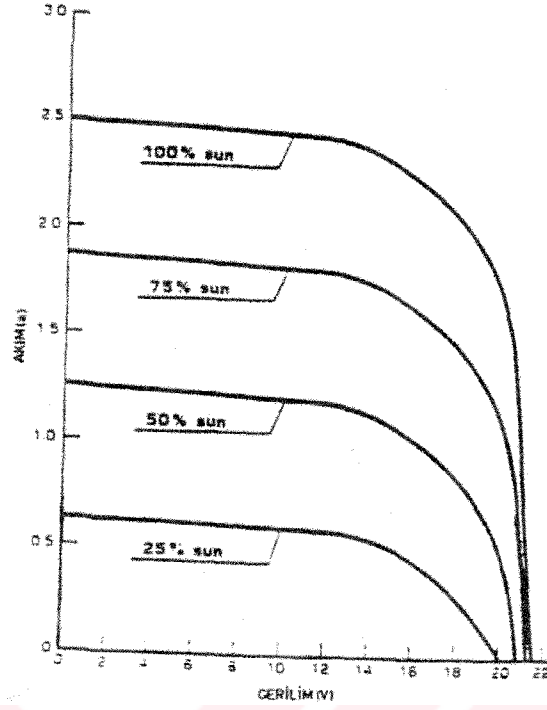
Dikkat edilecek son teorik sonuç, pil sıcaklığının çevrim verimine olan etkisidir. Kısa devre akımının sıcaklığa karşı duyarız olduğu çeşitli deneyler sonucunda ispatlanmıştır. En büyük etki ise sıcaklığa tamamen bağlı olan  $V_m$  'in  $I_n$ 'ın bir fonksiyonu olmasından ileri gelmektedir.

## 2.7. Güneş Pili Karakteristikleri

Bir güneş pilinin çeşitli karakteristikleri aşağıda verilmektedir. Şekil 2.8 bir güneş pilinin gerilim – akım karakteristiğini göstermektedir.

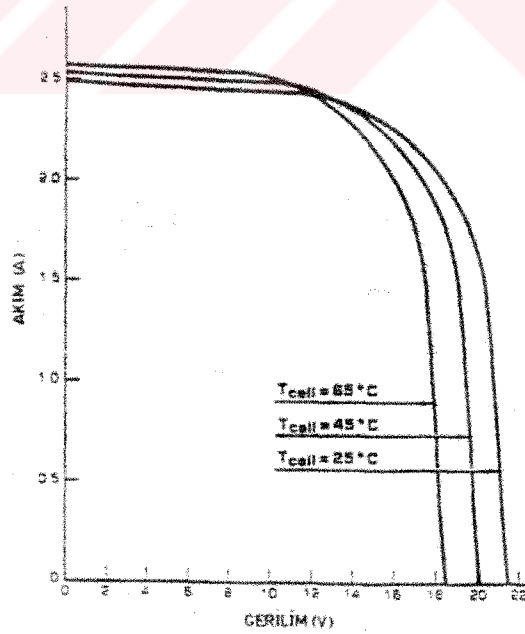


Şekil 2.8 Bir güneş pilinin V-I karakteristiği (Kılıç, 1983)

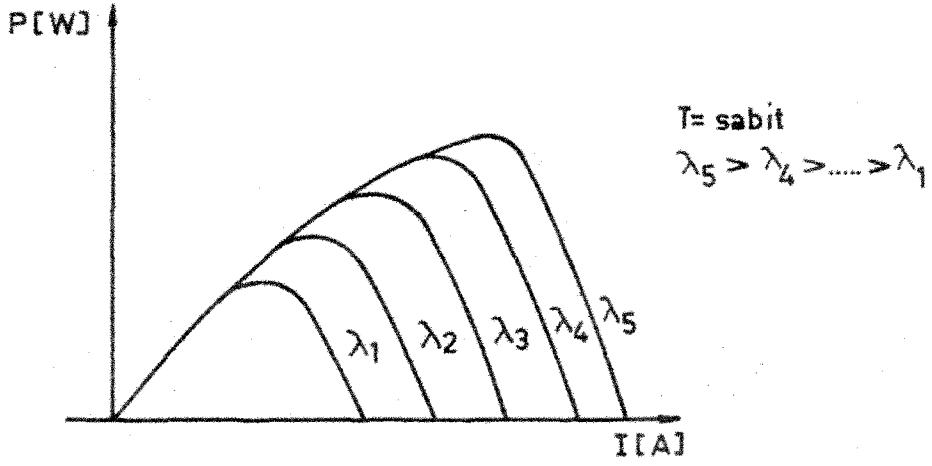


Şekil 2.9 Pilin ışık şiddetine bağlı I – V karakteristiği (Kılıç, 1983)

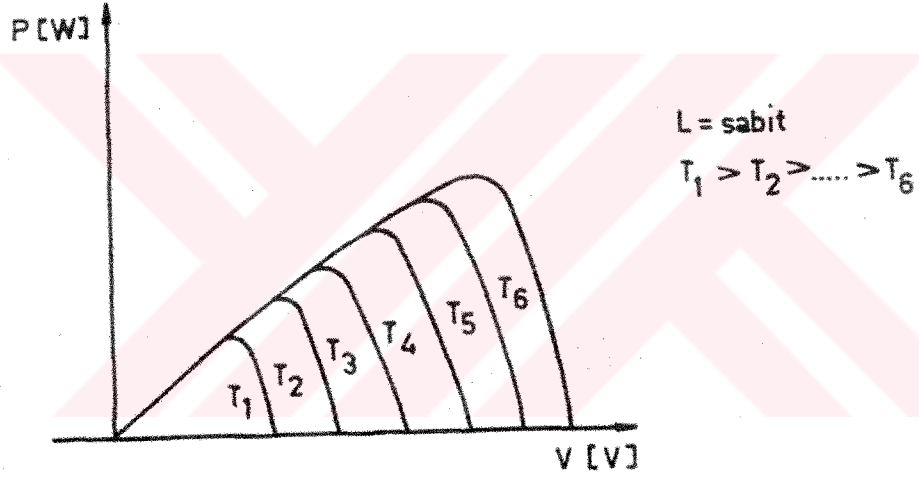
Şekil 2.8 ve Şekil 2.9 sıcaklık ve ışık şiddetinin I – V karakteristikiğine etkisini ayrı ayrı göstermektedir.



Şekil 2.10 Pilin sıcaklığa bağlı I – V karakteristiği (Kılıç, 1983)



Şekil 2.11 Pilin ışık şiddetine bağlı olarak P-I karakteristikleri (Chow, 1995)



Şekil 2.12 Pilin sıcaklığa bağlı P-V karakteristikleri (Chow, 1995)

Güneş pilinden çekilebilecek gücün ışık şiddetine ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimini Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de gösterilmektedir.

## 2.8. Güneş Pili Modülü Seçimi

### 2.8.1. Tasarım Parametreleri

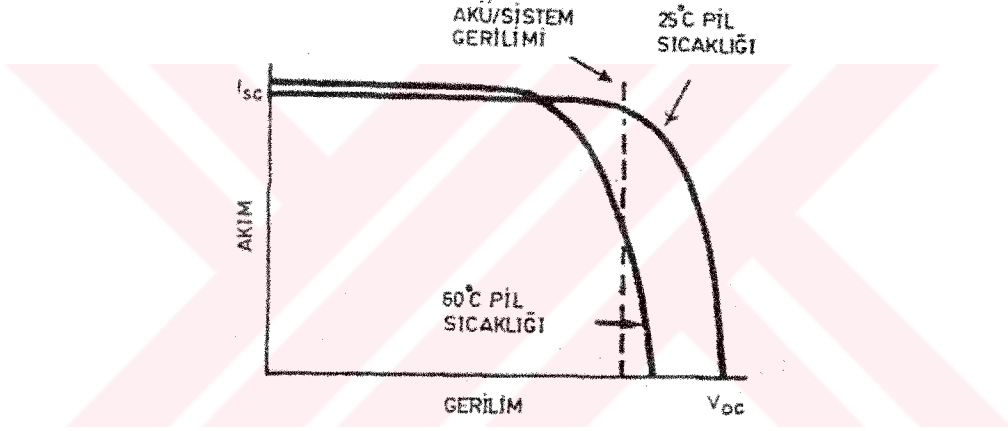


### 2.8.1.1. Yerel Güneşlenme Miktarı

Bu faktör, sistemin kurulacağı yerin iklimsel parametrelerine bağlıdır. Doğrudan güneş ışınım şiddeti miktarına ve güneşlenme süresine bağlı olan bu değer meteorolojik gözlemler ve ölçümler sonucu bulunan değerlere bağlıdır.

### 2.8.1.2. Yerel Sıcaklık

Silisyum güneş pillerinin verimleri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Güneş ışınımını güçlü olduğu zamanlarda bu etki kendini göstermektedir. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi, pilin uç gerilimi sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Sistem tasarlanırken bu gerilim değişimi göz önüne alınarak uygun bir akü seçilmelidir.



Şekil 2.13 Çeşitli güneş pili modül sıcaklıklarında akümülatör / sistem geriliminin belirlenmesi (Güneş, 1999)

### 2.8.1.3. Sistem Kayıpları

Bu faktör, PV güneş pillerinin kirlenmeleri sonucu oluşan kayıpları, hat ve iletim kayıplarını akümülatör veya depolama ünitesi kayıpları ile kontrol sistemi ve korozyon kayıplarını kapsamaktadır.

### 2.8.1.4 Diğer Güç Sistem Kayıpları

Yukarıda kayıplara ek olarak sistemde, çevirici ve kıyııcıdan meydana gelen kayıplar da mevcuttur. DC / AC çevirici için tüm bu kayıplar yaklaşık olarak yükün %23'ü

mertebesindedir. (yük çarpanı olarak 1.3 alınır). DC/DC kıyıcı için ise bu kayıplar yükün yaklaşık %29'u civarındadır.

### 2.8.1.5 Enerji Depolama Ünitesinin Kapasitesi

Depolanan enerji miktarı temelde yüke bağlı olmakla birlikte gelen enerji miktarının sürekliliğine de bağlıdır. Bu yüzden kapasitenin belirlenmesinde, güvenilirliği yüksek tutmak için (yükün kesintisiz beslenmesi) güneşlenme yönünden en kötü dönem esas alınır. Ayrıca istatistiki verilere dayanılarak, güneşin yükü besleyemeyeceği en uzun periyot hesaplanır ve tüm bu verilerin ışığında kapasite belirlenir.

### 2.8.2. Güç Seçimi

Güneş pili modülünün gücü üç aşamada belirlenebilir.

1-a) Yükün gereksinimi olan günlük güç Wh cinsinden belirlenebilir.

b)Yük besleme gerilimi AC ise çeviricinin kayıp katsayısı 1.3 civarındadır.

c) Güç süreklilik çarpanı bulunur.

d)  $1 \times 1 \times 1 \times c$  bulur (Wh/ gün).

2- Pillerin yerleştirileceği bölgenin güneşlenme katsayısı hazırlanmış haritalardan bulunur.

3- 1d değeri ile 2değeri çarpılarak seçilen bölge için gerekli güneş pili gücü watt olarak bulunur.

Örnek:

Yük tipi: güvenlik monitörü

Yer: Jeddah, Suudi Arabistan

Yükün enerji ihtiyacı: 0.37A, 120 VAC, sürekli yük.

1. adım:  $0.37 \text{ A} \times 24 \text{ saat} = 8.88 \text{ Ah/gün}$

$$8.88 \text{ Ah/gün} \times 120\text{V} = 1065.6\text{Wh/8gün}$$

$$\text{Evirici faktörü} = 1.3$$

Evirici kayıpları ile birlikte toplam yük

$$= 1065.5\text{Wh/gün} \times 1.3 = 1385.3 \text{ Wh/gün}$$

2.adım: Haritalardan bulunan güneşlenme katsayısı = 0.33

$$3.\text{adım: } 1385.3 \times 0.33 = 457 \text{ w}$$

Bu yük için yaklaşık 500 Wattlık bir güneş pili modülü uygundur



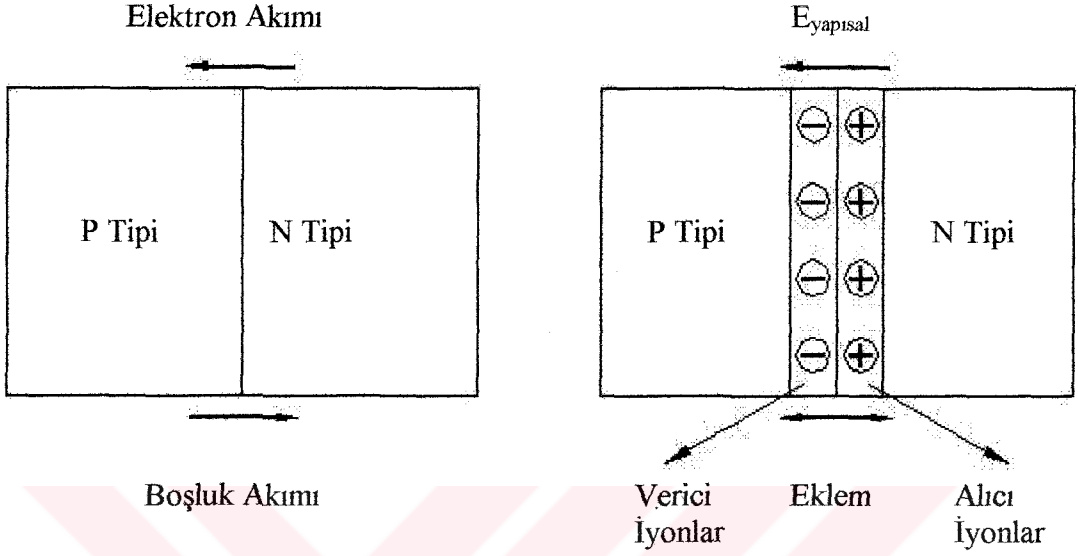
### 3. TEMEL FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE YARI İLETKENLER

#### 3.1. Yarı İletken Maddeler

Günümüzde elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar, LDR'ler gibi güneş pilleri de yarı iletken maddelerden yapılırlar. Yarı iletkenlik gösteren bir çok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, kadmiyum sülfür, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir. Yarı iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için, N yada P tipi katkılamaları gerekmektedir. Katkılama, saf yarı iletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesi ile yapılır. N ya da P tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan N tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. Grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyumun dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle 5. Gruptaki elementlere “verici” ya da “N tipi” katkı maddesi adı verilir. P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. Gruptan bir element, örneğin alüminyum, indiyum, bor gibi element eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur. Bu elektron yokluğuna “hol” ya da “boşluk” denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de P tipi” yada “alıcı” katkı maddeleri denir.

P yada N tipi ana malzemenin içerisinde gerekli katkı maddelerinin katılması ile yarı iletken eklemler oluşturulur. P ve N tipi yarı iletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani P tipinde negatif enerji seviyeleri ile boşluk sayıları eşit, N tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. PN eklem oluştuğunda, N tipindeki elektronlar, P tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafla da yük dengesi oluşana kadar devam eder (şekil 3.1) PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafından negatif verici iyonlar, N bölgesi tarafından pozitif alıcı iyonlar birikir. Bu eklem bölgesine “geçiş bölgesi” ya da yükten arındırılmış bölge” denir. Bu bölgede oluşan elektriki alan, “yapısal elektrik alan” olarak tanımlanır. Yarı iletken eklem güneş pili olarak çalışabilmesi için, eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki

aşamada oluşur. İlk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-boşluk çiftleri oluşturulur. İkinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılırlar.



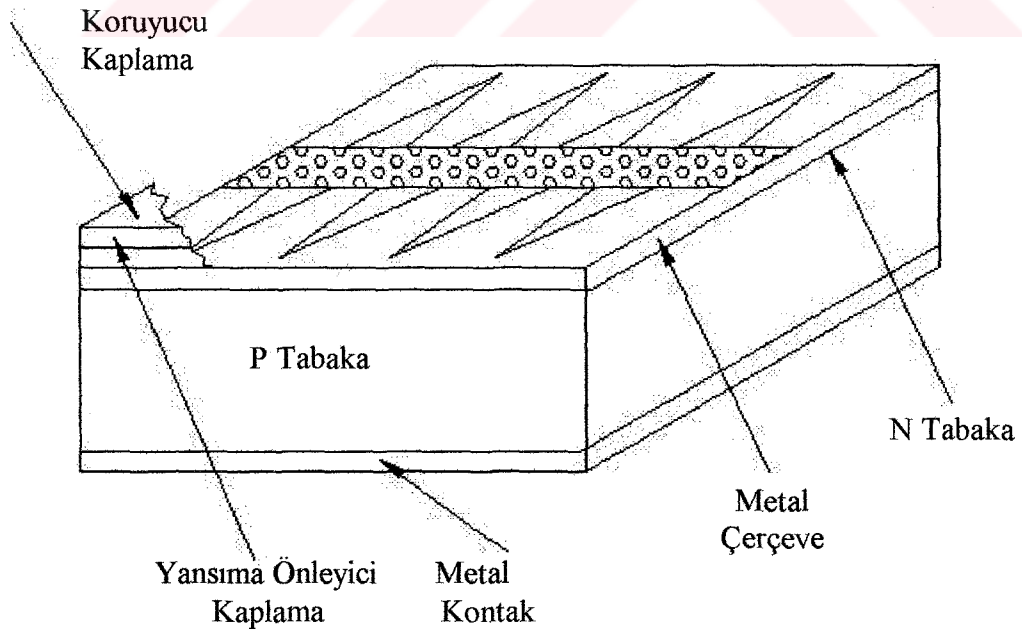
Şekil 3.1. PN Eklemine Oluşturulması (Güneş, 1999)

### 3.2. Güneş Pili Çalışma Prensibi

Yarı iletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bantından oluşur (Hankins, 1991; Markvart, 1994). Bu bantlar “valans bantı” ve “iletkenlik bantı” adını alırlar. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarı iletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans bantındaki bir elektrona vererek elektronun iletkenlik bantına çıkmasını sağlar. Böylece elektron-boşluk çifti oluşmuş olur. Bu olay, PN eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise, elektron-boşluk çiftleri buradaki elektrik alanı tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, elektronları N bölgesine, boşlukları da P bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-boşluk çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun pil yüzeyine çarpması ile aynı şekilde devam eder. Yarı iletkenin iç kısımlarında da gelen fotonlar tarafından elektron-boşluk çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alanı olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar.

### 3.3. Güneş Pili Yapım esasları

Çok çeşitli yapım esasları olmakla beraber, günümüzde tipik bir tek kristal yapılı PN eklem güneş pili basit olarak şöyle yapılır (EIE, 1992): Silisyum bir pil için hem P hem de N tabakanın saf silisyumdan yapılması gerekir. Saf silisyum, tek kristal yapısına sahiptir. Silisyum büyütme sürecinde, silisyum eriyiğine az miktarda 3. Grup maddesi eklenerek (alüminyum, indiyum, bor gibi) P tabakası elde edilir. N tabakası ise, eklem oluşturma ya da difüzyon sürecinde elde edilir. Bu süreç içerisinde P tipi silisyum tabakaları, yüksek sıcaklıklarda 5. Grup elementi içeren (fosfor gibi) ortama tutulurlar. Böylece N tipi katkı maddesi, silisyum yüzeye girerek ağ içerisine yerleşir, konsantrasyon daha fazla olduğu için P tipi maddeyi aşırı katkılayarak N tabakayı oluşturur. Bu şekilde bir PN eklem elde edilmiş olur (şekil3.2). Daha sonra ön yüzey olan N tabakadan, olabildiğince az alan kapatılacak şekilde metal bağlantılar alınır. Arka yüzey olan P tabakası ise tamamen bir metal ile kaplanır. Ön yüzey, güneş ışığının yansımısını en aza indirmek için yansımaya önleyici bir maddeyle kaplanır ve son olarak aygıt, çevre koşullardan zarar görmemesi için saydam bir koruyucu malzeme (cam gibi) ile kaplanarak güneş pili imalatı tamamlanmış olur.



Şekil 3.2. Güneş Pili Yapısı (Güneş, 1999)

### **3.4. Güneş Pili Türleri**

Güneş pili teknolojisi, kullanılan maddeler ve yapım türleri bakımından son derece çeşitlidir. Güneş pili yapım için şu anda kullanılmakta olan ondan fazla maddenin yanısıra, yüzlerce maddenin de üzerinde çalışılmaktadır. Aşağıda pratikte kullanılan bazı güneş pili türleri kısaca açıklanmıştır.

#### **3.4.1. Kristal Silisyum Güneş Pilleri**

Silisyum, yarı iletken özellikleri tipik olarak gösteren ve güneş pili yapımında en çok kullanılan bir maddedir. Fotovoltaik özellikleri daha üstün olan başka maddelerde olmakla birlikte, silisyum hem teknolojik üstünlüğü nedeniyle, hem de ekonomik nedenlerle tercih edilmektedir. Tek-kristal, yarı-kristal, şerit ve çok-kristal gibi değişik türleri vardır.

#### **3.4.2. Tek-kristal Silisyum Güneş Pilleri**

İlk ticari güneş pillerinde, “chrozalski kristal çekme tekniği” ile büyütülen tek kristal yapıli silisyum kullanılmıştır (EİE, 1992; Chow, 1995; Oral, 1979). Fotovoltaik endüstrisinde hala en çok kullanılan yöntem olan bu teknikte, öncelikle ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli kimyasal ve ısıl reaksiyonlardan geçilerek saf silisyum elde edilir. Daha sonra silisyum eriyiğe, çekirdek denen tek kristal yapıli bir silisyum parçası batırılır. Bu çekirdek eriyikten çıkarıldığında, soğuyan silisyum eriyik, çekirdeğin üzerine külçe şeklinde yığılmış olur. Bu silisyum külçe, elmas bir keski ile dilimlere ayrılır. Bu iki aşamada olur. Önce külçe dikdörtgen bloklar halinde kesilir, daha sonra bu bloklar dilimlere ayrılarak pil şeklinde işlenir. Verimleri %15 civarındadır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması bu pillerin dezavantajlarıdır.

#### **3.4.3. Yarı-kristal Silisyum Güneş Pilleri**

Yarı-kristal de denen bu tip piller, sıvı silisyumun soğutulması ile elde edilen kümelenmiş, küçük silisyum kristallerinden oluşur. Bu pillerin verimleri %14 civarında olup, kümelenmiş silisyum taneciklerinin sınırlarındaki kayıplara bağlıdır (Chow, 1995).

#### 3.4.4. Seris Silisyum Güneş Pilleri

Bu tür piller, malzeme kaybının azaltılması amacıyla, levha halinde silisyum tabakalarından yapılırlar. Çeşitli yöntemlerle elde edilen bu piller, halen geliştirme aşamasındadır. Verimleri laboratuvar şartlarında %13-16 arasındadır (EİE, 1992; Chow, 1995).

#### 3.4.5. Çok-kristal Silisyum Güneş Pilleri

Bu piller de şerit silisyum teknolojisiyle yapılmakla birlikte, yapıları çok kristal özellikler gösterir. Halen laboratuvar aşamasında olan bu pillerin verimleri %10 civarındadır (Chow, 1995).

#### 3.4.6. İnce Film Güneş Pilleri

Bu teknikte, soğurucu özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha az kalınlıkta (tek kristalin 1/500'ü kalınlığında) güneş pillerinin absorpsiyon katsayısı, kristal silisyum güneş pillerinin katsayılarından daha fazladır. Dalga boyu 0.7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalındığında amorf silisyum ile soğurulabilirken, kristal silisyum da ise aynı radyasyonu soğurabilmek için 500 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden amorf yapılı güneş pillerinde daha az malzeme kullanılır. Ayrıca montaj kolaylığı nedeniyle işgücünün azalması, bu pillere avantaj sağlar.

Amorf silisyum güneş pilleri (a-Si), ince film güneş pili teknolojisinin en önde gelen örneğidir. İlk yapılan amorf silisyum güneş pilleri, "Schottky" bariyer yapısında iken, daha sonra PN yapıları geliştirilmiştir. PN yapısındaki pillerin fabrikasyonu kalay oksitle kaplı iletken bir yüzeyin üzerine çöktürme yöntemi ile yapılır. Bu yüzeyin arkası daha sonra metalle kaplanır. Verimleri % 5-8 arasındadır. Ancak bu piller, kısa zamanda bozulmaya başlayarak çıkış güçleri azalır.

#### 3.4.7. Diğer Tip Güneş Pilleri

Bakır indiyum diselenit (SulnSe) maddesinden yapılan ve verimli %13 civarında olan bu piller halen geliştirme aşamasındadırlar ve daha kararlı çıkış gücüne sahip



oldukları için umut vericidirler. Kadmiyum tellur (CdTe) ile yapılan pillerin ise yutuculuk özelliği yüksek, verimleri de % 12 civarındadır. (EİE, 1992).

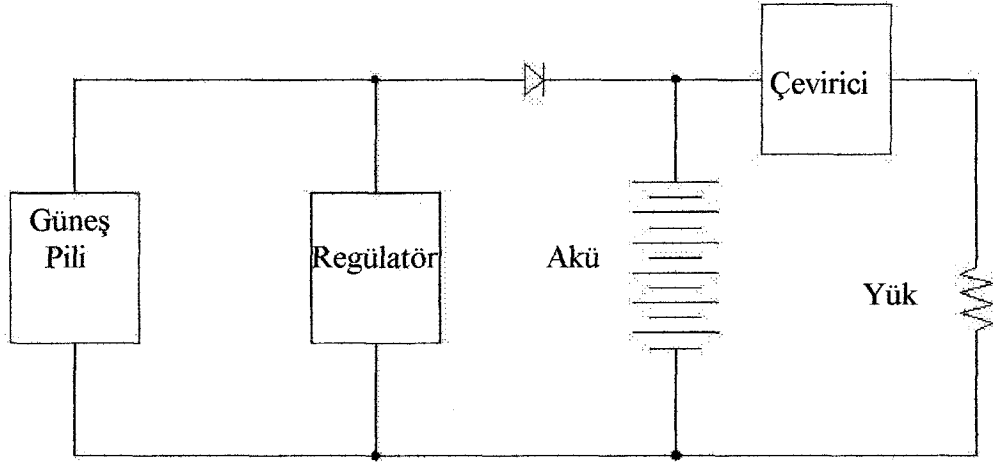
Bu güne kadar elde edilen en yüksek verime (%24) galyum arsanitten (GaAs) yapılan piller ile ulaşılmıştır (EİE, 1992). Bu madde ile çeşitli türde piller elde edilmekle birlikte, pahalı olduğu için çoğunlukla uzay teknolojisinde kullanılmaktadır. İnce film pillerin, güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünden yararlanabilmesi amacı ile denenilen bir yöntem ise, birden fazla ince film yapısının üst üste kullanılmasıyla elde edilen çok eklemlili film yapılarıdır.

Bunların dışında, güneş ışınımını yüksek verimle pillerin üzerine optik olarak yoğunlaştıran sistemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu tür sistemlerde güneşin hareketini izleyen düzenlerin yanısıra, güneş ışığını kıran (mercek) ya da yansıtan (ayna) elemanlar kullanılmaktadır.

### **3.5. Güneş Pili Sistemleri**

Güneş pili, elektrik enerjisinin gerekli olduğu birçok uygulamada kullanılabilir (Markvart, 1994; Hankins, 1991). Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak akümülatörler, invertörler, akümülatör şarj cihazları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bu güneş pili sistemi (Fotovoltaik Sistem) oluştururlar. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yerlerde, jeneratöre yakıt taşınması zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç kaynakları ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür.

Şekil 3.3'de temel sistem görülmektedir. Aşağıdaki blokların tanıtımı yapılmıştır.



Şekil 3.3. Temel Güneş Enerjisi Sistemi (Güneş, 1999)

1) Güneş pili grubu: Yük ve akü grubuna doğru gerilim sağlar. Pili grubu, bir çok güneş pillerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Seri-paralel bağlama yoluyla istenilen çıkış özelliklerine ulaşılabilir. Seri bağlama ile gerilim yükseltirken pil elemanlarının izolasyonları 600 V'un üzerine çıkılmasına izin vermezler. Akım ise daha çok iletken kalınlıkları ve diğer devre elemanlarına bağlıdır. Güneş pili grubunun çıkış gerilimi, akü grubunun şarj edilebilmesine uygun bir değerde olmalıdır, bu değer özellikle 12.24, 48 veya 120 V olarak seçilir.

2) Regülatör: Temel işlevi akü grubunu aşırı gerilimden korumaktır. Aşırı gerilim, akü elektrolitinde kaynamaya neden olur ve aküye zarar verir hatta parlatabilir.

3) Blokaj diyotu: Bu diyot, bir güneş pili sisteminin temel yapı taşlarından biridir. Piller, karanlıkta sızıntı akımları çok yüksek olan bir diyot gibi davranarak gece boyunca aküleri boşaltırlar. Blokaj diyodu bu istenmeyen yöndeki akımın akışına engel olmak amacıyla devreye seri olarak iletim yönünde bağlanır. Hesaplamalarda blokaj diyodu üzerindeki 0.5-0.7 V'luk gerilim düşümü göz önüne alınmalıdır.

4) Akü grubu: Sistemde bir akü grubunun kullanılmasının iki temel amacı vardır. Birincisi seviyeli enerjiyi depolayarak gerektiğinde sisteme kısa süreler için yüksek miktarda enerji verebilmek, ikincisi ise güneş pilinin yetersiz kaldığı zamanlarda (geceleri, bulutlu veya yağmurlu günler, sis vb) yükü beslemektir. Güvenilir bir güneş enerjisi sisteminde kullanılan aküler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

- Yüksek şarj ve deşarj verimi
- Düşük su kaybı
- Aşırı deşarjdan zarar görmeme
- Düşük kendi kendine deşarj oranı
- Az bakım gerektirme.

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

Güneş pili sistemi uygulamaları iki ana gruba ayrılabilir.

- Şebeke bağlantılı sistemler
- Bağımsız sistemler

### **3.5.1. Şebeke Bağlantılı Güneş Pili Sistemleri**

Şebeke bağlantılı güneş pili sistemlerinin gücü birkaç kW'dan birkaç MW'a kadar değişebilmektedir. Bu tür sistemler, iki ana gruba ayrılır.

İlk tür sistem, temelde bir yerleşim biriminin mesela, bir konutun elektrik ihtiyacını karşılar. Bu sistemlerde, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen d.a elektriğin a.a elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir.

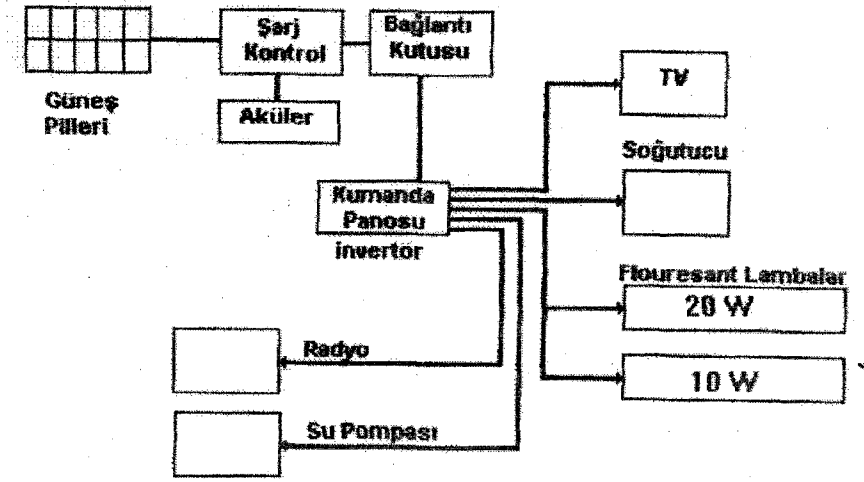
İkinci bir şebekeye bağlı güneş pili sistemleri, kendi başına elektrik üreterek, bunu şebeke satan büyük güç üretim merkezleri şeklindedir. Bunların büyüklüğü 600-700 kW'dan MW'lara kadar değişir.

### **3.5.2. Bağımsız Güneş Pili Sistemleri**

#### **3.5.2.1. Sistemin Yapısı ve Özellikleri**

PV sistemlerinin en tipik ve en yaygın kullanım şekli, yerleşim yerlerinden uzak yörelerde enerji gereksinimini karşılayan bağımsız (stand-alone) sistemleridir. Bu sistemler birkaç Watt'dan birkaç yüz kW'a kadar değişebilen güçlerde ve çok çeşitli türlerde yüklerin enerji talebini karşılayabilir.

Şekil 3.4'de alternatif akımla çalışan yüklere enerji sağlayan tipik bir güneş pili sisteminin şeması verilmiştir. Bu tür sistemlerde yeterli sayıda güneş pili modülü, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneş'in yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulur. Güneş pili modülleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır. Akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için kullanılan kontrol bizim ise akünün durumuna göre ya güneş pillerinden gelen akım ya da yükün çektiği akım keser. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir invertör eklenerek akümülatördeki d.a gerilim, 220 V, 50 Hz'lik sinüs dalgasına dönüştürülür.



Şekil 3.4 Bağımsız Güneş Pili Sistemi (İbrahim, 1996)

Bağımsız güneş pili sistemlerinin kullanıldığı tipik uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

- Radyolink istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri
- Petrol boru hatlarının katodik koruması, metal yapıların (köprüler, kuleler vb) korozyondan korunması
- Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler, hava gözlem istasyonları
- Bina içi ya da dışı aydınlatma
- Dağ evleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde TV, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması
- Tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompajı
- Orman gözetleme kuleleri
- Deniz fenerleri
- İlk yardım, alarm ve güvenlik sistemleri

- İlaç ve aşı soğutma

Güneş pili sistemleri en çok iletişim alanında kullanılmaktadır. Radyolink istasyonların çoğunlukla elektriği bulunmayan yüksek ve ulaşım sorunu olan yörelerde kurulu olması nedeniyle, bu tesislerde güneş pili modülleri kullanmak uygun bir çözüm olmuştur. Bu alanı, su pompajı ve aşı-ilaç koruma izlemektedir.

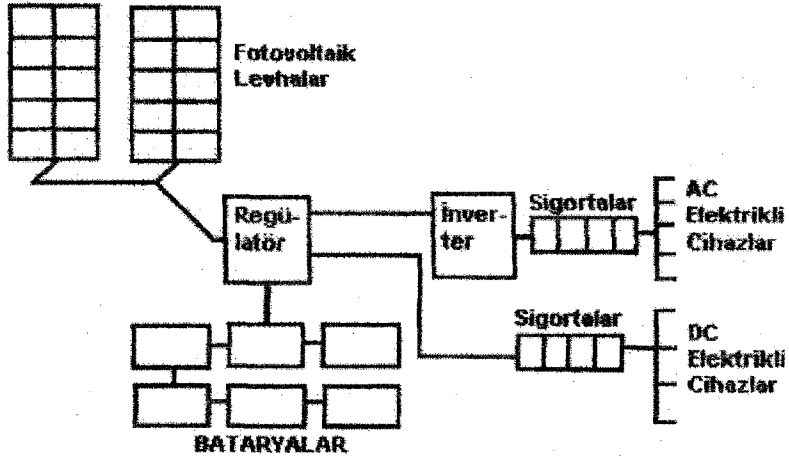
Bağımsız ve şebeke bağlantılı sistemlerin dışında, güneş pilleri, uzay uygulamaları ve tüketim ürünlerinde kullanılmaktadır. Uzayda 1958 yılından bu yana, uyduların ve uzay araçlarının elektrik ihtiyacını karşılamak için güneş pilleri kullanılmaktadır. Tüketiciye yönelik ürünlerin ise en tipik örneği, yıllardır ticari ortama kabul edilmiş olan güneş pili ile çalışan hesap makineleridir.

### 3.5.2.2. Sistemin Tasarımı

Küçük bir PV Sistem, Şekil 3.5'de gösterilen bölümlere ayrılabilir. PV levhalar güneş enerjisini direkt olarak enerjisine dönüştürürler. Tipik bir levha güneşli açık havada 12 Volt, 10 Amper kadar, yani 120 Watt elektrik üretebilir. Elde edilen gerilimi artırmak için levhalar seri olarak, akımı artırmak için ise paralel olarak bağlanırlar.

Güneşten maksimum enerjiyi toplayabilmek için PV levhaların gün boyunca en çok güneş gören güneş yönüne bakmaları ve bulunan eyleme göre zamana bağlı olarak yatay ile belirli bir eğilimde olmaları gerekir. Genel olarak kış aylarında levha yaz aylarına nispeten daha dikey olmalıdır.

Güneş enerjisi değişen ve her zaman olmayan bir enerji türüdür. Mesela, güneş doğmadan önce, güneş battıktan sonra veya kapalı ve bulutlu havalarda güneş enerjisi olmadığından toplanan fazla enerjini depolanıp bu zamanlarda kullanılması gerekir. Bu amaçla yüksek kapasiteli (mesela 100 Ah) batarya kullanılır. Genel olarak bir bataryanın ömrünü artırmak için kapasitesinin %80'den fazla deşarj olmaması gerekir.



Şekil 3.5 Küçük Bir PV Sistem Tasarımı (İbrahim, 1996)

PV sistemlerde güneş olduğu zamanlarda bataryaların tamamıyla dolduktan sonra akım almalarını (overcharge) önlemek gerekir. Fazla şarj bataryanın ısınmasına, sıvı kaybına ve batarya ömrünün kısılmasına yol açar. Regülasyon, PV levhalar ile bataryalar arasına konur ve bataryaları fazla şarj almaları önler.

İnvertör, 12 veya 24 voltluk düşük doğru akımı 240 Volt alternatif akıma dönüştürür. Çok küçük uygulamalarda invertör yerine düşük gerilim ve doğru akımla çalışan elektrikli cihazlar kullanmak mümkündür. (İbrahim, 1996)

Bir PV sistem tasarımı yapmadan önce ilk olarak sistemin kurulacağı bölgedeki aylara göre dağılmış, metre kareye düşen ortalama günlük güneş enerjisini bilmek gerekir. Gerekli olan bu bilgi normal olarak bölgeye en yakın olan meteoroloji istasyonundan elde edilebilir.

PV sistem tasarımı yapılırken ilk olarak sistemin kurulacağı yerdeki elektrik tüketimini hesaplamak gerekir. Bunun içinde kullanılacak olan elektrikli cihazların enerji harcamalarının (güç harcamaları ve kullanım zamanları) bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada sunulan tasarımda aylık enerji eşitliği esas alınmıştır. Tasarım adım adım şu şekilde gerçekleştirilir.

1. Kullanılacak olan bütün cihazların elektrik harcamaları, çalışma gerilimleri ve haftalık kullanım zamanları belirlenir. Bazı cihazların haftada sadece birkaç kez kullanıldıkları göz önünde bulundurulursa, haftalık hesaplamaların günlük hesaplara

nispeten daha doğru sonuçlar vereceği şüphesizdir. Elektrik harcamaları, haftalık kullanım saatleri ile çarpılarak haftalık a.a ve d.a enerji tüketimi hesaplanır.

2. Haftalık enerji 7 ile bölerek günlük a.a ve d.a enerji tüketimi Wh/gün olarak hesaplanır

3. İnvörtör kaybı, kablo kayıpları ve batarya gerilimi göz önünde bulundurularak gerekli olan düzeltilmiş günlük Ah saat ihtiyacı hesaplanır.

4. Fotovoltaik levha çalışma akımı, aylık güneş enerjisi verileri ile çarpılarak bir fotovoltaik levhanın üreteceği günlük Ah her ay için bulunur. Bulunan değerlerin ortalaması alınır.

5. Adım 3 ve adım 4'de bulunan değerler oranlanarak, gerekli olan paralel bağlanacak fotovoltaik levha sayısı hesaplanır.

6. Batarya gerilimi fotovoltaik çalışma gerilimine bölünerek gerekli olan seri bağlanacak fotovoltaik levha sayısı bulunur

7. Adım 3'den yararlanarak aylık Ah ihtiyacı ve aylık Ah üretimi hesaplanır. Buradan da aylık Ah saat farkı bulunur. Negatif olan değerler için üretilen enerji o aylık ihtiyacı karşılamaz. Pozitif olan değerler için ise üretilen enerji o aylık ihtiyacın üzerindedir.

8. Gerekli olan batarya miktarını hesaplamak için batarya ile çalışılması zorunlu olan gün sayısı günlük Ah ihtiyacı ile çarpılır ve bulunan miktar adım 7'de bulunan negatif Ah miktarı ile toplanır ve böylece gerekli olan toplam batarya kapasitesi Ah olarak hesaplanır. Bulunan miktar bir batarya kapasitesine bölünerek gerekli olan paralel bağlanacak batarya sayısı bulunur.

9. Toplam harcanan güç, adım 1'deki değerler kullanılarak hesaplanır. Bulunan miktar gerekli olan invertör güç kapasitesini verecektir.

10. Adım 9'da bulunan toplan gücü batarya gerilimine bölerek gerekli olan regülatör akım kapasitesi hesaplanır.



Görüldüğü gibi bir fotovoltaik sistem tasarımında bir çok değişken vardır ve tasarımı gerçekleştirip optimum sonuçlar elde etmek zaman isteyen bir işlemdir.

### 3.5.3. Güneş Tarlası Modeli

Bu modelde bir düz araziye belli sayıda parabolik veya silindirik-parabolik reflektörler dağıtılmakta ve güneş ışınları bu reflektörden yansıtılarak, reflektör geometrisine bağlı olarak, ya noktasal ya da çizgisel bir odakta toplanmaktadır. Bu odağın bulunduğu yere konulan kollektör içinden akıtılan ısı taşıma maddesi güneş enerjisi ile ısıtılarak, bilahare suyun buharlaştırılmasında veya uygun bir gazda potansiyel enerji depolanmasında kullanılmaktadır. Suyun direk buharlaştırılması da mümkündür. Bu kollektörden elde edilen gücün: seçilen ısı taşıma maddesinin fiziksel özelliklerine, akış hızına, basınç farkına ve pompalama gücüne bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağıntıyı: ısı miktarı, fenning denklemi ve bernoulli denklemi yardımı ile bulabiliriz.

$$\frac{L}{d} = \frac{(\pi^2 \cdot g)^{1/3}}{8\lambda} (\gamma \cdot c^2)^{1/3} \cdot (c_g \cdot \eta \cdot I)^{-2/3} \cdot (\Delta p)^{1/3} \cdot (\Delta t)^{2/3} \quad (3.1)$$

$$\frac{P_p}{P_c} = (2,34 \cdot 10^{-3}) \cdot (\eta_p \cdot \eta_t \cdot c \gamma)^{-1} \cdot \Delta p / \Delta t \quad (3.2)$$

Burada:  $L/d$  , tipik bir kollektörün uzunluğunun çapına oranını;  $g$ , yerçekimi ivmesini;  $\lambda$  , sürtünme katsayısını;  $c$ , ısınma ısısını;  $\gamma$  , özgül ağırlığını;  $c_g$ , faydalı geometrik alanını;  $\eta$  , kollektör verimini;  $I$  , anlık ışınım şiddetini;  $\Delta p$  , kollektörden akan sıvının sürtünmelerden dolayı uğradığı basınç düşümünü;  $\eta_p$  , sıvıyı pompalayan pompanın verimini;  $\eta_t$  , tesisin net verimini;  $P_p$  , pompalama gücünü;  $P_c$  ise kollektörün gücünü temsil etmektedir.

Denklem (3.1) ile verilen  $L/d$  oranının mümkün olduğu kadar yüksek, denklem (3.2) ile verilen  $P_p/P_c$  oranının ise mümkün olduğu kadar düşük olması arzu edilmektedir. Çünkü ancak bu şartlar altında tesisten alınan güç artmaktadır. Güneş tarlası elektrik santrallerinde ısı taşıma maddesi yerine tercih edilen beş ara maddeye ait  $L/d$  ve tesis gücü çizelge 3.1 de verilmektedir.

Çizelge 3.1. L/d ve tesis gücü değişimleri.

Madde	L/d	Güç (MW)
HITEC	96295	67,3
SHELL Th 23	73511	39,2
Na	68225	33,8
Na+K	49007	17,4
K	47622	16,4

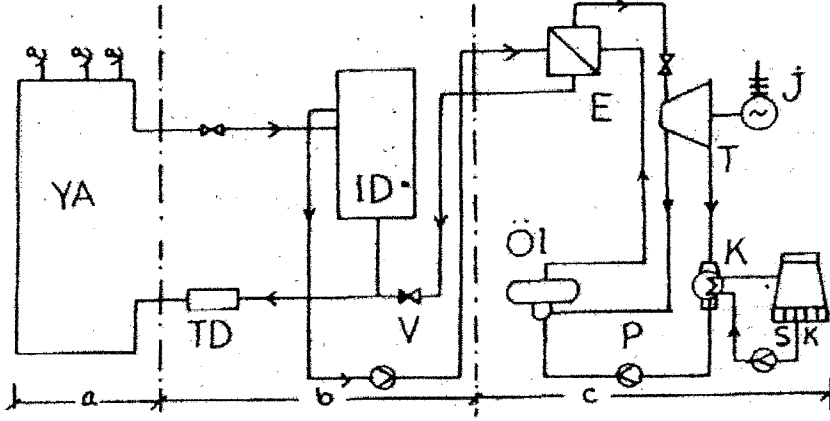
Denklem (3.2.) yardımı ile hesaplanan değerler ise çizelge (3.2.) verilmiştir.

Çizelge 3.2.  $P_p / P_c$  oranları

Madde	HITEC	Shell Th 23	Na	Na+K	K
$P_p / P_c$	0,0009	0,0021	0,0023	0,0028	0,0042

Çizelge (3.1.) ve (3.2.)'nin incelenmesinden L/d ve  $P_p / P_c$  oranları açısından, en uygun ısı taşıma maddesinin HITEC adı verilen ötektik tuz karışımı (%53  $KNO_3$  + %40  $NaNO_2$  + %7  $NaNO_3$ ) olduğu; L/d oranıyla tesisten elde edilen gücünde arttığı anlaşılmaktadır.

Tipik bir güneş tarlası modeline göre düşünülen elektrik santraline ait ısı akış ve enerji dönüşüm şeması şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6. Güneş tarlası modelinde ısı akışı (YA, yansıtıcı alan; TD, tampon depo; ID, ısı deposu; E, Eşanjör; J Jeneratör; T, Türbin; K, Kondenser; SK, soğutma kulesi; ÖI, ön ısıtıcı; P, Pompa; V, vana;) (Tsuda, 1994)

(Şekil 3.6.)'nin incelenmesinden, bu santralin üç alt sistemden oluştuğu anlaşılmaktadır: a) yansıtıcı alan; parabolik veya silindirik-parabolik reflektörlerin dağıtıldığı alandır. Odaklı yansıtıcı yüzeyler sadece direk ışınımı yakaladıkları için güneşi izlemek zorundadır. Bu nedenle sistemin tümü bilgisayarla yönetilmektedir. Bu reflektörler bir veya iki eksen ve hatta üç eksen etrafında bile hareket edebilirler. Reflektörlere heliostat adı verilmektedir; b) depolama sistemi; ısı deposu, tampon depo, pompa ve vanalardan oluşmaktadır. Isı deposu silindir biçiminde yalıtılmış bir depodur ve içinde ısı depolanacak malzeme (sıvı, katı) bulunmaktadır. Yansıtıcı sisteminden gelen ısı taşıma maddesi bu deponun yukarı kısmına gelir ve ikinci bir çevrimle buhar üretmek üzere eşanjöre gönderilmektedir. Isı deposunun alt kısmında biriken soğuk sıvı, tampon depo üzerinden yansıtıcı sisteme geçmektedir; c) güç dönüşüm sistemi; ısı deposundan eşanjöre gelen sıcak sıvıyla kızgın buhar elde edilmektedir. Buhar bir türbin jeneratör gurubu vasıtasıyla elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Türbinden çıkan çürük buhar kondenserde yoğuştuğundan sonra tekrar eşanjöre pompalanır.

Halen çalışmakta olan güneş tarlası elektrik santrallerinden bazılarının adı, gücü ve reflektör tipi (çizelge 3.3)'te görülmektedir. (S, silindirik-parabolik; P, parabolik).

Çizelge 3.3. Bazı güneş tarlası elektrik santralleri

Tesis Adı	Kapasite (KW)	Reflektör	Kullanım
Coolidge (ABD)	150	S	Sulama
Shenandoah (ABD)	400	P	Elektrik – ısıtma
Crosbyton (ABD)	5000	P	Elektrik
Almeria (İspanya)	500	S	Elektrik
General atomic (ABD)	100000	S	Elektrik

Ayrıca daha önceki konularda bahsetmiş olduğumuz bağımsız güneş pili sistemleriyle de PV'ler yardımıyla bir tarla oluşturulup; güneş tarlası modelleri oluşturulabilmektedir.

### 3.6. Güneş Pili Sistemlerinin Ekonomisi

Güneş pili sistemlerinin enerji maliyetini üç önemli etken belirler. Bunlar, verim ilk yatırım maliyeti ve ömrüdür.

#### 3.6.1. Verim

Pil veriminin maliyet üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Verimin artırılmasıyla güneş pili sistemlerinin maliyeti azalacaktır. Daha gelişmiş teknolojiler kullanılarak gelecekte pil verimlerinin %30'lar mertebesine çıkarılacağı beklenmektedir.

#### 3.6.2. Yatırım Maliyeti

Güneş pili sistemlerinin işletme ve bakım maliyetleri çok az olduğu için toplam sistem maliyetinin büyük bir kısmının ilk yatırım maliyeti oluşturur. Üretim teknolojisinin geliştirilmesi, yüksek verimli pillerin yapılması, modül tasarım ve yapım tekniklerinin geliştirilmesi ile ilk yatırım maliyeti azalacaktır. Güneş pili sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri arasında arazi, tesisat, montaj, invertör, ve diğer güç cihazları gibi destek elemanların maliyeti de yer alır. Destek sistemlerinin

maliyeti, bir güneş pili sisteminin maliyetinin yaklaşık yarısını oluşturduğu için, bu tür maliyetleri azaltmak en az modül maliyetini azaltmak kadar önem taşır.

### 3.6.3. Modül Ömrü

Silisyum kristal piller için bu etken fazla önem taşımaz, çünkü bu pillerde hedeflenmiş olan 30 yıllık ömre ulaşılmıştır. Amorj silisyum ve diğer güneş pili türlerinde zamanla güç çıkışı bozularak azaldığı için, ömür daha önemlidir. Modül ömrünün artmasının, enerji maliyetleri üzerinde önemli etkisi olacaktır.

Bir güneş pili sisteminin ürettiği enerjinin maliyeti, depolama yapılmadığı zaman 0.3-0.4 \$/kWh arasındadır. Bu maliyetle güneş pili sistemleri, enterkonnekte şebekenin olmadığı veya ulaşımın zor ve pahalı olduğu bölgelerde diğer alternatif enerji kaynakları ile yarışabilir düzeydedir. Bu gibi yerlerde birkaç kW'a kadar küçük güçteki uygulamalar (iletişim, ilaç-aşı soğutma, su pompası ve aydınlatma gibi) teknolojik açıdan olduğu kadar ekonomik açıdan da kendini kanıtlamıştır. Ancak istenen hedef, fiyatların enterkonnekte elektrik düzeyinde olmasıdır. 2000'li yıllara kadar maliyetin şebeke elektriği ile yarışabilecek düzeye geleceği umulmaktadır.

### 3.6.4. Güneş Pili Sistemlerine İlişkin Diğer Özellikler

Güneş pili dayanaklı güvenilir ve uzun ömürlüdür. Çalışmaları sırasında hiçbir elektriksel sorun çıkarmazlar ve bozulmazlar. Güneş pili modüllerinin karşı karşıya kalabilecekleri en büyük tehditler, yıldırım düşmesi ve uzun dönemde (20 yıl) hava koşullarından dolayı aşınmadır.

Güneş pili sistemlerinin ilk yatırım maliyetinin fazla olması, bugünkü şartlarda elektrik şebekesinin olduğu yerlerde kullanılmalarını ekonomik yönden sınırlamaktadır. Ancak elektrik hattı bulunmayan veya elektrik götürülmesinin pahalı olduğu kırsal yörelerde güneş pili sistemlerinin kullanımı daha uygun olmaktadır.

Güneş pili sistemlerinin en iyi yanlarından biri, diğer bütün yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgar, biyomas, hidrolik, termal güneş, jeotermal) gibi çevre açısından olumsuz etkilere sahip olmamasıdır.

## 4. MATERYAL VE METOT

### 4.1. Materyal

Bu çalışmada bir güneş pili modülü ile çalışan sistem kurularak değişik koşullarda deneyler yapılmıştır. Güneş pilinden elde edilen enerji bir şarj devresi üzerinden geçirilerek akümülatörde toplanmıştır. Deneyler sırasında güneş pilinden gelen tüm enerji depolanmıştır. Deney bitiminde bir yük vasıtası ile bu enerji kullanılmıştır. Deneylerde güneş pilinden, akü şarj devresinden, invertörden ve aküden alınan akım ve gerilim değerleri alınarak sistem verimi hesaplanmıştır.

Ayrıca EİE Genel Müdürlüğünün Isparta Meteoroloji Bölge Müdürlüğünde konuşlandığı direkt ve difüz güneş enerjisi ölçüm cihazlarının parametrelerinden de faydalanılmıştır. (resim 4.1.), (resim 4.2.).



Resim 4.1. Direkt güneş enerjisi ölçüm cihazı



Resim 4.2. Diffüz güneş enerjisi ölçüm cihazı

(Resim 4.1.) ve (resim 4.2.)'de görülen cihazlar vasıtasıyla Isparta'daki güneşlenme değerleri ile ilgili veriler bölüm 6'da kullanılmıştır.

## 4.2. Metot

### 4.2.1. Deney Düzeneği

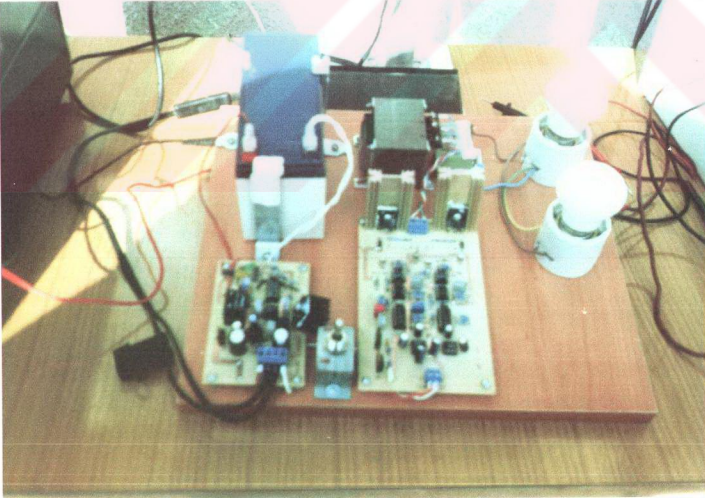
Deney düzeneği; bir güneş pili, bir şarj regülatörü, bir akümülatör, bir DC/AC çevirici (invertör), osiloskop, avometreler (ampermetre ve voltmetre için), 80286 tabanlı bir bilgisayar, ve analog sinyalleri dijitale dönüştürücü çevirici ve bilgisayara bağlı bir ara birimden oluşmaktadır (resim 4.3 ve 4.4).

#### 4.2.1.1. Fotovoltaik Güneş Pili

Fotovoltaik enerji dönüşüm zincirinin ilk halkası olan güneş pili doğru akım üretir. Güneş pili UNI-SOLAR marka US5 tipinde ve  $720 \text{ cm}^2$  yüzey alanıdır. Çizelge 4.1.'de güneş pilinin standart şartlarda ( $1000 \text{ W/m}^2$  ışınım ve  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  pil sıcaklığında) elektriksel ve fiziksel özellikleri verilmiştir.



Resim 4.3. Deney düzeneğinin genel görünüşü



Resim 4.4. Deney Düzeneğinin Yakından Görünümü



Teorik veriminin % 15 dolaylarında olduğu üretici firma tarafından belirtilmiştir. Resim 4.5.'de görülen güneş pilinin ömrü normal şartlar altında en az 10 yıldır ( Uni-Solar , 2001).



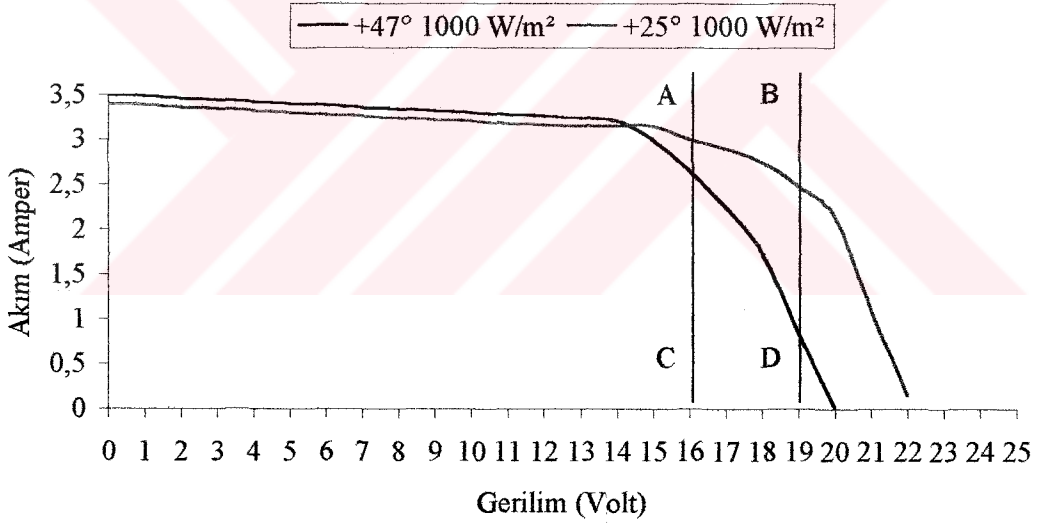
Resim 4.5. UNI-SOLAR US5 Tipi Güneş Pili

Çizelge 4.1. UNI-SOLAR US5 tipi güneş pilinin standart şartlarda elektriksel ve fiziksel özellikleri

Elektriksel Özellikler	
Güç	5 Watt
Yükteki Akım	0.30 Amper
Yükteki Gerilim	16.5 Volt
Kısa Devre Akımı	0.37 Amper
Açık Devre Gerilimi	23.8 Volt
Fiziksel Özellikler	
Uzunluk	450 mm
Genişlik	160 mm
Ağırlık	1 kg

Şekil 4.1.'de üretici firma tarafından verilen pilin akım-gerilim (I-V) karakteristik eğrileri görülmektedir. Değişik ışınım ve pil sıcaklıklarından pilden alınacak akım ve gerilimler buradan görülebilir.  $1000 \text{ W/m}^2$  ışınım ve  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  pil sıcaklığında yaklaşık

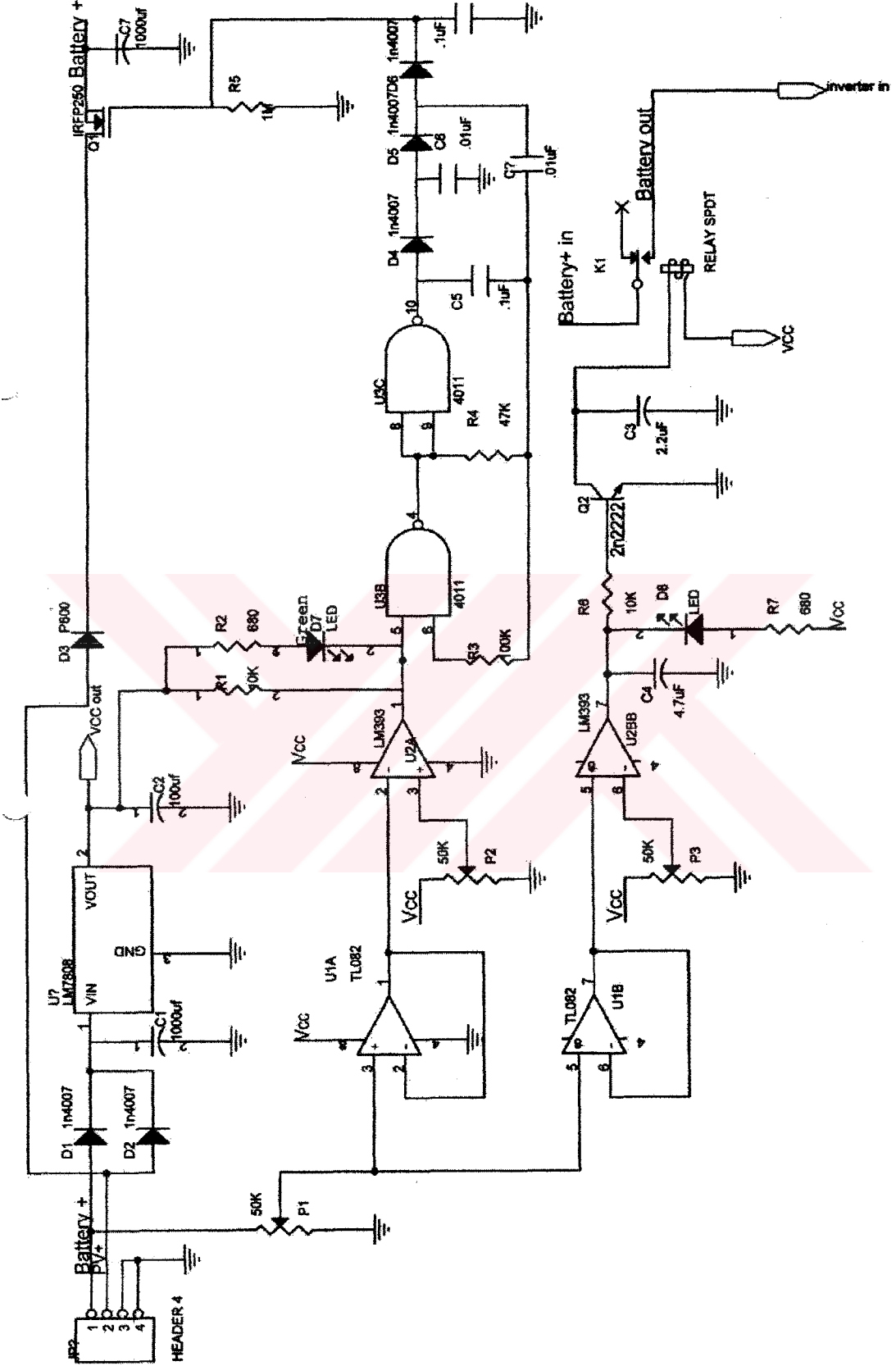
16 V'a kadar akım sabit kalmakta, bu değerden sonra akım azalarak 0 değerine düşmektedir. Diğer ışınlam ve pil sıcaklıkları için verilen eğrilerde de benzer durumlar görülmektedir. 1000 W/m<sup>2</sup> ve 25 °C pil sıcaklığında pilden 4.9 Watt alınabilirken, 1000 W/m<sup>2</sup> ışınlam ve 47 °C pil sıcaklığında ise 4.4 Watt alınabilmektedir. 25 °C pil sıcaklığında pil verimi %14.72 iken 47 °C pil sıcaklığında pil verimi %13.12 olmaktadır. Aradaki fark %1.6'dır. Bu da teorik verimi %15 olan bir pil için hiç de küçümsenmeyecek bir rakamdır. Bunun için ışınlamla birlikte pil sıcaklığı da pil verimine etki eden önemli parametrelerden birisidir. Pilin şekil 4.1.'de görülen ABCD alanı içerisinde kalan bölgede çalışması istenir. Bu bölgede akım ve gerilim değerlerinin her ikisi birden en yüksek değerindedir. Böylece pilden en büyük güç alınabilmektedir. Diğer bölgelerde akım değeri yüksek iken gerilim değeri düşük veya gerilim değeri yüksek iken akım değeri düşüktür. Bu da pilin çıkış gücünün küçük olmasına sebep olur.



Şekil 4.1. Güneş Pilinin I-V Karakteristik Eğrisi

#### 4.2.1.2. Şarj Regülatör Devresi

Şarj devresi, akümülatörü şarj etmekte kullanılan elektronik bir devredir (Şekil 4.2.). Güneş pilinden alınan gerilim, gelen güneş ışınlamına bağlı olarak 0-20 Volt arasında sürekli değişmektedir.



Şekil 4.2. Şarj Regülör Devresi

Ancak akümülatör en fazla 14 V gibi bir gerilimle şarj edilebilir. Daha fazlası akümülatörün hasarına sebep olur. Bunun için şarj regülatörü çıkışı maksimum 14 V'a ayarlanmıştır. Giriş gerilimi pilden olduğu için değişkendir.ancak şarj regülatörü pilden alınan akımı değiştirmemekte ve tamamını üzerinden geçirerek akümülatörün şarj olmasını sağlamaktadır.

#### 4.2.1.3. Akümülatör

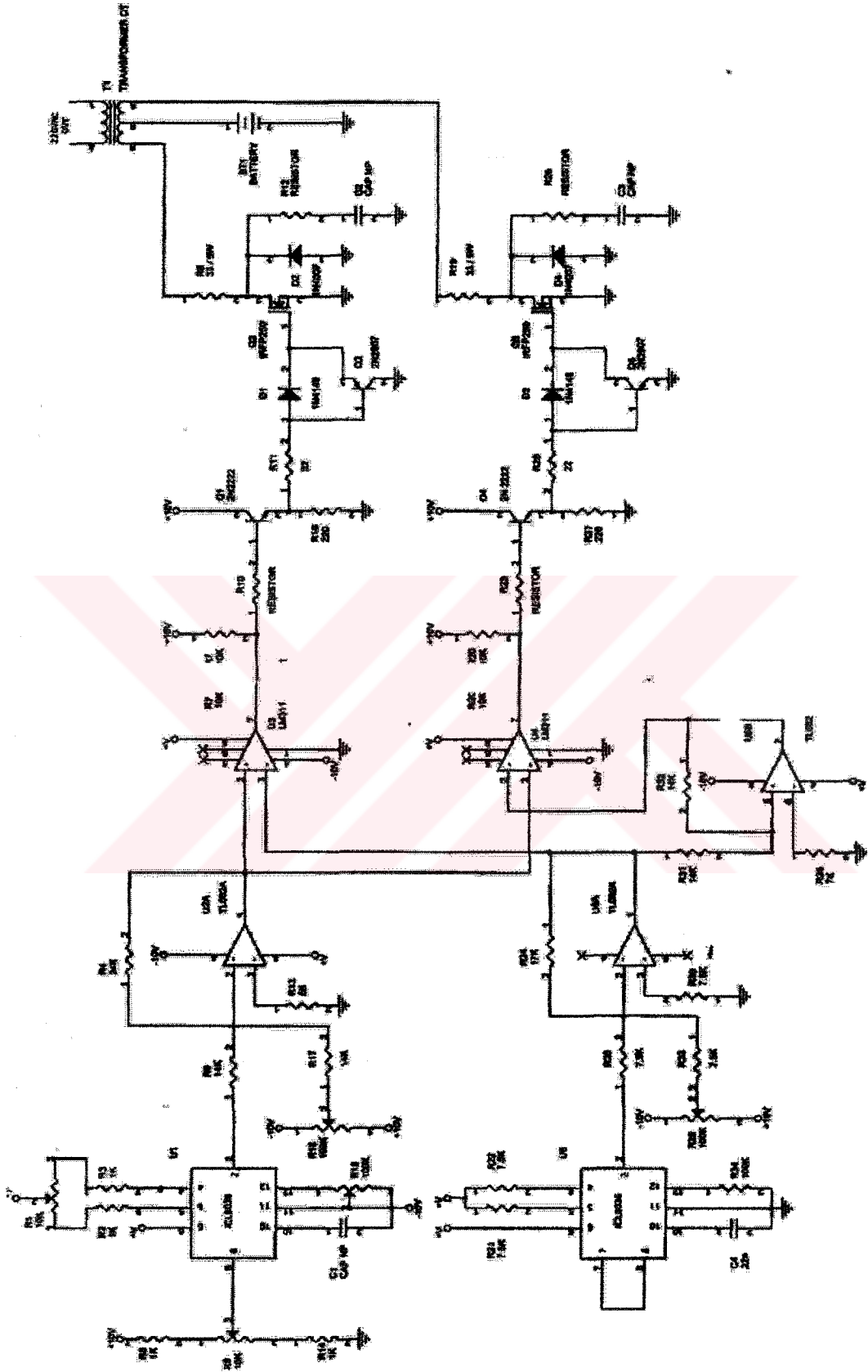
Deneylerde VOLTA (VT 1207) marka kuru tip kurşun-asit akümülatör kullanılmıştır. Akümülatörler yapıları gereği doğru akımla şarj ve deşarj edilirler. Teknik ve fiziksel özellikleri çizelge 4.2'de verilmiştir (Volta, 2000). Akümülatörün en küçük gerilimi 10.5 V, en büyük gerilimi 13.6 V'tur. Kapasitesi 7 Ah'tir. Akümülatörün kapasitesinin 0.25 katından fazla bir akımla şarj etmek akümülatöre zarar vereceğinden şarj regülatörü bu husus dikkate alınarak tasarlanmıştır.

Çizelge 4.2. Volta 1207 marka kuru tip akümülatörün teknik ve fiziksel özellikleri (20 °C)

Elektriksel Özellikler	
Tip	Kurşun-Asit
Kapasite	7 Amper/saat
Normal Gerilim	12 Volt
Minimum Gerilim	10.5 Volt
Maksimum Gerilim	13.6 Volt
Fiziksel Özellikler	
Uzunluk	150 mm
Genişlik	64 mm
Yükseklik	95 mm

#### 4.2.1.1. İnvörtör (DC/AC Çevirici) Devresi

Günümüzde evlerde kullanılan elektrikle çalışan cihazların bir çoğu alternatif gerilim ile (AC 220 V 50 Hz) çalışacak şekilde imal edilmişlerdir. Bu sebepten dolayı güneş pilinden elde edilen ve akümülatörde depolanan DC Doğru gerilim alternatif (AC) doğru gerilime dönüştürülmesi gerekir. Bunun için de sistemde invörtör (DC/AC çevirici ) kullanılmaktadır.



Şekil 4.3. İnvörtör (DC/AC çevirici) Devresi

Bizim kullandığımız invertör devresi 35 W güce duyarlıdır. Akümülatörden aldığı 12 V DC gerilimi 220 V AC gerilime dönüştürerek yükün çalışmasını sağlamaktadır (Şekil 4.3).

#### 4.2.1.5. Yük (Alıcı)

Deneylerde AC yük olarak philips marka alternatif akımla çalışan 5 W'lık ampüller kullanılmıştır.

Deneyler sırasında güneş pili üzerindeki, invertördeki şarj regülatöründeki; gerilim ve akım değerlerini okumak için ölçü aletleri kullanılmıştır. bu ölçümler için ampermetre ve voltmetre kademelerini kullandığımız avometreler ve hassas ölçümler için osiloskop kullanılmıştır (resim 4.3).

#### 4.2.1.6. Veri Toplama Ünitesi

Ölçümlerin hassas ve belirli aralıklarda hızlı bir şekilde yapılabilmesi için analog ve dijital ölçüm cihazlarının yanında bilgisayar kontrollü bir veri toplama sistemi kullanılmıştır. Ölçüm cihazlarından elde edilen analog sinyaller önce veri toplama ünitesinde dijital sinyallere dönüştürülmüş ve daha sonra bilgisayar tarafından okunarak kaydedilmiştir. Veri toplama ünitesinin bilgisayar ile bağlantısı bir ara birimle yapılmıştır. Veri toplama ünitesi şu değerlere ayarlanmıştır. Giriş aralığı  $\pm 5$  V, giriş kazancı 100, veri toplama frekansı 8 değer/dak. Veri toplama ünitesinin teknik özellikleri çizelge 4.3'te verilmiştir (Keithley, 1993).

Çizelge 4.3. KEITHLEY marka veri toplama ünitesinin özellikleri

Elektriksel özellikler	
Kanal Sayısı	8 Adet
Giriş Tanımı	16 Bit
Kodlama	Binary (ikili)
Giriş Aralığı	$\pm 5$ V veya $\pm 3.25$ V
Giriş Kazancı	1-10 veya 100
Veri Toplama Frekansı	16 Değer/saniye

### 4.3. DeneYlerin yapılışı

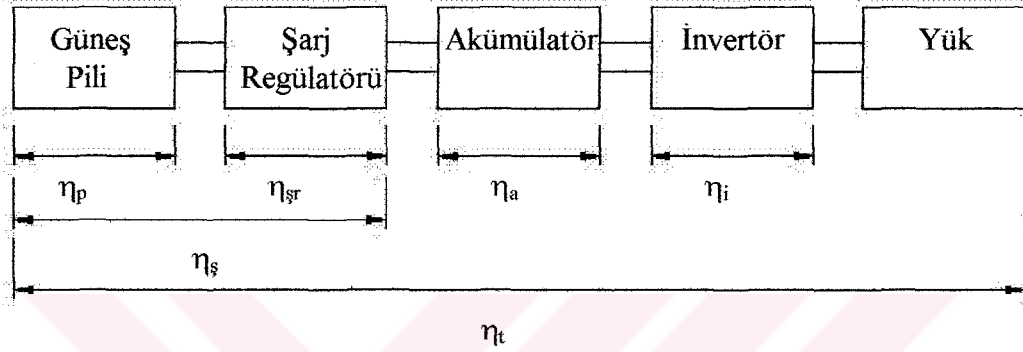
DeneYlerde tüm gün boyunca (güneşin doğuşu ile batışı arası) güneş pilinden elde edilen enerji akümülatörde depo edilmiş ve gün batımından sonra yük vasıtasıyla akümülatördeki enerji deşarj edilmiştir. Bununla ilgili sistem verimi hesaplanmıştır.

DeneYler Mart-Temmuz 2001 tarihleri arasında yapılmıştır.deneYler 29 Mart, 3-4 Nisan, 8-24-30 Mayıs, 15-16-17-18-25 Haziran, 2-3 Temmuz tarihlerinde toplam 13 gün olarak yapılmıştır. Gün doğuşunda deneYler başlamış,gün batışında ise deneYlere son verilmiştir. Gün batımından sonra deşarj süresi 160 dakika boyunca devam etmiştir.DeneYler Isparta/Keçiborlu'da yapılmış olup, güneş pili tam güneye ve 37° eğime (Isparta için enlem açısı) yerleştirilmiştir.

Deşarj işlemi için 10 Watt'lık AC yük kullanılmıştır.Gün doğuşunda akümülatör şarj edilmeye başlamadan önce gerilimi ölçülmüş, gün batımından sonra akümülatör gerilimi tekrar ölçülerek kaydedilmiştir.Deşarj işlemine başladıktan sonra, akümülatör gerilimi ilk değerine gelinceye kadar deşarj edilmiştir. Bu işlemlerle akümülatörde ne kadar enerji depolandığı ve yük tarafından ne kadarının kullanıldığı belirlenmiştir. Böylece akümülatör verimi ve kayıpları hesaplanmıştır. Deşarj süresi boyunca DC gerilim ve akımlar bilgisayar yardımıyla AC gerilim ve akımlar ise ölçü aletleriyle ölçülüp kaydedilmiştir

## 5. DENEY SONUÇLARI

Yapılan deneylerde gün doğuş ile gün batışı arasında güneş pilinden elde edilen enerji akümülatörde depo edilmiş ve gün batımından sonra bir yük vasıtasıyla akümülatördeki enerji deşarj edilmiştir. Ölçümler bilgisayar yardımıyla birer dakika ara ile alınmıştır. Ölçülen büyüklükler yardımıyla güneş pili verimi şarj regülatörü verimi, akümülatör verimi ve invertör verimi hesaplanmıştır (şekil 5.1.).



Şekil 5.1. Hesaplanan Verimlerin Şematik Gösterimi

Deneylerden elde edilen sonuçlar için burada sadece tipik bir günde ki (15 Haziran 2001) değerler verilmiştir.

Şekil 5.2.'de gelen güneş ışınımı ve pilden alınan güç görülmektedir. Gün doğuş ve batış saatlerinden gelen güneş ışınımı düşük değerlerde olduğundan pilden alınan güçte düşük olmakta, saat 10.00 ile 16.00 saatleri arasında artan güneş ışınımına paralel olarak pilden alınan güç de artmaktadır. Şekil 5.3. güneş pili verimi gösterilmiştir. Güneş pili verimi ( $\eta_p$ );

$$\eta_p = \frac{\text{Güneş pilinde ölçülen güç (W)}}{0.072 \text{ m}^2 \text{ ye gelen güneş ışınımı (W)}} \times 100 \quad (5.1.)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Güneş ışınımının küçük olduğu gün doğuş ve batış saatlerinde güneş ışınımı ile pilden alınan akım ve gerilim değerleri biraz hatalı okunmaktadır. Ölçüm hatalarından dolayı gün doğuş ve batış saatlerinde pil verimi normalden yüksek çıkmaktadır. Ortalama pil verimi %12 mertebesindedir.



Şekil 5.4.'de pil ve şarj reguletöründen alınan güç ve bunlar arasındaki kayıp görülmektedir. Şarj regülatörünün üzerinde, özellikle öğle saatlerinde ısı kaybı fazla olmasından dolayı, bir miktar enerji ısı enerjisi olarak açığa çıkmaktadır. Kayıplar öğle saatlerinde %10-15, doğuş ve batış saatlerinde %3-4 dolaylarındadır.

Şekil 5.5.'de şarj regülatörü verimi görülmektedir. Şarj regülatörü verimi ( $\eta_{sr}$ ) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\eta_{sr} = \frac{\text{Şarj regülatöründe ölçülen güç (W)}}{\text{Pilden alınan güç (W)}} \times 100 \quad (5.2.)$$

özellikle gün doğuş ve batışı sırasında gelen güneş ışınımına bağlı olarak pilden alınan gücün düşük olmasından dolayı kayıplar azalmakta ve verim çok yüksek çıkmaktadır. Işınımın büyük olduğu öğle saatlerinde kayıplar arttığından şarj regülatörü verimi düşmektedir. Ortalama şarj regülatörü verimi %91 civarındadır.

Şekil 5.6.'da şarj verimi görülmektedir. Şarj verimi ( $\eta_s$ );

$$\eta_s = \frac{\text{Şarj regülatöründe ölçülen güç (W)}}{0.072 \text{ m}^2 \text{ 'ye gelen güneş ışınımı (W)}} \times 100 \quad (5.3.)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu hem güneş pili verimini, hem de şarj regülatörü verimini kapsamaktadır. Özellikle gün doğuş ve batışı sırasında ölçülen değerlerin çok küçük olmasından dolayı ölçüm hataları oluşmakta ve bu da verimi etkilemektedir. Ortalama şarj verimi %11 'dir.

Şekil 5.7'de akümülatörde depolanan enerjinin zamanla değişimi ve pilden alınan enerjinin tamamının akümülatörde depolanması durumundaki (ideal durum) değişim görülmektedir. Gün doğuş ve batış saatlerinde akümülatöre gönderilen enerji yaklaşık sabit kalmakta, özellikle saat 10.00 ile 16.00 saatleri arasında pile gelen güneş ışınımının fazla olmasından dolayı, akümülatöre gönderilen enerji artmaktadır. Şarj regülatörü üzerindeki kayıplardan dolayı pilden alınan enerjinin tamamı akümülatöre gönderilmektedir. Enerjinin % 10-12 gibi bir kısmı şarj regülatörü üzerinde ısı enerjisi olarak kaybolmaktadır.

Şekil 5.8’de ise akümülatörden çekilen enerji görülmektedir. Akümülatörden çekilen toplam enerji, akümülatörde depolanan toplam enerjiden azdır. Akümülatörün şarj ve deşarj olması sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlardan dolayı kayıplar oluşmaktadır. Bundan dolayı akümülatör veriminin tanımlanması gerekir. Akümülatör verimi ( $\eta_a$ );

$$\eta_a = \frac{\text{Akümülatörde ölçülen enerji (Wh)}}{\text{Akümülatöre gönderilen enerji (Wh)}} \times 100 \quad (5.4.)$$

olarak tanımlanmıştır. Bir gün boyunca akümülatöre 28.5 Wh enerji gönderilmiş (Şekil 5.7), deşarj sırasında ise ancak 18.5 Wh enerji alınmıştır (Şekil 5.8). Buradan akümülatörün ortalama %67 verimle çalıştığı görülmüştür.

Şekil 5.9 ve 5.10’ da sırasıyla akümülatör karakteristiği ve invertör karakteristiği verilmiştir. deşarj sırasında akümülatörün gerilim ve akımındaki azalmalara paralel olarak invertörün çıkış gerilimi ve akımı da azalmaktadır.

Şekil 5.11’ de invertör verimi görülmektedir. İnvirtörün çalışması sırasında içerisinde kayıplar oluşmaktadır. İnvirtör verimi ( $\eta_i$ ):

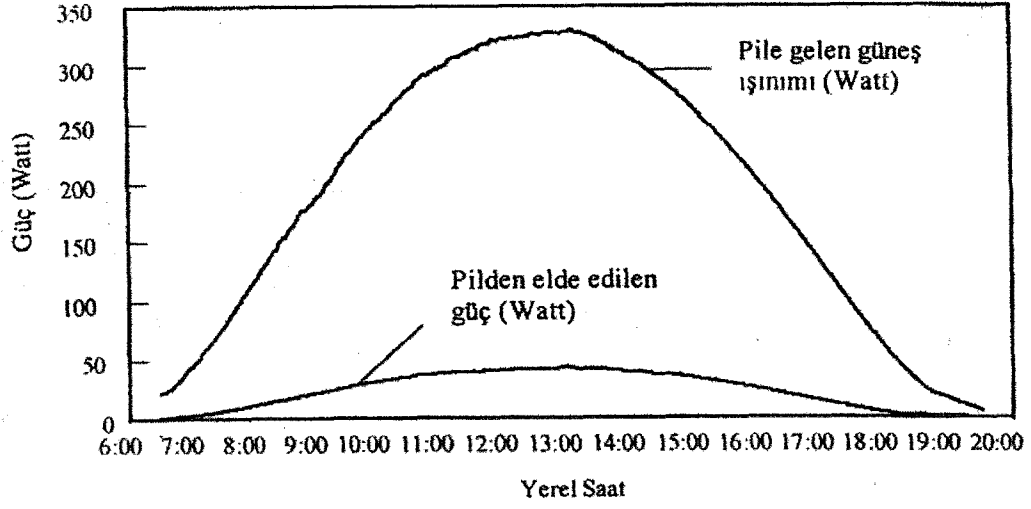
$$\eta_i = \frac{\text{İnvirtör gücü (W)}}{\text{Akümülatör gücü (W)}} \times 100 \quad (5.5.)$$

olarak tanımlanmıştır. Ortalama invertör verimi, içerisindeki kayıplardan dolayı % 80 mertebesinde dir.

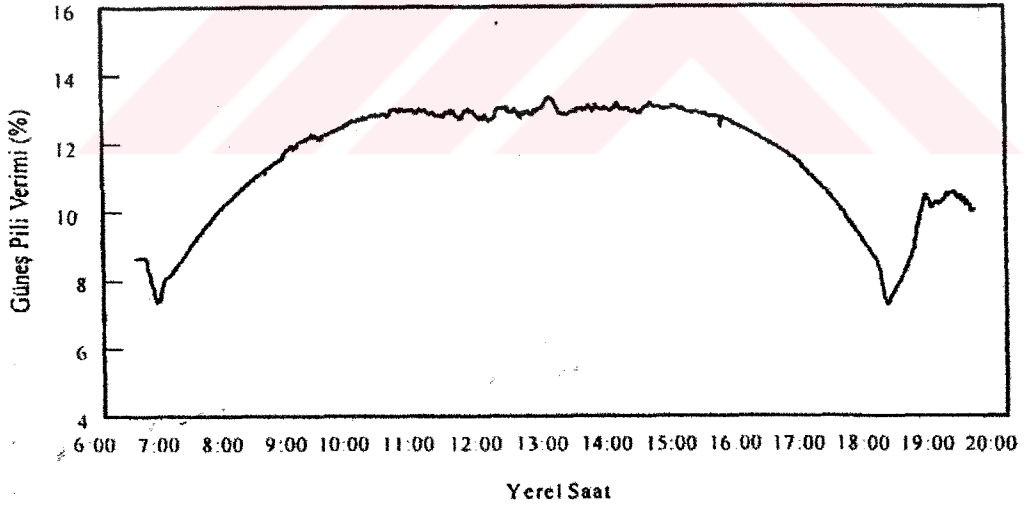
Toplam sistem verimi ( $\eta_t$ );

$$\eta_t = \eta_x \times \eta_a \times \eta_i \quad (5.6.)$$

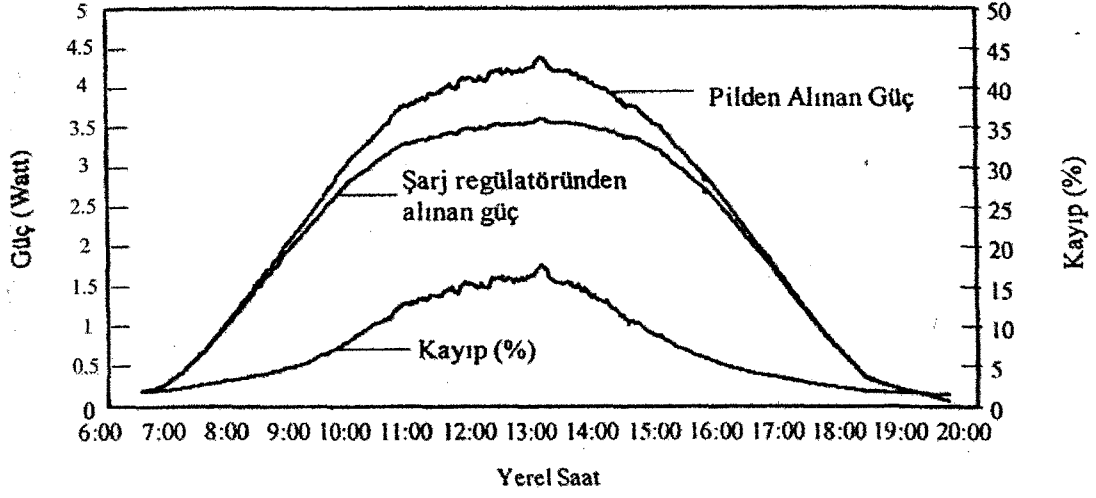
olarak tanımlanmıştır. Ortalama toplan sistem verimi yaklaşık %6’ dır.



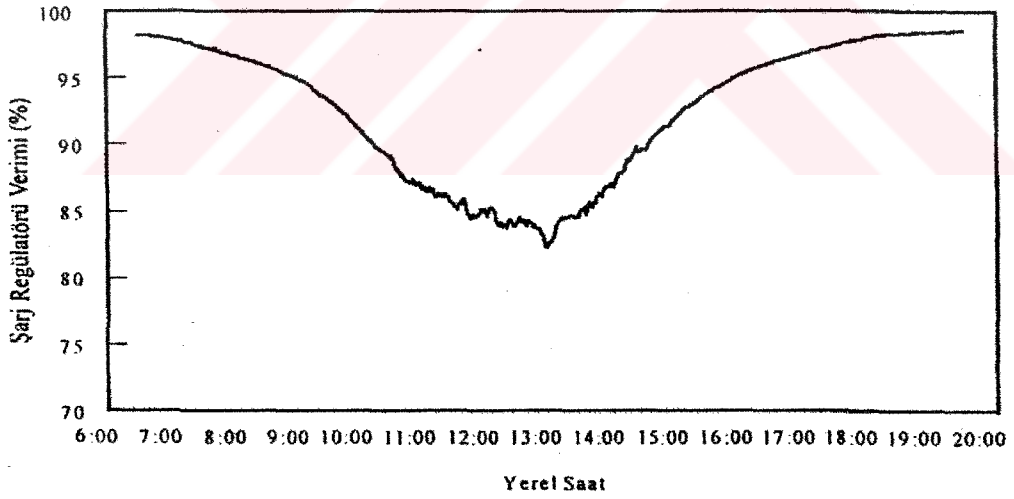
Şekil 5.2. Gelen Güneş Işınımı ve Pil Gücü



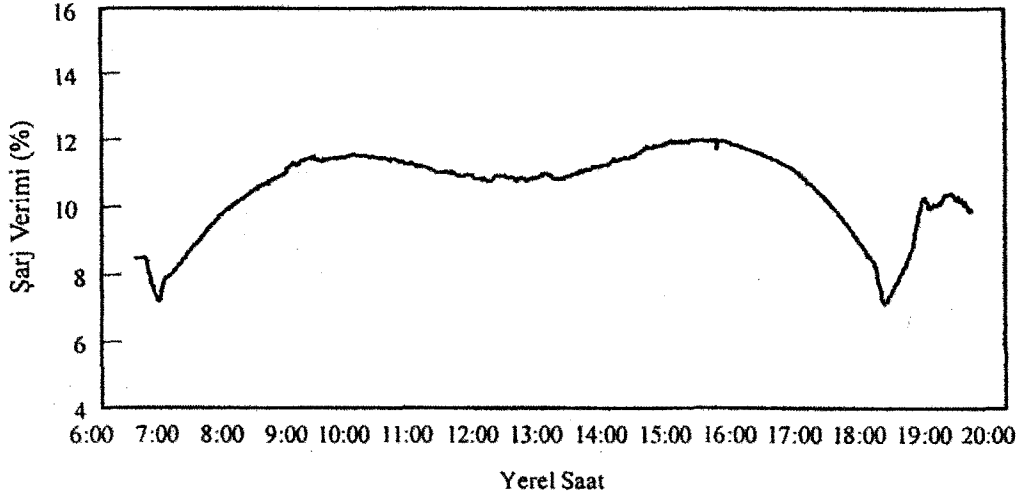
Şekil 5.3. Güneş Pili Verimi



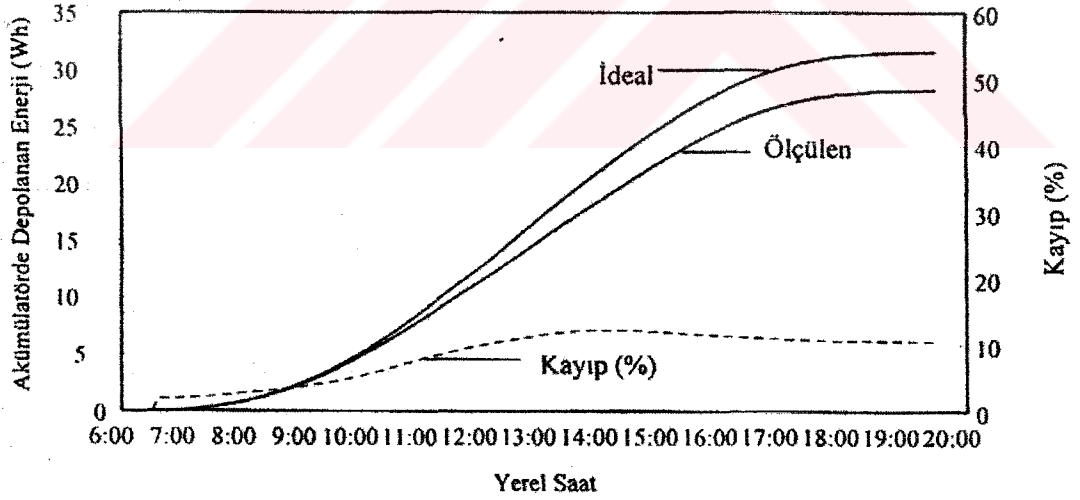
Şekil 5.4. Pil ve Şarj Regülatöründen Alınan Güç ve Kayıp



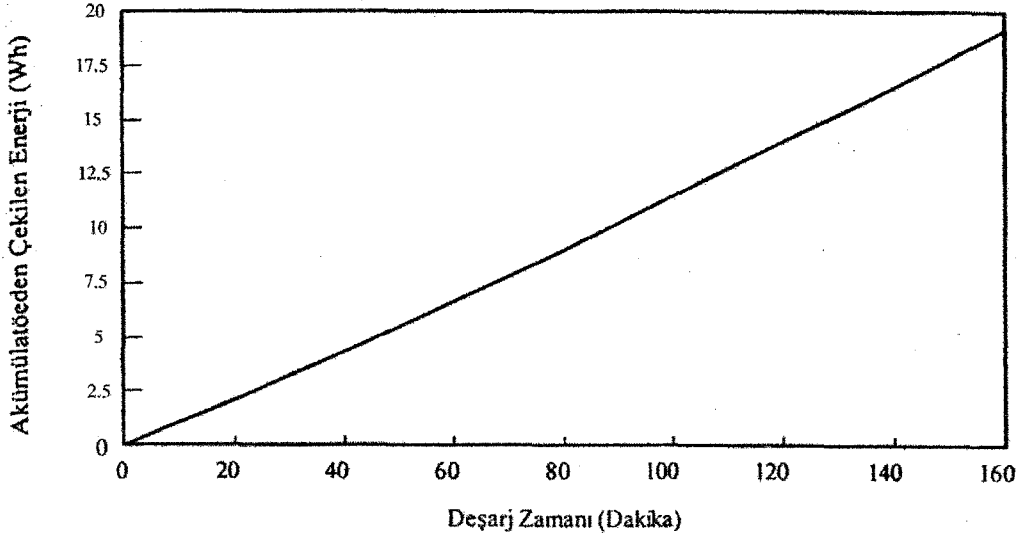
Şekil 5.5. Şarj Regülatörü Verimi



Şekil 5.6 Şarj Verimi

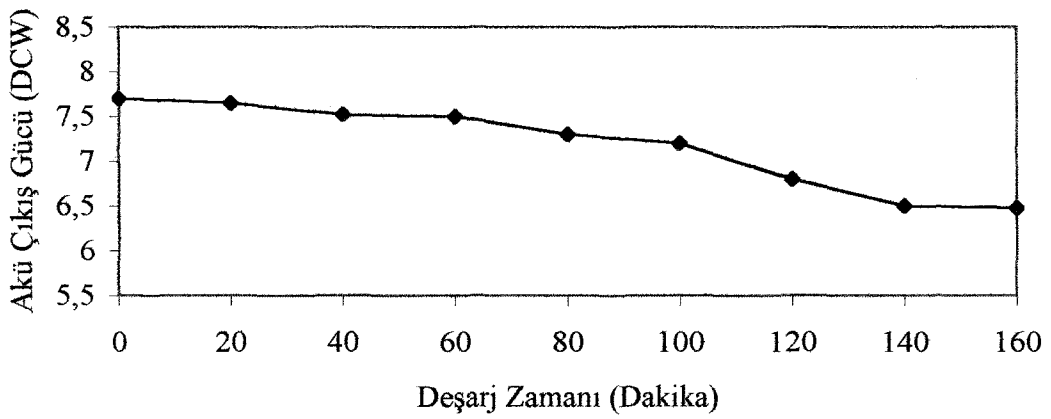
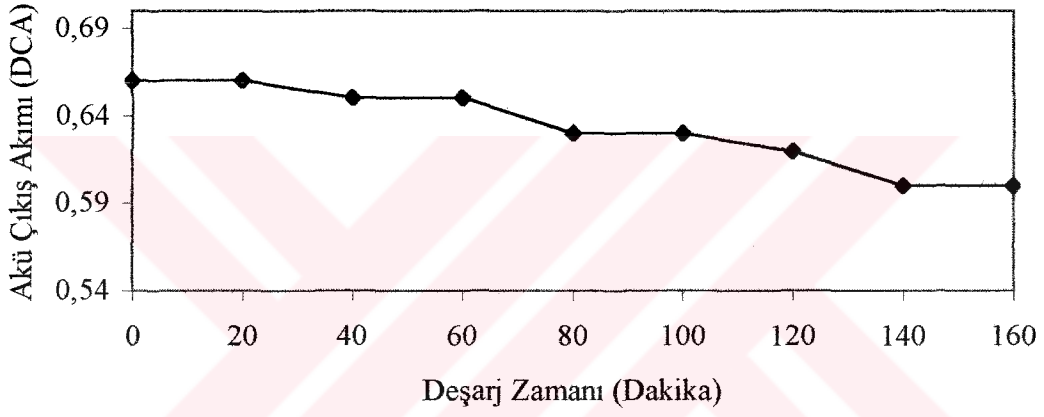
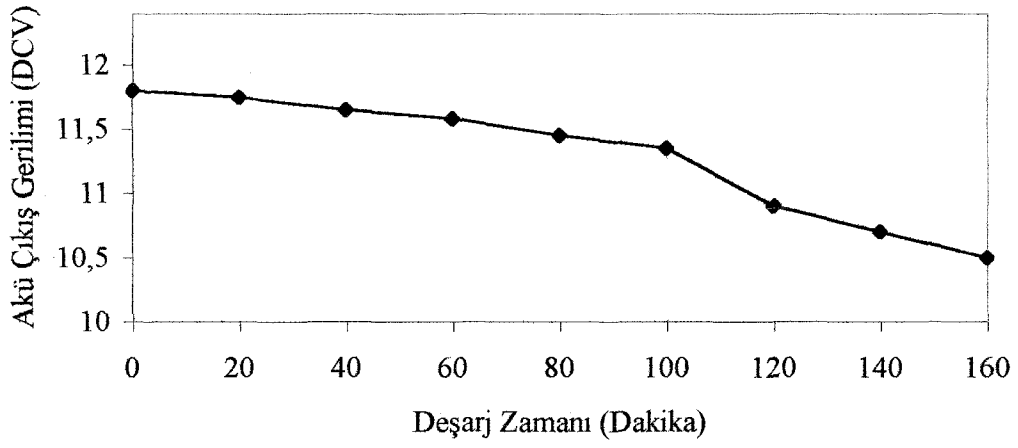


Şekil 5.7 Akümülatörde Depolanan Enerji

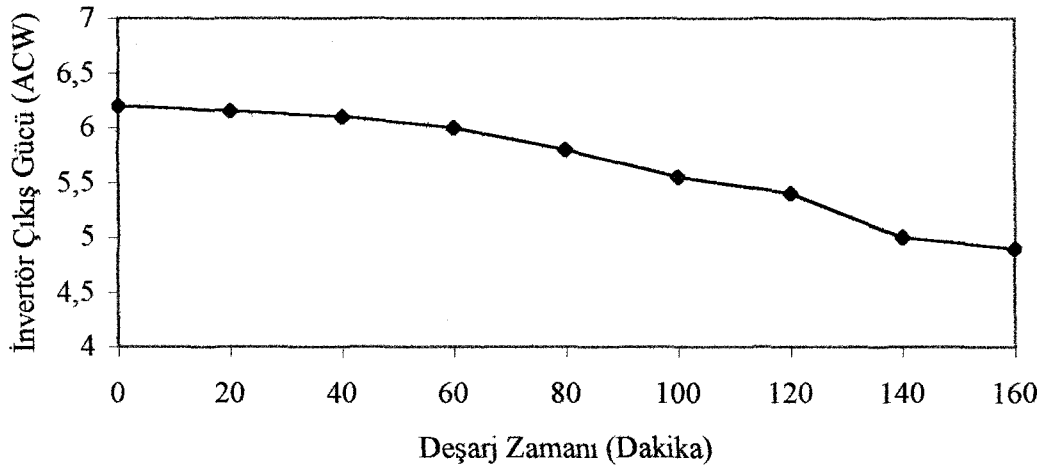
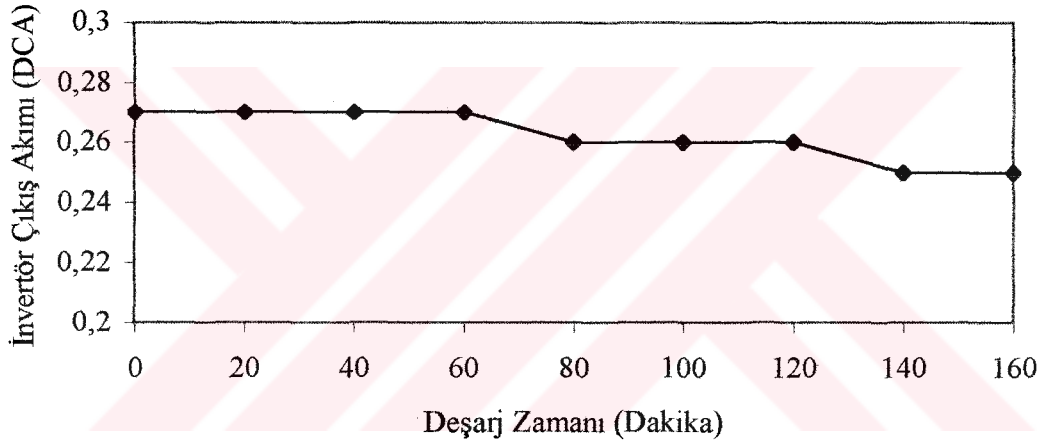
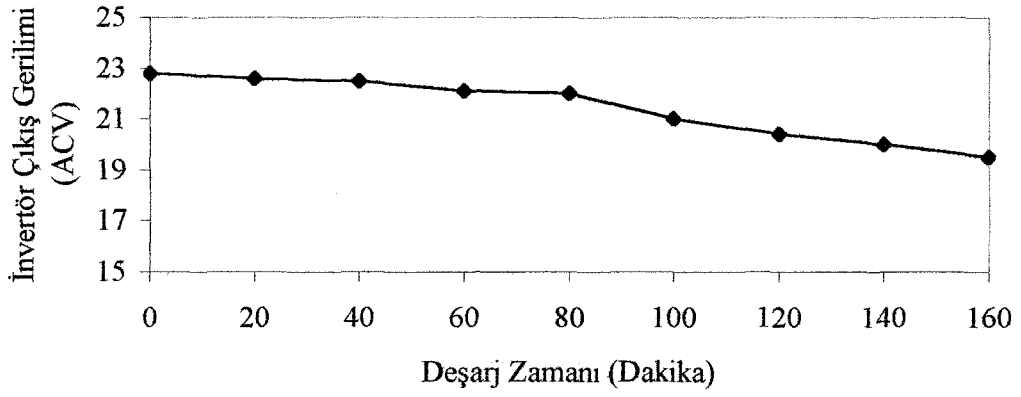


Şekil 5.8 Akümülatörden çekilen Enerji



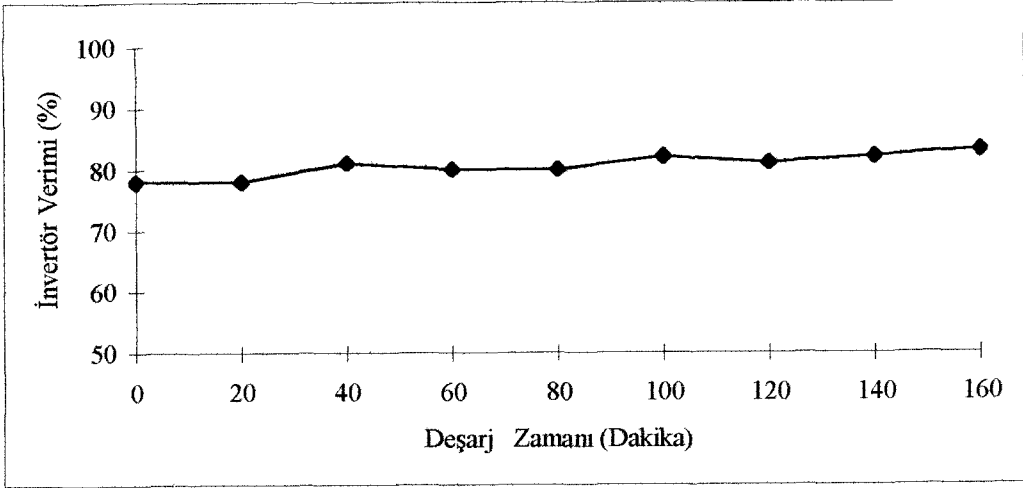


Şekil 5.9 Akümülatör Karakteristikleri



Şekil 5.10 İnvertör Karakteristikleri





Şekil 5.11 İnvertör Verimi



## 6. DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

Yukarıda verilen tipik günlere ait deney sonuçları diğer günler için de benzer şekildedir. Verim analizi için güneş pili verimi, şarj regülatörü verimi, bu ikisine bağlı olarak şarj verimi, akümülatör verimi, invertör verimi ve toplam sistem verimi tüm deney sonuçları kullanılarak hesaplanmıştır.

Deneylerden elde edilen pil verimi sonuçları birbirine yakın çıkmaktadır. Ortalama pil veriminin %12 olduğu görülmektedir. 0-200 W/m<sup>2</sup> değerleri arasında görülen yüksek pil verimi, küçük ışınım değerlerinde ampermetre ve voltmetrelerden okunan değerler çok küçük olduklarından ölçüm hataları büyük olmakta bu sebeple de pil verimi doğru olarak elde edilememektedir. Güneş pili teorik olarak 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım ve 25 °C'de %14.74 çalışırken, aynı ışınım ve 47 °C sıcaklıkta %13.13 verimle çalışmaktadır (Um-Solar, 2001). Şekil 4.1'de verilen pilin akım-gerilim karakteristiğinden de görülebileceği gibi, yüksek sıcaklıklarda pilin çıkış gücü düşeceğinden pilin verimi de azalacaktır.

Şarj regülatörü için deney sonuçlarından alınan ortalama verim yaklaşık %91'dir. Şarj regülatörü üzerinde ışınımın fazla olduğu saatlerde daha fazla enerji ısı enerjisine dönüşerek kaybolmaktadır. Pratik olarak kaybı sıfırlamak mümkün olmamakla beraber, daha iyi bir şarj regülatörü ile kayıplar azaltılabilir. Sistemde kullanılan şarj regülatörü yurt içinde imal edilmiştir. Yurt dışında başka firmalar tarafından imal edilen ve daha iyi bir verimle çalışan şarj regülatörü mevcuttur. Ancak bu firmaların imal ettiği şarj regülatörünün fiyatı bu çalışmada kullanılan regülatör fiyatının yaklaşık 1.5 katıdır.

Şarj verimi pili verimi ve şarj regülatörü veriminden oluşmaktadır. Bu şekilde de sonuçlar birbirine yakın çıkmaktadır. Ortalama şarj verimi %11 mertebesindedir. Işınım değeri arttıkça şarj verimi de artış göstermekte, ancak yaklaşık 800-850 W/m<sup>2</sup> ışınım değerinden sonra pil verimindeki düşmelerden ve şarj regülatöründeki kayıpların artmasından dolayı şarj verimi de azalmaktadır.

Şarj süresince akümülatöre gönderilen toplam enerjinin, deşarj süresince akümülatörden çekilen enerji ile karşılaştırılması sonucu elde edilen akümülatör

veriminin yaptığımız deneyler için yaklaşık %68 olduğu görülmüştür. Ancak üretici firmadan alınan bilgiler doğrultusunda, akümülatörün bozulmaması ve ömrünü tamamlanamaması durumlarında yaklaşık aynı verimle çalışacağı bildirilmiştir. (Hankins, 1991)'e göre, ortalama akümülatör verimi, akümülatör yaşına bağlı olarak %70 ile %90 arasında değişir.

İnvertör gücü 35 W olduğundan kullandığımız 5 W'lık yükler bu invertör için küçük kalmakta ve bu yükteki verim değerleri çizelge 6.1'de verilmiştir. Buradan da ortalama invertör veriminin %80 olduğu hesaplanmıştır. Fotovoltaik sistemler için özel olarak imal edilen invertörler mevcut olmakla birlikte, bunların fiyatı bu çalışmada kullanılan invertörün maliyetinin yaklaşık 4 katıdır.

Çizelge 6.1. Deneyler sonucu elde edilen invertör verimleri

Günler	İnvertör verimleri
29 Mart	77.20
3 Nisan	77.95
4 Nisan	76.40
8 Mayıs	80.01
24 Mayıs	78.35
30 Mayıs	78.58
15 Haziran	79.15
16 Haziran	76.90
17 Haziran	78.22
18 Haziran	81.15
25 Haziran	78.16
2 Temmuz	77.75
3 Temmuz	78.86

Deneyler sonucu elde edilen invertör verimleri birbiriyle uyum içerisindedir. Ortalama toplam sistem verimi %6 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç arzulan duruma uymaktadır.

Bundan sonraki bölümde deneyler sonucu elde edilen toplam sistem verimi (%6) dikkate alınarak bir elektrik kullanım tasarımı için fotovoltaik sistem analizi yapılacaktır. Bu sistemin hangi koşullarda ekonomik olacağı tartışılacaktır.

## 7. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI

### 7.1. Enerji Sarfiyatı ve Maliyet Analizi

Sistem tasarımı için Isparta şartlarında 4 kişilik bir aile düşünülmüştür. Bu ailenin tüm yıl boyunca aynı günlük programı uyguladığı varsayılmıştır. Bu ailenin bulunduğu eve gün boyunca yeterli miktarda ışık geldiği ve aydınlatmadan sadece gün batışından gün doğuşuna kadar sadece aydınlatmada faydalanacağı düşünülmüştür. Ailenin gece 23.00 ile sabah 06.00 saatleri arasında elektrik kullanmadığı varsayılmıştır. Buna göre aylara göre elektrik kullanım tasarımı hazırlanmıştır.

#### 7.1.1. Tasarım

Düşünülen tasarımda güneş pilinden sadece aydınlatma için yararlanılacağı düşünülmüş ve buna göre elektrik kullanım senaryosu hazırlanmıştır. Çizelge 7.1'de kurulu güç dökümü görülmektedir. Çizelge 7.2 ise saatlere göre tüketici güçleri ve kullanım senaryosu verilmiştir. Hesaplar Isparta şartlarına göre yapılmıştır.

Çizelge 7.1. Kurulu Güç Dökümü

Odalar	Aydınlatma	
Yatak Odası	2x40	Watt (Flourasant Ampul)
Oturma Odası	2x40	Watt (Flourasant Ampul)
Salon	2x40	Watt (Flourasant Ampul)
Banyo	40	Watt (Ampul)
WC	40	Watt (Ampul)
Mutfak	40	Watt (Ampul)
Toplam	360	Watt

Çizelge 7.2. Saatlere göre günlük tüketici güçleri

Saat	Faaliyet	Kullanılan Güç (Watt)
06.00-07.00	Yıkama, Giyinme (Odalar + Banyo + WC)	240 W
07.00-08.00	Kahvaltı (Mutfak)	40 W
08.00-17.00	Günlük Kullanım (Çeşitli Odalar)	360 W
17.00-19.00	Yemek (Mutfak + Salon)	120 W
19.00-22.00	Okuma , Oturma (Salon + Oturma Odası)	160 W
22.00-23.00	Yıkama, Yatma (Odalar + Banyo + WC)	240 W

Çizelge 7.3’de de elektrik kullanım senaryosu verilmiştir. Hangi saatlerde hangi tip aydınlatmanın ne kadar süre kullanılacağı bu çizelgede gösterilmiştir. Çizelgede verilen gece, gün batışı ve gün doğuşu arasında geçen süre, gündüz ise gün doğuşu ve gün batışı arasında geçen süre olarak tanımlanmıştır. “A”, geçen sürenin yarısı kadar bir zaman elektrik enerjisi kullanıldığını göstermektedir ve gece için düşünülmüştür. “B” ise, elektrik enerjisinin 1 saatte 15 dakika kullanıldığını göstermektedir ve gündüz için düşünülmüştür.

Çizelge 7.3. Elektrik Kullanım Senaryosu

Saat	Güç (Watt)	Gece	Gündüz
06.00-07.00	240	A	B
07.00-08.00	40	-	B
08.00-17.00	360	A	B
17.00-19.00	120	A	B
19.00-22.00	160	A	B
22.00-23.00	240	A	-

Çizelge 7.4’de aylara göre elektrik enerjisi kullanımı görülmektedir. Çizelge 7.3’deki elektrik kullanım senaryosuna göre aylık her gün için kullanılacak toplam elektrik enerjisi belirlenmiştir. Gün doğuş ve batış saatleri aylık ortalama olarak alınmıştır. Örneğin Isparta’da Ocak 1’de gün doğuşu 07.07, gün batışı 16.56’dur. Ocak 31’de ise gün doğuşu 06.57, gün batışı 17.26’dır. Ocak ayı için gün doğuşu 07.01, gün batışı 17.14 alınmıştır. Çizelge 7.4’de verilen 0.41, 0.25,0.5 katsayıları, “A-B” durumları

ve geçen süreler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Örneğin Ocak ayında 06.00-07.00 saatleri arasında yaklaşık 50 dakika gece, 10 dakika gündüzdür. "A" ve "B" durumları göz önüne alındığında gece geçen 40 dakikanın 20 dakikasında enerji harcandığı gündüz geçen 20 dakikanın ise 5 dakikasında enerji harcandığı düşünülmüştür. Toplam 25 dakika  $240 \text{ Watt} \times 0.5 \times 2 \text{ saat} = 120 \text{ W}'ı$  gece sarfiyatı bulunmuş olur. Buna göre 1 yıl için tüm aylardaki günlük toplam harcamalar elektrik kullanım senaryosuna göre hesaplanmış ve Çizelge 7.5'de verilmiştir. Bu çizelgeden de gözlenebileceği gibi, sadece aydınlatma amacıyla gerekli olan enerji aylara göre değişim göstermekle birlikte, en küçük 1368 Wh, en büyük 1501 Wh olan enerji ihtiyacının değişim miktarı %10 civarındadır.

Çizelge 7.4. Aylara göre günlük elektrik enerjisi kullanımı

Ay: Ocak		Gün Doğuş: 07.01					Gün Batış: 17.14	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.41						98	79
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.5			120	120
160 W					0.5		320	320
240 W						0.5	120	120
							1478	639

Ay: Şubat		Gün Doğuş: 06.40					Gün Batış: 17.44	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.32						77	38
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.44			106	106
160 W					0.5		320	320
240 W						0.5	120	120
							1443	584

Çizelge 7.4. Aylara göre günlük elektrik enerjisi kullanımı (Devam)

Ay: Mart		Gün Doğuş: 06.01					Gün Batış: 18.14	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.42			100	80
160 W					0.5		320	320
240 W						0.5	120	120
							1420	520

Ay: Nisan		Gün Doğuş: 05.19					Gün Batış: 18.41	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.33			91	60
160 W					0.48		307	307
240 W						0.5	120	120
							1398	487

Ay: Mayıs		Gün Doğuş: 04.46					Gün Batış: 19.07	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.33			80	40
160 W					0.45		288	256
240 W						0.5	120	120
							1368	416

Ay: Haziran		Gün Doğuş: 04.33					Gün Batış: 19.25	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.33			80	40
160 W					0.45		288	256
240 W						0.5	120	120
							1368	416

Çizelge 7.4. Aylara göre günlük elektrik enerjisi kullanımı (Devam)

Ay: Temmuz		Gün Doğuş: 04.46					Gün Batış: 19.22	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.33			80	60
160 W					0.45		288	288
240 W						0.5	120	120
							1368	416

Ay: Ağustos		Gün Doğuş: 05.10					Gün Batış: 18.55	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.38			91	60
160 W					0.47		300	288
240 W						0.5	120	120
							1391	468

Ay: Eylül		Gün Doğuş: 05.34					Gün Batış: 18.14	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.42			100	80
160 W					0.5		320	320
240 W						0.5	120	120
							1420	520

Ay: Ekim		Gün Doğuş: 06.01					Gün Batış: 17.30	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.48			115	120
160 W					0.5		320	320
240 W						0.5	120	120
							1435	560



Çizelge 7.4. Aylara göre günlük elektrik enerjisi kullanımı (Devam)

Ay: Kasım		Gün Doğuş: 06.31					Gün Batış: 17.00	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.25						60	
40 W		0.25					10	
360 W			0.25				810	
120 W				0.5			120	120
160 W					0.5		320	320
240 W						0.5	120	120
							1440	560

Ay: Aralık		Gün Doğuş: 07.06					Gün Batış: 17.04	
Güç	06-07	07-08	08-17	17-19	19-22	22-23	Toplam (Wh)	Gece (Wh)
240 W	0.37						89	60
40 W		0.25					10	
360 W			0.26				842	87
120 W				0.5			120	120
160 W					0.5		320	320
240 W						0.5	120	120
							1501	707

Çizelge 7.5. Yıllık aylara göre günlük enerji tüketimi

AY	GECE (Wh)	TOPLAM(Wh)
OCAK	639	1478
ŞUBAT	584	1443
MART	520	1420
NİSAN	487	1398
MAYIS	416	1368
HAZİRAN	416	1368
TEMMUZ	416	1368
AĞUSTOS	468	1391
EYLÜL	520	1420
EKİM	555	1435
KASIM	560	1440
ARALIK	707	1501

### 7.1.2. İlk Yatırım Maliyeti

Bu bölümde yukarıda verilen elektrik kullanım senaryosuna göre ihtiyaç duyulan elektrik enerjisini karşılamak için gerekli olan modül alanı ve toplam sistem maliyeti, deneyler sonucu elde edilen ortalama %6'lık sistem verimi dikkate alınarak hesaplanacaktır.

Yıl boyunca deneyler yapılmadığından, yılın diğer zamanlarındaki güneş ışınımı değerleri Ek 1'de verilen Isparta için güneş ışınımı değerlerinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Yaz ve kış aylarında eğik düzleme gelen güneş ışınımı eğim açısına göre değiştiğinden Isparta için pilin (enlem-5° = 32°) ile (enlem + 5° = 42°) ve enlem açısında (37°) gelen toplam güneş ışınımı çizelge 7.6' da verilmiştir. Buna göre pilin Mart-Eylül ayları arasında 32° eğime, Ekim-Şubat ayları arasında 41° eğime konulması ile güneş piline daha fazla ışınım gelecektir.

Çizelge 7.6. Değişik eğimlere gelen günlük toplam güneş ışınımı miktarları

Aylar	Ortalama Gün Uzunluğu (Saat)	Günlük Toplam Işınım (Wh/m <sup>2</sup> ) 32°	Günlük Toplam Işınım (Wh/m <sup>2</sup> ) 37°	Günlük Toplam Işınım (Wh/m <sup>2</sup> ) 42°
OCAK	9.61	3900.75	3987.11	4048.76
ŞUBAT	10.60	5089.52	5150.91	5180.18
MART	11.69	6101.73	6082.43	6025.92
NİSAN	12.53	6899.36	6762.81	6585.90
MAYIS	12.76	7643.64	7381.71	7076.36
HAZİRAN	12.83	7701.97	7382.86	7021.99
TEMMUZ	12.90	7445.34	7164.19	6842.32
AĞUSTOS	12.65	7271.86	7087.24	6860.32
EYLÜL	12.01	6708.36	6661.38	6571.79
EKİM	11.08	5878.83	5945.94	5945.87
KASIM	9.94	4562.52	4660.40	4728.65
ARALIK	9.28	3777.54	3871.81	3941.21

Çizelge 7.7'de gerekli modül alanı, gelen toplam ışınım ve tasarlanan senaryoya göre ihtiyaç duyulan toplam enerji miktarına göre hesaplanmıştır. Teorik toplam ışınım değerleri çizelge 7.6' dan alınmıştır. Hesaplamalarda sistem veriminin tüm yıl boyunca sabit ve % 6 olduğu kabul edilmiştir. Her ay için 1 günde 1m<sup>2</sup> 'lik pilden alınabilecek toplam enerji (Wh) hesaplanmış ve çizelge 7.7' de gösterilmiştir. Çizelge 7.8'de ise ilk yatırım maliyeti Uni-Solar (2001), Siemens (1996), Volta

(1995) ve Mutlu (2000)' den alınan veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Standart bir pil modülünün yüzey alanının  $0.36 \text{ m}^2$  olduğu dikkate alınarak, her ay için gerekli modül sayısı hesaplanmıştır. Ayrıca modül sayısı kadar sehpa gerekeceği düşünülmüştür. Toplam akümülatör kapasitesini hesaplamak için çizelge 7.5' de verilen toplam gece yükü miktarları kullanılmıştır. Üst üste üç gün boyunca havanın kapalı geçip akümülatörün yeterli miktarda şarj olmayacağı düşünülürse, akümülatör kapasitesinin üç katı alınmasında fayda vardır. Örneğin tasarladığımız senaryoya göre Ocak ayında gece yükü toplam 639 Wh (çizelge 7.5) olarak elde edilmiştir. Bu durumda 1917 Wh kapasiteye sahip akümülatör gerekecektir. Bir akümülatörün ortalama 12 V gerilimle çalışacağı dikkate alınır, 159.75 Ah' lik akümülatör kapasitesi elde edilir. Bu kapasiteye en yakın standartlardaki akümülatör 12 V, 200 Ah' lik akümülatördür.

İlk yatırım maliyeti tasarlanan senaryo da iki tip akümülatör için yapılmıştır. Kuru tip akümülatörler Türkiye'de imal edilmeyip, yurt dışından satın alınmaktadır. Bu tip akümülatörlerin özelliklerinden birisi de bakım gerektirmemesidir. Sulu tip akümülatörler ise yurt içinde imal edilmektedir. Bu tip akümülatörlere ayda bir bakım yapılması gerekmektedir. Kuru tip akümülatör maliyeti, sulu tip akümülatör maliyetinin yaklaşık 2.4 katıdır.

Çizelge 7.8' de görülebileceği gibi, ilk yatırım maliyeti aylara göre değişim göstermektedir. En büyük değerine Aralık ayında, en küçük değerine ise Mayıs-Haziran aylarında almaktadır. Aralık ayında gün uzunluğu ve gelen güneş ışınımı miktarı azdır. Bundan dolayı daha fazla pil alanına ihtiyaç duyulduğundan bu esas alınarak yapılan ilk yatırım maliyeti de fazla olmaktadır. Mayıs-Haziran aylarında ise gün uzunluğu gelen güneş ışınımı miktarı artmaktadır. Bundan dolayı pil alanı ile ilk yatırım maliyeti düşmektedir.

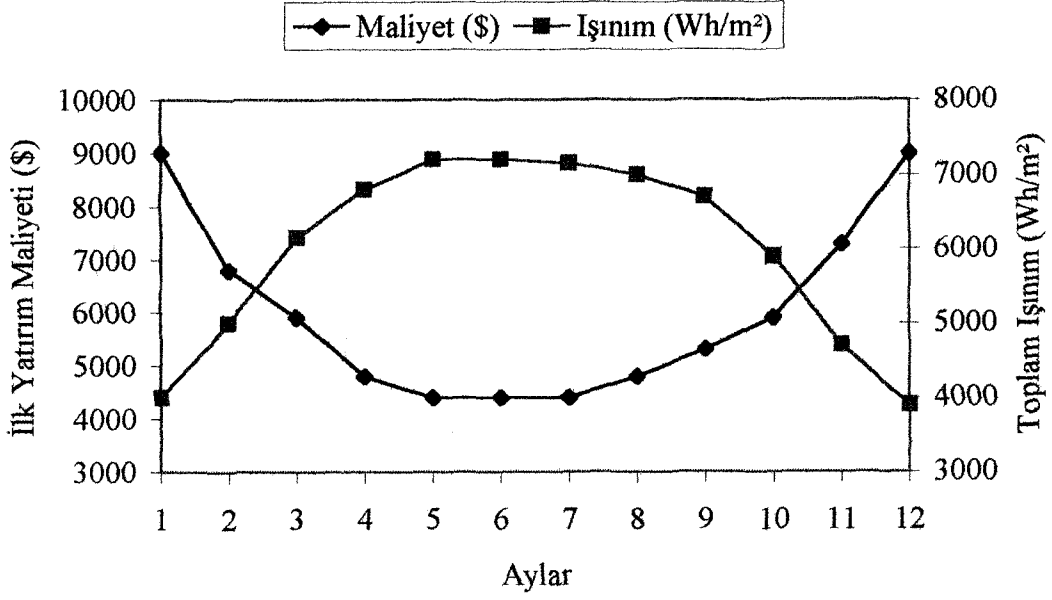
Çizelge 7.7. Tasarlanan senaryo için gerekli modül alanı

AYLAR	Günlük Toplam Işınım (Wh/m <sup>2</sup> )	Modül Eğim Açısı (°)	Gerekli Toplam Enerji (Wh)	1m <sup>2</sup> Pil Kullanılan Sistemden Elde Edilecek Toplam Enerji (Wh)	Gerekli Modül Alanı (m <sup>2</sup> )
OCAK	4048.76	42	1478	242.92	6.08
ŞUBAT	5180.18	42	1443	310.81	4.64
MART	6101.73	32	1420	366.10	3.87
NİSAN	6899.36	32	1398	413.96	3.37
MAYIS	7643.64	32	1368	458.61	2.98
HAZİRAN	7701.97	32	1368	462.11	2.96
TEMMUZ	7445.34	32	1368	446.72	3.06
AĞUSTOS	7271.86	32	1391	436.31	3.18
EYLÜL	6708.36	32	1420	402.50	3.52
EKİM	5945.87	42	1435	356.75	4.02
KASIM	4728.65	42	1440	283.71	5.07
ARALIK	3941.21	42	1501	236.47	6.34

Çizelge 7.8. İlk yatırım maliyeti

Aylar	Modül ve Sehpa sayısı (Adet)	Modül Fiyatı (\$/Adet)	Sehpa Fiyatı (\$/Adet)	Akü Tipi 12V	Kuru Akü (\$/Adet)	Sulu Akü (\$/Adet)	Şarj Devresi (\$)	İnventör (0.3 KW) (\$)	İşçilik (\$)	Toplam Maliyet	
										Kuru Akü	Sulu Akü
OCAK	17	440	15	200Ah	1044	450	50	200	50	9079	8485
ŞUBAT	13	440	15	200Ah	1044	450	50	200	50	7259	6665
MART	11	440	15	200Ah	1044	450	50	200	50	6349	5755
NİSAN	9	440	15	110Ah	688	283	50	200	50	5083	4678
MAYIS	8	440	15	110Ah	688	283	50	200	50	4628	4223
HAZİRAN	8	440	15	110Ah	688	283	50	200	50	4628	4223
TEMMUZ	8	440	15	110Ah	688	283	50	200	50	4628	4223
AĞUSTOS	9	440	15	110Ah	688	283	50	200	50	5083	4678
EYLÜL	10	440	15	110Ah	688	283	50	200	50	5538	5133
EKİM	11	440	15	200Ah	1044	450	50	200	50	6349	5755
KASIM	14	440	15	200Ah	1044	450	50	200	50	7714	7120
ARALIK	18	440	15	200Ah	1044	450	50	200	50	9534	8940

Şekil 7.1'de tasarlanan senaryo için günlük toplam güneş ışınımı ve ilk yatırım maliyetinin aylara göre değişimi verilmiştir. İlk yatırım maliyeti ışınımın az olduğu sonbahar ve kış aylarında daha fazla pil alanına ihtiyaç duyulduğundan fazla olmaktadır. İlkbahar ve yaz aylarında ışınım arttığından, gerekli pil alanı düşmekte ve maliyette az olmaktadır. Elde edilen ilk yatırım maliyetleri incelendiğinde yaz ayında 4223 \$, kış ayında ise 8949 \$ ilk yatırım maliyete elde edilmiştir.



Şekil 7.1. Tasarlanan senaryo için ilk yatırım maliyeti ve güneş ışınımının aylara göre değişimi

Buradan da ilk yatırım maliyetinin yaz ve kış ayları için yaklaşık yarı yarıya fark ettiği görülmektedir. Yaz ayları esas alınarak güneş pili sistemi tasarlanırsa, kışın gerekli olan enerji ihtiyacının tamamını güneş pili sistemi karşılayamayacağından, ek bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulacaktır.

## 7.2. Şehir Elektrik Kullanılması ve Enerji Maliyeti

Tasarlanan senaryoya göre evin elektrik ihtiyacının şehir şebekesinden karşılanması durumunda toplam yıllık elektrik enerjisi gereksinimi ve bunun maliyeti çizelge 7.9'da verilmiştir. Elektrikğin 1 kWh'nın 0.0833 \$ olduğu göz önüne alınmıştır (TEDAŞ 2001). Çizelge 7.9'da görüleceği gibi şehir elektrikli kullanılması durumunda ödenecek yıllık toplam tutar, güneş pili sisteminin ilk yatırım maliyeti yanında çok küçük kalmaktadır. Buradan da güneş pili sisteminin şehir şebekesinin bulunduğu yerleşim birimlerinde kullanılması ekonomik olmayacağı açıkça görülmektedir.

Sonraki bölümde ise elektrik hattı bulunmayan noktalar için uzak hat çekimi ilk yatırım maliyeti analizi yapılmış ve bulunan sonuçlar güneş pili sisteminin ilk yatırım maliyeti ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.9. Tasarlanan senaryo için elektrik maliyeti

Aylar	Günlük Toplam Harcama (Wh)	Gün Sayısı	Aylık Toplam Elektrik Enerjisi Gereksinimi (kWh)	Yıllık Toplam Elektrik Enerjisi Gereksinimi (kWh)	Yıllık Toplam Elektrik Enerjisi Tutarı (\$)
Ocak	1478	31	45.82	519.45	43.28
Şubat	1443	29	41.85		
Mart	1420	31	44.02		
Nisan	1398	30	41.94		
Mayıs	1368	31	42.41		
Haziran	1368	30	41.04		
Temmuz	1368	31	42.41		
Ağustos	1391	31	43.13		
Eylül	1420	30	42.60		
Ekim	1435	31	44.49		
Kasım	1440	30	43.20		
Aralık	1501	31	46.54		

### 7.3. Uzak Hat Çekimi ve Enerji Maliyeti

Günümüzde yerleşim birimlerinden uzakta, dağ ve tepelerde bulunan televizyon, radyo gibi verici istasyonlarında, meteoroloji istasyonlarında köy ve mezra elektrifikasyonunda elektrik kullanımı için uzak hat çekilmesi gerekir. Bu bölümde uzak hat çekilmesi durumunda güneş pili sisteminin ekonomikliği tartışılmıştır.

Hattın tek fazlı 220 V, 50 Hz olacak şekilde çekileceği düşünülmüştür. Hattın uzunluğuna bağlı olarak iletkenler üzerinde gerilim düşümü olacaktır. Bu gerilim düşümü (TEDAŞ 2001) tarafından verilen,

$$\text{Gerilim Düşümü} = 0.074 \times \frac{\text{Güç (kW)} \times \text{Mesafe (m)}}{\text{Kesit (mm}^2\text{)}} \quad (7.1)$$

Eşitliği ile hesaplanabilir. Gerilim düşümünün üçten küçük olması gerekmektedir. Hatta alüminyum iletken kullanılacağı ve 50 metre ara ile direk dikileceği düşünülmüştür. Hattın başındaki ve sonundaki direkler özel direk olup (Direk 2), aralardaki direkler ise normal tip direklerdir (Direk 1). Her direkte iletkenlere bağlamak için iki adet izolatör ve demiri ile hat için bir adet topraklama levhası düşünülmüştür. Kullanılan malzemeler ile ilgili birim fiyatlar çizelge 7.10'da verilmiştir (TEDAŞ, 2001).

Çizelge 7.10 Kullanılan malzemelerle ilgili birim fiyat listesi

Direkler (adet)	Maliyet (\$)
Demir Direk 1	124.97
Demir Direk 2	222.18
Beton Direk 1	132.21
Beton Direk 2	338.01
Alüminyum İletkenler (metre)	
50 mm <sup>2</sup> Plox	1.02
70 mm <sup>2</sup> Oxlip	1.29
95 mm <sup>2</sup> Peony	1.81
120 mm <sup>2</sup> Canna	2.41
İzolatör ve Demiri (adet)	2.61
Topraklama Levhası (adet)	49.97
Gerilim Yükseltici – Düşürücü Transformator, 10 KW (adet)	1000
Gerilim Yükseltici – Düşürücü Transformator, 12 KW (adet)	1200

(7.1) eşitliği dikkate alındığında elektrik hattı yaklaşık 2 km ve 2000 W'a kadar transformator kullanılmaksızın çekilebilmektedir (TEDAŞ, 2001). Bununla ilgili hat maliyeti çizelge 7.11'de verilmiştir. Daha büyük güç ve daha uzak mesafeler için gerilim yükseltici ve gerilim düşürücü transformatorler kullanılması gerekir. Bununla ilgili maliyet analizi ise çizelge 7.12'de verilmiştir. Çizelgelerde verilen \$ bazındaki fiyatlara işçilik ücretleri dahildir. Şekil 7.2'de uzak hat için ilk yatırım maliyetinin güce göre değişimi, mesafeye bağlı olarak verilmiştir. Özellikle 20 km ve sonrasında ilk yatırım maliyeti 100.000 \$ ve üzeri bir değere çıkmaktadır.

İlk yatırım maliyetlerinin fazla olması güneş pili sistemlerinin en büyük dezavantajlarıdır. Ancak elektrik hattı bulunmayan veya elektrik götürülmesinin pahalı olduğu kırsal yörelerde, dağ veya tepelerdeki verici istasyonlarında, dizel jeneratörlere alternatif olarak, güneş pillerinin kullanılması daha ekonomik olabilmektedir. Çünkü güneş pili sistemlerinde bir kez ilk yatırım için harcama

yapıldıktan sonra başka masraf olmamakta, oysa dizel jeneratörler ucuz satın alma fiyatlarına karşılık, yakıt ve bakım maliyetleri nedeniyle uzun dönemde pahalıya gelmektedir. Genellikle ulaşımın da zor olduğu bu tip kırsal yörelerde, dizel jeneratörlere sürekli yakıt taşımak sorun olabilmektedir. Ayrıca güneş pili sisteminin en büyük avantajlarından birisi de, ilk yatırım maliyeti yapıldıktan sonra, enerji kullanım ücreti ödemek gibi bir zorunluluğun olmamasıdır. Bundan başka jeneratörlerin tersine güneş pilleri bakım gerektirmez.

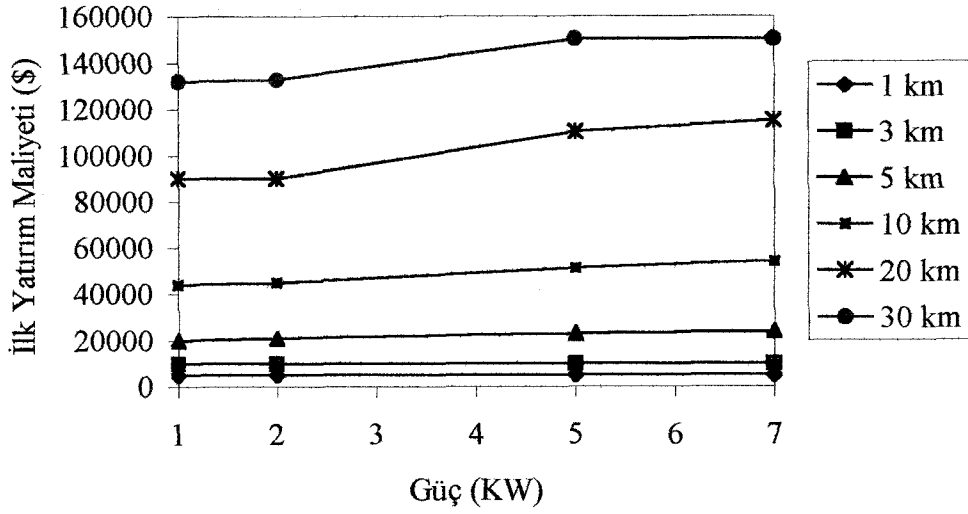
Çizelge 7.11 Kısa mesafeler için uzak hat çekimi ilk yatırım maliyeti

		İlk Yatırım Maliyeti (s)			
		500 W	100 W	1500 W	2000 W
500 m	Demir Direk	2033	2033	2168	2168
	Beton Direk	2323	2323	2456	2456
1000 m	Demir Direk	3821	3821	4091	4091
	Beton Direk	4183	4183	4453	4453
1500 m	Demir Direk	5610	5610	6013	6789
	Beton Direk	6044	6044	6448	7223
2000 m	Demir Direk	7935	7955	8969	10159
	Beton Direk	8442	8442	9477	10665
2500 m	Demir Direk	9859	9859	11151	-
	Beton Direk	10439	10439	11730	-
3000 m	Demir Direk	11782	11782	15117	-
	Beton Direk	12434	12434	15769	-

Çizelge 7.12 Uzak mesafeler için uzak hat çekimi ilk yatırım maliyeti

		İlk Yatırım Maliyeti (s)			
		1 Kw	2 kW	5 kW	7 kW
1 km	Demir Direk	5821	5821	6090	6490
	Beton Direk	6183	6183	6452	6852
3 km	Demir Direk	12794	12794	13781	14181
	Beton Direk	13625	13625	14433	14833
5 km	Demir Direk	21473	21473	24056	24456
	Beton Direk	22414	22414	24998	25398
10 km	Demir Direk	45869	45869	51817	52217
	Beton Direk	47534	47534	53483	53883
20 km	Demir Direk	89493	89493	101390	101790
	Beton Direk	92608	92608	104505	104905
30 km	Demir Direk	133118	133118	150963	151363
	Beton Direk	137681	137681	155526	155926



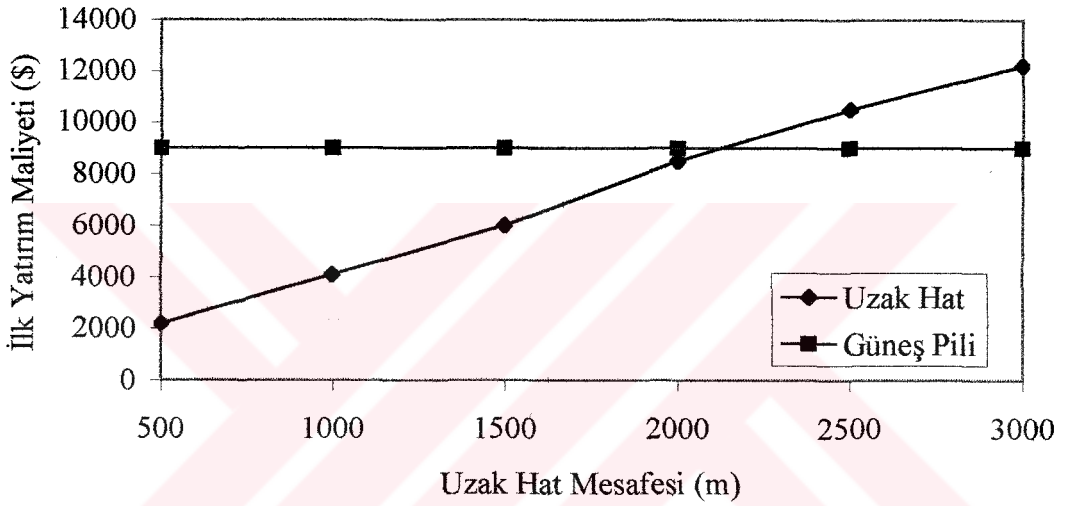


Şekil 7.2. Uzak hat çekimi ilk yatırım maliyeti

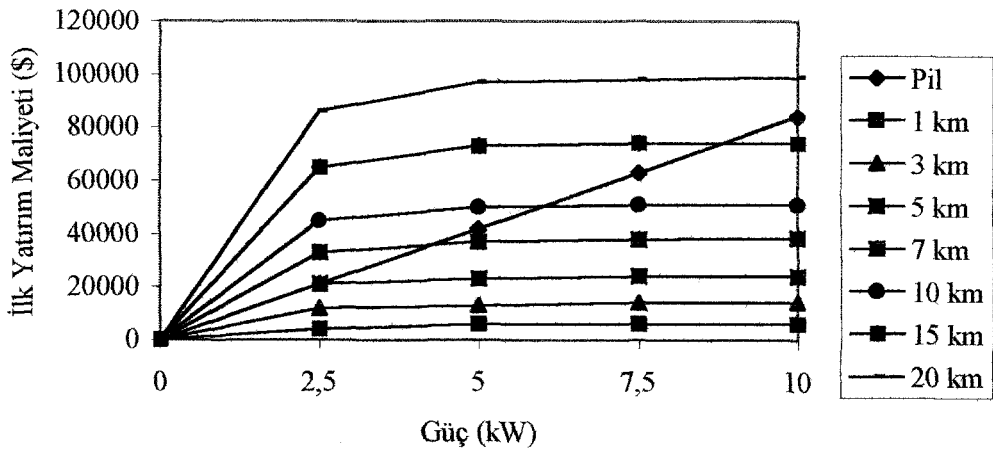
#### 7.4. Maliyet Karşılaştırması ve Gelecekte Güneş Pili

Yukarıda yapılan hesaplamalara dayanılarak, güneş pili sisteminin ilk yatırım maliyetinin şehir elektriğinin bulunduğu yerleşim birimlerinde ekonomik olmadığı ancak elektriğin bulunmadığı yerleşim birimlerinden uzak yerlerde (köy, çiftlik evleri, dağ, veya tepelerdeki radyo-televizyon verici istasyonları, orman gözetleme kuleleri, meteoroloji ölçüm istasyonları gibi) güneş pili sistemlerinin ilk yatırım maliyetinin hat çekimi ilk yatırım maliyetine göre daha ekonomik olduğu görülmektedir (çizelge 7.9 ve 2.12). Şekil 7.3'te tasarlanan senaryoya göre ihtiyaç duyulan enerjinin güneş pilinden elde edilmesi ve hat çekilerek sağlanması durumundaki ilk yatırım maliyetleri gösterilmiştir. Fotovoltaik sistemin ilk yatırım maliyetinin hesabında güneş ışınımının en az ve gün uzunluğunun en kısa olduğu Aralık ayı esas alınmıştır. Hat çekiminde ise 500 W'lık bir hat çekildiği dikkate alınmıştır. 2 ile 3 kW'lık bir gücün elektrik hattı ile taşınması için gerekli ilk yatırım maliyeti aynıdır. Bundan da görüleceği üzere senaryo, için yaklaşık 2 km'den sonraki mesafelerde güneş pili sistemi ekonomik olmaktadır. Ayrıca elektrik hattı ilk yatırım maliyeti ile beraber, hat çekildikten sonraki enerji kullanımından dolayı ödenecek ücretler de dikkate alınır, güneş pili sisteminin daha da ekonomik olacağı görülecektir.

Ancak sabit bir mesafe için gerekli güç artarsa, belirli bir güç değerinden sonra fotovoltaik sistemin üstünlüğünden bahsetmek mümkün olmaz. Bu durum şekil 7.4'de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi 5 km'nin altındaki mesafelerde gerekli güç ne olursa olsun uzak hat çekimi fotovoltaik sisteme göre daha ekonomik olmaktadır. Ancak 5 km'den sonraki belirli bir güce kadar fotovoltaik sistem maliyeti daha düşük olurken, kritik bir noktadan sonra hat çekimi tekrar ekonomik hale gelmektedir. Yalnız bu değişimin öngörülen enerji kullanım senaryolarına doğrudan bağlı olduğu gerçeği gözardı edilmemelidir.

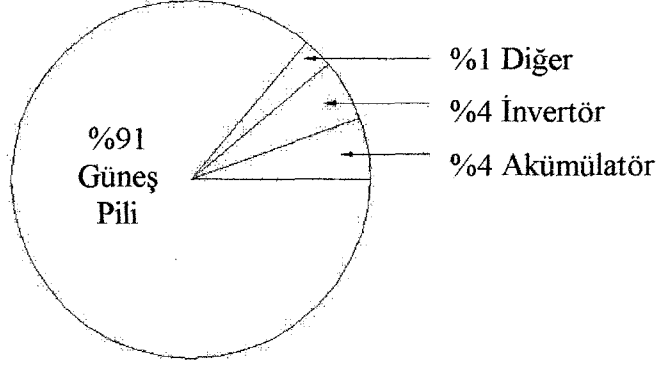


Şekil 7.3. Tasarlanan senaryo için ilk yatırım maliyetinin karşılaştırılması



Şekil 7.4. Güneş pili ve uzak hat ilk yatırım maliyetlerinin güce göre değişimi

Şekil 7.5’de ise güneş pili sistemini oluşturan birimlerin ilk yatırım maliyeti içindeki paylar verilmiştir. Görüldüğü gibi ilk yatırım maliyeti içinde %91 civarında olan pil maliyeti, toplam sistem maliyetini belirleyen en önemli parametredir.



Şekil 7.5 Güneş pili sistem ünitelerinin ilk yatırım maliyeti içindeki payları

Gelişen teknoloji ile pil maliyeti, dolayısı ile pil satış fiyatı düşmektedir (Partain, 1995). 1996 yılı için Watt başına pilin üretim maliyeti yaklaşık 3 \$’dır. 2001 yılı için ise 2.8 \$’dır. Bu fiyatlara kar payı, paketleme ve taşıma masrafları, gümrük ve fon vergisi gibi maliyetler eklenince, Wat başına pil maliyeti 8 \$’a kadar yükselmektedir. Ülkemizdeki mevcut ekonomik şartlara göre 55 Watt’lık bir güneş pili ancak 440 \$’a satın alınabilmektedir. Bazı üretim firmalar, 100.000 \$ ve üzerindeki pil satın alışlarında %20’lik bir indirim yapmaktadırlar. Bu da toplam maliyetin yaklaşık %17 düşmesi anlamına gelmektedir.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Coğrafi olarak; Türkiye ve özellikle bölgemiz güneşin bol olduğu bir yöredir. Ancak bu potansiyelden henüz gereği gibi faydalanılmamaktadır.

Bu çalışmada bölgemizdeki güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmek amacıyla, küçük güçlü tüketicilerin beslenmesinde fotovoltaiik sistemlerin kullanılması tasarlanmaktadır.

Deneyisel olarak incelenen fotovoltaiik sistemde kullanılan güneş pilinin ideal şartlardaki verimi %15 civarındadır. Buna yüzeye gelen güneş ışınımı ve pil sıcaklığı etki etmektedir. Pile gelen güneş ışınımı arttıkça pil verimi de artmıştır.

Yapılan deneyler ve alınan ölçümler sonucunda ortalama güneş pili veriminde bir miktar düşme olmuştur. Ortalama %12 olarak görülmüştür. Güneş ışınımı gün boyu 0-1000 W/m<sup>2</sup> arasında değiştiği ve sıcaklığında buna bağlı olarak değişeceği düşünülürse bulunan bu değerler üretici firma tarafından verilen değerlerle iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Güneş piline daha fazla ışınım gelmesini sağlamak-pilin verimini artırmada önemli rol oynayacaktır. Pilin mevsimlere göre değişik eğimlere konulması ile güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanılmış olacaktır. Isparta Bölgesi için güneş pilinin Mart-Eylül ayları arasında 32° eğime, Ekim-Şubat ayları arasında ise 42° eğime konulması gerekir (enlem +5, -5). Ayrıca güneş piline güneşi takip edecek bir elektronik modül eklenirse güneş ışınımından en yüksek derecede faydalanılacağı bir gerçektir.

Güneş pilinden alınan gerilim değerleri; ışınımına bağlı olarak 0-21 V arasında değişmektedir. Ancak akümülatör en fazla 14 V gibi bir gerilim değeri ile şarj edilebilir. Akümülatöre gönderilen enerjiyi düzenlemek amacıyla sistemde bir şarj regülatörü kullanılmıştır. Kullanılan şarj regülatörünün ortalama verimi %91 dolaylarında olduğu bulunmuştur. Kayıpları daha az bir şarj regülatörü ile verimin artırılması mümkündür. Ancak bu da maliyetin artması demektir. Enerji depolanması ve ihtiyaç duyulduğunda kullanılması amacıyla kullanılan akümülatörlerin %68 verimle çalıştığı hesaplanmıştır. Akümülatörde şarj ve deşarj işlemleri sırasında

meydana gelen kimyasal reaksiyonlardan dolayı bazı kayıplar oluşmaktadır. Kullanılan akümülatörün yeni olduğu ve ideal bir akümülatörün ortalama %70 verimle çalıştığı düşünülürse bulunan değerler kabul edilebilir niteliktedir.

Elektrikle çalışan cihazların çoğu 220 V ve 50 Hz alternatif gerilimle çalışmaktadır. Akümülatörden alınan doğru gerilimin bu cihazları çalıştırabilmesi için alternatif gerilime dönüştürülmesi gerekir. Fotovoltaik sistemler için imal edilen özel invertörler ve devreleri mevcut olmakla birlikte daha hassaslarının dış ülkelerden ithal edildiklerinde fiyatları oldukça yüksektir.

Deneyden sonra hazırlanan elektrik kullanım senaryosu ve deneylerden elde edilen toplam fotovoltaik sistem verimi de dikkate alınarak maliyet analizi yapılmıştır. Burada ilk yatırım maliyeti dikkate alındığında; güneş pili sisteminin elektriğin bulunduğu yerleşim birimlerinde ekonomik olmadığı, ancak yerleşim birimlerinden ve elektrik santrallerinden uzakta elektrik ihtiyacı olan yerlerde güneş pili sisteminin uzak hat çekimine göre daha ekonomik olabileceği düşünülmüştür.

Özellikle tarımsal sulama pompalarında, dağ başı baz istasyonları, radyo ve tv vericileri gibi uzak hat elektrik çekimine ihtiyaç olacak yerlerde, ada -köy ve mezra elektrifikasyonunda daha ekonomik olacağı düşünülmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte Watt başına pilin maliyeti her yıl düşmekte ve önümüzdeki yıllarda da düşmeye devam edeceği beklenmektedir. Toplam maliyette %91'lik bir paya sahip olan pil maliyetinin düşmesiyle toplam sistem maliyeti de düşecektir. Artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün biraz daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Buna paralel olarak da klasik enerji kaynakları hızla tükenmektedir. İleriki yıllarda arz talep dengesini karşılamak üzere alternatif enerji kaynaklarının kullanılması kaçınılmazdır. Bu alternatif enerji kaynaklarının en önemlilerinden birisi de güneş enerjisidir. Günümüzde pahalı olduklarından dolayı çok fazla kullanım alanı bulamamakla birlikte, bu sistemlerin uzun ömürlü olmaları, çevreyi kirletmemeleri, gürültüsüz çalışmaları, bakım gerektirmemeleri ve en önemlisi enerji kullanımı için para ödenmemesi gibi sebeplerde yakın bir gelecekte yaygın olarak kullanılmaları beklenmektedir.

## 8- KAYNAKLAR

- Alibaş, K.ve Baycık, H., 1987.Güneş enerjisi ve güneş enerjisinden faydalanma olanakları, Mühendis ve Makine, Cilt 29, Sayı 331.
- Altas, I.H., and Sharaf, A.M., 1996, Novel on-line MPP search algorithm for PV arrays, IEEE Transactions on Energy Conversions, v.11, p.748-754.
- Anis,W.R. and Alfons, H.A., 1994, Phatovoltaic powered regulated cathodic protection system, Solar energy, volume 53, no:2, Paper 211-214.
- Atagündüz, G, 1989, Güneş enerjisi temelleri ve uygulamaları, Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir, s 372.
- Bein, B., 1999, Energy generation in natural environment, II. international sustainable energy meeting, İstanbul.
- Chow, D., 1995, Solar cells brochures and catalogues, Nnovaest international company ltd, Taiwan., p.50-85
- Çıtıroğlu, A., 2000, Güneş enerjisinden yararlanarak elektrik üretimi, Mühendis ve Makine Dergisi, 41, 485, 32-37.
- Çolak, M. ve Erdiş, F., 1989, Fotovoltaik prensibi ile güneş enerjisinden doğrudan elektrik üretimi, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir.
- Çolak,M.,1991, Güneş pilleri ve uygulama alanları, Mühendis ve Makine, cilt 32, sayı 382.
- Deriş, N., 1984, Güneş Evleri, Özyılmaz Matbaası, İstanbul, 127 s.
- Erdiş, F., 1989, Türkiye’de güneş pilleri ile elektrik enerjisi üretimi üzerine bir fizibilite çalışması, Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Doktora tezi.
- E.İ.E., 1992, Elektrik işleri etüt idaresi genel direktörlüğü, Güneş Pilleri, Ankara

- Girgin, T., 1990, Akümülatörlerin teknik yapısı, Mühendis ve Makine, cilt 31, sayı 361.
- Gonzales, M.C. and Carrol, J.J., 1994, Solar cells Efficiency variations with varying atmospheric contiotons, Solar Energy, v 53, n 5, p 395-402
- Güneş, M., 1999, Fotovoltaik sistemin sağladığı elektrik enerjisi ile çalışan bir uygulama sisteminin tasarımı, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.s.5-50
- Hankins, M., 1991, Small solar electric systems for Afrika, Commenwealth science council published, United Kingdom, 105 p.
- Hiroshi, s., 1994, Status of amorphous silicon solar cell tecnologies in Japan, Solar energy materials and solar cells, 34 v, 263-270 p.
- İbrahim, D., 1996, Güneş enerjisi ve fotovoltaik pil kullanarak su pompası sistem tasarımı, elektrik dergisi sayı. 93, s.104-111
- Ichikawa, Y., 1994, Fabrication tecnology for large-area a-Si solar cells, Solar energy materials and solar cells, 34 v, 321-328 p.
- Karaçorlu, M., 1996, Güneş pili ile elektrik üretiminin çukurova bölgesi için kullanılabilirliğinin araştırılması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, S.20-80
- Keithley, 1993, ADC-16 User Guide, England.
- Kılıç, A. ve Öztürk, A., 1983, Güneş enerjisi, Kipaş Dağıtımçılık, İstanbul, 331 s.
- Leblebici, D., Elektronik elemanlar ders notu, İTÜ; E.E. Fak., ofset baskı atölyesi, s.10-50
- Markvart, T., 1994, Solar Electricity, John Wiley and Sons Ltd. Published, England, 228 p.
- Mutlu, 2001, Mutlu Aküleri broşür ve katalogları, fiyat listesi, İstanbul

- Oral, M., 1979, Güneş Pilleri, Ege Üniversitesi Fizik Bölümü, İzmir, 59 s.
- Özdemir, A., 1991, Güneş modülleri test projesi sonuç raporu, EİE bülteni, s.30
- Partain, L.D., 1995, Solar cells and their application, John Wiley inc., 441 p.
- Siemens, 2001, Solar energy products catalog and brochures, Germany.
- Tarıcan, A., 1994, Güneş pili santralleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek lisans tezi, s.15-35
- TEDAŞ., 2001, Türkiye elektrik dağıtım anonim şirketi, Elektrik proje ve tesis birim fiyat kitabı, Ankara.
- Tsuda, I., Kurukawa, K. And Nozaki, K., 1994, Annual simulation results of PV system with redox Elow battery, Solar energy materials and solar cells, 35 v, 503-508 p.
- Unesco, 1988, Solar Powered Electricity, Intermediate technology published, 56-69 p.
- Uni-solar, 2001, Solar energy products catalog and brochures, U.S.A.
- Uyarel, A. ve Öz, E.S., 1987, Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi, İstanbul, 240 s.
- Volta, 2000, Stationary type lead-acid battery catalog and price list, United Kingdom.
- Zhu, F. and Singh, J.,1993, On the optical desing oe thin film amorphous silicon solar cells, Solar energy materials and solar cells 31 v, 119-131 s.



**ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı :Sefer KUTLU

Doğum Yeri :Isparta

Doğum Yılı :01.05.1968

Medeni Hali :Evli

**Eğitim ve Akademik Durumu**

Lise :1983-1986 Isparta Merkez Endüstri Meslek Lisesi

Lisans :1986-1992 Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği

Yabancı Dil : İngilizce

**İş Deneyimi**

1992-1994 Isparta Merkez Endüstri Meslek Lisesi (Öğretmen)

1994-1995 Balıkesir Teknik Astsubay Hazırlama Okulu (Öğretmen)

1995-1999 Isparta Merkez Anadolu Teknik Lisesi (Öğretmen)

1999-..... SDÜ Keçiborlu Meslek Yüksek Okulu (Öğretim Görevlisi)