

**T.C.
TUNCELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

GÜNEŞ PİLLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ercan ERDOĞDU

(102103103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 01 Haziran 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 28 Haziran 2011

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali TUTAY (T.Ü)

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ali TUTAY (T.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü)

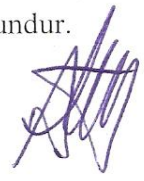
Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE (T.Ü)

HAZİRAN-2011

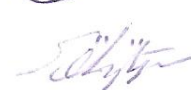
Ercan ERDOĞDU tarafından hazırlanan GÜNEŞ PİLLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Prof. Dr. Ali TUTAY
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. Bu tez, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Başkan : Prof. Dr. Ali TUTAY (T.Ü) 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü) 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE (T.Ü) 

Tarih : 28 Haziran 2011

ÖNSÖZ

Güneş Pili sistemleri başlangıçta uzay çalışmalarında kullanılmış daha sonra elektrik şebekesinin çekilmesinin mümkün olmadığı ya da anlamlı olmadığı yerlerde özellikle küçük güçte enerji taleplerini karşılamak için kurulan ve şebekeden bağımsız sistemler olarak karşımıza çıkmışlardır.

Fosil yakıtların dünyamıza verdikleri zararlar nedeniyle yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarından biri olan güneş pillerinin kullanımı, dünya hükümetlerinin birçoğu ve özellikle kamuoyu tarafından desteklenmektedir. Günümüzde güneş pilleri üzerine yapılan çalışmalar neticesi maliyetleri düşmekte ve verimleri artmaktadır.

Tez çalışmamda güneş enerjisi hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra, güneş pillerinin yapısı, çalışma ilkeleri, kullanım alanları, türleri üzerinde durulmuş ve deneysel bir güneş pili sistemi tasarlanarak kullanılacak materyaller ele alınmıştır.

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Danışmanım ve hocam Prof. Dr. Ali TUTAY'a, hocalarım Yrd. Doç Dr. Zeki OMAÇ, Yrd. Doç Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE, Yrd. Doç Dr. Ömer ÇELİK'e, Tunceli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine ve Güneş Takip Sisteminin tasarımı konusundaki yardım ve katkılarından dolayı Sayın Basri ACAR beyefendiye ve tabii ki anlayışlarından dolayı eşime ve kızıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın yenilenebilir ve alternatif bir temiz enerji kaynağı olan güneş pilleri üzerine araştırma yapan mühendis ve fizikçilere ışık tutması umuduyla...

Ercan ERDOĞDU
Tunceli - 2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	X
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Güneş ve Güneş Enerjisi.....	6
1.1.1. Kara Cisim Işıması ve Güneş Işığı Spektrumu.....	8
1.1.2. Hava Kütlesi	11
1.1.3. Güneş - Dünya Geometrisi	13
1.1.4. Eşdeğer Tam Güneş Saati.....	15
1.1.5. Güneş Işınımını Ölçme	15
1.2. Türkiye'de Güneş Enerjisi.....	17
1.3. Güneş Enerjisi Teknolojileri.....	20
1.3.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi	20
1.3.2. Güneş Pillerinin Kullanım Alanları	21
1.3.3. Isıl Güneş Teknolojileri	24
2. GÜNEŞ PİLLERİ	25
2.1. Yarıiletkenler ve Fotoelektrik Olayı.....	25
2.1.1. Yarıiletkenler	25
2.1.2. Fotoelektrik Olay	26
2.1.3. Silisyum ve Germanyum	27
2.1.4. Katkılama.....	28
2.1.5. N tipi yarıiletken	29
2.1.6. P tipi yarıiletken.....	30
2.1.7. P – N kavşağı ve Birleşme Kesitinde Elektrik Alanın Oluşması.....	31
2.2. Güneş Pillerinin Yapısı.....	32
2.3. Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi	37
2.4. Güneş Pillerinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler.....	39
2.4.1. Sıcaklık	39
2.4.2. YüzeY Parametresinin Etkisi.....	41
2.4.3. Spektral Etki	42
2.4.4. Foto AçısAl Etki	42
2.5. Güneş Piliindeki Kayıplar.....	43
2.5.1. Işıksal kayıplar	43
2.5.2. Elektriksel kayıplar	43
2.5.3. Akım kayıpları	43
2.5.4. Açık devre gerilimi	44
2.5.5. Direnç kayıpları	44
2.5.6. Pil ömrü ve verim kaybı	44
2.6. Güneş Pili Türleri	45
2.6.1. Selenyum Güneş Pilleri	45

2.6.2. Silisyum Güneş Pilleri	45
2.6.3. İnce Film Güneş Pilleri	47
2.6.4. Galyum Arsenit (GaAs)	47
2.6.5. Kadmiyum Tellürid (CdTe)	47
2.6.6. Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe ₂)	48
2.6.7. Tandem Piller ve Optik Yoğunlaştırıcı Hücreler	48
2.6.8. Dye (Ağartma Özellikli) Duyarlı Piller	49
2.6.9. Organik Güneş Pilleri	49
2.6.10. Son Yıllarda Üzerinde Çalışılan Güneş Pilleri	49
2.6.11. Auger Jenerasyon Malzeme	49
2.7. Güneş Pili Güç Verimlilikleri	50
3. MATERYAL VE METOD	52
3.1. Güneş Modülü	53
3.2. Akü	55
3.3. Şarj Kontrolörü (Regülatörü)	57
3.4. Eviriciler (İnverterler)	58
3.4.1. Eviricilerin Yapısı ve Çalışma Prensipleri	60
3.5. Modül Eğim Açısı	64
3.6. Güneş Takip Sistemi	65
3.6.1. Yerçekimini kullanarak çalışan sistemler	66
3.6.2. Açık döngü sistemler	66
3.6.3. Kapalı döngü sistemler	68
3.6.4. Güneş Takip Sistemlerinin Gerekliliği	68
3.6.5. Güneş Takip Sistemlerinin Verimi	68
4. BULGULAR	70
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	76
6. ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	82

ÖZET

Güneş Pili sistemleri başlangıçta uzay çalışmalarında kullanılmış daha sonra elektrik şebekesinin uzatılmasının mümkün olmadığı ya da anlamlı olmadığı yerlerde özellikle küçük güçte enerji taleplerini karşılamak için kurulan, şebekeden bağımsız sistemler olarak karşımıza çıkmışlardır. Güneş pilleri günümüzde maliyet ve verim açısından istenilen düzeye gelememiş olmasına rağmen hemen hemen her alanda kullanılabilir duruma gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, 10 W güneş pili kullanarak elektrik enerjisi üretilmiş ve 12 volt 12 Ah gücündeki kuru tip aküde depo edilmiştir. Güneş enerjisinin elektrik üretiminde yetersiz olduğu durumlarda aküde depo edilen enerji ile sistem çalıştırılmıştır.

Tasarlanan sistem ile ilgili olarak; panel ve akünün voltmetre ile boşa ölçümü yapılmıştır. Daha sonra sistem bağlı fakat yüksüz durumda ölçümler yapılmıştır. En son ise sistem bağlı ve yüklü durumda ölçümler yapılmıştır. Ayrıca tasarlanan bir güneş takip sistemi ile güneş takip sistemlerinin verime olan etkileri incelenmeye çalışılmıştır.

İlk yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen bu sistemler, işletme maliyetlerinin düşük olması nedeniyle kullanılma oranı günden güne artmaktadır. Son zamanlarda güneş enerjisinden elektrik üretiminde üreticilere sağlanan devlet desteği sayesinde çift yönlü sayaç kullanılarak ve akü kullanma maliyetini ortadan kaldırarak her evin kendi elektrik ihtiyacının belirli bir bölümünü veya tamamını üretmesi, hatta devlete elektrik satarak gelir elde etmesi gündeme gelmiştir.

Özellikle güneş pillerinin verimlerini artırma ve maliyetlerini azaltma yönünde yapılan çalışmalara ağırlık verilmesinin, ulusal üretime geçilmesinin, bireysel kullanıcıların devlete elektrik satmasını kolaylaştıracak çift yönlü sayaç sisteminin uygulamaya konulmasının, yatırımcılara gerekli desteğin sağlanmasının en azından bu konudaki bürokratik engellerin kaldırılmasının ve güneş pillerinin diğer enerji sistemleri ile birlikte kullanıldığı hibrid sistemlerin (özellikle hidrojen üretiminde) tasarlanmasının son derece uygun olacağı sonucuna varıldı.

Anahtar sözcükler: Güneş Pili, Güneş Takip Sistemi

SUMMARY

The Study of Solar Cells Through Theoretical and Experimental Methods

In the beginning, solar cells systems were used for space working and then today are used as systems independent from the central net which are established especially to small amount of energy demands, in case that the net of electricity is not possible to reach or doesn't require at all. Solar cells systems today can be used in nearly everywhere although it hasn't extended to the pleased position in terms of cost and efficiency.

In this study of thesis, energy of electricity has been produced by using the 10 w celled solar battery, and it has been stored in a dry type of 12 volt 12 Ah powered storage battery. In case that solar energy is not sufficient to manufacture electric energy, the system has been operated by the energy which is stored in the storage battery.

Concerning the system, first of all panel and storage battery have been measured as empty. Later, the measurements have been carried out when the system is connected but without charged. Finally, the measurements have been carried out when the system is connected and with charged. Furthermore, by the projected sun tracker system, the effects of sun tracker systems on efficiency was investigated.

Although the first cost of investment is expensive, the rate of using these systems increases day by day due to their low operating costs. Recently, by the help of government support given to whom manufacturing electricity from solar energy, every family can manufacture a major part of its demand or all of it, even derive revenue from selling electricity to government bu using duplex counter and eliminating the cost of using a battery.

In conclusion, it is considered that to focus on expanding efficiency anc reducing costs of solar cells, to go into national production, to put duplex battery system enabling families sell electricity to government into practice, to support investors at least to eliminate bureaucratic barriers and to design hybrid systems (especially in producing hydrogen) in which solar cells are used with the other kind of energy systems are highly advisable.

Key Words: Solar Cell, Sun Tracker System

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Atmosferdeki CO_2 miktarının yıllara göre değişimi	2
Şekil 1.2. 1980 – 2008 arası ülkemizdeki kurulu güç kapasitesi	5
Şekil 1.3. 1980 – 2009 arası ülkemizdeki elektrik üretimi	5
Şekil 1.4. 1980 – 2009 arası ülkemizdeki elektrik tüketimi	5
Şekil 1.5. Elektromanyetik Spektrum	7
Şekil 1.6. Güneşten yeryüzüne ulaşan ve atmosferden yansıyan ışınım oranları	8
Şekil 1.7. Kara cismin değişik sıcaklık dereceleri için ışınım şiddeti grafiği	10
Şekil 1.8. Güneş ışığı spektrumu	11
Şekil 1.9. Hava Kütlesi tanımlaması	12
Şekil 1.10. Dünyanın güneş etrafındaki hareketi	14
Şekil 1.11. Güneşin yaz ve kış aylarında gökyüzündeki açısı	14
Şekil 1.12. Sabit yatay bir yüzeye gün boyunca düşen güneş ışınımına bir örnek	15
Şekil 1.13. Tipik ticari piranometre örnekleri	16
Şekil 1.14. Pirheliyometre	16
Şekil 1.15. Türkiye'nin güneş enerjisi haritası	18
Şekil 1.16. Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m^2 - gün)	19
Şekil 1.17. Türkiye güneşlenme süreleri (Saat)	19
Şekil 1.18. Türkiye PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (Kwh-Yıl)	20
Şekil 1.19. Güneş pili enerji sistemi	22
Şekil 1.20. Çatısı güneş pili kaplı ev	23
Şekil 1.21. Şebekeye elektrik veren güneş pili sistemi	23
Şekil 1.22. Güneş pilleri ile sokak aydınlatması	24

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Enerji bandları	25
Şekil 2.2. Fotoelektrik olayı incelemek üzere hazırlanmış bir deney	26
Şekil 2.3. Silisyum ve germanyum yarı iletkenin yapısı	28
Şekil 2.4. N tipi yarıiletken	30
Şekil 2.5. P tipi yarıiletken	30
Şekil 2.6. Elektrik alanın “n tip” i ve “p tip” i etkileyiş diyagramı	31
Şekil 2.7. Fotonların silisyumda elektron hareketi oluşturması	32
Şekil 2.8. Güneş pili (şematik)	33
Şekil 2.9. P-N kavşağının oluşturulması ve kavşağa düşen foton enerjisi ile iletkenlik temini	33
Şekil 2.10. Güneş pili eşdeğer elektrik devresi	34
Şekil 2.11. Bir PV hücrenin I-V karakteristiği	35
Şekil 2.12. Farklı ışımaya seviyeleri altındaki gerçek ve ideal güneş pillerinin I-V karakteristiği	36
Şekil 2.13. Güneş pilinin yapısı	37
Şekil 2.14. Pillerden modül ve örgülerin yapılması	38
Şekil 2.15. Güneş pili ile akünün şarj edilmesi	39
Şekil 2.16. Selenyum güneş pilinin yapısı	45
Şekil 2.17. Işık yolu gelişiminin optik olarak tanımı	47
Şekil 2.18. Dönüşüm veriminin yarı iletken band aralığına bağlılığı	51
Şekil 3.1. Fotovoltaik sistemlerin akım - enerji dengesi	53
Şekil 3.2. Güneş pili	54
Şekil 3.3. Güneş pili modülü	54
Şekil 3.4. Akünün dıştan görünümü	56

Sayfa No

Şekil 3.5. Sabit bir oranda şarj ve deşarj boyunca pil elektrolitinin özgül ağırlığı ve pil geriliminin değişimi	57
Şekil 3.6. Şarj kontrolörü	58
Şekil 3.7. Evirici gösterimi	59
Şekil 3.8. Evirici yapısı	60
Şekil 3.9. Şekil 3.8 'deki devrede yük uçlarındaki gerilim dalga şeklinin zamana göre değişimi	61
Şekil 3.10. Bir fazlı köprü evirici devresi	62
Şekil 3.11. Şekil 3.10 'daki devre çıkışından elde edilen gerilim dalga şekli	63
Şekil 3.12. Evirici	63
Şekil 3.13. Modül eğim açısı	64
Şekil 3.14. Yerçekimi özelliğine göre çalışan sistemlere iki örnek	66
Şekil 3.15. Yerçekimi özelliğine göre çalışan güneş takip sisteminin çalışma esası	67
Şekil 3.16. Açık döngü sistemlerin blok diyagramı	67
Şekil 3.17. Kullanılan güneş takip sistemi	69
Şekil 3.18. Kullanılan güneş takip sisteminin devre şeması	69
Şekil 4.1. Güneş panelinin kısa devre akımının zamana bağlı değişimi (eğim 0°)	70
Şekil 4.2. Güneş panelinin açık devre geriliminin zamana bağlı değişimi (eğim 0°)	71
Şekil 4.3. Işığın geliş açısına bağlı olarak güneş pili veriminin ölçülmesinde kullanılan deney düzeneği	72
Şekil 4.4. Sabit durumda güneş panelinin açık devre geriliminin açuya bağlı değişimi ..	73
Şekil 4.5. Sabit durumda güneş panelinin kısa devre akımının açuya bağlı değişimi	74
Şekil 4.6. Hareketli durumda güneş panelinin açık devre geriliminin açuya bağlı değişimi	74
Şekil 4.7. Hareketli durumda güneş panelinin kısa devre akımının açuya bağlı değişimi	75

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. 1980 – 2009 yılları arası ülkemizdeki elektrik üretim ve tüketim verileri	3
Tablo 1.2. 1980 – 2009 yılları arası ülkemizdeki elektrik üretim kaynakları	4
Tablo1.3. Hava Kütlesinin bazı değerlerine karşılık gelen ışınım şiddeti ve açı değerleri	13
Tablo 1.4. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli	17
Tablo 1.5. Türkiye'nin yıllık güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı	18
Tablo 2.1. Bazı yarıiletkenlerin enerji band aralığının sıcaklıkla değişimi	40
Tablo 2.2. GaAs güneş pili parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimi	40
Tablo 2.3. Silisyum güneş pili parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimi	41
Tablo 2.4. Germanyum güneş pili parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimi	41
Tablo 2.5. Güneş piline ışığın spektral etkisi	42
Tablo 2.6. Güneş pili verimleri	50
Tablo 3.1. Şarj regülatörünün panel gücü ve gerilim değerine göre seçimi	57
Tablo 3.2. Şarj kontrolörü için teknik bilgiler (25 C ⁰ de)	58
Tablo 3.3. Evirici için teknik bilgiler	64
Tablo 3.4. Ankara'da aylara göre eğimli yüzeyde güneş ışınımı	65
Tablo 4.1. Açık havada ölçülen akım ve gerilim değerleri (eğim 0°)	70
Tablo 4.2. Işık açısına bağlı olarak gerilim ve akım değişimi	73

SEMBOLLER LİSTESİ

KISALTMALAR

AM	: Air mass (Hava Kütlesi)
BJT	: Bipolar junction transistor (İki kutuplu jonksiyon transistörü)
CO₂	: Karbondioksit
CO	: Karbonmonoksit
D1,D2,D3,D4	: Köprü inverter devresindeki serbest geçiş diyotları
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
HES	: Hidroelektrik Santral
IGBT	: Insulated gate bipolar transistor (Yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör)
PPM	: Parts Per Million (Milyonda Bir)
PSH	: Equivalent peak sun hours (Eşdeğer tam güneş saati)
TEP (TOE)	: Ton Eşdeğer Petrol

SEMBOLLER

A	: Güneş Pili Alanı(m ²)
a	: Soğurma katsayısı
γ	: Frekans (Hz)
η	: Verim
c	: Işık Hızı (300000 km/s)
e	: Euler sayısı (yaklaşık 2,718)
eV	: Elektronvolt
E	: Enerji (joule)
FF	: Doluluk oranı (Dolun çarpanı)
h	: Planck sabiti ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s)
I_{sc}	: Kısa devre akımı
k	: Boltzman sabiti ($1,38 \times 10^{-23}$ joule/K)
kW	: Kilowaat (10 ³)
k1, k2	: Yok olma katsayıları
m	: Kütle (kg)
MW	: Megawaat (10 ⁶)
n1, n2	: Kırıcılık indisleri
r	: Direnç
σ_{sb}	: Stefan-Boltzmann sabiti
λ	: Dalga boyu (m)
P	: Güç
q	: Elektriksel yük ($1,6 \times 10^{-19}$ coulomb)
R	: Yansıma katsayısı
T	: Geçme katsayısı
t	: Sıcaklık (Kelvin)
V	: Sistem gerilimi
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
W	: Watt

1. GİRİŞ

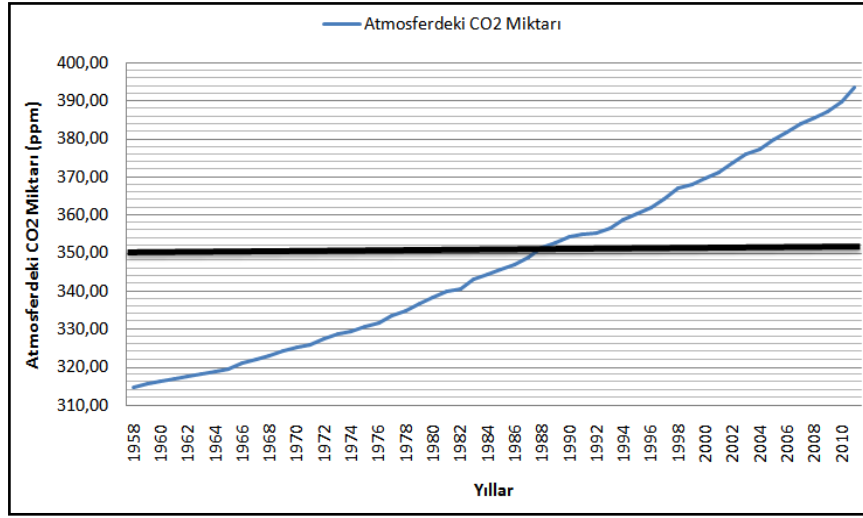
Enerji bir toplumun gelişmişlik düzeyini belirleyen temel ölçütlerden biridir ve klasik termodinamikte iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır (Uyarel ve Öz, 1987).

Bugün kullanılan enerjinin büyük bir kısmı; kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtlar; bitkilerin ve hayvanların milyonlarca yıl boyunca çürümesi ile oluşmuştur. Bunları yeryüzüne çıkarabilmenin yolu, yeryüzünü delmek (sondaj) ya da kazmaktır. Yeraltında ısı ve basınçla oluşan bu yakıtlar, oluşumlarından daha hızlı olarak tüketilmektedir. Bu sebeple fosil yakıtlar, kısa süreçte yenilenemeyen yakıtlar olarak düşünülürler. Bu yakıtların tükenmesi ve fiyatlarının devamlı artmasının yanı sıra, yanmaları sonucu çevreye verdikleri zararlar ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri de büyüktür (Küpeli, 2005).

Yenilenebilir enerji, "doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanabilir (Dinçadam, 2008). Hidroelektrik Enerji, Rüzgar Enerjisi, Jeotermal Enerji, Biokütle Enerjisi, Hidrojen Enerjisi gibi yenilenebilir enerji türlerinden biri olan güneş enerjisinin, geliştirilmesindeki temel etken fosil yakıtların ve çevreye olan zararlı etkilerinden uzaklaşmaktır (Ünal, 2006).

Dünya'da enerji tüketiminin bu şekilde devam etmesi durumunda 2020 yılında fosil yakıt kaynaklarının yarısının tüketilmiş olacağı tahmin edilmektedir. Fosil kaynaklar, sadece yakıt olarak değil aynı zamanda başta ilaç olmak üzere kimya sektöründe pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu yönü ile de korunması, ya da en azından tüketiminin azaltılması önemlidir.

Herhangi bir karışımda toplam madde miktarının milyonda 1 birimlik maddesine 1 ppm (parts per million) denir. Kömür veya petrol gibi fosil yakıtların yanması sonucu, daima CO_2 oluşur. Yapılan ölçümler milyonlarca yıldır 180-280 ppm arasında değişen CO_2 seviyesinin günümüzde 392 ppm seviyesine çıktığını göstermektedir (350 ppm üst sınırdır). Karbondioksit diğer sera gazlarına göre %55 'lik bir oranla, doğal sıcaklık dengelerinin bozulmasında en büyük etkiyi yaparak küresel ısınmaya neden olmaktadır. Şekil 1.1 'de görüldüğü üzere CO_2 miktarı her yıl ortalama 2 ppm artmaktadır (URL-1, 2011) (URL-2, 2011) (URL-3, 2011).



Şekil 1.1. Atmosferdeki CO_2 miktarının yıllara göre değişimi

Küresel ısınmanın oluşumunda sera etkisinin rolü büyüktür. Sera Etkisini, güneşten gelen kısa dalga boylu ışınların geçmesine izin veren gaz tabakasının, dünya üzerinden yansıyan uzun dalga boylu ışınlarının büyük bir kısmını tutması sonucu meydana gelen atmosferik dengesizlik olarak kısaca açıklayabiliriz.

Atmosfere atılan diğer sera gazları ise CO , SO_2 , NO_x gibi zehirli gazlar ve radyoaktif maddelerdir. Termik santrallerde, sanayide ve binalarda yakıt olarak kömür kullanıldığında, bu kirlilik etmenlerinin yanında kül de açığa çıkar. Kül civa, kurşun, arsenik ve kadmiyum içermesi nedeniyle yüksek oranda kirletici etkiye sahiptir.

Fosil yakıtların bu şekilde kullanılmaya devam edilmesi durumunda, aşırı kuraklık, deniz seviyesinde yükselme sonucu su baskınları, fırtınalar ve ultraviyolenin artması gibi küresel değişimler sonucu, doğanın ekolojik dengesinin bozulması kaçınılmazdır (URL-1, 2011). Ayrıca şunu da unutmayalım ki 2009 yılı itibarı ile kullandığımız petrolün yaklaşık %42'sini başka ülkelerden alıyoruz ve ödemeyi döviz olarak yapıyoruz (URL-5, 2011).

Şu anda ülkemizdeki elektrik enerjisinin yaklaşık % 50'si doğal gazdan karşılanmaktadır. Doğal gaz kaynaklı termik santraller, ilk yatırım maliyetlerinin ucuz olması ve iki yıl gibi kısa bir zamanda faaliyete geçmelerinden dolayı tercih edilmektedir. Ancak dışa bağımlı olduğumuz bu kaynak kullanılırken, milyar dolarlarca döviz dışarıya aktığından, devletimiz kârda değil zarardadır. Bir diğer husus doğal gaz vanasının kontrolü dış ülkelerde olduğundan, ikili anlaşmalara rağmen herhangi bir anlaşmazlık durumunda vana her an kapatılabilir. Bu durum ülkemiz açısından bir tehdit oluşturmaktadır (Dinçadam, 2008), (URL-4, 2011).

Tablo 1.1. 1980 – 2009 yılları arası ülkemizdeki elektrik üretim ve tüketim verileri (URL-5, 2011).

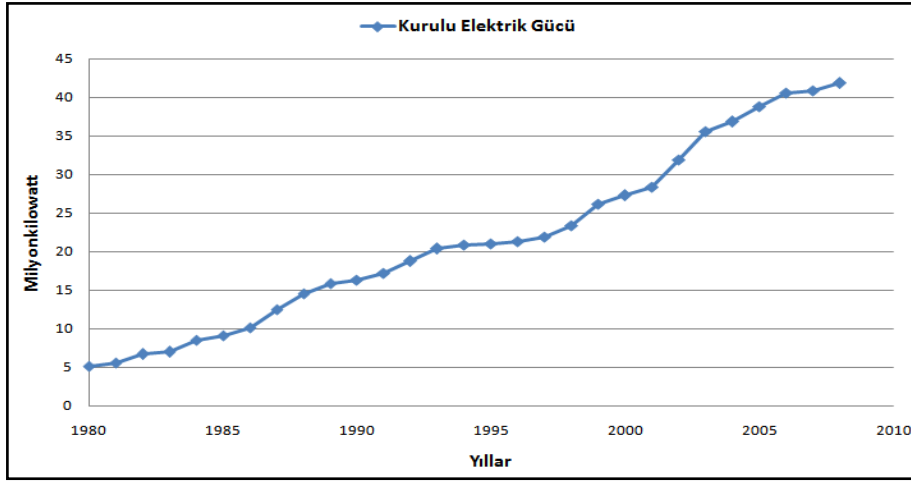
YILLAR	Toplam Elektrik Kurulu Güç Kapasitesi (Milyon Kilowatt)	Toplam Elektrik Üretimi (Milyar Kilowattsaat)	Toplam Elektrik Tüketimi (Milyar Kilowattsaat)	Elektrik Dağıtım Kayıpları (Milyar Kilowattsaat)	Toplam Elektrik Dış satımı (Milyar Kilowattsaat)	Toplam Elektrik Dış alımı (Milyar Kilowattsaat)	Hidroelektrik Üretimi (Milyar Kilowattsaat)
1980	5,119	23,322	21,839	2,824	0,000	1,341	11,159
1981	5,538	23,803	22,488	2,931	0,000	1,616	12,308
1982	6,654	26,440	24,896	3,317	0,000	1,773	13,810
1983	6,950	27,356	26,154	3,422	0,000	2,220	11,130
1984	8,463	30,721	29,634	3,740	0,000	2,653	13,190
1985	9,122	34,369	32,566	3,945	0,000	2,142	11,822
1986	10,116	36,398	31,728	5,447	0,000	0,777	11,637
1987	12,495	39,965	35,019	5,518	0,000	0,572	18,314
1988	14,521	46,300	40,373	6,308	0,000	0,381	28,447
1989	15,809	45,879	40,190	6,247	0,000	0,558	17,610
1990	16,318	55,249	47,836	6,681	0,907	0,175	22,917
1991	17,210	57,766	50,459	7,561	0,506	0,760	22,456
1992	18,717	64,632	55,512	8,995	0,314	0,189	26,302
1993	20,338	71,078	60,450	10,252	0,589	0,213	33,611
1994	20,860	75,152	62,793	11,842	0,550	0,033	30,280
1995	20,955	82,853	68,388	13,769	0,696	0,000	35,186
1996	21,250	91,196	75,267	15,854	0,345	0,270	40,070
1997	21,892	99,093	82,732	18,582	0,271	2,492	39,418
1998	23,354	106,475	88,682	20,795	0,298	3,300	41,807
1999	26,120	111,191	91,691	21,545	0,285	2,330	34,330
2000	27,264	118,973	98,571	23,756	0,437	3,791	30,570
2001	28,332	116,518	97,335	23,329	0,433	4,579	23,770
2002	31,846	123,324	102,545	23,932	0,435	3,588	33,346
2003	35,587	133,916	110,434	24,052	0,588	1,158	34,977
2004	36,824	143,962	120,038	23,243	1,144	0,463	45,623
2005	38,843	154,186	128,980	24,044	1,798	0,636	39,165
2006	40,565	167,969	141,496	24,810	2,236	0,573	43,802
2007	40,835	182,053	153,848	26,647	2,422	0,864	35,492
2008	41,818	188,839	161,025	27,481	1,122	0,789	32,937
2009	---	185,209	---	---	1,550	0,813	35,521

Yukarıdaki tabloda kurulu güç birimi olarak kW, yıllık elektrik üretim ve tüketim birimi için ise kWh kullanılmıştır (URL-6, 2011). Çeşitli kaynaklarda enerji birimi olarak TEP (TOE) ifadesinde kullanılmaktadır (URL-5, 2011). (1 TEP = 11630 kWh)

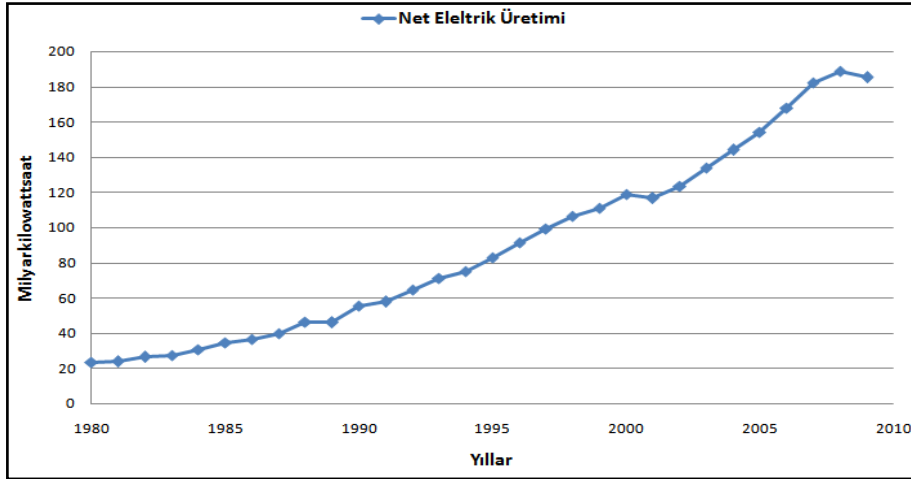
Söz konusu tablodan her yıl üretilen elektriğin yaklaşık % 15'inin (hatta bazı yıllar yaklaşık %20 sinin) dağıtımında kaybolduğu görülmektedir. Tablo 1.2 'de 1980 – 2009 yılları arasında ülkemizdeki elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılım yüzdeleri gösterilmiştir (URL-4, 2011).

Tablo 1.2. 1980 – 2009 yılları arası ülkemizdeki elektrik üretim kaynakları

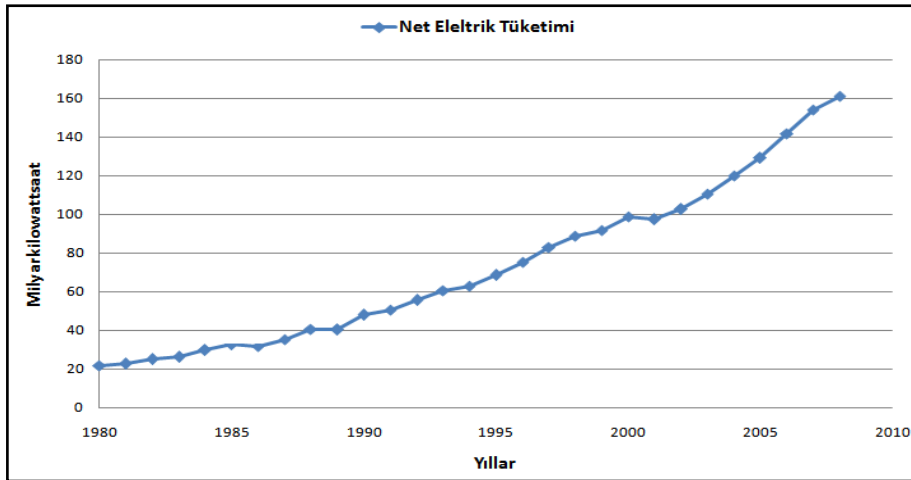
YILLAR	TAŞKÖMÜRÜ (%)	LİNYİT (%)	FUEL-OİL (%)	MOTORİN (%)	LPG (%)	NAFTA (%)	YENİLENEBİLİR +ATIK (%)	DOĞAL GAZ (%)	HİDROLİK (HES) (%)	JEOTERMAL +RÜZGAR (%)	TOPLAM (%)
1980	3,9	21,7	22,4	2,6			0,6		48,8		100
1981	3,6	21,3	21,1	2,5			0,4		51,1		100
1982	3,4	20,8	20,0	2,4					53,4		100
1983	2,9	28,5	23,2	3,9					41,5		100
1984	2,3	30,7	21,9	1,1					43,9	0,1	100
1985	2,1	41,8	20,5	0,2				0,2	35,2	0,0	100
1986	2,0	47,0	17,5	0,1				3,4	29,9	0,1	100
1987	1,4	38,4	12,2	0,2				5,7	42,0	0,1	100
1988	0,7	25,3	6,8	0,1				6,7	60,3	0,1	100
1989	0,6	38,3	8,1	0,1				18,3	34,5	0,1	100
1990	1,1	34,0	6,8	0,0				17,7	40,2	0,2	100
1991	1,7	34,1	5,6	0,0			0,1	20,8	37,6	0,1	100
1992	2,7	33,8	7,8	0,0			0,1	16,0	39,5	0,1	100
1993	2,4	29,7	7,0	0,0			0,1	14,6	46,1	0,1	100
1994	2,5	33,5	7,1	0,0			0,1	17,6	39,1	0,1	100
1995	2,6	29,9	6,4	0,3			0,3	19,2	41,2	0,1	100
1996	2,7	29,3	6,5	0,4			0,2	18,1	42,7	0,1	100
1997	3,2	29,6	6,3	0,5	0,1		0,3	21,4	38,5	0,1	100
1998	2,7	29,5	6,6	0,3	0,2	0,1	0,2	22,4	38,0	0,1	100
1999	2,7	29,1	5,6	0,6	0,2	0,5	0,2	31,2	29,8	0,1	100
2000	3,1	27,5	6,0	0,8	0,3	0,4	0,2	37,0	24,7	0,1	100
2001	3,3	28,0	7,2	0,7	0,1	0,4	0,2	40,4	19,6	0,1	100
2002	3,1	21,7	7,4	0,2	0,0	0,7	0,1	40,6	26,0	0,2	100
2003	6,1	16,8	5,8	0,0	0,0	0,8	0,1	45,2	25,1	0,1	100
2004	7,9	14,9	4,4	0,0	0,0	0,6	0,1	41,3	30,6	0,2	100
2005	8,1	18,5	3,2	0,0	0,0	0,2	0,1	45,3	24,4	0,2	100
2006	8,0	18,4	2,4	0,0	0,0	0,0	0,1	45,8	25,1	0,2	100
2007	7,9	20,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,1	49,6	18,7	0,3	100
2008	8,0	21,1	3,6	0,1	0,0	0,0	0,1	49,7	16,8	0,5	100
2009	8,5	20,1	2,3	0,2	0,0	0,0	0,2	49,3	18,5	1,0	100



Şekil 1.2. 1980 – 2008 arası ülkemizdeki kurulu güç kapasitesi (URL-5, 2011).



Şekil 1.3. 1980 – 2009 arası ülkemizdeki elektrik üretimi (URL-5, 2011).

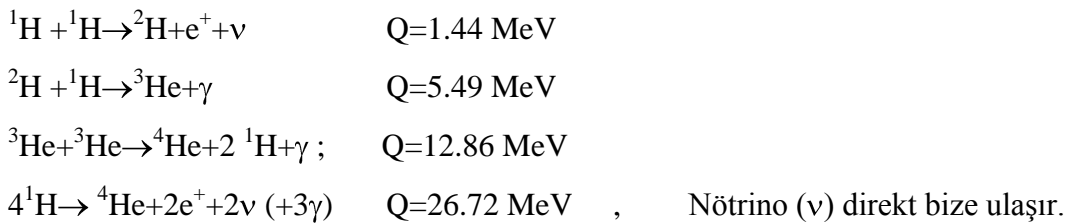


Şekil 1.4. 1980 – 2009 arası ülkemizdeki elektrik tüketimi (URL-5, 2011).

1.1. Güneş ve Güneş Enerjisi

Güneş, Samanyolu Galaksisindeki 200 milyar yıldızdan 'orta büyüklükte' biridir. Dünyaya en yakın yıldız olan güneş, yer kürenin başlıca enerji kaynağıdır. Yapı olarak bakıldığında %90'ı hidrojen, %10'u helyumdan oluşmaktadır. Bunun yanında çok az miktarda ağır metaller de içermektedir. Güneşin çapı yaklaşık 1.400.000 km (Dünyanın yaklaşık 109 katı), dünyaya uzaklığı ise 150 milyon km (8,3 ışık dakikası) 'dir. Yoğunluğu dünyanın ¼ ü kadardır. Kendi çevresinde dönüşünü 90 dünya gününde tamamlar. Merkez Sıcaklığı 20.000.000 °C 'dir. Güneş ortalama 6000K sıcaklıkta ışınım yapan bir cisim olarak kabul edilir. Nükleer yakıtlar dışında, dünyada kullanılan tüm yakıtların ana kaynağıdır.

Genel kabul gören görüşe göre güneş enerjisinin kaynağı, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışınım enerjisidir. Güneşin merkezi füzyon reaksiyonu için uygun bir ortamdır. Muhtemelen, hidrojen termonükleer bir reaksiyon sonucu helyuma dönüşmektedir. Olması muhtemel bir reaksiyon aşağıda gösterilmiştir. Bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan enerji çok fazladır. Her füzyon reaksiyonunda yaklaşık 25 MeV enerji üretilir. Saniyede 10^{38} reaksiyon gerçekleşir ve 4×10^{38} proton tüketilir. Güneşin yakıtı 10^{10} yıl devam edecek yeterliliktedir (Goswami vd., 2000), (Yiğit ve Atmaca, 2010) (Karamanav, 2007).



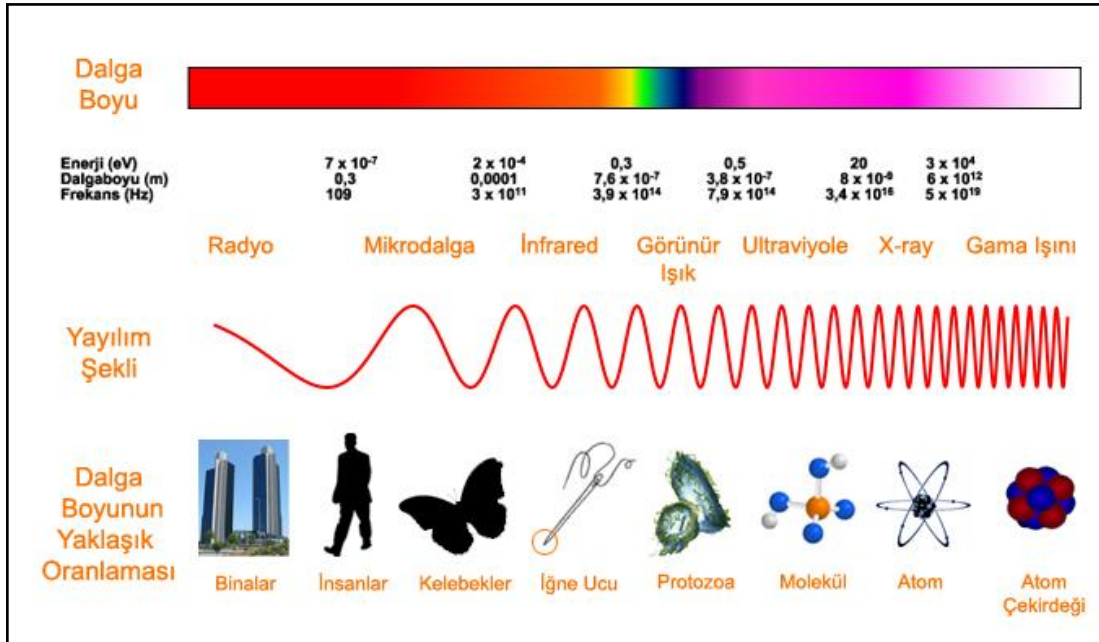
Güneşin merkezinde bir saniyede yaklaşık olarak 564 milyon hidrojen 560 milyon ton helyuma dönüşmektedir. Aradaki 4 milyon ton madde farkı ise enerjiye dönüşerek, ısı ve ışık enerjisi halinde uzaya yayılmaktadır. $E = mc^2 = 3,6 \times 10^{26}$ (Joule/saniye = Watt)

Güneşten 170 milyar MW ışınım enerjisi dünyaya gelmektedir. Güneşin ürettiği toplam enerji dikkate alındığında, bu çok küçük bir değerdir. Ancak bu tutar bile insanlığın bugün için kullandığı toplam enerjinin 15-16 bin katıdır.

Dünyanın dışına bir metre kare alana bir saniyede gelen güneş enerjisi 1367 W/m^2 'dir (Güneş Sabiti). Pratik olarak yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı değeri 1000 W/m^2 olarak kabul edilmektedir (Yiğit ve Atmaca, 2010).

Güneş ışınımının %9 u mor ötesinde, %45 i görünür ışık bölgesinde ve geri kalanı ise kırmızı altı bölgesinde bulunur. Her dalga boyunun şiddeti aynı değildir. Şekil 1.5 'de Elektromanyetik Spektrum görülmektedir (URL-7, 2011).

Güneş ışığına karşı her molekül farklı tepki gösterir. Örneğin; ozon, spektrumun ultraviyole bölgesindeki ışınları soğururken, su buharı ve karbondioksit öncelikle görünür ve kızılötesi bölgelerdeki ışınları soğurmaktadır (Messenger ve Ventre, 2004).

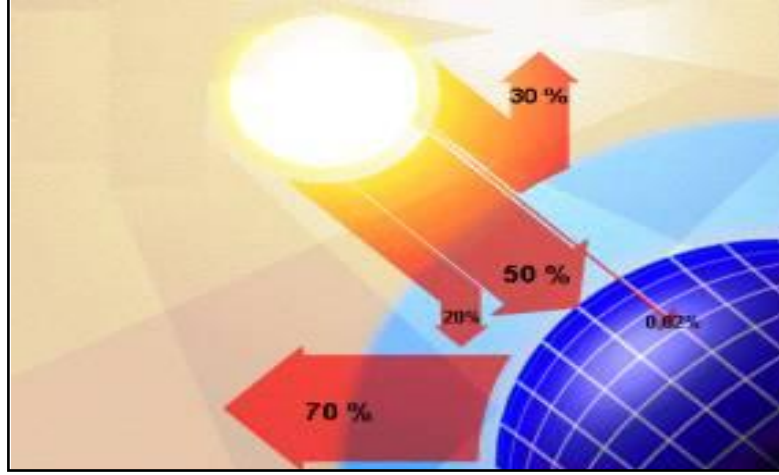


Şekil 1.5. Elektromanyetik Spektrum

Güneş ışınımının tamamı yer yüzeyine ulaşmaz, %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır. Güneşten gelen ışınımın %20'si atmosfer ve bulutlarda tutulur. Güneş ışınımının %50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile Dünya'nın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün olur. Rüzgar hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına da bu ısınma neden olur.

Yeryüzüne gelen güneş ışınımının %1'den azı bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır. Bitkiler, fotosentez sırasında güneş ışığıyla birlikte karbondioksit ve su kullanarak, oksijen ve şeker üretirler. Fotosentez, yeryüzünde bitkisel yaşamın kaynağıdır.

Şekil 1.6 'da görüldüğü gibi Dünya'ya gelen güneş ışınımı, sonunda ısıya dönüşür ve uzaya geri verilir (URL-1, 2011).



Şekil 1.6. Güneşten yeryüzüne ulaşan ve atmosferden yansıyan ışınım oranları

1.1.1. Kara Cisim Işıması ve Güneş Işığı Spektrumu

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

Güneşin yayınladığı enerji, kara cisimlerin uyduğu şu yasalarla belirtilebilir:

1. Wien Kayma Yasası: Kara cisim radyasyonu için farklı sıcaklıklardaki enerji dağılımının deneysel verileri incelenerek, yayınlanan enerjinin dalga boyu ve sıcaklıkla değiştiği bulunmuştur. Kara cismin sıcaklığı yükselince, yayınladığı toplam enerji miktarı da artar. Artan sıcaklıkla, dağılımın tepe noktası daha kısa dalga boylarına kayar. Bu kayma miktarı Wien Kayma Yasası adı verilen (1.1) bağıntısına uymaktadır.

$$\lambda_{\max}T = 0,2898 \times 10^{-2}m.K \quad (1.1)$$

Burada; λ_{max} yayınlanan radyasyonun dalga boyu için elde edilebilecek en büyük değerdir. T radyasyonu yayınlayan cismin sıcaklığıdır. Radyasyon spektrumunu açıklayabilmek için a dalga boyu aralığında yayınlanan birim alan başına gücü, I(a,T) şeklinde tanımlamak kolaylık sağlar. Kara cisim ışımasının klasik modeline göre yapılan hesabın sonucu,

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4} \quad (1.2)$$

bağıntısı ile ifade edilen Rayleigh-Jeans Yasası 'dır. Burada k, Boltzmann sabitini göstermektedir. Rayleigh-Jeans Yasası uzun dalga boylarında başarılı olmakla birlikte, kısa dalga boyları için yapılan hesaplamalarda deneysel verilerle uyumlu değildir. Ayrıca Rayleigh-Jeans bağıntısına göre, tüm frekanslardaki radyasyon enerjileri toplamının sonsuz olması gerektiği gibi yanlış bir sonuç ("mor ötesi felaket" diye bilinir) çıkmaktadır. Elektromanyetik alanda sonsuz bir enerji mümkün olmayan bir durumdur (Serway, 1996).

2.Planck Yasası: Max Planck, bu yanlışlığı düzeltebilmek için kara cisim ışımasının kuantalanmış olduğu varsayımını kullanarak,

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1.3)$$

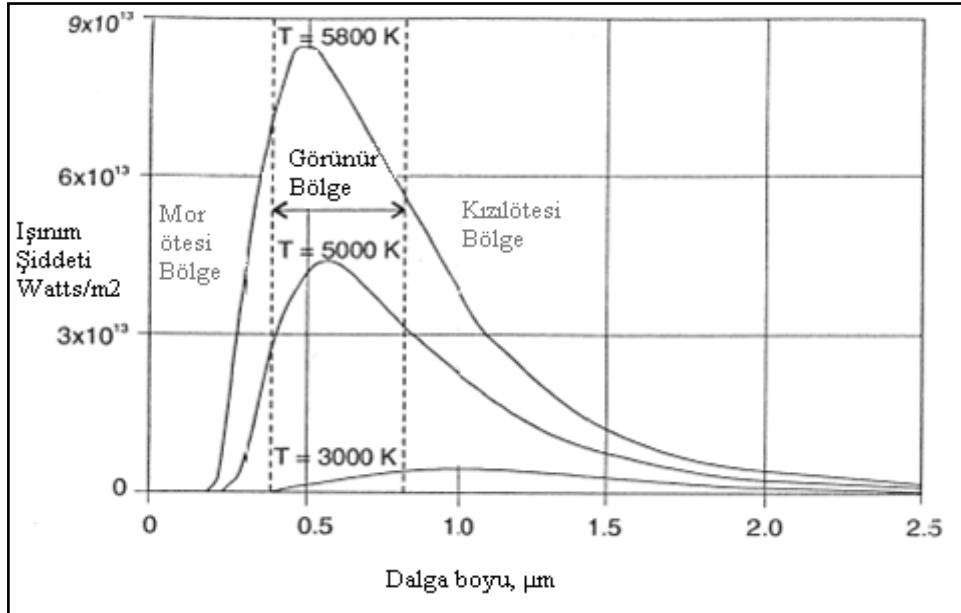
bağıntısına ulaşmıştır. Buradaki $I(\lambda, T)$ enerji yoğunluğu (W/m^2), k (boltzman sabiti) = $1,38 \times 10^{-23}$ joule/K, h (planck sabiti) = $6,626 \times 10^{-34}$ J.s, c (ışık hızı) = 300000 km/s ve λ dalga boyu (m) 'dur. Tüm dalga boylarında yapılan hesaplamalarda, deneysel verilerle tam bir uyum içinde olan bu bağıntı Planck Yasası 'dır (Messenger ve Ventre, 2004), (Serway, 1996).

3.Boltzmann Yasası: Bunlardan başka, her sıcaklıkta kara cisim ışımasını açıklamak için bir de Stefan-Boltzmann Yasası kullanılır. Bu yasaya göre; her cisim, her sıcaklıkta, bütün doğrultularına ışınlar halinde enerji gönderir. Cismin birim yüzeyinden birim zamanda yayınlanan enerji,

$$I = \sigma_{sb} T^4 \quad (1.4)$$

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

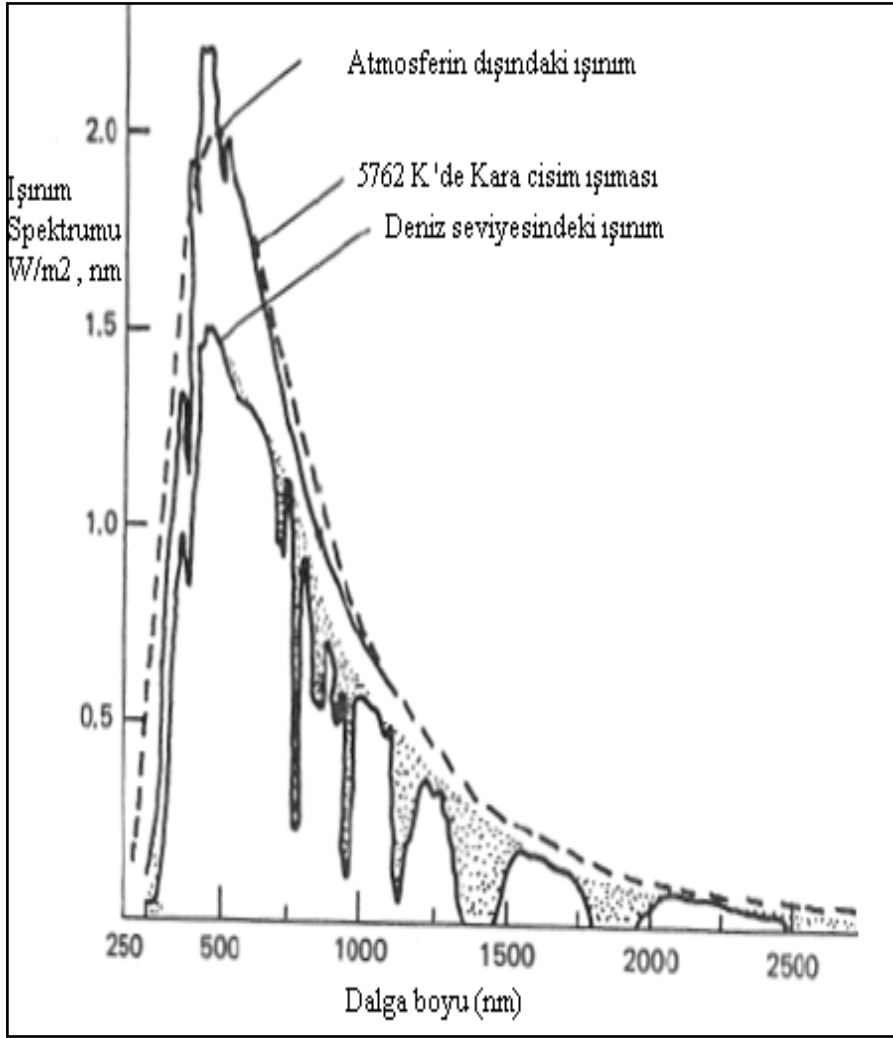
Güneşten yayılan enerji düzgün olarak ve her yöne dağılmaktadır. Bu enerji yayılımı eşitlik (1.3)'de gösterilen Planck'ın Kara Cisim Işıması formülüyle uyumaktadır (Messenger ve Ventre, 2004). Eşitlik (1.3) incelendiğinde görülecektir ki; belli bir dalga boyundaki ışıktan elde edilecek enerji şiddeti ışığın dalga boyuna ve sıcaklık derecesine bağlıdır. Bununla ilgili olarak Şekil 1.7 'de değişik sıcaklık dereceleri için Kara Cismin ışınım şiddeti grafiği çıkartılmıştır (Messenger ve Ventre, 2004).



Şekil 1.7. Kara cismin değişik sıcaklık dereceleri için ışınım şiddeti grafiği

Görüldüğü üzere düşük sıcaklıklara doğru gidildikçe, ışınım şiddetinin tepe değeri sağa doğru kaymaktadır. Gerçek hayatta da karşılaştığımız durumlar buna uygundur. Örneğin, ısı yayan bir cismin sıcaklığı arttıkça kızarmaya başlar ve bu durum yaydığı enerjinin görünür ışık bölgesine doğru kaydığını gösterir. Eğer sıcaklığı daha da artarsa rengi maviye yaklaşır çünkü görünür ışık bölgesi de kendi içinde renk tayflarına ayrılır.

Şekil 1.8 'de görüldüğü üzere güneşin spektrumu kara cismininkine oldukça yakındır. Çoğu ışık kaynağı kara cismin veya güneşin yaydığı ışık spektrumunda ışık vermez. Diğer bir ifadeyle yaydığı ışıkta her dalga boyuna ilişkin bileşen olmayabilir. Bu husus özellikle fotovoltaik hücrelerle ilgili ölçüm ve deneyler yaparken kullanılan ışık kaynaklarına dikkat edilmesi açısından önem arz etmektedir (Messenger ve Ventre, 2004).



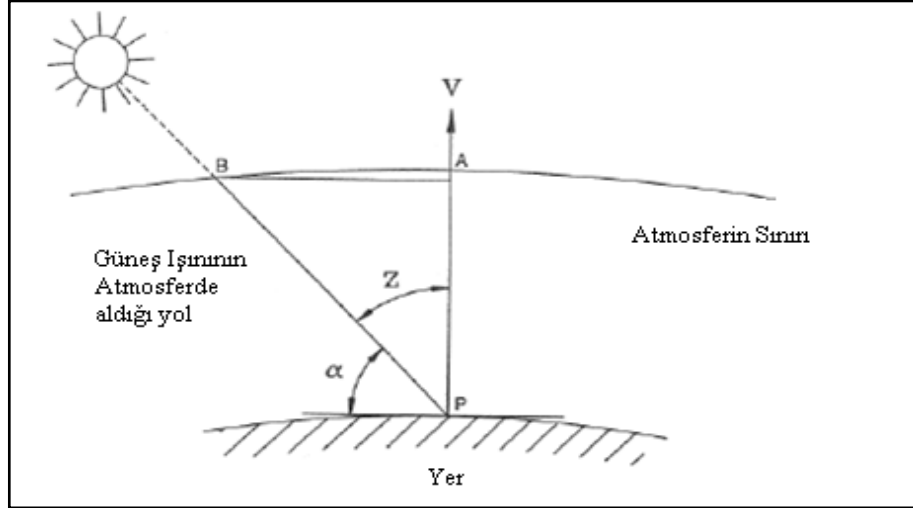
Şekil 1.8. Güneş ışığı spektrumu (Goswami vd., 2000).

1.1.2. Hava Kütlesi

Bölüm 1.1 'de, ışığın atmosferde yansıtıcı, dağıtıcı ve soğurucu etkilere maruz kaldığından bahsedildi. Işığın bu etkenlerden ne kadar etkilendiği atmosferde kat ettiği yolun uzunluğuyla doğru orantılıdır (Goswami vd., 2000), (Messenger ve Ventre, 2004), (Strong ve Scheller, 1993).

Işığın atmosferde kat ettiği yolun göstergesi olarak hava kütlesi (air mass) tanımlanmıştır. Şekil 1.9 'da gösterildiği gibi hava kütlesini ışığın atmosferde kat ettiği yolun, güneş tam tepede olsaydı ışığın deniz seviyesine kat edeceği yola oranı şeklinde tanımlayabiliriz (Goswami vd., 2000), (Messenger ve Ventre, 2004), (Nelson, 2003).

$$\text{Air Mass} = AM = \frac{(BP)}{(AP)} = \text{cosec } a = \sec z \quad (1.5)$$



Şekil 1.9. Hava kütlesi tanımlaması (Goswami vd., 2000).

Yukarıdaki tanımlamadan hareketle şöyle bir genelleme yapabiliriz; Atmosferin hemen dışındaki herhangi bir nokta için Hava Kütlesi 0, Deniz seviyesinde ve güneş tam tepedeyken Hava Kütlesi 1, Deniz seviyesinden yukarıda ve güneş tam tepedeyken $0 < \text{Hava Kütlesi} < 1$, Güneş tepede değilken yerdeki herhangi bir nokta için Hava Kütlesi > 1 , Güneş, yüzey normaline 48° açıyla gelirken Hava Kütlesi = 1,5 'dur.

Fotovoltaik ölçümler, standart olarak Hava Kütlesi = 1,5 'da yapılmaktadır. AM0 şartında yani atmosferin hemen dışındaki bir noktada güneşin ışınım şiddeti 1367 W/m^2 iken AM1 şartında yani deniz seviyesinde bir noktaya güneş dik olarak geldiğinde ışık şiddeti yaklaşık 1000 W/m^2 'ye düşmektedir. Yani, AM1 şartı altında atmosfer, güneş ışığı enerjisinin yaklaşık %30'unu geri yansıtmakta veya soğurmaktadır. Değişik Hava Kütlesi şartları altında güneş ışınımının ne kadarının yere ulaşacağı konusunda bir çok farklı yaklaşım metodu çıkartılmıştır. Bunlardan Meinel 'e göre elde edilen ışık şiddeti ve Hava Kütlesi arasında şöyle bir ilişki kurulabilir (Goswami vd., 2000), (Messenger ve Ventre, 2004), (Threlkeld ve Jordan, 1958):

$$I = 1367 \times (0.7)^{(AM)^{0.678}} \quad (1.6)$$

Eşitlik (1.6) 'daki formülün bazı AM değerleri için sonuçları Tablo 1.3'de gösterilmiştir.

Tablo1.3. Bazı AM değerlerine karşılık gelen ışınım şiddeti ve açı değerleri

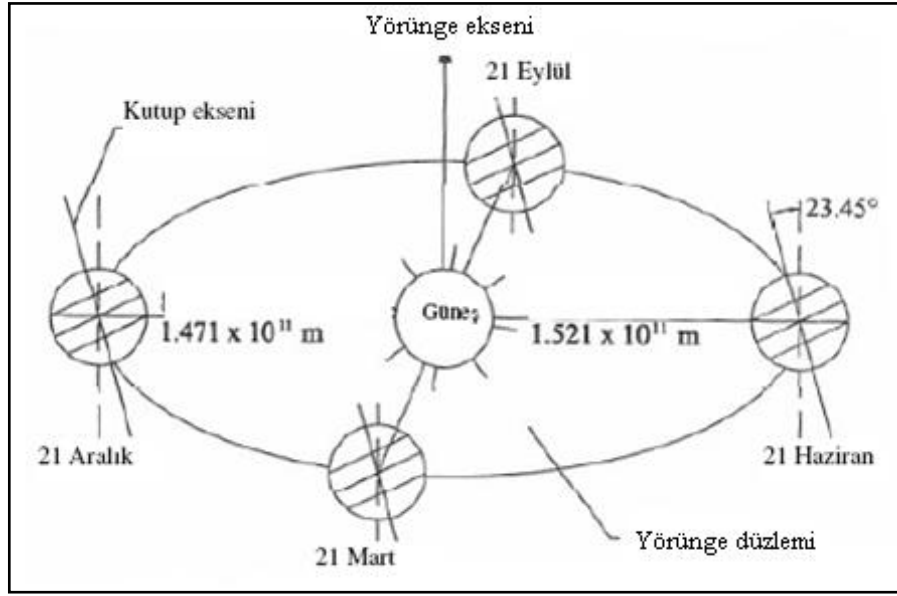
Air Mass (AM)	Yere Ulaşan Işınım Şiddeti (I) (W/m^2)	Güneş Işığının Yüzey Normaliyle Yaptığı Açı (Derece)
0	1367	0
1	957	0
1,15	923	30
1,5	855	48
2	773	60
3	645	70
5	473	78
10	250	84

Tablo 1.3 'de görülen, yere ulaşan ışınım şiddetindeki düşüş tamamen güneş ışınlarının atmosferde güç kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla şu hususu özellikle vurgulamak gerekir; güneş takip sistemlerinin kullanım amacı ışık şiddetindeki bu azalmaları telafi etmek değildir. Güneş takip sistemlerinin kullanım amacı; güneş ışınlarının yüzeye sürekli dik gelmesini sağlayarak elde edilen enerji miktarını artırmaktır. Gerçek ışınım şiddeti, güneşin mevsimsel ve günlük hareketlerine ve atmosferin durumuna göre değişmektedir (Bilgin, 2006).

1.1.3. Güneş - Dünya Geometrisi

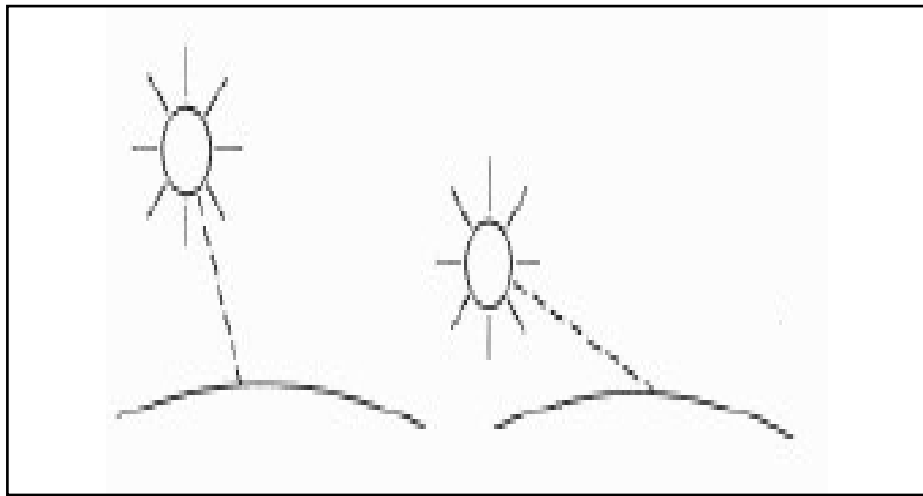
Şekil 1.10 dünyanın güneş etrafındaki yıllık yörüngesini göstermektedir. Dünyanın güneşle olan mesafesi 21 Aralıkta en kısa mesafeye inerek $1,471 \times 10^{11}$ m olurken, 21 Haziranda en uzun mesafeye çıkarak $1,521 \times 10^{11}$ m olmaktadır (Bureau, 2004).

Dikkat edilirse; dünya ile güneş arasındaki mesafe en kısa olduğu zaman kış mevsimini, en uzun olduğu zaman ise yaz mevsimini yaşamaktayız. Tabi güney yarım kürede durum bunun tam tersidir. Buradan hareketle şu sonuca varabiliriz; dünyadaki mevsimsel ve günlük sıcaklık değişimleri güneşe yakınlıktan ziyade güneş ışınlarının yere geliş açısıyla ilgilidir. Mevsimsel değişimler, dünyanın kutup eksenindeki $23,45^\circ$ 'lik eğimi ve güneş etrafındaki dönüşünden kaynaklanmaktayken, günlük değişimler dünyanın kendi eksenini etrafındaki dönüşünden kaynaklanmaktadır.



Şekil 1.10. Dünyanın güneş etrafındaki hareketi (Goswami vd., 2000).

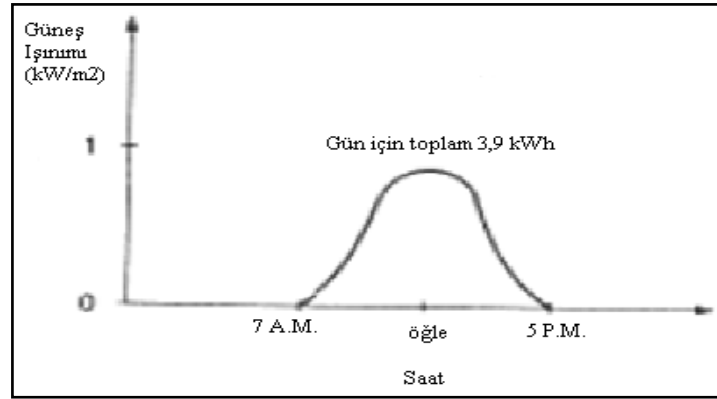
Şekil 1.11 'de görüldüğü gibi yaz mevsiminde güneş ışınları atmosfere daha dik açıyla girerken kış mevsiminde daha eğimli bir açıyla gelmektedir. Dolayısıyla güneşin günlük hareketinin (doğuş ve batış) yanı sıra bir de mevsimsel hareketi söz konusudur. Güneş takip sistemi tasarımlarında her iki değişimde dikkate alınarak tek eksende veya çift eksende takip yapabilen sistemler geliştirilebilmektedir (Kalogirou, 1996), (Rumala, 1986), (Zogbi ve Laplaze, 1984).



Şekil 1.11. Güneşin yaz (soldaki) ve kış aylarında gökyüzündeki açısı (Strong ve Scheller, 1993).

1.1.4. Eşdeğer Tam Güneş Saati

Birim zamandaki ışınım W/m^2 birimiyle ölçülür ve anlık bir büyüklüktür. Örneğin; atmosferin hemen dışında yani AM0 şartında ışınım $1367 W/m^2$ 'dir ve sabit kabul edilir. Atmosferi geçtikten sonra AM1 şartı altında bu değer yaklaşık $1000 W/m^2$ 'ye düşmektedir. Toplam ışınım ise belli bir süre zarfında toplanan güç miktarıdır ve kWh/m^2 birimiyle gösterilir.



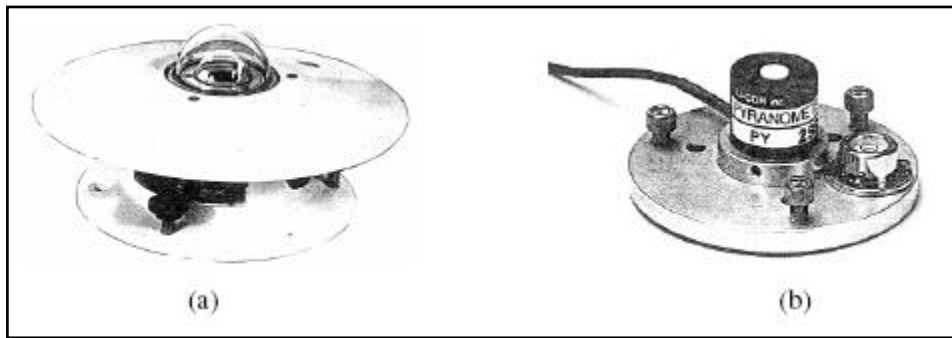
Şekil 1.12. Sabit yatay bir yüzeye gün boyunca düşen güneş ışınımına bir örnek

Eşdeğer tam güneş saati (equivalent peak sun hours (psh)) ise; bir yere gün boyunca düşen ışınım gücü toplamının kaç kWh/m^2 olduğunun ölçüsüdür. Yani Şekil 1.12 örneğinde görülen yer için sabah-öğle-akşam saatlerinde farklı şiddetteki ışık enerjisi toplamı 3,9 kWh'dir ve bu noktanın eşdeğer tam güneş saati 3.9 kWh (psh) demektir (Messenger ve Ventre, 2004), (Strong ve Scheller, 1993).

1.1.5. Güneş Işınımını Ölçme

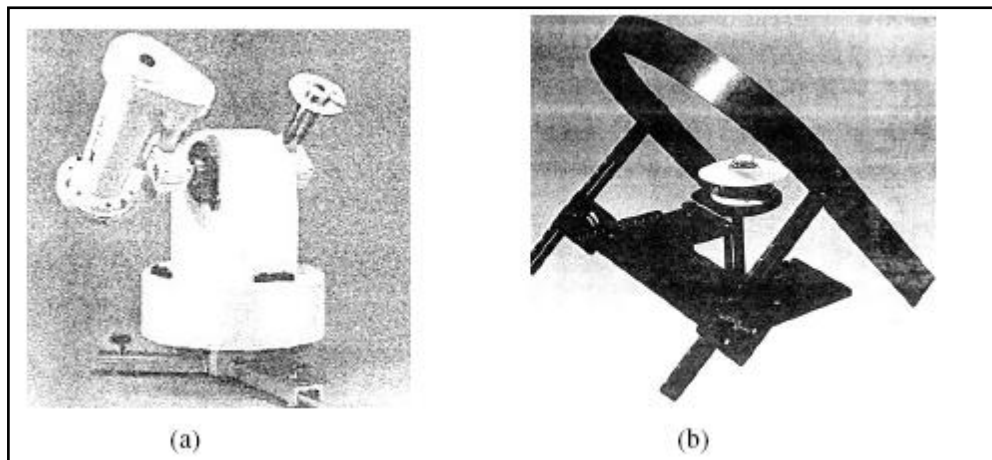
Güneş ışınımı her ne kadar varsayımlar ve teorik hesaplarla herhangi bir bölge için tahmin edilebilse de bir bölgedeki gerçek güneş ışınımı değerlerini bulmak için ölçümler yapmak gerekmektedir. Hatta bu değerlerin daha sağlıklı bir netice vermesi için ölçümlerin uzun süreli yapılarak ortalama bir değer elde edilmesi gerekmektedir. Çünkü önceki bölümlerde de açıklandığı gibi herhangi bir yere her herhangi bir tarih ve zamanda düşen güneş ışınımı şiddeti birçok değişkene bağlı olarak (atmosfer koşulları, çevresel şartlar vs.) ani değişiklikler gösterebilmektedir (Bilgin, 2006).

Güneş ışınımı şiddetini ölçmek için temelde iki farklı tür cihaz kullanılmaktadır. Bunlar, piranometre (pyranometer) ve pirheliyometre (pyrheliometer)'dir (Şekil 1.13). Piranometre, yarı küresel bir görüş açısına sahiptir ve bu sebeple direkt ve dağınık ışınımın toplamını ölçmek için kullanılırlar. Pirheliyometre ise daha dar (yaklaşık 5°) bir görüş açısına sahiptir ve bu sebeple daha çok güneşten gelen direkt ışınımı ölçmek amacıyla kullanılır. Piranometre ayrıca direkt ışınımı engelleyen bir bant kullanılarak sadece dağınık ışınımı ölçmek amacıyla da kullanılabilir (Goswami vd., 2000), (Messenger ve Ventre, 2004), (Strong ve Scheller, 1993).



Şekil 1.13. Tipik ticari piranometre örnekleri (a) termal dedektörlü (b) fotovoltaik dedektörlü

Pirheliyometre kullanarak direkt güneş ışınımı şiddetini ölçerken doğru bir ölçüm için cihazın güneşe tam dik açıyla bakması gerekmektedir (Şekil 1.14). Eğer ölçümü belli bir süre içerisinde sürekli yapacaksak bu cihazı güneş takip sistemiyle bütünleşik bir yapıda kullanmak gerekmektedir. (Kalogirou, 1996), (Rumala, 1986), (Zogbi ve Laplaze, 1984).



Şekil 1.14. (a) Çift eksen güneş takip sistemli pirheliyometre (b) Bantlı piranometre

1.2. Türkiye'de Güneş Enerjisi

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde (DMİ) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınlam şiddeti verilerinden yararlanarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınlam şiddeti 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Tablo 1.4 'de verilmiştir (URL-8, 2011).

Tablo 1.4. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli

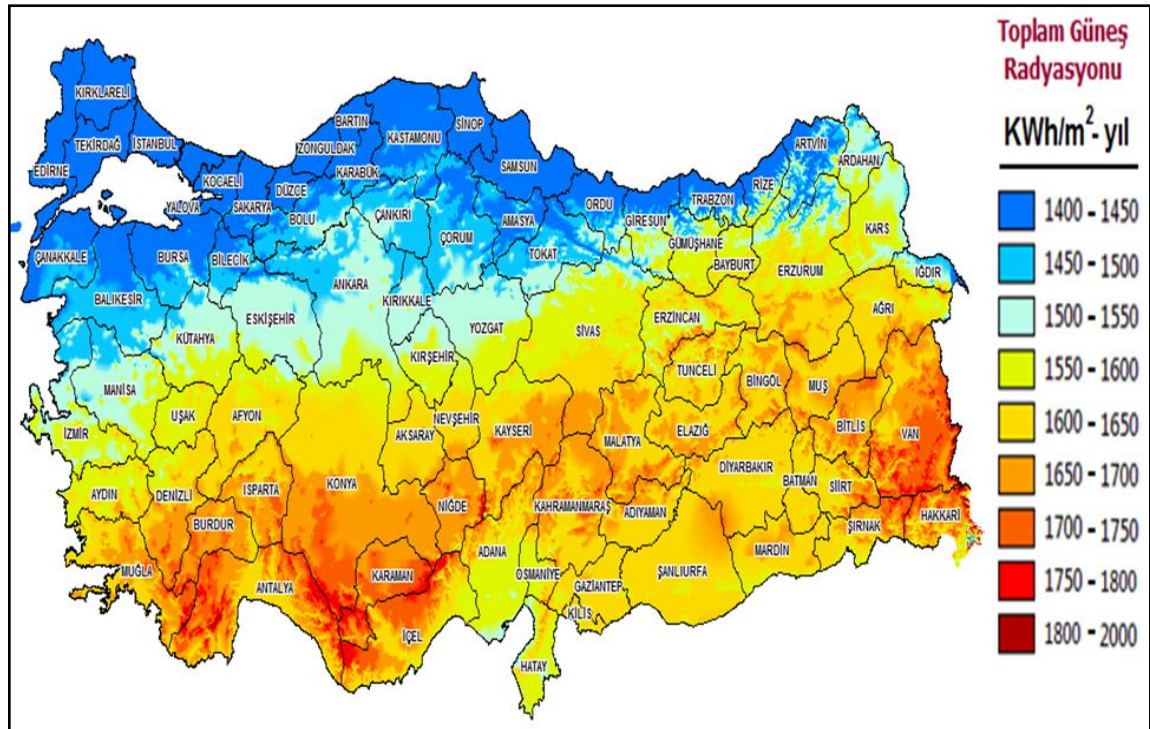
AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ
	(Kcal/cm ² -ay)	(kWh/ m ² -ay)	(Saat/ay)
OCAK	4,45	51,75	103
ŞUBAT	5,44	63,27	115
MART	8,31	96,65	165
NİSAN	10,51	122,23	197
MAYIS	13,23	153,86	273
HAZİRAN	14,51	168,75	325
TEMMUZ	15,08	175,38	365
AĞUSTOS	13,62	158,4	343
EYLÜL	10,6	123,28	280
EKİM	7,73	89,9	214
KASIM	5,23	60,82	157
ARALIK	4,03	46,87	103
TOPLAM	112,74	1311	2640
ORTALAMA	308,0 cal/cm ² -gün	3,6 kWh/m ² -gün	7,2 saat/gün

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı da Tablo 1.5 'de verilmiştir.

Tablo 1.5. Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/ m ² -yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

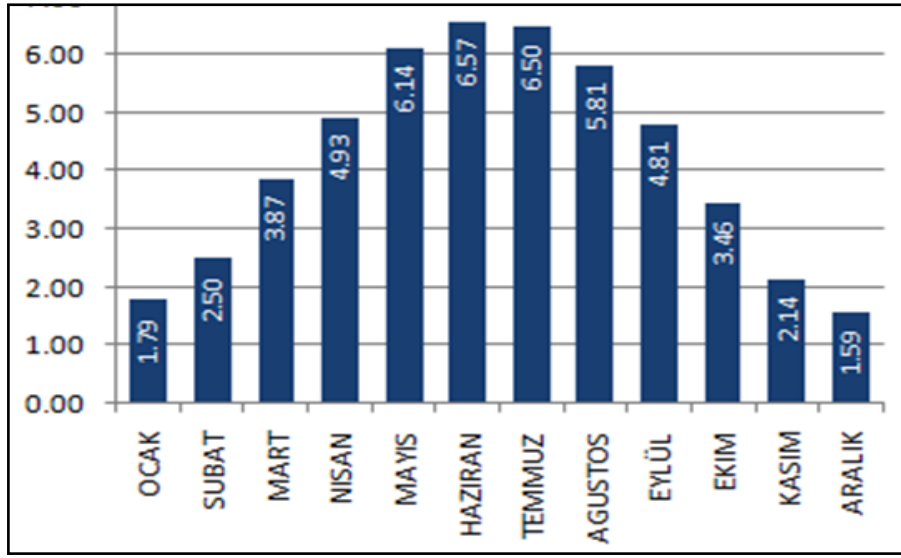
Ancak, bu değerlerin, Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. 1992 yılından bu yana EİE ve DMİ, güneş enerjisi değerlerinin daha sağlıklı olarak ölçülmesi amacıyla enerji amaçlı güneş enerjisi ölçümleri almaktadır. Devam etmekte olan ölçüm çalışmalarının sonucunda, Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin eski değerlerden %20-25 daha fazla çıkması beklenmektedir (URL-8, 2011).



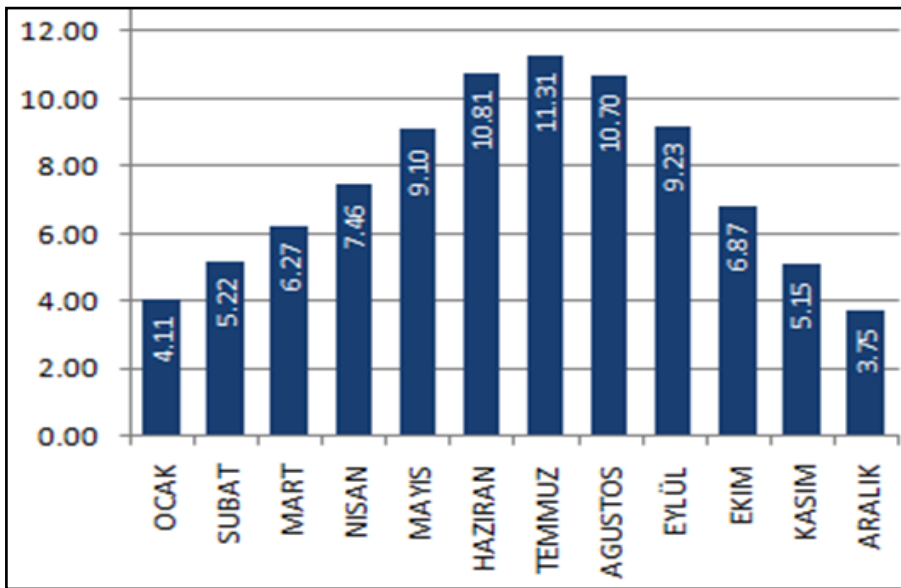
Şekil 1.15. Türkiye'nin güneş enerjisi haritası

Türkiye'nin güneş ışınlarını alma potansiyeli Şekil 1.15 'de gösterilmiştir (URL-8, 2011). Bu haritadan güney bölgelerimizin güneş alma açısının kuzey bölgelerimizden daha iyi olduğu görülmektedir.

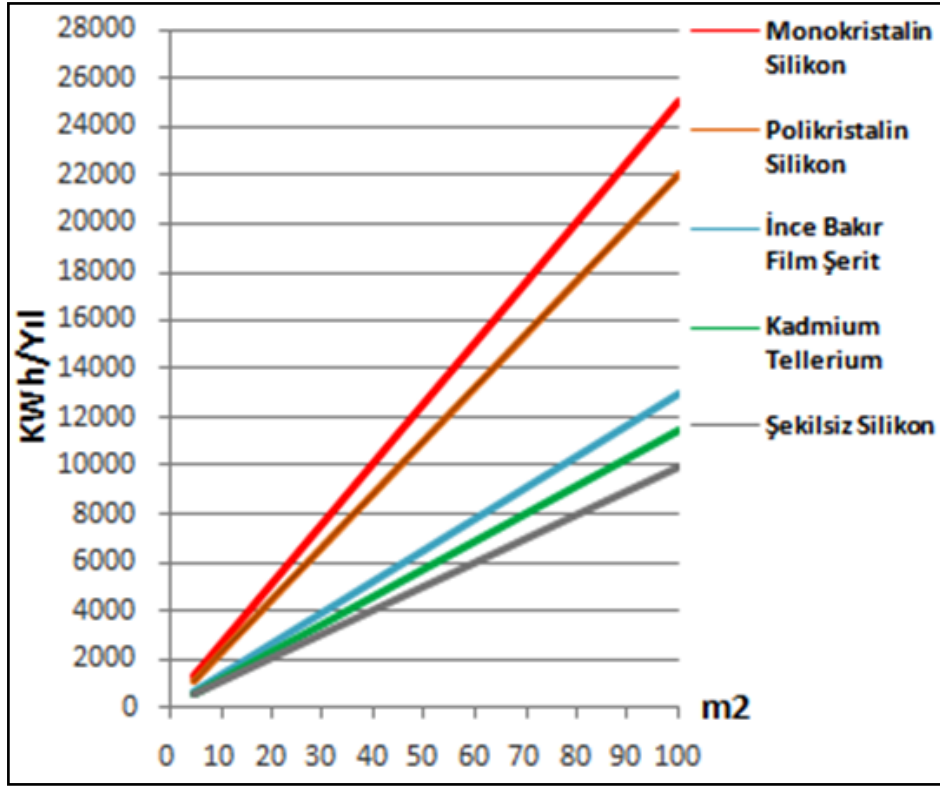
EİE ve DMİ istasyonlarında 1985 - 2006 yıllarına ait ölçüm yapılan 22 yıllık güneş ölçüm değerleri sonucu hazırlanan Radyasyon Değerlerini, Güneşlenme Sürelerini ve Fotovoltaik malzeme türüne göre üretilebilecek enerji değerlerini gösteren grafikler Şekil 1.16, Şekil 1.17 ve Şekil 1.18 'de gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Türkiye global radyasyon değerleri (KWh/m²-gün)



Şekil 1.17. Türkiye güneşlenme süreleri (Saat)



Şekil 1.18. Türkiye PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (Kwh-Yıl)

1.3. Güneş Enerjisi Teknolojileri

Güneş enerjisi teknolojileri; yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte Güneş Pilleri ve Isıl Güneş Teknolojileri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir.

Ülkemizde güneş enerjisinin en ekonomik ve en yaygın kullanılan türü güneş enerjisi ile su ısıtma sistemleridir(Güneş Kollektörleri). Su ısıtma sistemlerinden sonra en yaygın ve ticari olarak kullanılan sistemler ise güneş pilleridir.

1.3.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik piller de denen bu yarıiletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler (URL-9, 2011). Bu enerji çevriminde hareketli parça bulunmaz. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, fotovoltaik olayına dayanır.

1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaik olayını

bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir.

1914 yılında fotovoltaiik diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaiik diyotlar ilk kez 1954 yılında Chapin tarafından silikon kristali ile gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaiik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaiik güç sistemleri 1960'ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir.

Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'lerde başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki 1. petrol bunalımını izleyen yıllarda olmuştur.

Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silisyum kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarıiletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir.

Yakın geçmişe kadar alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaiik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek "sosyal maliyet" göz önüne alındığında, fotovoltaiik sistemler fosile dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilir (Karamanav, 2007).

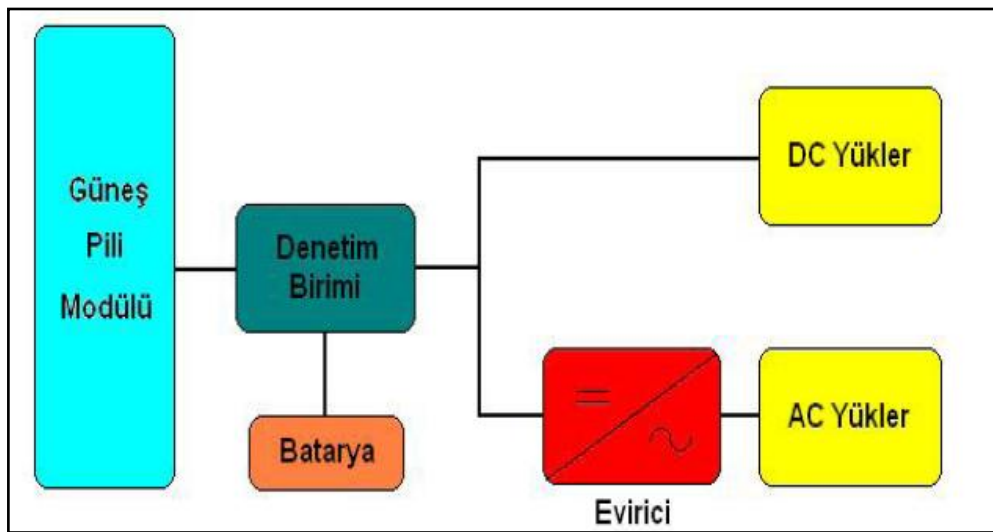
1.3.2. Güneş Pillerinin Kullanım Alanları

Güneş pilleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak, akümülatörler, eviriciler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş pili sistemi (fotovoltaiik sistem) oluşturulur. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik

şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür (Karamanav, 2007).

Bu sistemlerde yeterli sayıda güneş pili modülü, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin 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 denetim birimi ise akünün durumuna göre, ya güneş pillerinden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı keser. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir evirici eklenerek akümülatördeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz.lik sinüs dalgasına dönüştürülür. Bazı sistemlerde, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazı bulunur. Şekil 1.19 'da şebekeden bağımsız bir güneş pili enerji sisteminin şeması verilmektedir (URL-10, 2011).

Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri yüksek güçte santral boyutunda sistemler olabileceği gibi küçük güçlü sistemler de olabilir. Bu sistemlerde örneğin bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerjinin depolamasına gerek yoktur, yalnızca üretilen DC elektriğin, AC elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir.



Şekil 1.19. Güneş pili enerji sistemi

Şekil 1.20 'de çatısı güneş pili kaplı bir ev, Şekil 1.21 'de şebekeye elektrik veren bir güneş pili sistemi ve Şekil 1.22 'de Güneş pilleri ile sokak aydınlatmasının bir örneği görülmektedir (URL-10, 2011).



Şekil 1.20. Çatısı güneş pili kaplı ev



Şekil 1.21. Şebekeye elektrik veren güneş pili sistemi



Şekil 1.22. Güneş pilleri ile sokak aydınlatması

1.3.3. Isıl Güneş Teknolojileri

Bu sistemlerde öncelikle güneş enerjisinden ısı elde edilir. Bu ısı doğrudan kullanılabilir gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir. Isıl Güneş Teknolojileri Düşük Sıcaklık Sistemleri (düzlemsel güneş kolektörleri, vakumlu güneş kolektörleri, güneş havuzları, güneş bacaları, su arıtma sistemleri, güneş mimarisi, güneş ocakları, ürün kurutma ve seralar... vb.) ve Yoğunlaştırıcı Sistemler (Parabolik Oluk Kolektörler, Parabolik Çanak Sistemler, Merkezi Alıcı Sistemler... vb.) olarak iki şekilde ele alınabilir (URL-9, 2011).

2. GÜNEŞ PİLLERİ

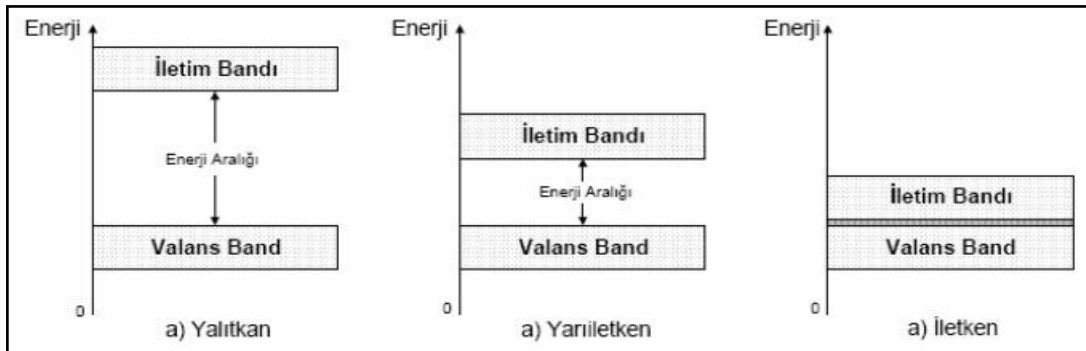
2.1. Yarıiletkenler ve Fotoelektrik Olayı

2.1.1. Yarıiletkenler

Atom, pozitif yüklü bir çekirdekle, onun etrafında belirli yörüngelerde dolanan elektronlardan meydana gelmiştir. Son tabaka elektronlarına valans (denge) elektronları denir ve cisimlerin kimyasal bileşikler yapmalarını temin eder.

Bir atomun karakteristik özelliğini son yörüngesinde bulunan elektronlar belirlemektedir ve bu elektronların olduğu banda *valans bandı* denmektedir. Valans bandındaki bazı elektronlar o kadar enerjik olabilirler ki biraz daha üst enerji seviyesine sıçrayabilir ve dışarıdan uygulanacak hafif bir etkiyle atomdan kopabilirler. Bu tür elektronlar elektrik ve ısı iletiminde aktif rol oynarlar ve bunların bulunduğu banda *iletkenlik bandı* denir. Valans bandı ve iletkenlik bandı arasındaki enerji seviyesine *band aralığı* (band gap) veya yasak aralık denir (Goswami vd., 2000), (Messenger ve Ventre, 2004), (Floyd, 2002).

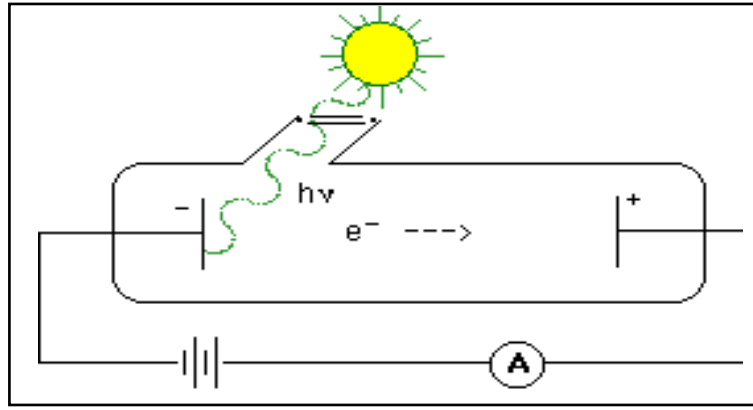
Valans Bandı ile iletim bandı arasındaki enerji seviyesinin değerine göre maddeler yalıtkan, yarıiletken ve iletken olarak üçe ayrılabilir. İletim ve Valans bandları arasındaki enerji aralığında elektronların bulunma olasılığı yoktur. Bu bölgeye yasak enerji aralığı denir. İki atomu birbirine bağlayan valans elektronların serbest hale geçmesi için gerekli olan enerji, yasak enerji aralığına eşit olup; bu enerjinin değeri metaller için sıfır, yalıtkanlar için birçok eV, yarı iletkenler için 1eV civarındadır (Karamanav, 2007).



Şekil 2.1. Enerji bandları

2.1.2. Fotoelektrik Olay

1890 yılında Hertz tarafından ilk kez gözlenen bu olayda, temiz bir metal yüzeye düşen ışık ışınları metal yüzeyden elektronların koparak serbest hale geçmesine yol açarlar. Bu metal yüzeye (katot) başka bir metal (anot) arasına bir potansiyel farkı uygulanırsa ampermetrede bir akım ölçülebilir (Karaoğlu, 1997).



Şekil 2.2. Fotoelektrik olayı incelemek üzere hazırlanmış bir deney

Fotoelektrik olayın, klasik fizikle açıklanması imkansız olan şu özellikleri sayılabilir:

- Yüzeyden elektron kopması ancak, düşen ışığın frekansı bir eşik değerden büyük olduğu zaman başlar.
- Salınan elektronların kinetik enerjisi ışığın şiddetinden bağımsız fakat frekansa lineer olarak bağımlıdır.

Fotoelektrik olay olabilmesi klasik teoriye göre mümkün, ama gözlenen bu davranışları klasik olarak açıklamak mümkün değildir. Örneğin, ışığın taşıdığı enerji (her elektromanyetik dalga gibi) ışık şiddetiyle orantılıdır. Bu durumda, elektronların kazandığı enerjinin de ışığın şiddetine bağımlı olması beklenirdi. Ayrıca, elektronların enerjilerinin frekansa bağımlı oluşunu klasik olarak açıklamak mümkün değildir.

Işığın bir dalga olmayıp enerji kuantumu paketlerinden oluştuğu fikri 1905 yılında Einstein tarafından ortaya atıldı. Buna göre, frekansı γ olan bir ışık demeti her biri $E=h\gamma$ kadar enerji kuantumu taşıyan fotonlardan oluşur. Bu fotonlardan biri metal yüzeyde soğrulduğunda $h\gamma$ kadar enerji bırakır. Bu enerjiyi alan bir elektron yüzeyden kopabilmek

için W kadar bir enerji (İş fonksiyonu) harcayarak serbest hale geçebiliyorsa kalan miktar onun kinetik enerjisi olur:

$$\frac{1}{2}mV^2 = h\gamma - W \quad (2.1)$$

$h\gamma$ değeri W den küçük olduğunda elektronlar kopmayacağından, eşik frekansının varlığı da böylece açıklanmış olur (Karaoğlu, 1997).

Böylece Einstein ışığın bir dalga olmayıp, parçacıklar topluluğu (fotonlar) topluluğu olması gerektiğini ortaya attı. Burada bir çelişki ile karşılaşyoruz. Newton zamanından beri girişim ve kırınım olayları ışığın dalga karakterinde olmasını gerektiriyordu. Parçacık yapısındaki enerji kuantumları cinsinden bu olayları açıklamak mümkün değildir.

Daha sonra görüleceği üzere, bu görünürdeki çelişki dalga-parçacık ikilemi olarak bilinir. Burada kısaca açıklarsak, modern yoruma göre her iki karakter de doğrudur: Işık bazı olaylarda dalga, bazı olaylarda da parçacık gibi davranır. Ama bir olay sırasında iki karakteri de aynı anda göstermez.

Einstein'ın fotoelektrik formülü daha sonra Milikan tarafından yapılan çok hassas deneylerle de doğrulandı.

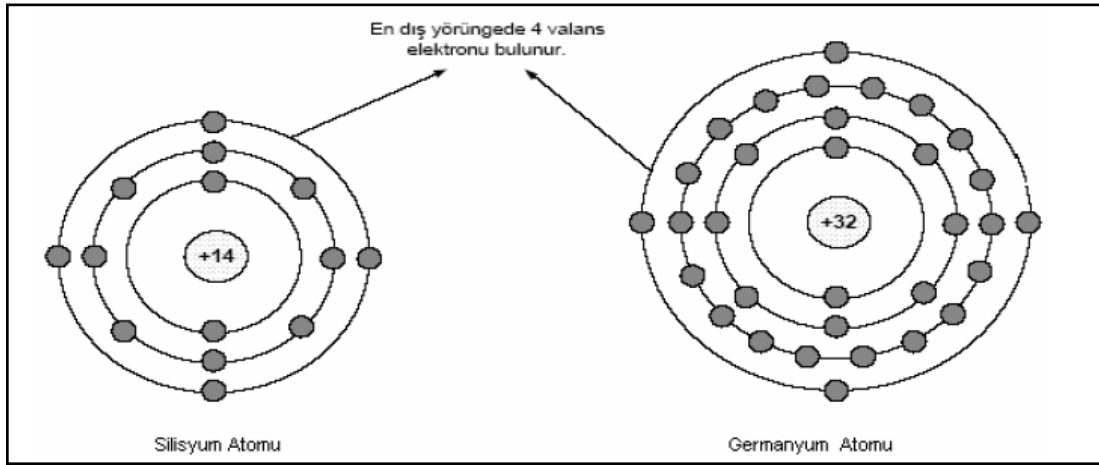
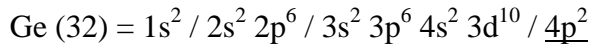
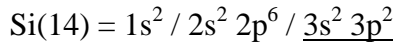
Planck ışık enerjisinin $h\gamma$ nin katları halinde alınıp verildiğini söylemişti. Einstein bir adım daha atarak, ışığın $E = h\gamma$ kadar enerjiye sahip parçacıklardan oluştuğunu gösterdi (Karaoğlu, 1997).

2.1.3. Silisyum ve Germanyum

Güneş pili hücreleri yarı iletken malzemelerden yapılıdır. Silisyum en çok kullanılan yarı iletken malzemedir. Silisyum atomunun 14 elektronu vardır. Üç halka şeklinde çekirdeğin etrafında hareket ederler. İlk halkada iki, ikinci halkada sekiz elektron çekirdeğe yakın şekilde hareket eder. Son halkada 4 elektron vardır. Silisyum son halkadaki 4 elektrona bir başka 4 elektron ekleyip son halkasındaki elektron sayısını 8 'e çıkarmaya çalışır. Halkadaki 4 elektron yanı başındaki diğer silisyum atomundaki 4 elektrona bağlanır. Bu bağlantı diğer komşu atomlarla devam eder ve silisyum saf kristal yapısına kavuşmuş olur.

Bağlanacak elektronu kalmayan kristal silisyum atomunun iletkenliği çok zayıflar. Çünkü elektronlar sıkıca birbirine bağlı olduğundan bağlanacak elektron arayışı son bulmuştur (Özgöçmen, 2007).

Saf silisyuma ısı verilirse, bu ısı enerjisi saf silisyumdaki bazı elektronların atom yapısından kopmasını sağlar, ancak bu kopma saf silisyumda çok azdır. Silisyum, yapısında elektronu kopmuş yere başka bir elektron arar. Aynı şekilde yan atomdan kopan elektronu bu boşluğa yerleştirir. Bu boşluktan çıkan elektronda yerine gelen elektronun boşluğuna gider. Bu elektronların yer değiştirmesinden elektrik akımı oluşur. Ancak saf silisyumda serbest kalabilen elektron çok azdır. Bunun için saf silisyuma enerji verildiğinde çok az elektrik akımı oluşur (Özgöçmen, 2007).



Şekil 2.3. Silisyum ve germanyum yarı iletkenin yapısı

2.1.4. Katkılama

Yarıiletken malzemenin içerisine, çok az tutarda uygun seçilmiş yabancı atom katkılanması ile yarıiletkenin elektriksel özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilir. Saf yarıiletkenin yapısal özelliklerini bozmayacak tutarda ve denetimli bir biçimde yarıiletken kristale yerleştirilen yabancı atomlara “safsızlık atomları” ve bu işlemede “**katkılama**” adı verilir(Karamanav, 2007).

Saf silisyum kristalinde her atom 14 elektrona sahip olmakla birlikte, en dış yörüngedeki dört elektron, komşu atomlarla olan ilişkileri belirler. Değerlik elektronları adını verdiğimiz bu dört elektronun her biri, en yakınındaki dört silisyum atomu ile bağ yaparak silisyum kristalindeki ana yapı taşını oluşturur (Karamanav, 2007).

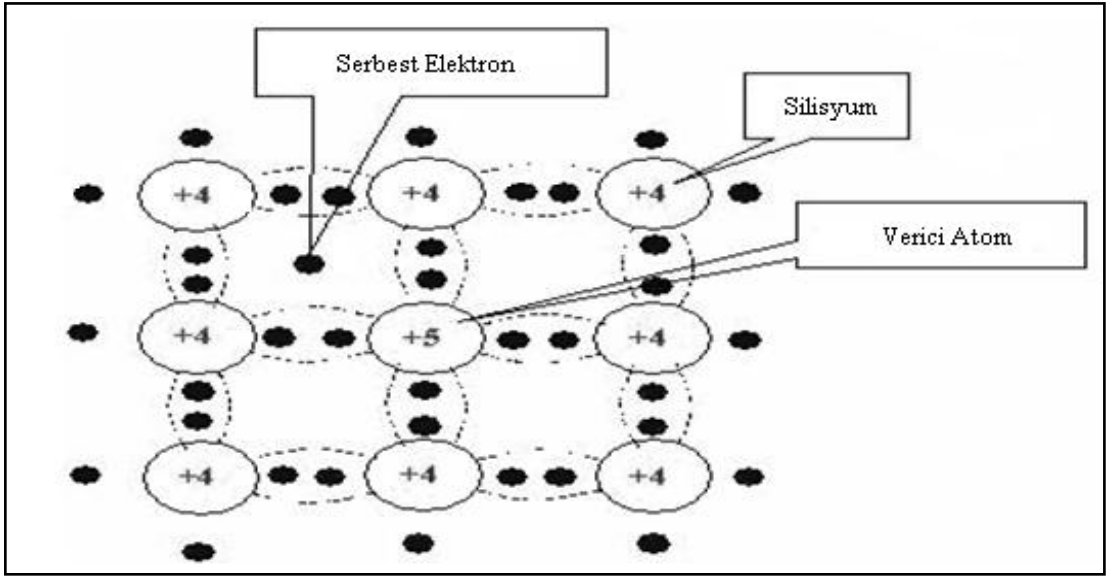
Saf silisyum kristali içerisinde değerlik elektron sayısı beş olan fosfor atomu katkılanırsa, fosforun beşinci değerlik elektronu açıkta kalacaktır. Fosfor atomuna çok zayıf olarak bağlı olan bu elektron çok küçük bir enerji ile atomundan ayrılarak silisyum kristalinin iletkenlik bandına çıkacaktır. Fosfor atomunda olduğu gibi, katıldığı kristal yapıya elektron veren safsızlık atomlarına verici denir. Bu şekilde katılanmış yarıiletkenlerde elektriksel yük, elektronlar ile iletkenlik bandında taşınır ve bu nedenle bu yarıiletkenler n-tipi olarak adlandırılır (Karamanav, 2007).

Saf silisyum kristali içerisinde değerlik elektron sayısı üç olan boron atomu katkıladığımızı düşünelim. Boron atomu, silisyum kristalindeki üç atomla bağ yaparken dördüncü atomla paylaşacağı elektronu olmadığı için, değerlik bandında boşluklar oluşacaktır. Bu şekilde katılanmış yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları artı yükleri gibi düşünülen boşluklardır. Boşlukların çoğunluk taşıyıcısı olduğu bu tür malzemelere p-tipi yarıiletken adı verilir (Karamanav, 2007).

N-tipi yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcıları elektronlar ve azınlık taşıyıcıları boşluklar, p-tipi yarı iletkende ise durum bunun tersidir. Yarı iletkenlere dışarıdan bir elektrik alan uygulandığı zaman, elektrik alana tepki veren simetrik dengede olmamasından dolayı çoğunluk taşıyıcılarıdır. Elektronlar elektrik alan ile ters yönde hareket ederken, boşluklar elektrik alan doğrultusunda hareket ederler.

2.1.5. N tipi yarıiletken

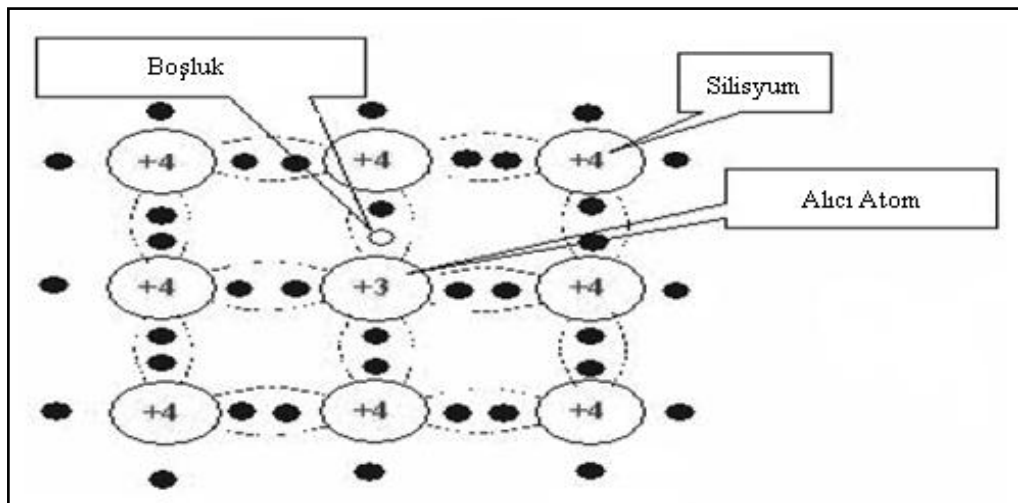
İletkenlik tipini değiştirmek için Si ve Ge içine, periyodik cetvelin III ve V. Grup elementleri ilave edilir. Bunlar boş valans elektronu bulundurlar (Arsenik, Bor, Fosfor, Antimuan gibi). Ergimiş halde bulunan Ge'a (milyonda bir) arsenik ilave edilirse, her arsenik atomu, bir Ge atomu yerini alacak ve 4 elektronuyla kovalant bağ teşkil edilecek, 5. Valans elektronu serbest kalıp iletkenliği temin edecektir. İletkenlik (-) yükü temin edildiği için N tipi yarı iletken ismini alır. Bu elektronlar, oda sıcaklığında, iletkenlik bandına ulaşır (Karamanav, 2007).



Şekil 2.4. N tipi yarıiletken

2.1.6. P tipi yarıiletken

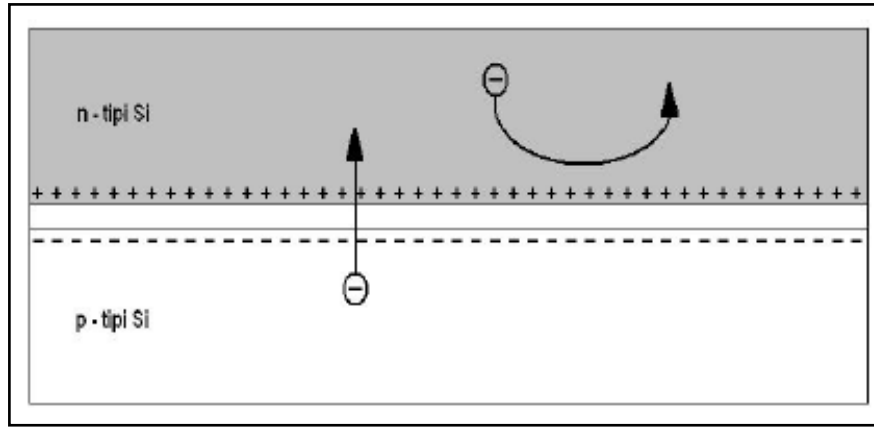
Ergimiş germanyuma, III. gruptan üç valans elektronu bulunduran elementler ilave edilerek yapılır (İndium, Galyum, vb). Katılama sırasında indium atomları kristal örgü içinde Ge atomunun yerini alır. Kovalent bağ için 3 elektron mevcuttur ve komşu atomdan bir elektron kaparak bağ oluşturur. Komşu atomda bir boşluk oluşmuştur. Bu ise elektron hareketine sebep olur. Bir yarıiletkenin kullanılabilme sıcaklığı, aktivasyon enerjisiyle artar. Kullanabilme frekansı ise yük taşıyıcıların hareketliliği ile artar (Karamanav, 2007).



Şekil 2.5. P tipi yarıiletken

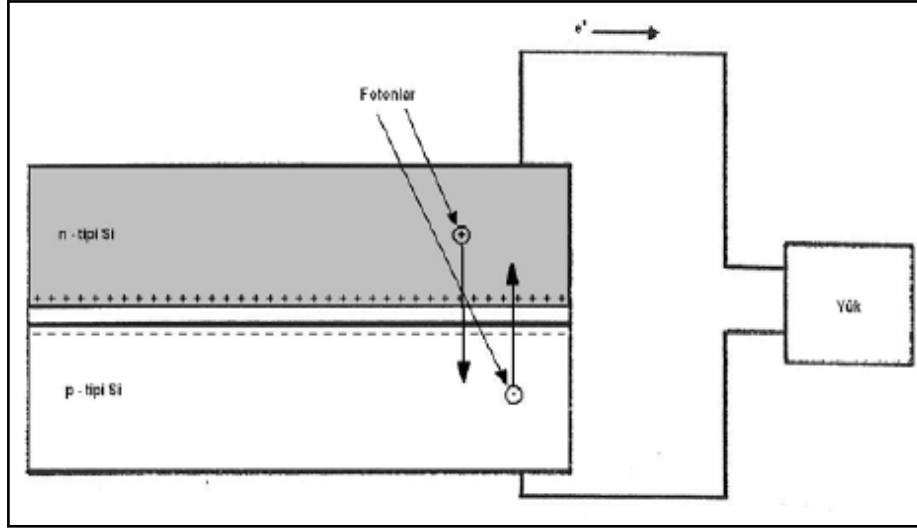
2.1.7.P – N kavşağı ve Birleşme Kesitinde Elektrik Alanın Oluşması

Bu ayrı ayrı elektrik alanı olmayan ve kendi halinde doğal olan parçalar birleştirildiğinde, birleşme kesitinde “n tip” silisyumun içindeki elektronlar “p tip” silisyumun içindeki pozitif boşlukları dolduracak, ancak birleşme yerinde bu birleşme o kadar kuvvetli olacaktır ki elektronlar bu bariyeri bir zaman sonra geçemeyeceklerdir. Yani “n tip” yarıiletken yapı elektronunu “p” tipi yarıiletken yapıya gönderdiğinden, birleşme noktasında “+” alan oluşacak, aksi taraftaki “p” tipi yarıiletken yapı elektron aldığından “-” alan oluşturacaktır. Serbest kalabilecek elektronların hareket yönleri Şekil 2.6’ da gösterilmiştir (Özgöçmen, 2007).



Şekil 2.6. Elektrik alanın “n tip” i ve “p tip” i etkileyiş diyagramı

Güneş ışığının içindeki foton denilen enerji bu birleşmiş malzemeye yansıdığına, elektronları serbest bıraktırır. Serbest kalan elektronların yeri de boş kalacaktır. Eğer bu olay birleşme alanı yakınında oluyorsa elektronlar “n” tipe, boşluklarda “p” tipe geçecektir. Eğer bu iki parça bir iletkenle birbirine bağlanırsa, elektronlar tekrar eski yerine, deliklerde eski yerine döneceklerdir. Elektrik enerjisinin temel prensibi olan bu elektron hareketinden dolayı akım, elektrik alanından dolayı da gerilim elde edilir. Bu döngü ışık olduğu sürece devam eder. Şekil 2.7 fotonların silisyumda oluşturduğu elektron hareketini göstermektedir (Özgöçmen, 2007).



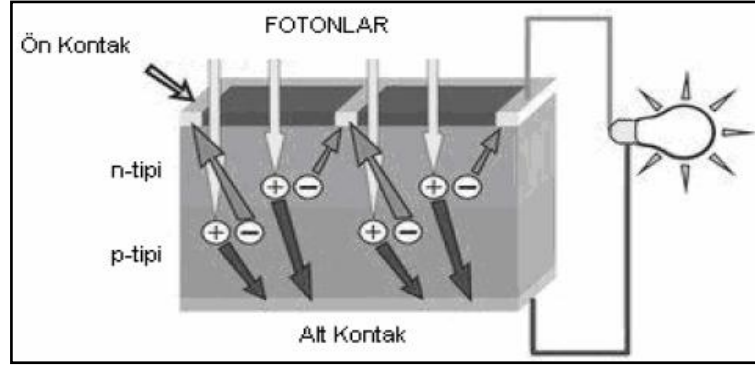
Şekil 2.7. Fotonların silisyumda elektron hareketi oluşturması

2.2. Güneş Pillerinin Yapısı

Güneş pilleri (fotovoltaik diyotlar) üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. Güneş pili hücreleri yarı iletken malzemelerden yapılıdır. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları 100 cm^2 civarında, kalınlıkları özellikle en yaygın olan silisyum güneş pillerinde $0.2 - 0.4 \text{ mm}$ arasındadır. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, Fotovoltaik (Photovoltaic) olayına dayanır. Yani üzerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pillerin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek Fotovoltaik olayını bulmuştur (Çetinkaya, 2001).

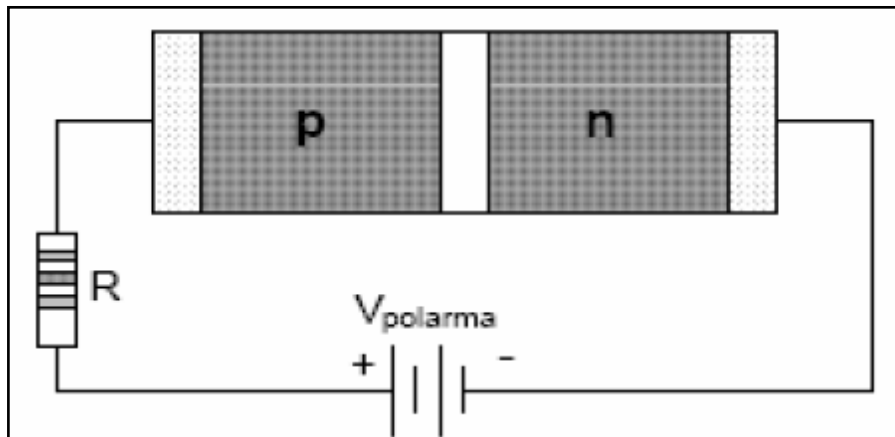
Deniz seviyesinde, parlak bulutsuz bir gündeki ışınım şiddeti maksimum 1000 W/m^2 civarındadır. Yöreyle bağılı olarak 1 m^2 'ye düşen güneş enerjisi miktarı yılda $800-2600 \text{ KWh}$ arasında değişir. Bu enerji, güneş pilinin yapısına bağılı olarak %5 - %70 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya güneş pili modülü yada fotovoltaik modül adı verilir. Gerekirse bu modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak, fotovoltaik bir dizi oluşturabilir.

Bilindiği gibi, güneş pili bir yarı iletken düzendir. Çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardan oluşan N tipi ile çoğunluk yük taşıyıcıları oyuklardan oluşan P tipi yarı iletken yan yana getirilir. Işık enerjisi bu birleşme noktasına düşürülürse Şekil 2.8 'de görüldüğü gibi dış devreden bir akım geçebilmektedir (Karamanav, 2007).



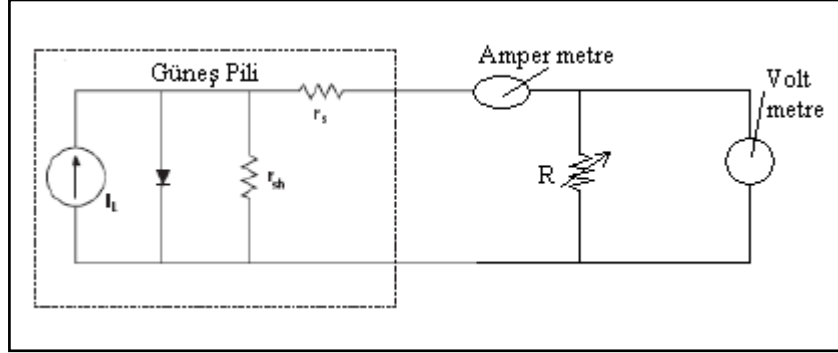
Şekil 2.8. Güneş pili (şematik)

P-N yarı iletken kavşağında, elektronlar P tipi bölgeye geçerek birleşme yüzeyine yakın bölgelerde boşluk yük taşıyıcıdaki elektron eksikliğini tamamlayıp (-) iyonlar oluştururken N tipi bölgede de (+) iyon duvarı oluşacaktır. Dış tesir olmazsa bu enerji duvarı akımın geçmesini önleyecektir. Işın demeti bu bölgeye düşerse, yük taşıyıcı elektronlar çok az oranlarda olduğundan, muhtemelen bir valans elektrona enerjisini bırakacak ve onu P tipi bölgeye doğru itecektir. Dış devre akımı ise Şekil 2.9'da görüldüğü gibi P 'den N 'e doğru olacaktır (Karamanav, 2007).



Şekil 2.9. P-N kavşağının oluşturulması ve kavşağa düşen foton enerjisi ile iletkenlik temini

Şekil 2.10’da bir güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi görülmektedir. Görüldüğü gibi eşdeğer devre, bir akım kaynağı, bir diyot, seri direnç (r_s) ve bir paralel dirençten (r_{sh}) oluşmaktadır (Messenger ve Ventre, 2004).



Şekil 2.10. Güneş pili eşdeğer elektrik devresi

Güneş pilleri, belli güneşlenme şartlarında, birim alan başına belirli bir akım ve gerilim üretirler. İstenen bir enerji için birçok pili seri ve paralel olarak bağlamak gerekir. Böylece güneş panelleri oluşturulur. Şekil 2.10 'da eşdeğer şeması verilen güneş pilinde dış devre akım şiddeti ve uçlardaki gerilim ölçülebilir. Ayarlanabilir bir dış dirençle (R), gerilim ve akım açık devreden kısa devreye kadar değiştirilebilir (Karamanav, 2007).

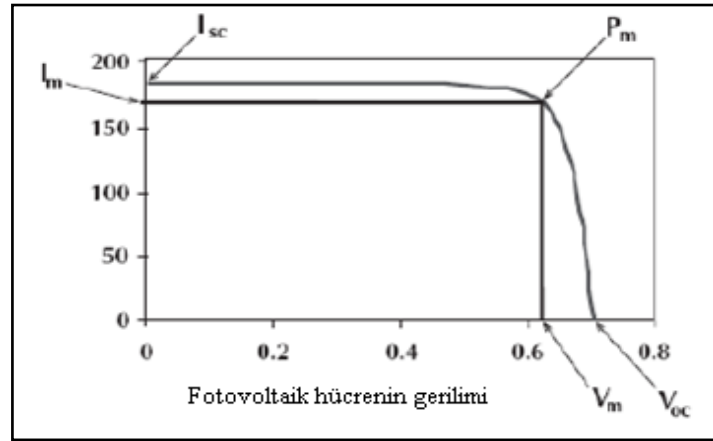
Seri direnç (r_s), PV hücrenin ön yüzündeki direnç kayıplarını, paralel direnç (r_{sh}) ise diyot kaçak akımından kaynaklanan kayıpları temsil etmektedir. PV hücrenin enerji çevrim verimi şu şekilde tanımlanır (Messenger ve Ventre, 2004).

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (2.2)$$

P_m , hücrenin maksimum güç noktasındaki gücü, P_{in} ise hücreye gelen güneş ışınının gücüdür. Şekil 2.11. PV hücrelerin I-V karakteristiğini göstermektedir. I_m maksimum güç noktasındaki akım değerini, V_m maksimum güç noktasındaki gerilim değerini, I_{SC} hücrenin kısa devre akımını, V_{OC} hücrenin açık devre gerilimini göstermek üzere maksimum güç noktasını şu şekilde ifade edebiliriz:

$$P_{max} = I_m \cdot V_m = FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC} \quad (2.3)$$

Buradaki FF, doluluk oranı (fill factor) olarak tanımlanır. FF, PV hücrenin kalitesi hakkında bir göstergedir. İdealde FF=1'dir. Yani seri direnç (r_s) = 0 ve paralel direnç (r_{sh}) = ∞ 'dur. Ancak gerçek uygulamalarda bu pek mümkün değildir. Tipik bir PV hücrenin FF 'ü teknolojisine bağlı olarak 0.5 ile 0.82 arasında değişebilmektedir. FF 'ünü iyileştirmek için gerçek akımın kaçak akıma oranını yükseltmek yani seri direnci azaltıp paralel direnci artırmak gerekmektedir (Messenger ve Ventre, 2004).



Şekil 2.11. Bir PV hücrenin I-V karakteristiği

Güneş pillerinin yapımında; silisyum, germanyum, selen, galyum arsenik (GaAs), kadmiyum tellürid (CdTe) gibi yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Pil üzerine düşen ışık seviyesine bağlı olarak elde edilen akım ve gerilimin miktarı değişir. Bu durumda, I-V karakteristik denklemi şu şekildedir (Şenpınar, 2005).

$$I = I_1 - I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (2.4)$$

Burada; I = güneş pilinin çıkış akımı, I_1 = fotonlardan dolayı pil akımının içeriği, I_0 = diyodun ters doyma akımı, $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{coulomb}$ (elektriksel yük), $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ (Boltzmann sabiti), V = güneş pilinin çıkış gerilimi ve T ise Kelvin olarak pil sıcaklığıdır. Gerçek güneş pillerinin I-V karakteristikleri bu ideal versiyondan az çok farklılık gösterirken, denklem (2.4) güneş pillerinin ideal performansının belirlenmesini sağlar (Şenpınar, 2005).

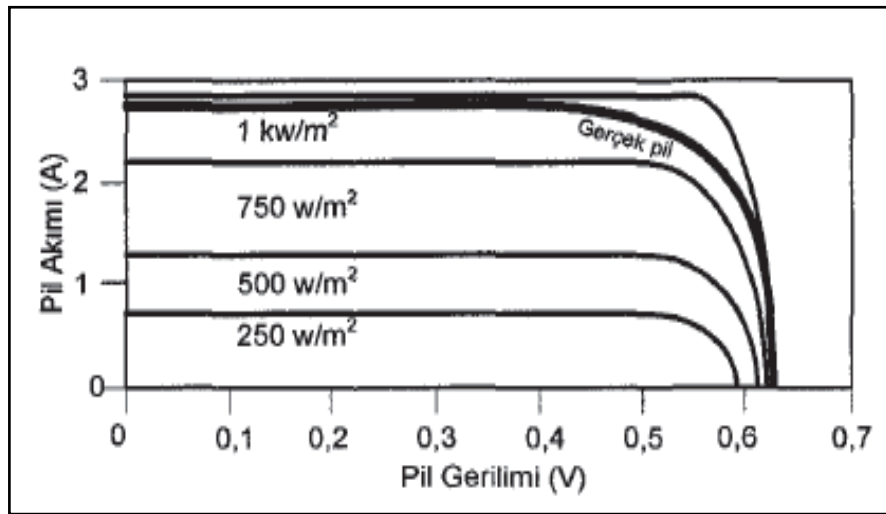
Şekil 2.12 güneş pilinin hem gerilim sınırlamasına hem de akım sınırlamasına sahip olduğunu gösterir (Messenger ve Ventre, 2004). Bu, pilin açık devre ya da kısa devre

şartları altında çalıştırılarak zarar görmeyeceğini gösterir. Güneş pilinin kısa devre akımı, basitçe üslü ifade de $V=0$ yazılarak bulunur. Buradan, $I_{SC} = I_1$ olur. Çok iyi bir yaklaşım yapmak için, pil akımının pilin ışımasıyla doğru orantılı olduğu görülür. Bu yüzden, eğer pil akımı standart test şartları altında; yani $G_0 = 1 \text{ kW/m}^2$ ve AM 1.5 için bilirse, o zaman herhangi diğer bir G ışımadaki pil akımı şöyle bulunur.

$$I_{1(G)} = (G/G_0) \cdot I_{1(G_0)} \quad (2.5)$$

Pilin açık devre gerilimini belirlemek için pil akımı sıfıra ayarlanır ve (2.4) denklemi V_{OC} için çözülür;

$$V_{OC} = (k \cdot T/q) \cdot \ln((I_1 + I_0)/I_0) \approx (k \cdot T/q) \cdot \ln(I_1/I_0) \quad (\text{çünkü } I_1 \gg I_0) \quad (2.6)$$



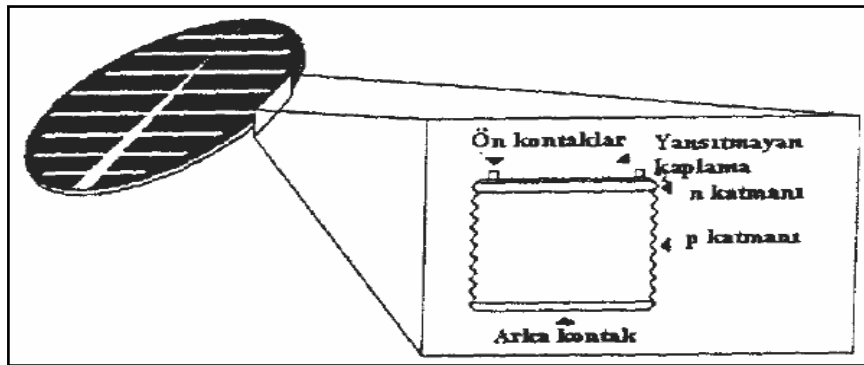
Şekil 2.12. Farklı ışıma seviyeleri altındaki gerçek ve ideal güneş pillerinin I-V karakteristiği

Açık devre gerilimi pilin ışımasına sadece logaritmik olarak bağlıdır ve kısa devre akımı pilin ışımasıyla doğru orantılıdır.

Farklı ışıma değerleri için pilin akım ve gerilim değerleri de değişecektir. Herhangi bir andaki pil gerilimi ile o andaki pil akımı çarpılarak pil gücü belirlenir. Pilin ekonomisinden ziyade mümkün olduğunca daha fazla enerji elde etmesi ve pilin en fazla gücü üretecek şekilde çalışması istenir (Messenger ve Ventre, 2004).

2.3. Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi

Başka malzemeler kullanılıyor olsa bile, günümüzde, pek çok güneş pili silisyumdan yapılmaktadır. Güneş pilinin üzerine güneş ışığı düştüğünde, silisyum atomunun son yörüngesindeki valans elektronu negatif yüklenir. Işık foton denilen enerji parçacıklarından oluşmuştur. Fotonları saf enerjiden oluşmuş bilardo toplarına benzetmek olasıdır ve bunlar bir atoma çarptıklarında tüm atom enerjilenir ve en kolay kopabilecek durumda olan son yörüngedeki valans elektronu kopar. Serbest kalan bu elektronda, gerilim veya elektriksel basınç olarak isimlendirebileceğimiz potansiyel enerji ortaya çıkar. Bu enerji, bir aküyü şarj etmek veya bir elektrik motorunu çalıştırmak için kullanılabilir. Önemli olan nokta, bu serbest elektronları pil dışına alabilmektir. Üretim sırasında, pilin ön yüzeyine yakın yerde bir iç elektrostatik bölge oluşturularak, bu elektronun serbest duruma geçmesi sağlanır. Silisyum kristali içine diğer elementler yerleştirilmiştir. Bu elementlerin kristal içinde bulunması, kristalin elektriksel olarak dengede olmasını önler. Işıkla karşılaşan malzemede, bu atomlar dengeyi bozar ve serbest elektronları diğer pile veya yüke gitmeleri için pilin yüzeyine doğru süpürürler. Milyonlarca foton pilin içine akarken, elektronlarda enerji kazanıp bir üst seviyeye çıkar, pil içindeki elektrostatik bölgeye ve oradan da pil dışına akarlar. İşte bu oluşan akış elektrik akımıdır (Karamanav, 2007).

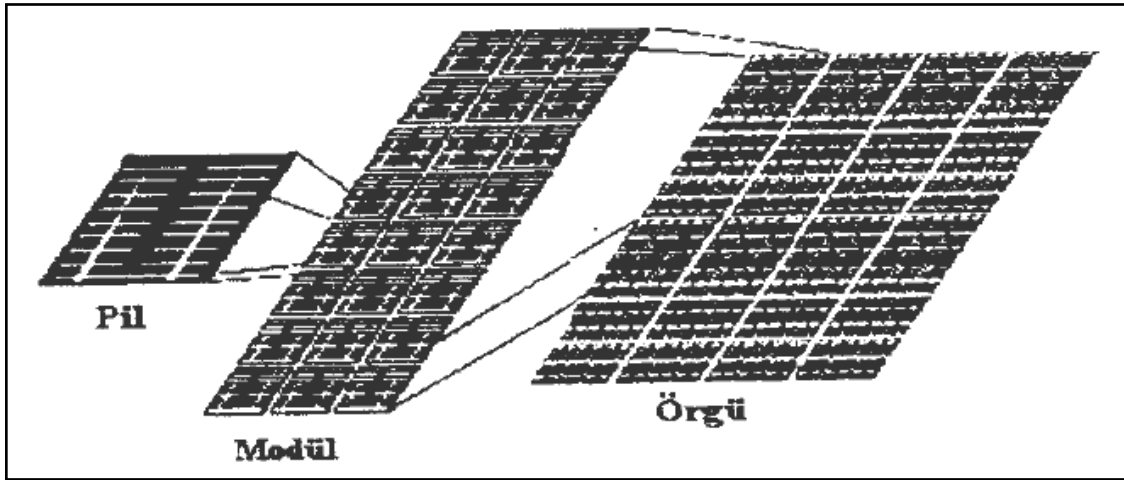


Şekil 2.13. Güneş pilinin yapısı

Tek kristalli silisyum güneş pilinin rengi koyu mavi olup, ağırlığı 10 gramdan azdır. Pilin üst yüzeyinde, pil tarafından üretilen akımı toplayacak ve malzemesi genellikle bakır olan ön kontaklar vardır. Bunlar negatif kontaklardır. Kontakların altında 150 mm kalınlığında, yansıtma özelliği olmayan bir kaplama tabakası vardır. Bu tabaka olmazsa, silisyum, üzerine düşen ışınımın üçte birine yakın kısmını yansıtacaktır. Bu kaplama

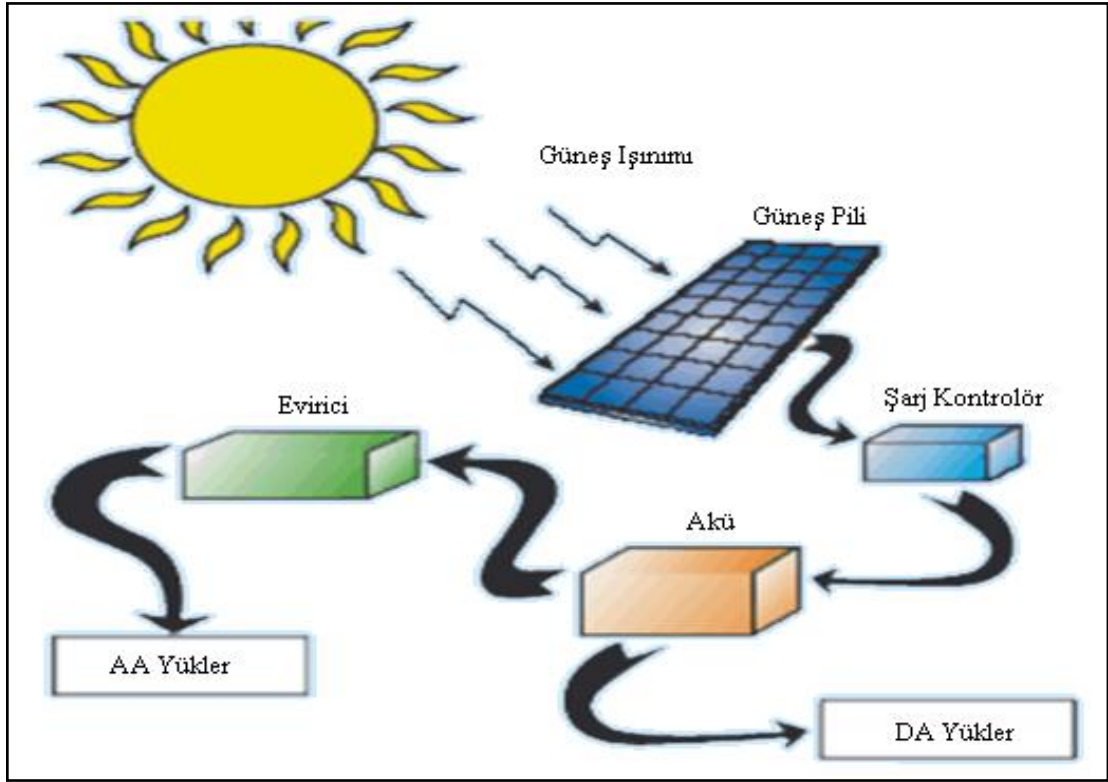
tabakası, pil yüzeyinden olan yansımayı önler. Pilin ön yüzeyi, normal olarak yansıyan ışığın bir kısmını daha yakalayabilmek amacıyla, piramitler ve konikler şeklinde tasarlanmıştır. Yansıtıcı olmayan kaplamanın altında, pilin elektrik akımının ortaya çıktığı yapı bulunur. Bu yapı iki farklı katman halindedir. N-katmanı, fosfor atomları eklenmiş silisyumdan oluşan ve pilin negatif tarafını oluşturan katmandır. P-katmanı ise, bor atomları eklenmiş silisyumdan oluşmuş, pilin pozitif tarafıdır. İki katman arasında, P-N kavşağı denilen, pozitif ve negatif yüklü elektronların karşılaştığı bir bölge bulunur. Pilin arka yüzeyinde, elektronların girdiği pozitif kontak görevi gören arka kontak yer alır.

Tipik bir silisyum güneş pili, 0.5 volta kadar elektrik üretebilir. Pilleri birbirine seri bağlayarak üretilen gerilim değerini arttırmak olasıdır. Genellikle, 30-36 adet güneş pili, 15-17 voltluk bir çıkış gerilimi vermek için birlikte bağlanabilir ki; bu gerilim değeri de, 12 voltluk bir aküyü şarj etmek için yeterlidir. Silisyum pillerin seri bağlanması ile modüller, modüllerin birbirine bağlanması ile örgüler oluşur (Karamanav, 2007).



Şekil 2.14. Pillerden modül ve örgülerin yapılması

Güneş pilinin kolayca kırılabilmesi ve ürettiği gerilimin çok düşük olması gibi, sakıncalarının giderilmesi gerekir. Pillerin birbirlerine bağlanması ile oluşan modüller koruyucu bir çerçeve içine alınmışlardır ve kullanılacak düzeye gerilim üretirler. Modülde bulunan pil sayısı, çıkış gücünü belirler. Genellikle, 12 voltluk aküleri şarj etmek için 30-36 adet silisyum güneş pilinin bağlanması ile bir modül oluşsa bile, daha yüksek çıkış güçleri için daha büyük modüller yapılabilir. En basit sistem, Şekil 2.15 'de gösterildiği gibi bir modül ve bir aküden oluşmuş bir sistemdir (Karamanav, 2007).



Şekil 2.15. Güneş pili ile akünün şarj edilmesi

Modüllerin fiziksel ve elektriksel olarak bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya panel adı verilir. Bu modülden elde edilen gücü arttırmak için başvurulan bir yapılanma biçimidir. Bu şekilde, çıkış gücü, 12, 24, 48 V veya daha yüksek olabilir. Birden fazla panelin kullanıldığı bir sistemde, paneller, kontrol cihazına veya akü grubuna, birlikte bağlanabilecekleri gibi, her panel tek olarak da bağlanabilir.

2.4. Güneş Pillerinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler

2.4.1. Sıcaklık

Güneş pillerinin çalışmasında sıcaklığın önemli bir etkisi vardır. Güneş pillerinin kısa devre akımı sıcaklığın düzgün bir şekilde artmasıyla yükselme eğilimi gösterir. Yarıiletken enerji band aralıkları genellikle sıcaklıkla azaldığından açık devre gerilimi ve dolum faktörü azalır. Enerji band aralığı oda sıcaklığında lineer olarak değişme gösterirken düşük sıcaklıklarda ise doğrusal olmayan bir değişme gösterir (Karamanav, 2007).

Güneş panelleri ideal sayılan 25 °C sıcaklık, 1.000 W/m² güneş radyasyonu ve 1,5 AM (Air Mass, hava kütlesi) ortamda test edilir. Bu ortama göre panellerin verimleri ve gösterdikleri etkiler hesaplanır. Panelin güneş ışığını alması ile birlikte elektrik üretimi başlar fakat verimlerin %100 olmamasından dolayı güneşten gelen enerjinin bir kısmı elektrik enerjisine dönüşürken bir kısmı da ısı enerjisi olarak ortaya çıkar. Bu olay panellerin ısınmasına neden olur, güneş hücrelerinin ısınması ile akım (I) artarken, gerilim (V, Volt) değeri düşer. Gerilimde ki düşüşün fazla olması nedeni ile çıkış gücünde de düşüş olur ve bu verim kaybına neden olur. Sıcaklığın düşük olması durumunda ise tam tersi geçerlidir ve panelde verim artışı olur. İşte bu nedenden dolayı güneş panelleri güneşli fakat soğuk yere ihtiyaç duyarlar. Tabii kişin -10°C sıcaklıkta 1000 W/m² güneş radyasyonunun bulunması durumunda. Panel seçimi yaparken, sıcaklığın panel üzerinde ki etkisi de değerlendirilmelidir (URL-11, 2011).

Tablo 2.1. Bazı yarıiletkenlerin enerji band aralığının sıcaklıkla değişimi (Karamanav, 2007).

Malzeme	T=300°K	T=0°K
Si	1.12 eV	1.17 eV
Ge	0.67 eV	0.75 eV
PbS	0.37 eV	0.29 eV
PbTe	0.29 eV	0.19 eV
InSb	0.16 eV	0.23 eV
GaSb	0.69 eV	0.79 eV

Tablo 2.2. GaAs güneş pili parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimi (Karamanav, 2007).

T (°K)	eV	V	%η
273	1.4345	1.047	29.51
300	1.4245	0.989	27.73
323	1.4120	0.940	26.19
353	1.3981	0.875	25.14
373	1.3887	0.830	22.75

Tablo 2.3. Silisyum güneş pili parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimi (Karamanav, 2007).

T (°K)	eV	V	%η
273	1.1312	0.75	26.83
300	1.1245	0.699	24.67
323	1.1185	0.654	22.80
353	1.1104	0.595	20.33
373	1.1048	0.555	18.67

Tablo 2.4. Germanyum güneş pili parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimi (Karamanav, 2007).

T (°K)	eV	V	%η
273	0.67366	0.302	13.88
300	0.66339	0.248	10.60
323	0.65444	0.201	7.89
353	0.64253	0.139	4.62
373	0.63446	0.099	2.79

2.4.2. Yüzey Parametresinin Etkisi

Işığın yansımalarını azaltmada kullanılan yaklaşımlardan biri de özel yapılı yüzeylerdir. Özel yapılı yüzeyler ve silisyum ince tabakaların kullanımı artmaktadır. Silisyum tabakaların yüzeylerinde küçük piramitler seçici dağlama yöntemi kullanılarak elde edilirler. Bu piramitlerin yüzeylerinden yansıyan ışık, diğer piramitlerden de yansıyarak pilin içine girer.

Güneş pillerinde anti yansıtıcı kaplama kullanılmasıyla yansımaya kayıpları azaltılmış olur. Işığın yüzeye düştüğü her noktadaki toplam yansımaya, silisyuma dik gelen ışıkta olduğu gibidir. Yüzeydeki toplam yansımaya %0.33 ile %11 seviyeleri arasındadır. Yüzeyleri piramitleştirme tekniği kullanılarak yansımaya önleyici kaplama olmaksızın yüksek performanslar elde edilebilir (Karamanav, 2007).

2.4.3. Spektral Etki

Monokromatik ışık, yarıiletken içinde elektron-deşik çiftinin oluşmasına neden olur. Elektron-deşik oluşumunun uzaysal dağılımı;

$$G = (1 - R)\alpha\theta^{-\alpha x} \quad (2.7)$$

Burada θ ; gelen ışığın foton açısını, R ; yansımaya katsayısını, α ise soğurma katsayısını gösterir. Kısa dalga boyları için α büyük bir değerdedir ve ışık yarıiletken malzeme içinde çabucak soğurur. Hücrelerde fotonların bütün enerjileri kullanılmaz. Görünür dalga boylarında verim en yüksektir, kızılötesi bölgelerde ise en düşüktür (Karamanav, 2007).

Tablo 2.5. Güneş piline ışığın spektral etkisi

RENK	DALGABOYU (nm)	VOLT
Mor	410	3.11
Mavi	470	3.34
Yeşil	520	3.52
Sarı	590	3.44
Turuncu	650	3.22
Kırmızı	725	3.20

2.4.4. Foto Açısız Etki

Yarıiletken malzemeden yapılmış olan güneş piline gelen fotonlar, yüzeye çarpınca ışığın bir kısmı yüzey tarafından yansıtılırken, geriye kalan diğer kısmı yarıiletken tarafından soğurur. Yansımaya katsayısı şu şekilde verilir;

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_2 - n_1)^2 + k_2^2} \quad (2.8)$$

Fotonların yarıiletken güneş pili tarafından yutulması ve yansıtılmasından sonra ışığın şiddeti zayıflayarak geçer ve geçen bu kısım şu şekilde verilir (Karamanav, 2007);

$$T = \frac{(1-R)^2 \cdot e^{-\alpha x}}{(1-R)^2 \cdot e^{-2\alpha x}} \quad (2.9)$$

2.5. Güneş Piliindeki Kayıplar

Güneş pilleri kayıplar nedeni ile daha düşük verimle çalışmaktadır. Güneş pillerinde ilk çalışma anından başlayarak görülen kayıplar aşağıdaki gibidir (Özgöçmen, 2007).

2.5.1. Işıksal kayıplar

Güneş ışığı fotonlarının soğurulmaması ve azınlık taşıyıcılarının üretilmemesinden doğan kayıplardır. Güneş pillerinde üretilen akım değeri, üretilen azınlık taşıyıcıları ve soğurulan güneş ışığı fotonlarının sayısı ile belirlenir. Işıksal kayıplar üretilen akım değerinde azalmalara yol açar.

2.5.2. Elektriksel kayıplar

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

2.5.3. Akım kayıpları

Güneş pillerinde üretilen azınlık taşıyıcılarının kaybı pek çok yolla gerçekleşebilir. Uyarılan taşıyıcıların sonlu ömürleri vardır. Bu nedenle ortaya çıkan akım kaybı, yayılım uzaklıklarıyla soğurucu kalınlığı arasındaki orana bağlıdır. Soğurucu kalınlığının aynı zamanda soğurmayı en iyi hale getirmek üzere seçilmesi gerektiğinden, ışıksal ve

elektriksel gereksinimler arasında bir uzlaşma sağlanmalıdır. İyi tasarlanmış güneş pillerinde hacim içi yeniden birleşme kayıpları %5 ile %20 arasında değişir. Yüzey yeniden birleşmesi, bir malzemedeki her kesitin yeni elektronik koşullar yaratmasından kaynaklanmaktadır. Işınım ile üretilen ve yüzeye doğru yayınıma uğrayan taşıyıcılar, yüzey etkilerini önleyici özel önlemler alınmadığı ya da taşıyıcıların yüzeye ulaşmaları engellendiği zaman, yüzeyde yitirilirlir. Yüzeyde bir oksit tabakanın oluşturulması, genellikle, yüzey koşullarının etkisini ve bundan dolayı da taşıyıcı kaybını azaltır. Yüzey yakınlıklarına uygulanan homojen olmayan bir katkılama işlemi, bir iç elektrik alanı oluşumuna yol açarak, azınlık taşıyıcıların yüzeyden uzaklaştırılmasına ve akım kayıplarının azaltılmasına neden olur. Yüzeydeki bu yeniden birleşme kaybı en iyileştirilmiş güneş pillerinde %0-5 arasında değişim gösterir. Yapılacak bir katkılama işlemi azınlık taşıyıcılarını uzaklaştıracak ve akım kayıplarını önlemede başarılı olacaktır.

2.5.4. Açık devre gerilimi

Açık devre gerilimini kontrol eden ve etkileyen parametreler; hacim içi yeniden birleşme ömrü, ara yüzey yeniden birleşme hızları, band aralığı ve eklem n ve p taraflarının katkılama seviyeleridir. Açık devre gerilim kayıpları %4 ile %50 arasında değişir.

2.5.5. Direnç kayıpları

Seri direnç ve paralel iletkenlik güneş pillerinde arzu edilmeyen özelliklerdir. Paralel direnç değeri açık devre gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İdeal bir güneş pilinde paralel direnç sonsuza yakın olmalıdır. Güneş pillerinde paralel iletkenlik ve seri direnç kayıpları %0-%10 mertebesinde dir.

2.5.6. Pil ömrü ve verim kaybı

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

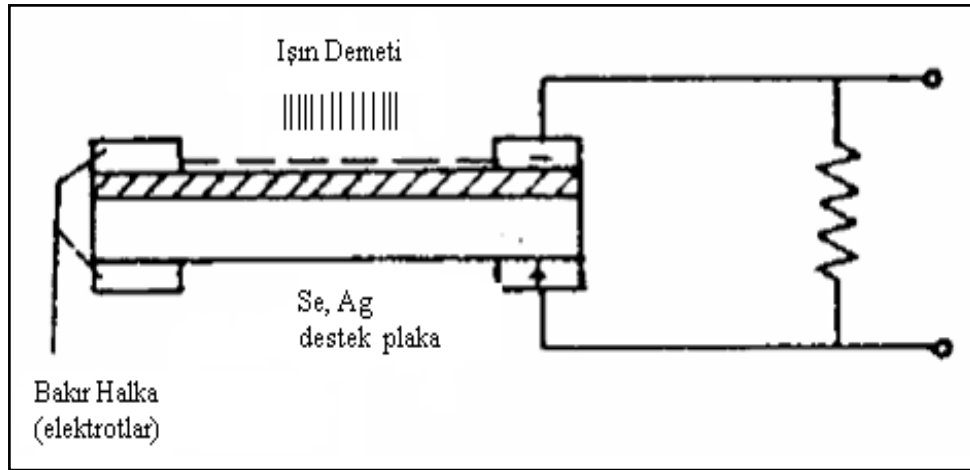
hedefi olmaktadır. Güneş pillerinin çıkış gücündeki azalmanın kolayca anlaşılabilen birkaç nedeni vardır. Pilin dış yüzeyinde, güneş ışınımının gelişini engelleyen toz ve pisliklerin birikmesi bu nedenler arasındadır.

2.6. Güneş Pili Türleri

Güneş pilleri pek çok farklı maddeden yararlanarak üretilebilir. Günümüzde en çok kullanılan maddeler şunlardır:

2.6.1. Selenyum Güneş Pilleri

Saf selenyum, alkali metallerle veya klor, iyot gibi halojenlerle karıştırılıp P tipi yarı iletken oluşturulur. Bunun üzerine iyi iletken ve yarı iletken / yarı geçirgen bir gümüş tabaka birkaç mikron kalınlığında kaplanarak P-N kavşağı oluşturulur. Şekil 2.16 'da bir selenyum güneş pilinin yapısı görülmektedir. Bu pillerin 50 °C 'nin üzerinde kullanılmamaları tavsiye olunur (Karamanav, 2007).



Şekil 2.16. Selenyum güneş pilinin yapısı

2.6.2. Silisyum Güneş Pilleri

Silisyum güneş pilleri tek kristal (monokristal), çok kristal (multikristal), şerit, kristal ince film, amorf ve karmaşık (kristal ve amorf teknolojilerinin karışımı) yapılar da olmak üzere pek çok şekilde üretilmektedir.

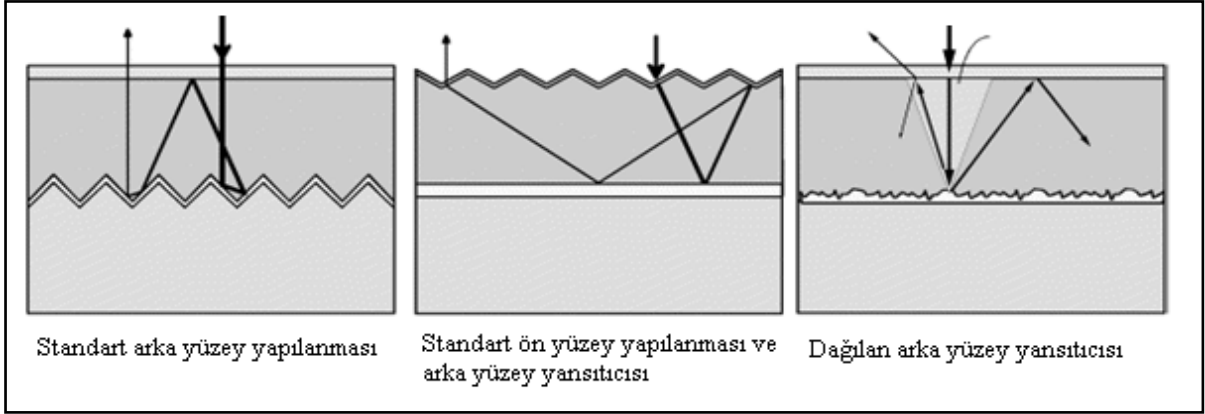
Tek kristal (Monokristal) Silisyum: Önce büyütülüp daha sonra 200 mikron kalınlıkta ince tabakalar halinde dilimlenen Tek kristal Silisyum bloklardan üretilen güneş pillerinde laboratuvar şartlarında %24, ticari modüllerde ise %15'in üzerinde verim elde edilmektedir (URL-10, 2011).

Çok kristal (Polikristal) Silisyum: Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen Çok kristal Silisyum güneş pilleri ise daha ucuza üretilmekte, ancak verim de daha düşük olmaktadır. Verim, laboratuvar şartlarında % 18, ticari modüllerde ise % 14 civarındadır (URL-10, 2011).

Amorf Silisyum: Kristal yapı özelliği göstermeyen bu Si pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 mertebesindedir. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılan amorf silisyum güneş pilinin bir başka önemli uygulama sahasının, binalara entegre yarısaydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üretici olarak kullanılabilmesi tahmin edilmektedir (URL-10, 2011).

Güneş pillerinde yüzey yapılanmasındaki malzemenin seçimi önemlidir. Silisyumun yansıtma özelliği çok yüksek olduğundan güneş pillerinin yüzeyindeki yansıma en alt düzeyde tutulmalıdır. Buna bağlı olarak günümüzdeki tüm güneş pillerinin yüzeyi yansıma önleyici bir kaplama içermektedir. Bu kaplamanın yansıma katsayısı düşüktür. Şekil 2.17' de gösterildiği gibi yüzeyin pütürlenmesi yansımayı azaltmakla kalmayıp pilin daha çok ışık almasını sağlamaktadır. Bu yöntemle radyasyon yolları artırılmış ve ışık soğurması kolaylaştırılmış olmaktadır. Normal ıslak kimyasal pütürleme yalnız tek kristalli silisyumlara uygulanabilir. Bu tür yapılanma (pütürleme) polikristal malzemede uygulanamaz. Çünkü yüzey değişik kristallerden oluşmaktadır. Günümüzde bu engeli aşacak yöntemler geliştirilmektedir (Lüdemann, 2000).

Güneş pili yapımında kullanılan malzemelerin rezerv durumları da önemlidir. Silisyumun, güneş pili yapımında kullanılan diğer malzemelere oranla doğada daha çok bulunan bir element olması nedeni ile rezerv konusunda bir sorunu bulunmamaktadır (Karamanav, 2007).



Şekil 2.17. Işık yolu gelişiminin optik olarak tanımı

2.6.3. İnce Film Güneş Pilleri

Bu teknikte, soğurma (absorban) özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha az kalınlıkta (tek kristalin 500 de 1'i kalınlığında) güneş pilleri yapılır. Örneğin amorf silisyum güneş pillerinin soğurma katsayısı kristal silisyum güneş pillerinin katsayısından daha fazladır. Dalga boyu katsayısı 0.7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalınlığında amorf silisyum ile soğurulabilirken, kristal silisyumda ise aynı radyasyonu soğurmak için 500 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden amorf yapılu güneş pillerinde daha az malzeme kullanılır ve montaj kolaylığı nedeniyle bir avantaj sağlar (Karamanav, 2007).

2.6.4. Galyum Arsenit (GaAs)

Bu malzemeye laboratuvar şartlarında %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcı) verim elde edilmektedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemler GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır (Karamanav, 2007).

2.6.5. Kadmiyum Tellürid (CdTe)

CdTe, ince film PV ürünler için ideale yakın bir malzemedir. Çünkü birkaç özelliği bir arada bulundurmaktadır. Optik band aralığının, güneş enerjisi dönüşümü için çok uygun

olduğu gibi ince film üretim yöntemleri de çok kolaydır. Bu nedenle büyük çaplı modüllerin üretimi için çalışmalar devam etmektedir (Karamanav, 2007).

Çokkristal yapıda bir malzeme olan CdTe ile güneş pili maliyetinin çok aşağılara çekileceği tahmin edilmektedir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde %16, ticari tip modüllerde ise %7 civarında verim elde edilmektedir (Karamanav, 2007)

2.6.6. Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe₂)

Periyodik tablonun birinci, üçüncü ve altıncı gruptan elementlerin üçünün ya da daha fazlasının bir araya gelmesi ile oluşan bu bileşik yarıiletkenlerin soğurma katsayıları oldukça yüksek olup, yasak enerji aralıkları güneşin spektrumu ile ideal bir şekilde uyuşacak biçimde ayarlanabilir. Bakır indiyum ve selenyumdan yapılan üçlü bileşik yarıiletkenle başlayan bu grup (CIS) güneş pilleri olarak anılır. CdTe güneş pillerine en yakın rakip olarak gözükmektedir. Bu gün CIS ince film güneş pillerinin çoğunluğu içerisinde Ga elementinin katılması ile daha yüksek verimlilikler elde edilir. Ancak yarıiletkeni oluşturan element sayısı artıkça gereken teknoloji ve malzemenin özelliklerinin denetimi de bir o kadar karmaşık duruma gelmektedir. Laboratuardaki küçük alan pillerin verimliliği %18'e kadar ulaşırken, 900 cm² yüzey alana sahip modüllerin verimlilikleri ancak %15 dolayındadır. CIS pillerde uygulanan teknolojilerden iki tanesi öne çıkmıştır. Bunlardan birincisi, elementlerin eş zamanlı olarak vakumda buharlaştırılmasıdır. İkinci yöntem, herhangi bir yöntemle büyütülen bakır-indiyum ince film alaşımının uygun bir ortamda selenyumla tepkimeye sokulmasıdır (Selenizasyon) (Karamanav, 2007).

2.6.7. Tandem Piller ve Optik Yoğunlaştırıcı Hücreler

Güneş pillerinin verimlilikleri band aralıkları farklı hücrelerin yukarıdan aşağıya sıralanması ile belirgin bir şekilde artırılabilir. Böylelikle güneş ışığından maksimum verimlilik sağlanır (Ünal, 2006).

Gelen ışığı 10-500 kat oranlarda yoğunlaştıran mercekli veya yansıtıcı araçlarla modül verimi %17'nin, pil verimi ise %30'un üzerine çıkılabilmektedir. Yoğunlaştırıcılar basit ve ucuz plastik malzemeden yapılmaktadır (URL-10, 2011).

2.6.8.Dye (Ağartma Özellikli) Duyarlı Piller

Nanokristal Dye duyarlı güneş pilleri hızlı fotoelektrokimyasal yenilenme işlem mekanizmasına sahip pillerdir. Bu pillerin diğer pillerden temel farkı ışını yakalayan (Dye) sistemin diğer elemanlardan ayrı olmasıdır (Ünal, 2006).

2.6.9.Organik Güneş Pilleri

Polimerler, moleküler organik camlar gibi organik malzemeler p tip veya n tip yarı iletken özelliği gösterirler. Bu malzeme ile oldukça yüksek optik alım katsayıları sağlamak mümkündür. Organik bileşiklerin cinsleri hemen hemen sonsuzdur. Sonsuz alternatif içerisinde malzemenin bolluğu, düşük ısılarda üretim kolaylığı ve düşük maliyet malzeme seçimini belirler (Ünal, 2006).

2.6.10. Son Yıllarda Üzerinde Çalışılan Güneş Pilleri

Ticari ortama girmiş olan geleneksel Si güneş pillerinin yerini alabilecek verimleri aynı ama üretim teknolojileri daha kolay ve daha ucuz olan güneş pilleri üzerinde de son yıllarda çalışmalar yoğunlaştırılmıştır.

Bunlar; fotoelektrokimyasal çok kristalli titanyum dioksit piller, polimer yapılı plastik piller ve güneş spektrumunun çeşitli dalga boylarına uyum sağlayacak şekilde üretilen enerji band aralığına sahip kuantum güneş pilleri gibi yeni teknolojilerdir (URL-10, 2011).

2.6.11. Auger Jenerasyon Malzeme

Bu kavramda yüksek enerji fotonları nokta iyonizasyon yöntemi ile iki veya daha fazla delik oluşturmaktadır. Yarıiletkenlerde bu tür malzemenin teorik verimliliği %42 olmaktadır. Teorik olarak bu yapı oluşturulmuş ancak böyle bir malzeme henüz üretilenmemiştir. Werner ve arkadaşlarına göre bu malzeme 0,95 eV indirekt aralık 1.9 eV direkt aralık değerlerine sahip olmalıdır (Werner, 2000). Muhtemel malzemenin silisyum germanyum bileşimi olması düşünülmektedir.

2.7. Güneş Pili Güç Verimlilikleri

Fotovoltaik güneş pillerinin sürekli gelişimlerine bağlı olarak verimliliklerinin özetlendiği çizelgelerin geçerlilik süreleri oldukça kısa olmaktadır. Ancak, karşılaştırılmalı bir kaynak olması amacı ile Fraunhofer Enstitüsü tarafından yapılan en yüksek verimlilikleri gösteren özet Tablo 2.6 'da verilmiştir (Karamanav, 2007).

Tablo 2.6. Güneş pili verimleri

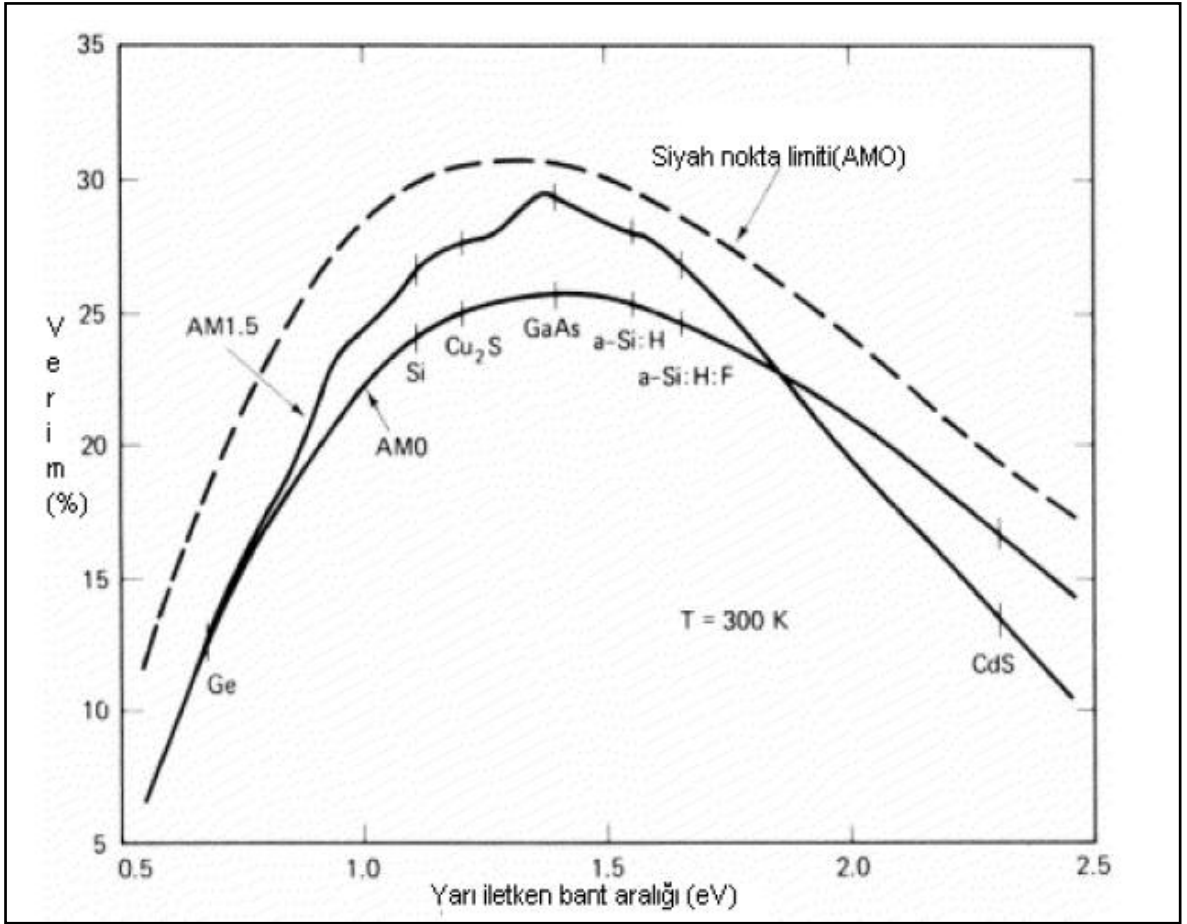
Fotovoltaik Pilin Cinsi	Alan (cm^2)	Verim (%)
Tek Kristalli Silisyum	4,00	24
Çok kristalli Silisyum	21,2	17,4
Amorf Silisyum	1	14,7
Cu/In, Ga,Se ₂	0,4	17,7
CdTe/CdS	-	15,8
GaAS Tek kristal	1	23,9

Katı faz fiziği açısından silisyumun (Yasak enerji aralığı 1,1 eV) PV dönüşümü için ideal bir malzeme olmadığını bilmekteyiz. Güneş spektrumu morötesinden (ultraviyolede – enerjisi 2.7eV) kızılötesine (enfraruja – enerjisi 1,7eV) kadar geniş bir aralığı kapsar. Öte yandan bir yarı iletken belirli aralıktaki enerjiyi fotonlar aracılığıyla enerjiye dönüştürür (Ünal, 2006).

Düşük enerji düzeyindeki fotonlar yarı iletkenler tarafından algılanamazlar. Yüksek enerjili fotonlar ise belirli bir enerji aralığına indirgenerek algılanabilirler. Şekil 2.18.'de görülen eğri, verimliliği band aralıklarına göre tanımlar. Şekil 2.18 'de görüldüğü gibi silisyum en üst seviyedeki verimliliği sağlamasa da en üst düzeye yakındır. Daha önemli bir nokta silisyumun indirekt yarı iletken oluşudur. Bu tür yarı iletkenlerdeki ışık soğurma özelliği, direkt yarı iletkenlerdeki soğurma özelliğinden daha düşüktür (Ünal, 2006).

Silisyum, PV gelişimden önce büyük miktarlarda üretilmesi, mikroelektronik pazarda kullanılması, az malzeme kullanımı, kullanım teorisinin iyi bilinmesi ve çok kolay bir şekilde kontrol edilmesinden dolayı güneş hücrelerinde tercih edilmektedir (Ünal, 2006).

Bu alanda büyük araştırmaların yapılması sürpriz değildir. Güneş pili için ideal malzeme şartları şunlardır; 1.1 ile 1.7 eV band aralığı, direkt band yapısı, bol miktarda bulunabilirlik, zehirli olmayan malzeme, kolay üretilme, kolay atılma, çok miktarlarda üretilme, iyi PV dönüşüm, uzun süre dayanabilme.



Şekil 2.18. Dönüşüm veriminin yarı iletken band aralığına bağlılığı

Bütün bu şartları sağlayan bir malzeme henüz bulunamamıştır. Bu özellikleri sağlayan malzemenin en önemli özelliği yüksek ışık soğurma katsayısına sahip olmasıdır. Bu özellik sağlandığında PV alanında kullanılan kristal silisyum miktarı büyük ölçüde azalacaktır. İnce film malzemenin kullanılması halinde, bu malzeme ile seri bağlantılarla büyük alan tasarrufu yapılmış olacaktır. Güneş enerjisinin geleceği için üç senaryo öngörülmektedir(Ünal, 2006).

1. Günümüzde kullanılan tek kristal veya bütünleşik çok kristal teknolojisinin etkinliğinin devamı
2. Şerit veya orta kalınlıkta yeni bir silisyum film kristali
3. a-Si veya CIS veya CdTe gibi ince film malzemenin büyük miktarlarda üretimine geçilmesi

Uzun vadede organik güneş pili veya III/V-tandem pil gibi yeni kavramlar ve malzemelerin kullanılma olasılığı ortaya çıkacaktır (Ünal, 2006).

3. MATERYAL VE METOD

Fotovoltaik sistemler üç ayrı grupta toplanır. Birincisi güneş modülüdür. İkincisi enerjiyi kullanan gruptur. Üçüncü grup ise enerji üretimi ile tüketimi arasında kalan ve sistemi dengeleyen araçlardır. Bu grupta akü, şarj kontrol devresi, evirici devresi ve kablolar bulunmaktadır. Şekil 3.1 fotovoltaik sistemlerin akım-enerji dengesini göstermektedir (Özgöçmen, 2007).

H (Wh/m ² ×gün)	: Işınım
P_{PV} (W)	: Güneş Pili Gücü
A (m ²)	: Güneş Pili Alanı
η_{PV}	: Fotovoltaik Çevrim Enerji Verimi
E_{PV}	: Alanı (m ²) iken, Güneş Pilinin Standart Koşullarda Ürettiği Enerji
E_{L1} (W)	: Şarj Denetleyici Çıkışındaki Enerji
E_{L2} (W)	: Yüke Verilen Enerji
E_L (Ah/gün)	: Yüke Verilen Enerji
η_A	: Akü Verimi
η_S	: Bağlantı, Kablo ve Sistem Bileşen Kayıpları
η_{INV}	: Evirici Verimi
I_{PV}	: Güneş Pilinin Ürettiği Net Akım
I_m	: En yüksek güç noktasında güneş modülü akımı
n_m	: Düzeltme - İndirgeme Katsayısı (Nominal değerlerden sapma)
t (saat)	: Yüke verilen enerji ile yükün çalışma süresi
P_L	: Yük Gücü
V	: Sistem Gerilimi

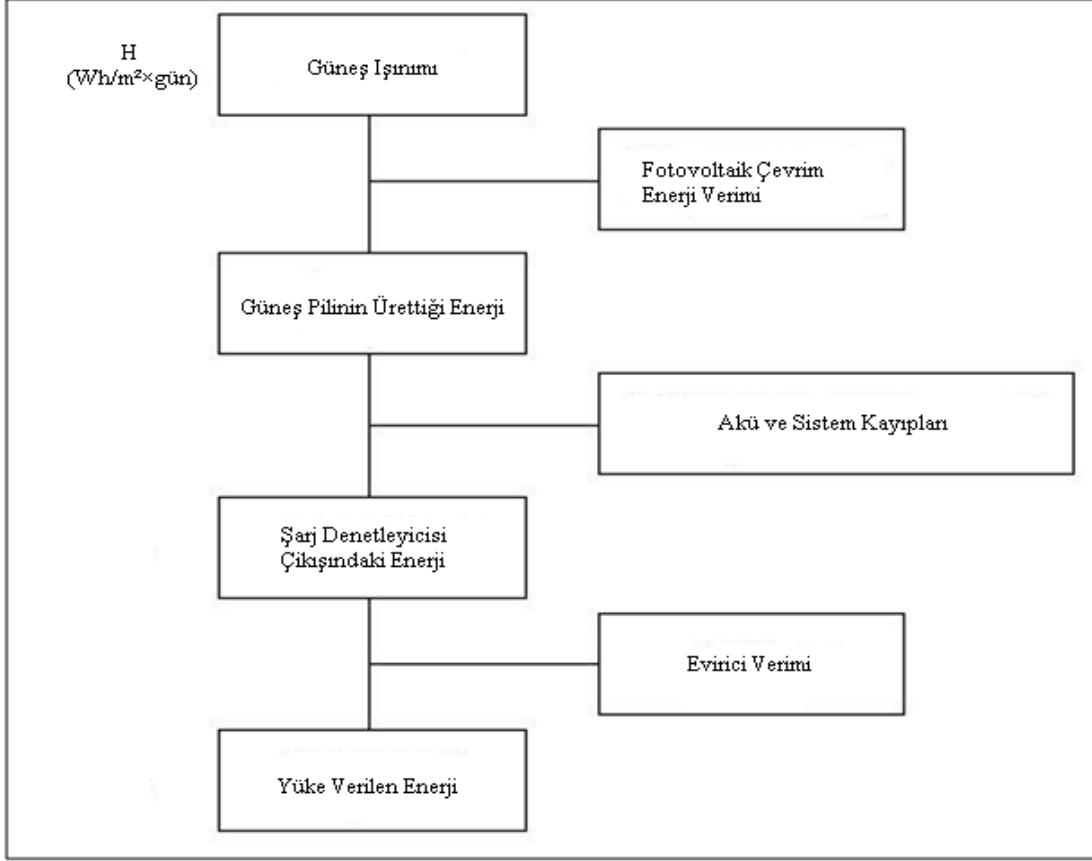
$$E_{PV} = P_{PV} \times (H/1000) = \eta_{PV} \times A \times H \quad (3.1)$$

$$E_{L1} = \eta_A \times \eta_S \times E_{PV} \quad (3.2)$$

$$E_{L2} = \eta_{INV} \times E_{L1} = \eta_A \times \eta_S \times \eta_{INV} \times E_{PV} \quad (3.3)$$

$$I_{PV} = n_m \times I_m \quad (3.4)$$

$$t = E_L / (P_L / V) \quad (3.5)$$



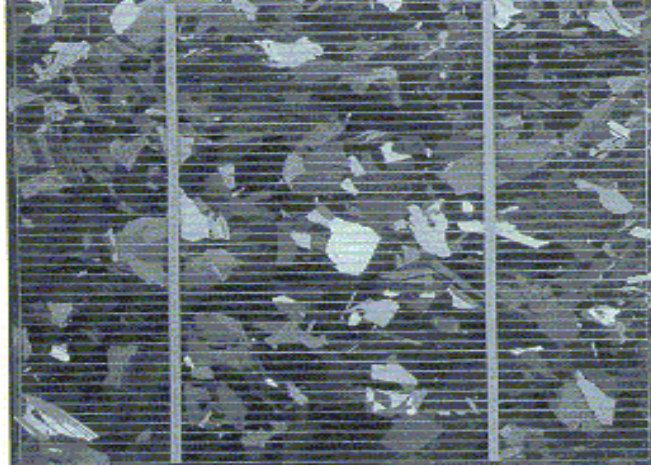
Şekil 3.1. Fotovoltaik sistemlerin akım - enerji dengesi

3.1. Güneş Modülü

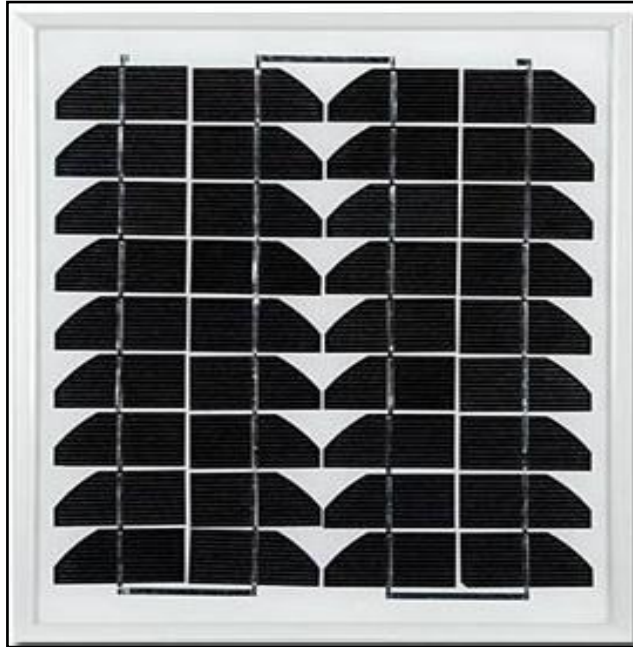
Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır.

Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir.

Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç Watt'tan megaWatt'lara kadar sistem oluşturulur (URL-10, 2011).



Şekil 3.2. Güneş pili



Şekil 3.3. Güneş pili modülü

Deneyisel sistemde kullanılan güneş modülünün standart şartlar altında (AM 1,5 - 25 C^0 - 1000 W/m^2) teknik özellikleri;

- Panel tek kristalli (monokristal) yapıdadır.
- Panelin en fazla gücü 10W'dır.
- En yüksek güç tüketimindeki gerilimi 17,2 voltur.
- En yüksek güç tüketimindeki akımı 582 mA dir.
- Panelin açık devre gerilimi 22 voltur.
- Panelin kısa devre akımı 0,651 amperdir.
- Panelin (125x1,25 cm ebatlarında kesilmiş) 36 hücreden oluşmuştur.
- Panel çalışma sıcaklık aralığı -40 C , +80 C dir.
- Panel performans tolerans aralığı -3% / +3% değerindedir.
- Panel 1,25 kg ağırlığındadır.
- Panel (365 X 293 X 23) mm ebatlarındadır.
- Hücre verimi %13 den, modül verimi %11 den büyüktür.
- Panel çerçevesi alüminyumdan yapılmıştır.
- 2 Yıl ürün garantisi ve 25 yıl boyunca %80 güçle çalışma garantisi vardır.

3.2. Akü

Fotovoltaik sistemlerde aküler, güneş modülleri tarafından üretilen elektriği depolar ve yük ihtiyacını karşılayacak yeterli güç üretilmediği zaman kullanırlar. Akünün sistem içinde doğru işletilmesi sistemin güvenilir çalışmasının en önemli yönüdür.

Akü hücrelerinin kapasiteleri amper saat cinsinden verilir. Bu tam şarjlı bir aküden belirli bir deşarj oranı ve elektrolit sıcaklığı altında, belirli bir gerilime kadar çekilebilen elektrik miktarıdır.

Yaygın olarak kullanılan aküler kurşunasitli akülerdir. Çünkü bu tip aküler defalarca dolup boşalırken kapasitelerinin %80'inin korurlar. Bataryalar şarj sırasında hidrojen ve oksijen gazı çıkardıkları için havalandırması iyi olan ve elektrikten izole edilmiş olan bir ortamda tutulması önerilir. Bu gazların çıkması ile elektrolit içindeki aktif maddeler azalır ve elektrolitin direnci artar. Ayrıca açığa çıkan gaz miktarı artarsa yanma veya patlamalara sebep olabilir. Akülerin en büyük dezavantajı ağırlıklarıdır. Akü ömrü yapabileceği tam devir adedi ile sınırlıdır. Tamamen dolu bir akü tamamen boşalıp arkasından tekrar tamamen doldurulduğunda, akü tam devir yapmış olur. Aynı şekilde tamamen dolu bir akü kısmen boşaldıktan sonra tekrar doldurulduğunda ise, akü bir kısmi devir yapmış olur.

Akünün devir mukavemeti elektrolitin sulandırılması ile yükseltilebilir. Ancak bu durumda akünün iç direnci yükseleceğinden bu defa da akünün kendi kendine boşalması hızlanır (Şenpınar, 2005).

Aküler aşırı şarj ve deşarjdan korunmalıdır, ayrıca uzun süreli düşük şarj seviyesinde tutulmaması gerekir. Aküler seri bağlanarak gerilimleri, paralel bağlanarak akım kapasiteleri arttırılır. Bataryaların verimi ortalama %70-80 civarındadır. Ortam sıcaklığı da batarya verimini etkiler. Ortam sıcaklığındaki her 10 C⁰ artış bataryanın kullanım süresini yarı yarıya azaltır. Kurşunasitli bataryanın 20 C⁰ sıcaklıktaki kullanım süresi 5-10 yıl arasında değişmektedir (Şenpınar, 2005).

Deneyisel sistemde kullanılan akü (Eurostar ES1212); Bakımsız kuru tip akü olup, 12V 12 Ah gücünde, (96,5x151x98) mm ebatlarında, 3,55 kg ağırlığındadır. Akü ömrü 5 yıldır.

Akü, valf regüleli kurşun asit akü olup tam bakımsızdır. Bilinen diğer akülerde olduğu gibi sıvı elektrolitlidir(jel haldeki sulfürikasit). Normal akülerdeki saf su tamamlama kapakları yerine, iç basıncı regüle eden valf özellikli özel kapaklar kullanılmıştır. Bu sayede oksijen kaybı önlenir ve şarj anında oluşan gazların açığa çıkarılması sağlanır. Valf regüleli bu akülerin kullanımında da diğer akülerde olduğu gibi, elektrik akımının tehlikelerine karşı, elektrolit gazının patlama riski ve elektrolitin aşındırıcı etkileri gibi tüm risklere karşı emniyet kuralları uygulanmalıdır. Akünün regüleli kapakları asla açılmamalıdır. Çünkü bu akülerde saf su veya demineralize su kullanımına ihtiyaç yoktur.

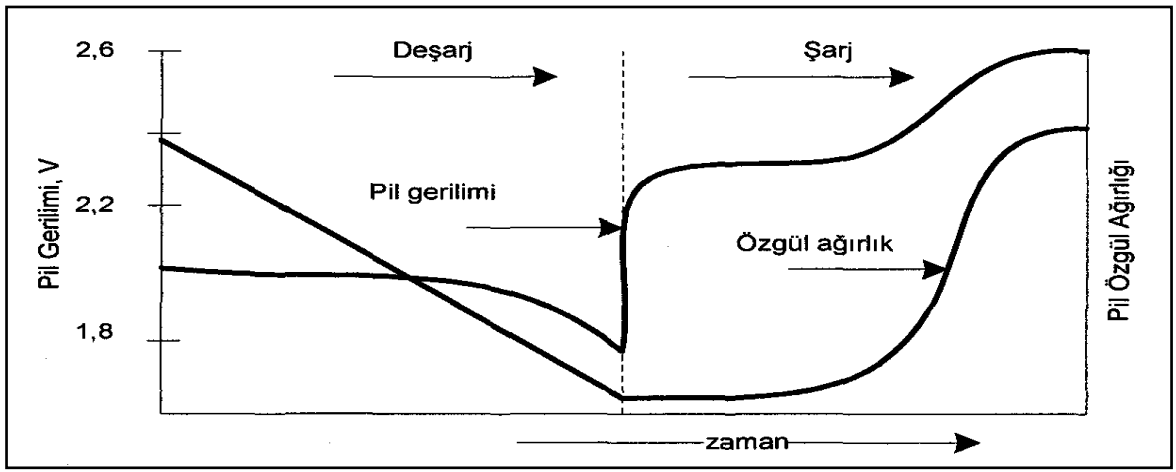
Yüksek performanslı plakalar ve elektrolit, güç yedekleme sistemleri için fazladan güç çıkışı sağlar. Genel kullanım alanları, UPS ve acil durum aydınlatma sistemleridir.



Şekil 3.4. Akünün dıştan görünümü

3.3. Şarj Kontrolörü (Regülatörü)

Bataryalı bütün sistemlerde bir şarj kontrolörü temel elemandır. Şarj kontrolörü, yük ve panel arasındaki çalışma sırasında bataryanın çalışmasını kontrol eder. Şarj kontrolörü, batarya deşarj durumu belli bir duruma ulaştığı zaman yükü ve batarya tamamen şarj olduğu zaman ise güneş panelini devreden ayırır. Kontrolör, değişik şarj, deşarj ve sıcaklık şartları altında en uygun batarya-sistem performansını sağlar. Değişik şarj ve deşarj durumunda, batarya uç gerilimi Şekil 3.5 'de gösterilmiştir (Messenger ve Ventre, 2004).



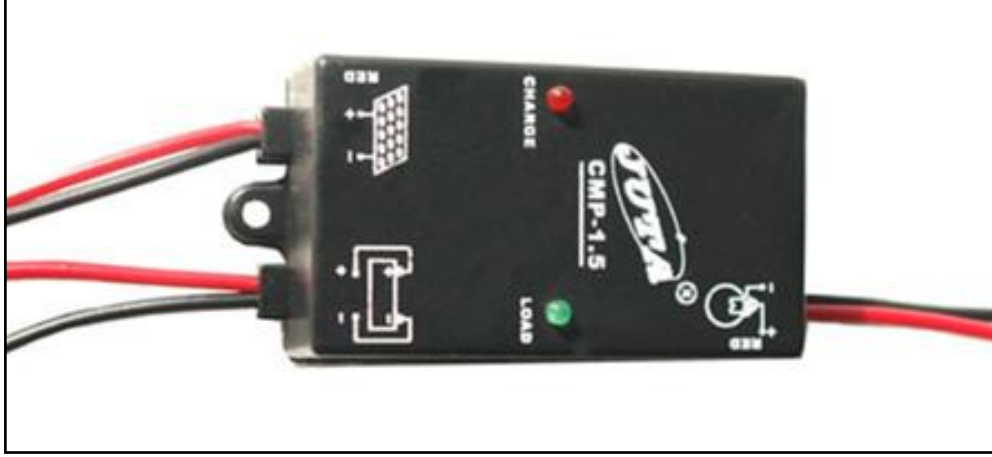
Şekil 3.5. Sabit bir oranda şarj ve deşarj boyunca pil elektrolitinin özgül ağırlığı ve pil geriliminin değişimi

Regülatör seçerken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, regülatörün gerekli olan en fazla akıma dayanıklı olmasıdır. Panel gücü ve kullanılan batarya gerilim değerine göre uygun şarj regülatörü seçimi Tablo 3.1'de gösterilmiştir (URL-12, 2011).

Tablo 3.1. Şarj regülatörünün panel gücü ve gerilim değerine göre seçimi

En Uygun Gerilim Değeri	Panel Gücü (W)	En fazla akım (amper)
12 V	153	9
	374	22
	544	32
	748	44
	1020	60
24 V	216	9
	748	22
48 V	340	5
	1088	16

Deneyde kullanılan Juta 12V 3 Amper mini solar (CMP12) şarj kontrolörü Şekil 3.6 da ve teknik özellikleri Tablo 3.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Şarj kontrolörü

Tablo 3.2. Şarj kontrolörü için teknik bilgiler (25 C⁰ de)

Model	CMP12 3A
En fazla yük akımı	≤3A
Ani gerilim düşüşü	<100mV
Gerilim derecesi	12 V
Yüksek gerilim kesme değeri	13.7V - 27.4V
Düşük gerilim kesme değeri	10.5V - 21.0V
Düşük gerilim bağlanma değeri	12.6V - 25.2V
Sıcaklık düzenleyicisi	-3mV/°C/cell
Kendi tüketimi (en fazla)	≤10mA
En büyük bağlantı terminali	2.5mm ²
Boyut	35 x 55 x 20 (mm)
Ağırlık	0.55kg

3.4. Eviriciler (İnverterler)

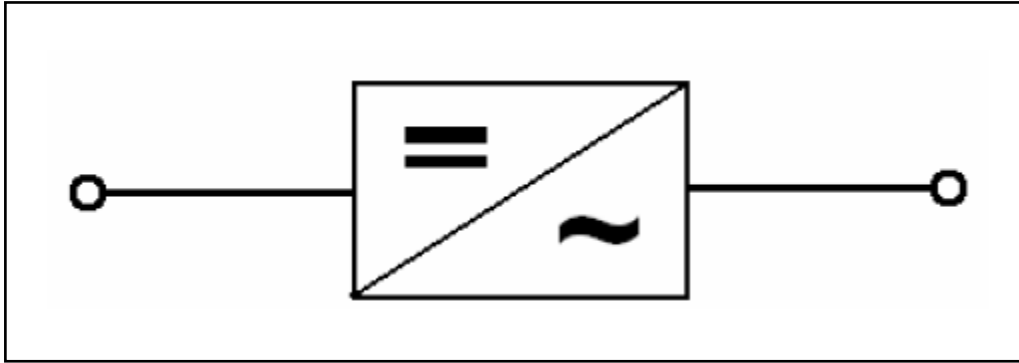
Eviriciler temel yapı olarak, doğru gerilimden genliği ve frekansı ayrı olarak ayarlanabilen alternatif gerilim üreten güç elektroniği çeviricileridir.

Eviricilerin çalışmasındaki temel ilke, IGBT, MOSFET, GTO, BJT gibi güç elektroniği yarı iletken anahtarlama elamanlarının uygun şekilde bağlanmaları ve uygun sıra ve zamanda iletim ve kesime sokularak, girişteki doğru gerilimi çıkışta alternatif gerilime dönüştürmektir. Eviriciler gibi güç elektroniği çeviricilerinde yarı iletken

elemanlar anahtarlama elemanı olarak kullanıldığından, bu yarı iletken elemanlar lineer bölgede değil doyum bölgesinde çalıştırılırlar.

Evirici çıkışında genliği ve frekansı belirlenebilen gerilim alternatiftir, ancak sinüzoidal değildir. Çıkışta elde edilmek istenen saf sinüzoidal bir alternatif gerilimdir. Ancak doğru gerilim formunun değiştirilmesi ile evirici çıkışında saf sinüzoidal bir gerilim elde etmek mümkün değildir. Elde edilen gerilim, belli bir çıkış frekansına sahip ve belli bir genliği olan sinüzoidal gerilim ve bu frekansın katlarına sahip ve belli genlikleri olan sinüzoidal gerilimlerden oluşur. Bir başka deyişle evirici çıkış gerilimi, içinde saf sinüzoidal ana harmonik gerilimine ilaveten harmonik bileşenleri bulunduran harmonikli bir dalga şeklindedir.

Amaç çıkışta saf sinüzoidal bir gerilim dalga şekli elde etmek ise, tasarımda oluşması kaçınılmaz bu harmoniklerin yok edilmesi ya da ihmal edilebilir seviyelere indirgenmesi büyük önem kazanır. Evirici temel olarak Şekil 3.7 'deki gibi gösterilir.



Şekil 3.7. Evirici gösterimi

Eviriciler uygulamadaki besleme özelliklerine göre akım beslemeli ve gerilim beslemeli olarak iki grupta toplanırlar. Akım beslemeli ya da gerilim beslemeli eviriciler arasında yapılacak seçim yükün özelliklerine göre değişir.

Gerilim beslemeli eviricilerde çıkış gerilim dalga biçimi, giriş doğru gerilimi ve anahtarlama yöntemi ile belirlenir. Yük bu dalga biçimine etki edemez. Eğer yük harmonik akımlara yüksek empedans gösteren bir özellik taşıyorsa, bu tip yükün gerilim beslemeli bir evirici ile sürülmesi daha uygundur (Ahmed, 1998).

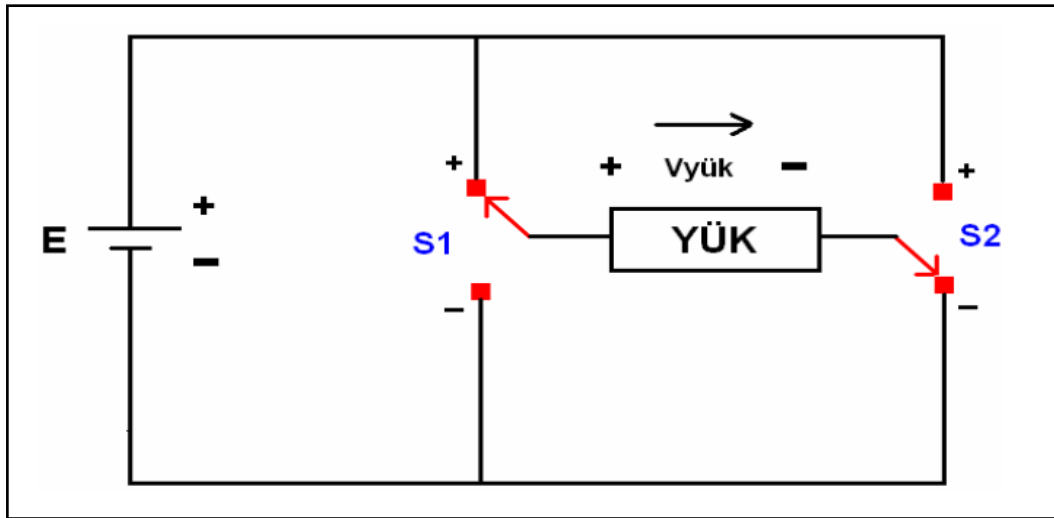
Akım beslemeli eviricilerde, eviriciyi besleyen kaynak sabit bir akım kaynağı özelliği taşır. Eviricilerin kaynaktan çektiği akımın sabit kalması, doğrultucu bir devrenin çıkışına

seri bağlanacak çok büyük bir self (endüktans) ile sağlanabilir. Eğer evirici çıkışındaki yükün harmonik akımlara düşük empedans gösteren bir özelliği varsa, bu durumda akım beslemeli inverter kullanmak daha uygun olur (Ahmed, 1998) (Gülgün, 1999).

Eviriciler, çıkış dalga şekillerinin istenilen frekansta ve genlikte ayarlanılabilmesi nedeniyle (istenilen gerilimin elde edilmesi, elektrikli taşıma sistemleri, bir fazdan üç faza çevirme, asenkron motor kontrol vb.) piyasada çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

3.4.1. Eviricilerin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Daha önceden bahsedildiği üzere, eviriciler, girişine uygulanan doğru gerilimden, yapısında bulunan güç elektroniği anahtarlama elemanlarının uygun sıra ve zamanda iletme ve kesime sokularak istenen genlik ve frekansta alternatif gerilim üreten güç elektroniği çeviricileridir. Uygun tasarımla bir fazlı ya da çok fazlı inverterler yapılabilir. Şekil 3.8 'de temel evirici yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Evirici yapısı

Şekil 3.8 'de görülen devrede; E, eviriciyi besleyen doğru gerilimi, S_1 ve S_2 ideal anahtarları, $V_{yük}$, yük uçlarında görülen gerilimi ve YÜK, endüktans veya kapasite kombinasyonlarından oluşabilen lineer yükü ya da herhangi bir nonlineer yükü temsil etmektedir. Devrenin yapısına dikkat edilirse 4 farklı çalışma durumu olduğu görülür (Ahmed, 1998).

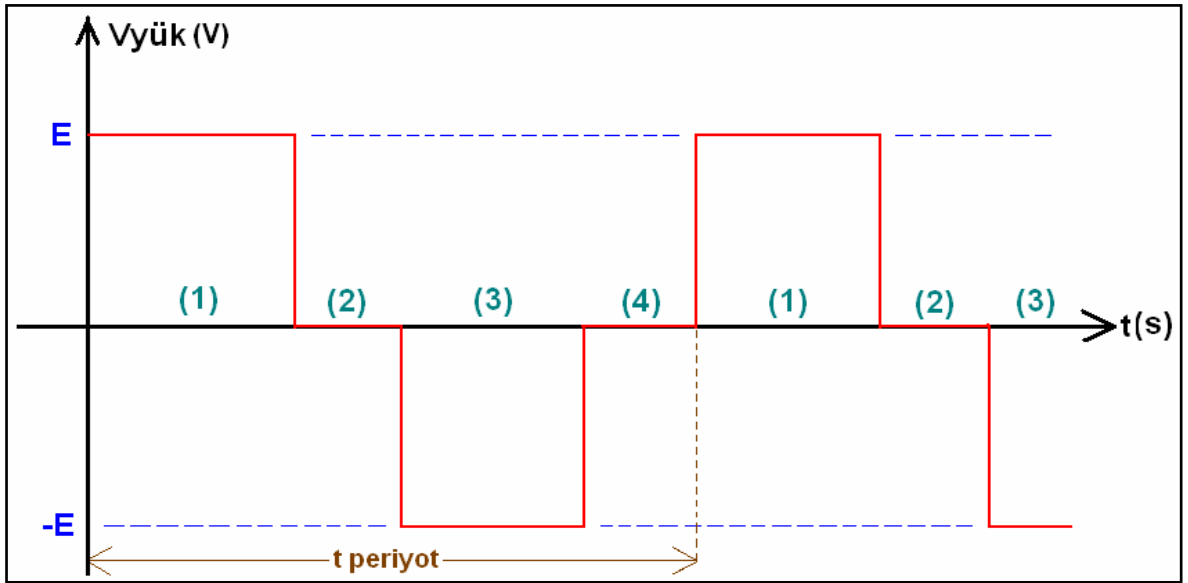
Birinci durumda S_1 anahtarı (+) konumda ve S_2 anahtarı (-) konumda olabilir. Bu durumda yük uçlarında +E gerilimi görülür.

İkinci durumda S_1 anahtarı (+) konumda ve S_2 anahtarı da (+) konumda olabilir. Bu durumda yük uçlarında sıfır gerilim görülür.

Üçüncü durumda S_1 anahtarı (-) konumda ve S_2 anahtarı (+) konumda olabilir. Bu durumda yük uçlarında -E gerilimi görülür.

Son ve dördüncü durumda ise S_1 anahtarı (-) konumda ve S_2 anahtarı da (-) konumda olabilir. Bu durumda yük uçlarında sıfır gerilim görülür.

Bu durumların sırasıyla gerçekleşmesi ve periyodik olarak devam etmesi sonucu yük uçlarında oluşacak $V_{yük}$ gerilim dalga şekli Şekil 3.9 'da gösterilmiştir. Şekil 3.9 'da birinci durumun olduğu kısım (1), ikinci durumun olduğu kısım (2), 3.durumun olduğu kısım (3) ve dördüncü durumun olduğu kısım (4) ile sembolize edilmiştir.

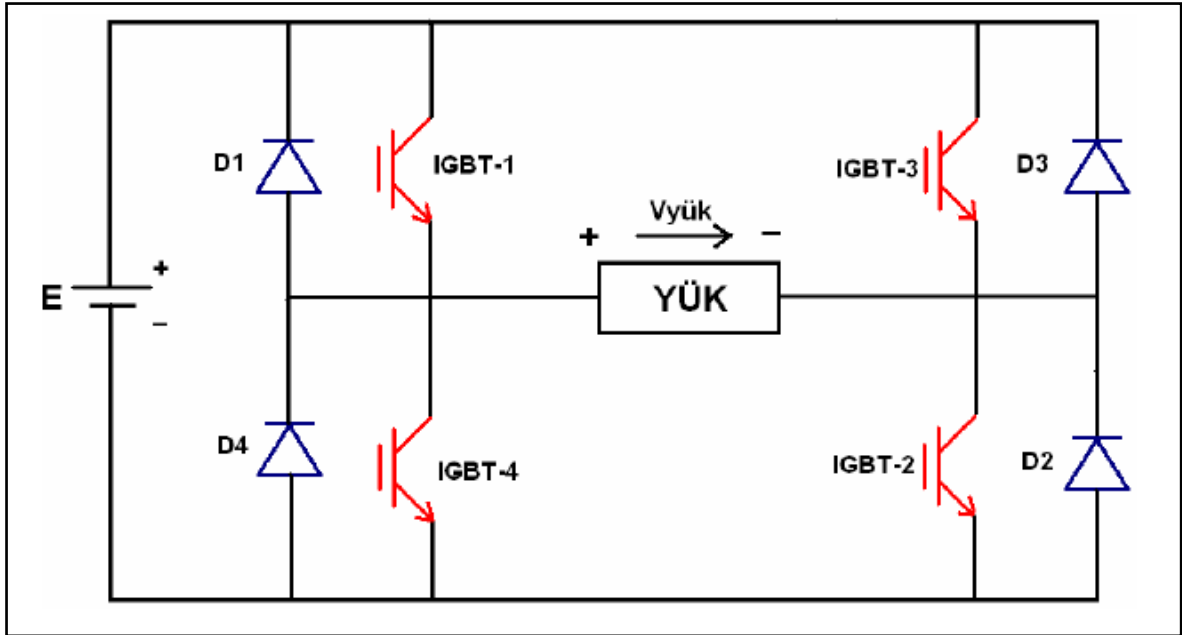


Şekil 3.9. Şekil 3.8 'deki devrede yük uçlarındaki gerilim dalga şeklinin zamana göre değişimi

Şekil 3.9 'dan görüldüğü üzere, bu sıralı ve periyodik dört durumlu çalışma sonucu yük uçlarında periyodu " $t_{periyot}$ " olan kare dalga alternatif bir gerilim oluşur. Oluşan gerilim dalga şeklinin frekansı ise $1/(t_{periyot})$ olur. Çalışma durumlarının süreleri değiştirilerek çıkış geriliminin frekansı da değiştirilebilir. Elde edilen gerilim dalga şekli alternatif olmasına rağmen sinüzoidal değildir. Bu dalga şekli, frekansı $1/(t_{periyot})$ olan ana harmonik gerilime ilave olarak ana harmonik frekansının katlarında harmonik

bileşenleri içerir. Bu da tasarımcıları harmonik bileşenleri en aza indirgeyecek gerilim dalga şekilleri elde edecek tasarımlar yapmaya zorlamaktadır. Teorik hesaplamalar sonucu görülmüştür ki, alternatif gerilim dalga şekli sinüs formuna ne kadar çok benzetilirse, harmonik bileşenlerin genliği o derece az olmaktadır. Bu yaklaşım, evirici tasarımı için oldukça ilkel ama bir o kadar da temel bir genellemedir. Evirici çalışmada karşılaşılan bu harmonik problemleri çözmek için birçok anahtarlama yöntemleri geliştirilmiştir. Darbe genlik bindirimli anahtarlama, kare dalga anahtarlama, tek ve çift yönlü darbe genişlik modülasyonlu anahtarlama ve programlanmış harmonik eliminasyonu bu yöntemlerden bazılarıdır. Bu yöntemler dışında yeni yöntemler de geliştirilebilir.

Şekil 3.10 'da bir fazlı köprü evirici devresi gösterilmiştir. Devrede örnek anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmıştır. Tasarıma göre diğer güç elektroniği anahtarlama elemanları da kullanılabilir. D_1 , D_2 , D_3 ve D_4 diyotları serbest geçiş diyotlarıdır. Yük, herhangi bir lineer ya da nonlineer yük olabilir. E, eviriciye uygulanan doğru gerilimdir.



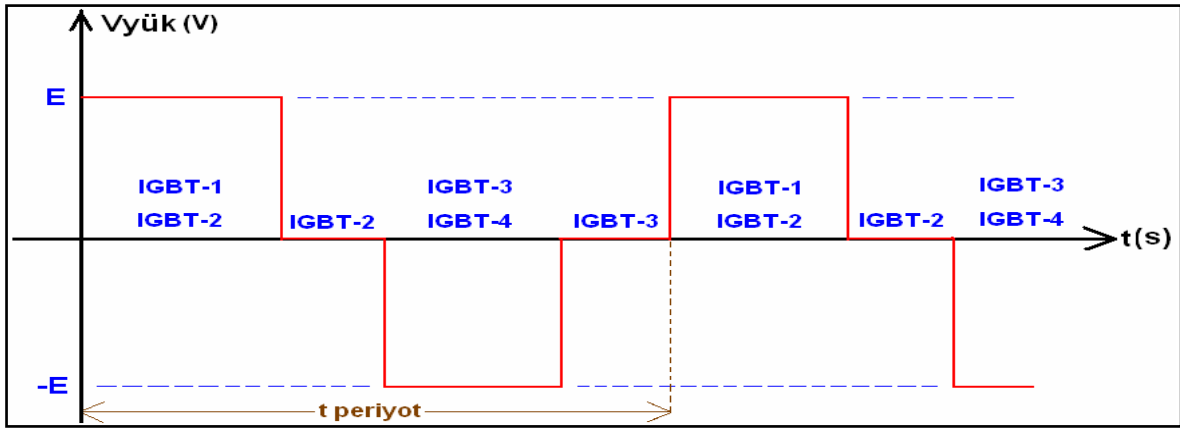
Şekil 3.10. Bir fazlı köprü evirici devresi

Şekil 3.10 'da görülen bir fazlı köprü evirici devresinde, IGBT-1 ve IGBT-2 elemanları ile IGBT-3 ve IGBT-4 elemanları eşlenik çalışmaktadır (Arifoğlu, 2005).

Devrenin genel çalışmasını incelemek için ve serbest geçiş diyotlarının işlevlerini açıklayabilmek için, yükün endüktif özellikte olduğu varsayılmıştır. IGBT-1 ve IGBT-4 ile

IGBT-3 ve IGBT-2 anahtarlama elemanlarının hiçbir zaman aynı anda ilettime sokulmaması gerekir. Devre yapısından görüldüğü üzere, bu çiftler aynı anda ilettime sokulduğunda kısa devre oluşur ve elemanlar yanar.

Tasarıma göre anahtarlama elemanları uygun şekilde kontrol edilerek evirici çıkışında farklı gerilim dalga şekilleri oluşturulabilir. Şekil 3.10 'da görülen bir fazlı köprü evirici devresinin çalışma prensibini açıklamak için, çıkışta Şekil 3.11 'deki gerilim dalga şeklinin oluşturulmak istendiği varsayılmıştır. Daha öncede belirtildiği üzere yükün endüktif özellikte olduğu kabul edilmiştir. Şekilde, farklı bölgelerde sadece iletimde olan IGBT 'lerin isimleri belirtilmiştir.



Şekil 3.11. Şekil 3.10 'daki devre çıkışından elde edilen gerilim dalga şekli

Deneyde kullanılan Linetech 300W Modifiye Evirici Şekil 3.12 'de ve teknik özellikleri Tablo 3.3 'de gösterilmiştir.



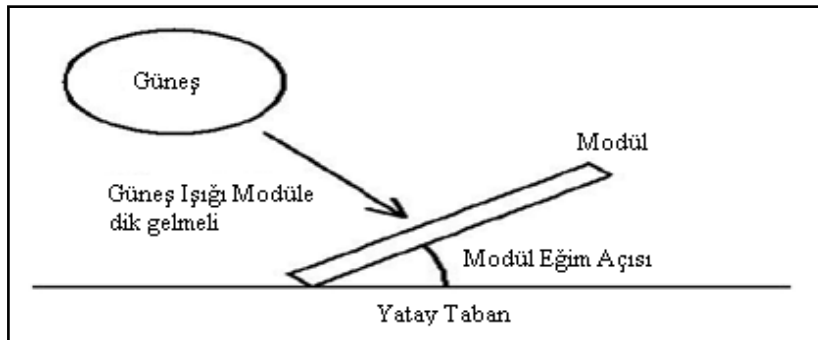
Şekil 3.12. Evirici

Tablo 3.3. Evirici için teknik bilgiler

Model	A301-300-12
DA Giriş gerilimi	12 V
Giriş gerilim aralığı	10 -15 V
DA Giriş akımı	35 A
Bekleme konumu giriş akımı (yüksüz çektiği akım)	0,36 A
Çıkış Gerilimi	230 V (AA)
Çıkış dalga şekli	Modifiye sinüs dalga şekli
Çıkış frekansı	50 Hz \pm 1 %
Devamlı çıkış gücü	300W
Enfazla çıkış gücü	600W
Verim	% 82 - 85
Zayıf pil (akü) kapatma	9,5 \pm 0,5 V DA
Zayıf pil alarmı	10 \pm 0,5 V DA
AC çıkış regülasyonu	\pm 10 %
Termal koruma	45 \pm 5 (°C) (mikrokontrolör)
Aşırı yük koruması	Evet
Pil ex. 12V/24V koruma	Evet
Pil kutupluluk koruması	Evet (Sigorta ile)
Sigorta	25A*3PCS
Boyut	165 x 88 x 74 (mm)
Ağırlık	1,1 kg

3.5. Modül Eğim Açısı

Tasarlanan sistemde kullanılan güneş pili modülünden en iyi verimi elde edebilmek için modülün güneş ışığına dik gelecek şekilde monte edilmesi gerekmektedir. Yüze gelen güneş ışınımı miktarı modül eğim açısına göre değişmektedir.



Şekil 3.13. Modül eğim açısı

Tablo 3.4 Ankara ili için eğime göre ışınım miktarını göstermektedir. Tabloya göre kış toplamı; Aralık, Ocak, Şubat aylarındaki toplam ışınımdır. Ankara için tüm yıl ışınımının en fazla olduğu açı 30° ve kış ayları içinde ışınımın en fazla olduğu açı ise 60°'dir. En son sütunda ise bu üç ayın ışınım ortalaması verilmiştir (Özgöçmen, 2007), (Özdemir, 2003).

Tablo 3.4. Ankara'da aylara göre eğimli yüzeyde güneş ışınımı

Eğim	İlkbahar Ayları			Yaz Ayları			Sonbahar Ayları			Kış Ayları			Yıl Ortalaması	Kış ayları Ortalaması
	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ocak		
0	2528	3722	4861	6139	7028	7111	6556	5111	3528	2083	1417	1694	4315	1731
10	2898	4035	5020	6152	6950	7075	6703	5473	4020	2513	1750	2061	4554	2108
20	3204	4261	5077	6054	6755	6913	6714	5712	4419	2886	2045	2381	4702	2437
30	3737	4392	5030	5844	6442	6625	6585	5820	4714	3190	2291	2645	4776	2709
40	3589	4425	4880	5526	6018	6216	6318	5795	4896	3415	2481	2844	4700	2913
50	3656	4359	4631	5110	5494	5699	5923	5637	4958	3556	2609	2973	4550	3046
60	3636	4196	4292	4608	4887	5089	5411	5350	4900	3607	2672	3028	4306	3102
70	3530	3940	3873	4038	4220	4409	4799	4944	4722	3568	2668	3007	3977	3081
80	3340	3599	3387	3422	3519	3685	4108	4431	4430	3439	2596	2911	3572	2982
90	3073	3184	2851	2787	2823	2954	3365	3826	4034	3225	2459	2743	3110	2809

3.6. Güneş Takip Sistemi

Güneş takip sistemlerinin çalışma şeklini ayçiçeklerine benzetebiliriz. Ayçiçeklerinin sürekli güneşe doğru bakması gibi bu sistemler de güneşin hareketini takip etmektedir. Bu yönüyle güneş takip sistemleri için “elektromekanik ayçiçeği” tabirini de kullanabiliriz (Bilgin, 2006).

Güneş takip sistemlerini aşağıdaki şekilde sınıflandırabiliriz:

- 1) Takip eksenine göre;
 - a) Tek eksen kontrollü
 - b) Çift eksen kontrollü
- 2) Kontrol mekanizmasına göre;
 - a) Yerçekimini kullanan çözümler
 - b) Açık döngü sistemler
 - c) Kapalı döngü sistemler

3.6.1. Yerçekimini kullanarak çalışan sistemler

Şekil 3.14 'de görüldüğü gibi bu sistemlerde panellerin sağ ve sol kenarlarına yerleştirilmiş ve içerisinde özel bir sıvı olan iki adet tüp bulunmaktadır.



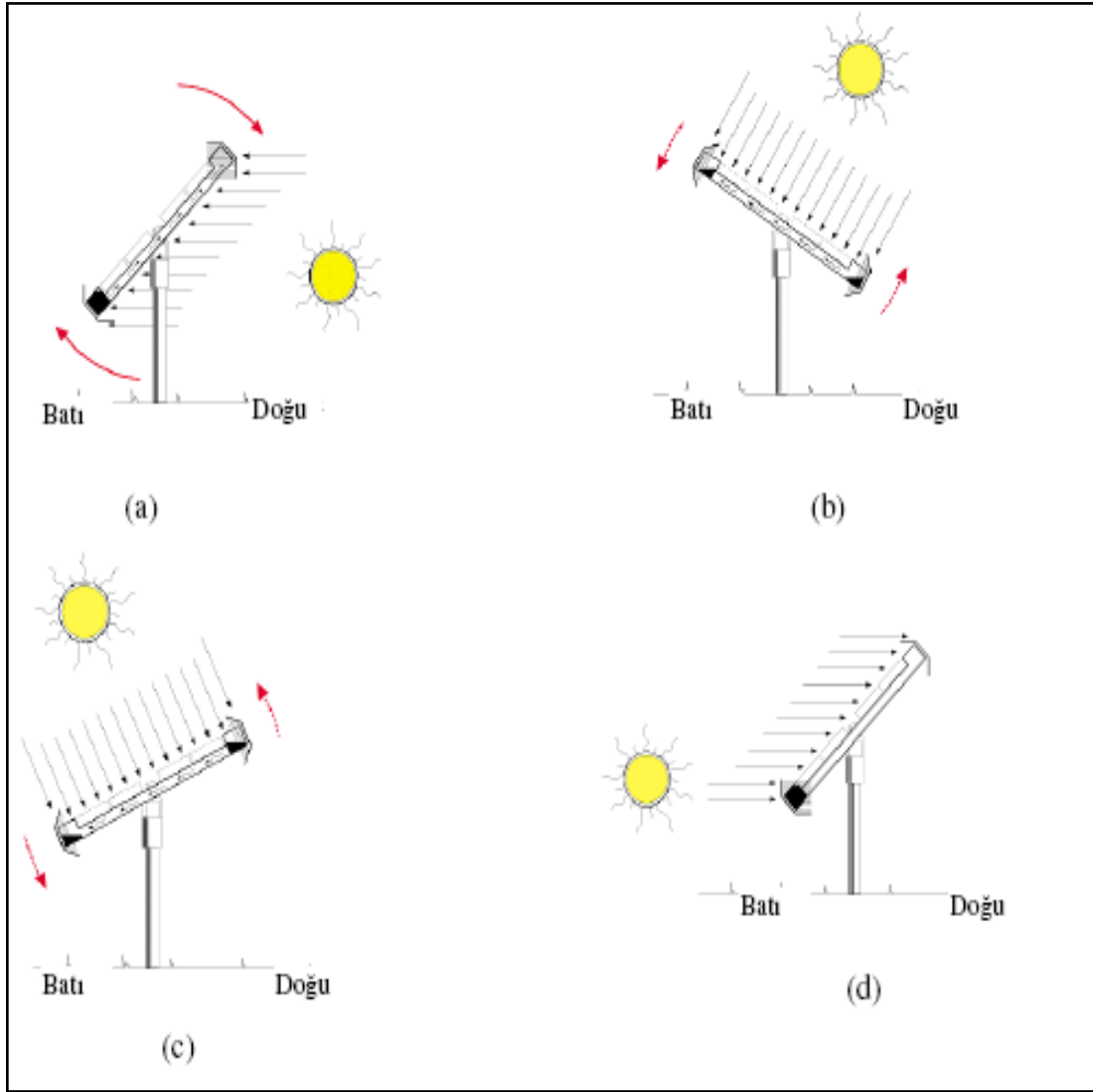
Şekil 3.14. Yerçekimi özelliğine göre çalışan sistemlere iki örnek

Bu tüpler birbiriyle bağlantılı olup birbirleri arasında sıvı geçişi olmaktadır. Tüplerin içerisinde bulunan sıvı ısıya karşı hassas ve genişleme katsayısı yüksektir. Paneller öncelikle ağırlık merkezine göre dengeli bir şekilde yerleştirilmektedirler. Daha sonra bu sıvı tüplerinden daha fazla güneş ışınına maruz kalan taraftaki sıvı genişerek karşı tüpe doğru akmakta ve böylece panelin ağırlık merkezi kaydırıldığı için panel, güneşe doğru hareket etmektedir. Güneş ışınları panel yüzeyine dik gelinceye kadar panel hareketine devam etmektedir (Bilgin, 2006).

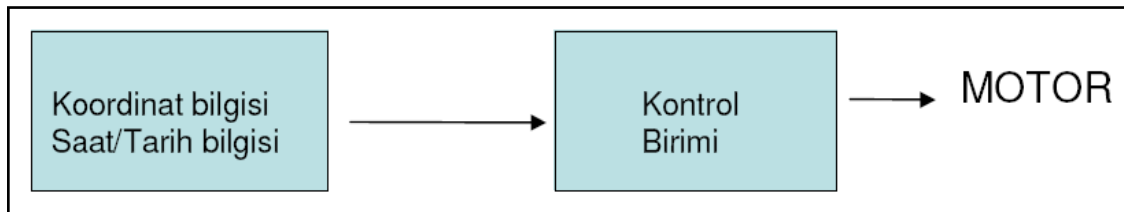
Güneş takibi için herhangi bir elektriksel aksam gerektirmeyen bu sistemlerde takip genellikle tek eksenle yapılmaktadır. Rüzgârın olumsuz etkisini azaltmak için hidrolik damper kullanılmaktadır.

3.6.2. Açık döngü sistemler

Aslında dünyanın herhangi bir noktası için güneşin yılın herhangi bir günü ve saatinde hangi koordinatlarda olacağı bellidir. Bu düşünceden hareketle güneşin yerini tespit etmek amacıyla sensör kullanılmasına gerek duymadan koordinat bilgilerine göre güneş takibi yapan mikroişlemci kontrollü sistemler bu gruba girmektedir(Şekil 3.16) (Bilgin, 2006).



Şekil 3.15. (a) Panel, gecenin batıya bakar şekilde kalmış, sabah alttaki tüpe daha fazla güneş ışını gelmekte ve sıvı yukarı kaba doğru genişmekte
 (b) Güneş ışınları her iki tüpe eşit miktarda gelinceye kadar panel dönmekte
 (c) Güneş hareket ettikçe belli bir açıyla panel güneşi takip etmekte
 (d) Panel, akşam batıya dönük olarak kalmakta



Şekil 3.16. Açık döngü sistemlerin blok diyagramı

3.6.3. Kapalı döngü sistemler

Çeşitli sensörler vasıtasıyla güneşin yerini tespit ederek panellerin güneşe doğru yönelmesini sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerde geri besleme olduğu için kapalı döngü olarak adlandırılmışlardır (Bilgin, 2006). Kullandığımız devre bu gruba girmektedir.

3.6.4. Güneş Takip Sistemlerinin Gerekliliği

Yatay zeminin yüzey normaline z gelme açısıyla gelen ışının birim yüzeye düşen anlık ışımaya şiddeti (Bureau, 2004):

$$I_z = I \cdot \cos z \text{ 'dir} \quad (3.6)$$

Bir yüzeye güneş ışını ne kadar dik gelirse birim yüzeye düşen ışımaya şiddeti o kadar yüksek olacaktır. Güneş takip sistemleri, güneş ışınlarının yüzeye sürekli dik gelmesini sağlayarak elde edilen enerji miktarını artırmaktadır.

3.6.5. Güneş Takip Sistemlerinin Verimi

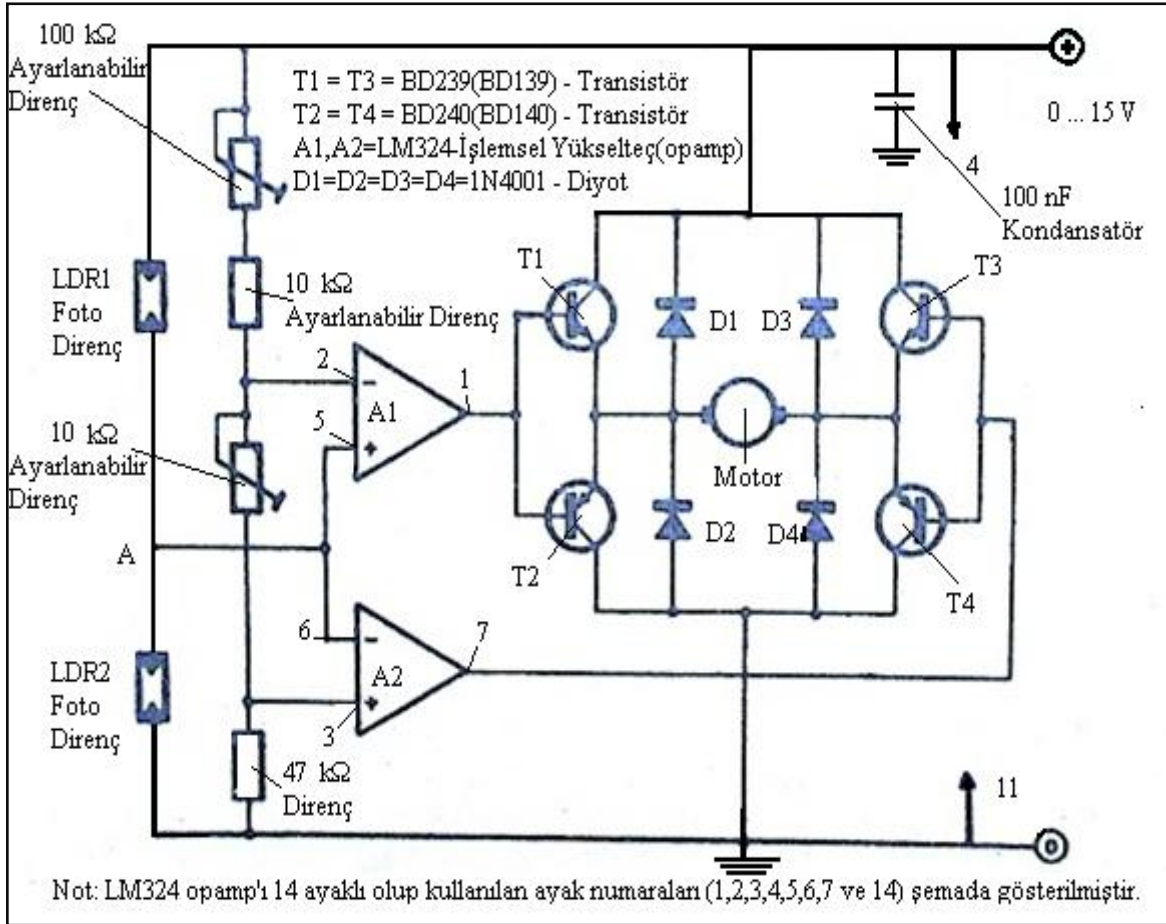
Bir önceki bölümde belirtildiği gibi güneş takip sistemlerinin kullanım amacı elde edilen enerji miktarını artırmaktır. Bu artışın ne kadar olacağı da önemli bir husustur. Bu konuyla ilgili olarak ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından elde edilen bazı şehirlere ilişkin, tek eksen ve çift eksenli güneş takibi yapılması durumunda elde edilen enerji artışı verileri kullanılarak aşağıdaki sonuçlar çıkartılmıştır (Bilgin, 2006).

- Güneş takibi yapılmayan sabit durumda; $5,5 \text{ kWh/m}^2$ yıllık ortalama ışımaya enerjisi elde edilmektedir.
- 1-eksenli takip yapılırsa; $7,2 \text{ kWh/m}^2$ yıllık ortalama ışımaya enerjisi elde edilmektedir. Bu, sabit duruma göre % 30,9 artış demektir.
- 2-eksenli takip yapılırsa; $7,4 \text{ kWh/m}^2$ yıllık ortalama ışımaya enerjisi elde edilmektedir. Bu, sabit duruma göre %34,5 artış demektir.

Bu çalışmada Şekil 3.17 'de devre şeması verilen tek eksen takip yapabilen, kapalı döngü bir sistem kullanılmıştır.



Şekil 3.17. Kullanılan güneş takip sistemi



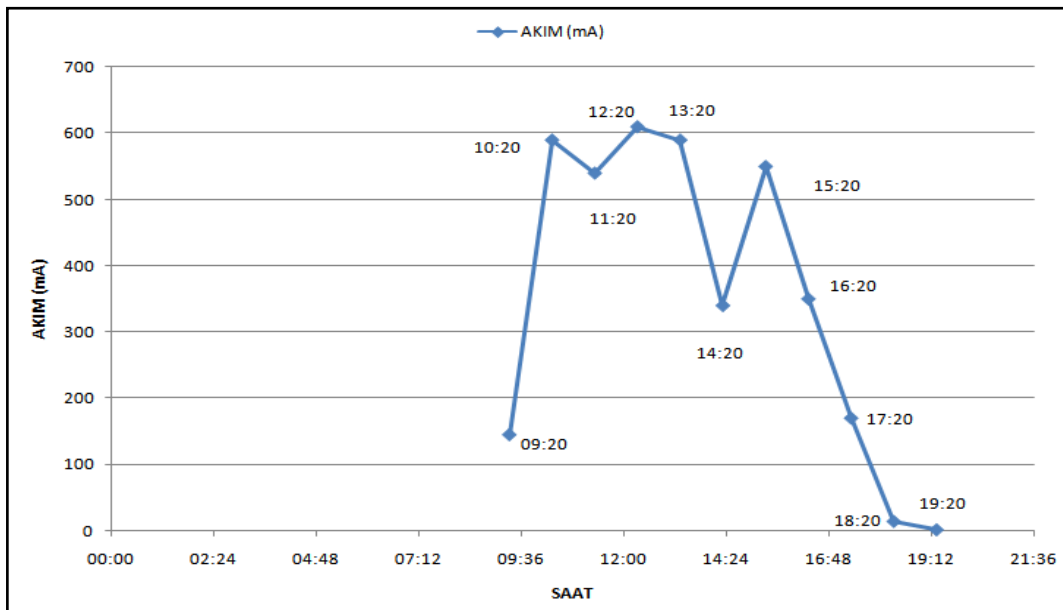
Şekil 3.18. Kullanılan güneş takip sisteminin devre şeması

4. BULGULAR

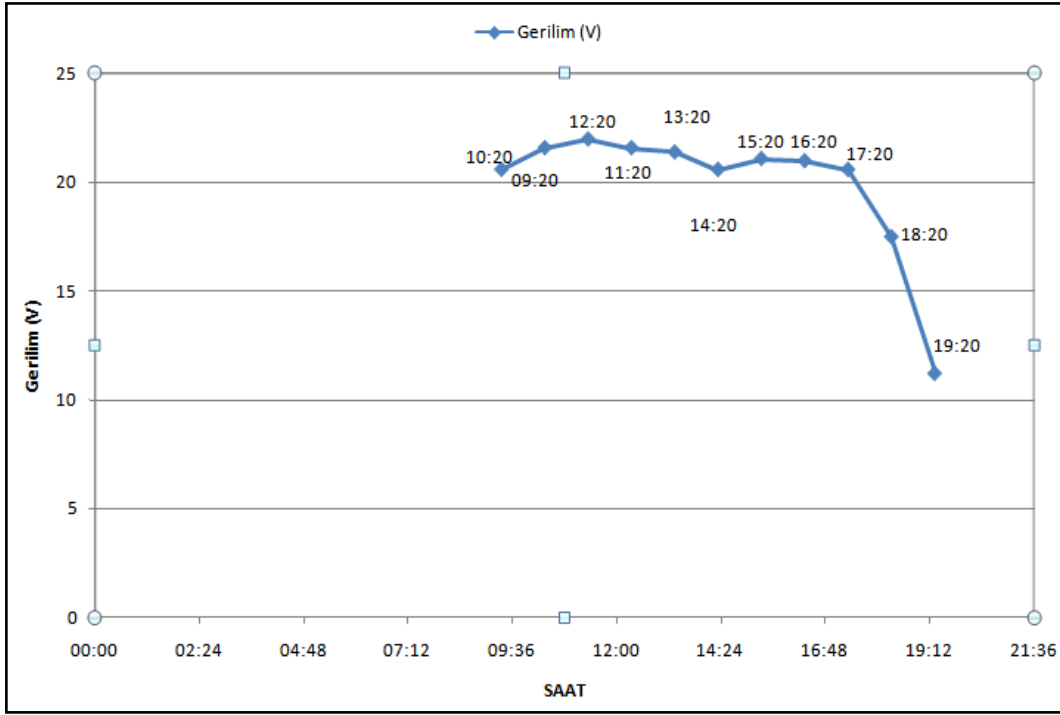
Güneş panelimizin açık devre gerilimi ve kısa devre akımı birer saat arayla ölçülmüştür. (Ölçümler 29.05.2011 tarihinde, Tunceli merkezde, açık havada, ortalama mevsim şartlarında, panel zemine paralel - 0° eğimle - yerleştirilerek alınmıştır.) Ölçüm sonuçları Tablo 4.1 'de gösterilmiştir. Saat 11:20 ve 14:20 'de bulutlanmadan dolayı akım ve gerilimde düşüşler gözlenmiştir ki bu da son derece normaldir.

Tablo 4.1. Açık havada ölçülen akım ve gerilim değerleri (eğim 0°)

SAAT	AKIM (mA)	Gerilim (V)
09:20	145	20,6
10:20	590	21,6
11:20	540	22
12:20	610	21,6
13:20	590	21,4
14:20	340	20,6
15:20	550	21,1
16:20	350	21
17:20	170	20,6
18:20	14	17,5
19:20	1,27	11,2



Şekil 4.1. Güneş panelinin kısa devre akımının zamana bağlı değişim grafiği (eğim 0°)



Şekil 4.2. Güneş panelinin açık devre geriliminin zamana bağlı değişim grafiği (eğim 0°)

İlk olarak güneş panelimiz şarj kontrol devresine bağlanmıştır. Panel çıkış gerilimi 22 V 'dur. (Bu değer 36 hücreli kullanılan panel için geçerli olup daha fazla gerilim istenirse seri panel sayısının artırılması yeterlidir.) Böylece güneşten alınan enerji panele gelerek güneş pillerinin çalışma prensibi doğrultusunda elektrik enerjisi üretilmiştir.

Şarj kontrol devresinin çıkışı ise akü ve evirici devresine bağlanmıştır. Evirici devresi, DC gerilimi AC gerilime çevirip yükselterek 11 W lık tasarruflu ampulün yanması sağlamıştır. Ölçümler 15.05.2011 tarihinde saat 17:00 da açık havada, Tunceli Merkezde panel batı yönünde 60° eğimle yerleştirilerek alınmıştır.

Birinci deneyde panel ve akü, şarj kontrol devresine bağlanarak oda ortamında ve açık havada akü şarj deneyi yapılmıştır ve akünün şarj olduğu görülmüştür. Oda içerisindeki şarj akımı değeri (0,08 A), açık havadaki değerlere (0,14A) göre % 75 daha düşüktür.

Bu düşüklüğün nedenleri ise;

- Güneş ışınımının oda içerisine yeterince ve istenilen açı ile gelememesi,
- Oda camının yansıtıcı özelliğidir.

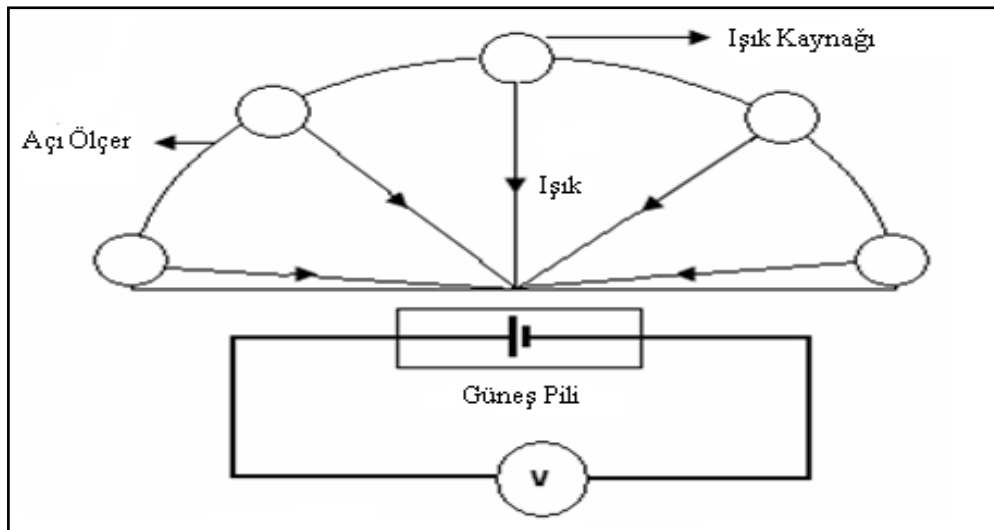
İkinci deneyde; açık havada panelin ve akünün boşa gerilimi (voltmetrede) ölçülmüştür. Şarj kontrol, evirici ve yük (11W 'lık tasarruflu ampul) bağlı değilken panel

girişinde 21,4 V değer ölçülmüştür. Şarj kontrol ve evirici devresi bağlı değilken akü uçlarında yapılan ölçümde ise 12,5 V ölçüm alınmıştır.

Üçüncü deneyde; açık havada sistem bileşenleri bağlı fakat yüksüz durumda sıra ile evirici girişi ve evirici çıkışı gerilimleri voltmetre yardımıyla ölçülmüştür. Şarj kontrol devresi ve evirici devresi bağlı, yüksüz durumda evirici girişi için 12,8 V (DA), evirici çıkışı için 218 V (AA) değerleri gözlemlenmiştir. (Akü dolmakta)

Dördüncü deneyde ise açık havada şarj kontrol devresi ve evirici devresi bağlı, yüklü durumda akü uçlarındaki gerilim 12,3 V (DA), evirici çıkışındaki gerilim 215 V (AA) olarak gözlemlenmiştir. (Panelden karşılanamayan enerjinin bir kısmı aküden karşılanmakta)

Yukarıda alınan ölçümlerden sistemin istenilen şekilde çalıştığı görülmüştür. Beşinci deneyde ise güneş pillerinin çalışmasını etkileyen dış faktörlerden birisi olan foto açısal etkiyi incelemek için karanlık bir oda ortamında sabit ışık kaynağı altında (11 W, 600 Lümen, 30 cm mesafede), sabit sıcaklıkta ($T=21^{\circ}\text{C}$), ışık kaynağı 0° - 180° arasında hareket ettirilerek, güneş panelinin akım ve gerilim değerlerindeki değişim ölçülmüştür. Ölçülen değerlere bağlı olarak güneş panelinin akım ve gerilimindeki değişim grafikleri çizilmiştir. Yapılan ölçüm ve çizilen grafiklere göre, güneş panelinden en iyi verimi alabilmek için ışık kaynağının açısının 90° olması gerektiği görülmektedir. Işık açısı 0° ve 180° olduğunda güneş panelinin verimi minimum düzeydedir.



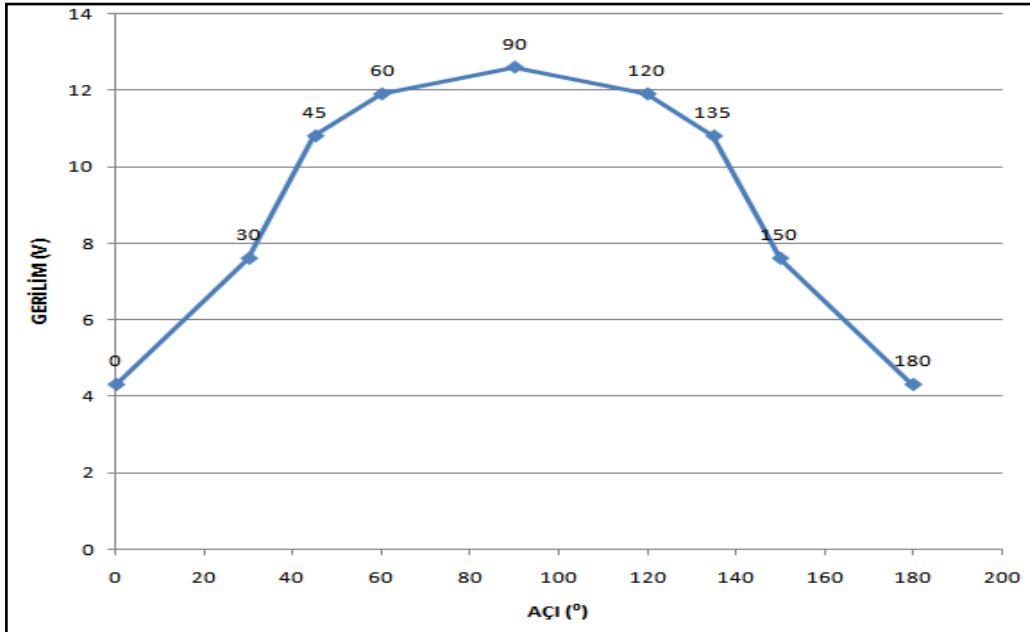
Şekil 4.3. Işığın geliş açısına bağlı olarak güneş paneli veriminin ölçülmesinde kullanılan deney düzeneği

Tek güneş paneli ile yapılan deneyde önce panel sabit tutulmuş ışık açısı 0° ile 180° arasında değiştirilerek güneş panelinin akım ve gerilim değerlerindeki değişimler ölçülmüştür. Daha sonra panel güneş takip sistemi ile birlikte kullanılarak aynı ölçümler tekrarlanmıştır. Bu ölçümler Tablo 4.2 'de görülmektedir.

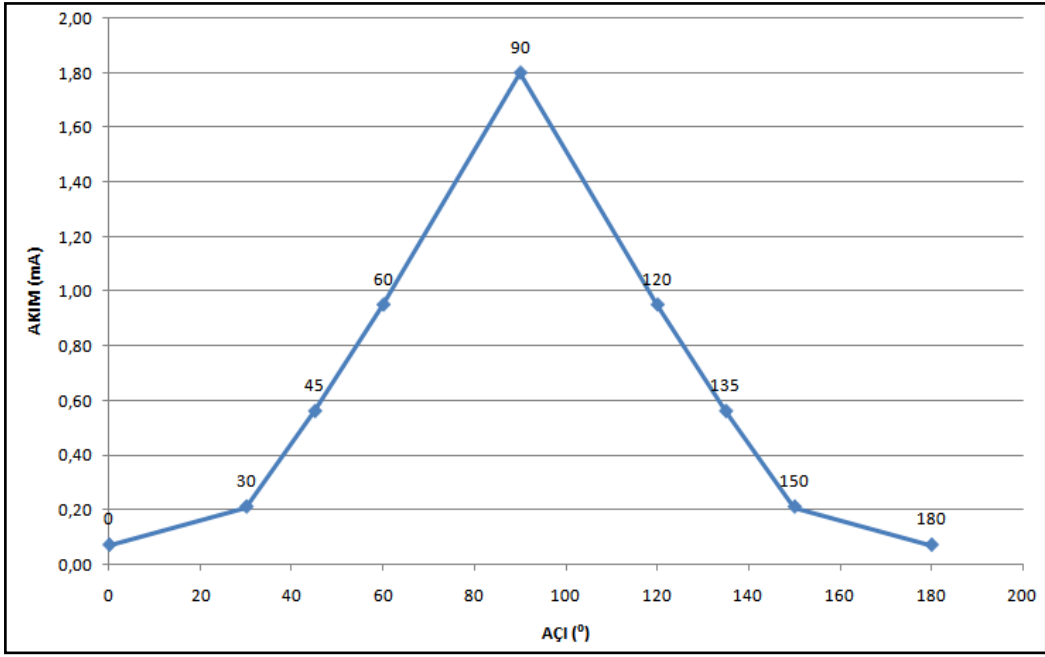
Tablo 4.2. Işık açısına bağlı olarak gerilim ve akım değişimi

AÇI (°)	PANEL SABİT		PANEL HAREKETLİ	
	GERİLİM (V)	Akım (mA)	GERİLİM (V)	Akım (mA)
0	4,30	0,07	12,60	1,80
30	7,60	0,21	12,60	1,80
45	10,80	0,56	12,60	1,80
60	11,90	0,95	12,60	1,80
90	12,60	1,80	12,60	1,80
120	11,90	0,95	12,60	1,80
135	10,80	0,56	12,60	1,80
150	7,60	0,21	12,60	1,80
180	4,30	0,07	12,60	1,80

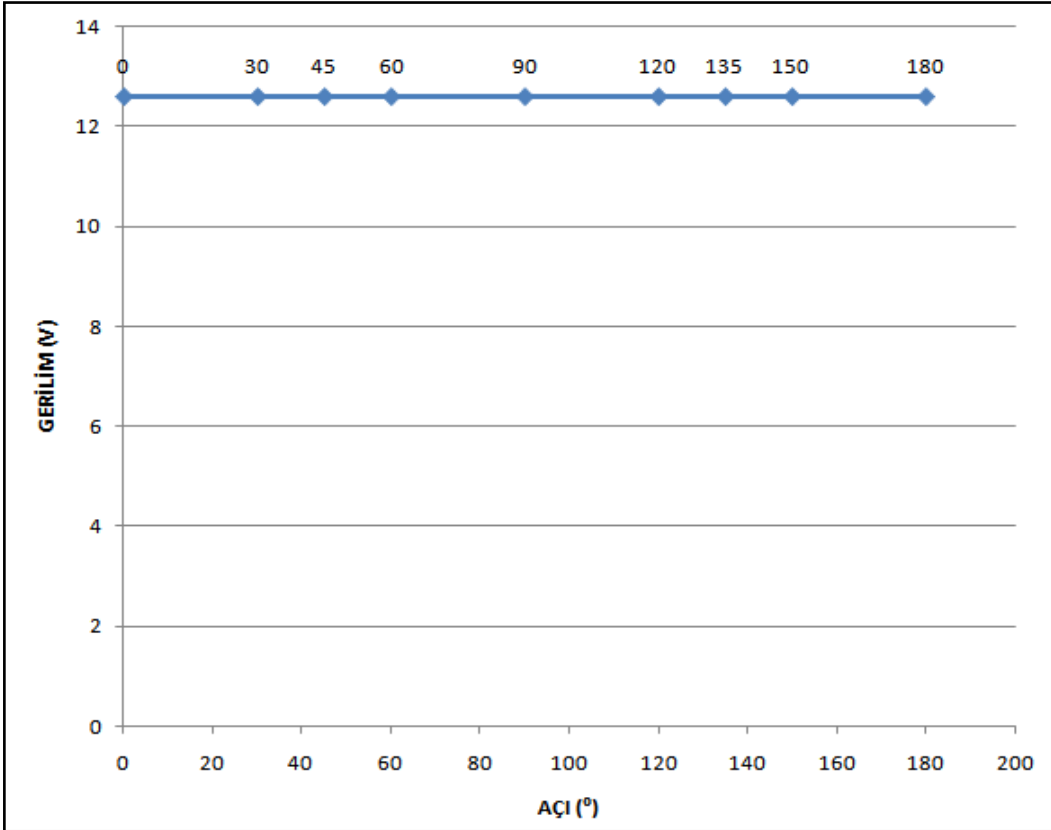
Tablo 4.2 'deki ölçüm değerlerine bağlı olarak; güneş panelinin açık devre geriliminin ve kısa devre akımının açığa bağlı değişim grafiği çizilebilir.



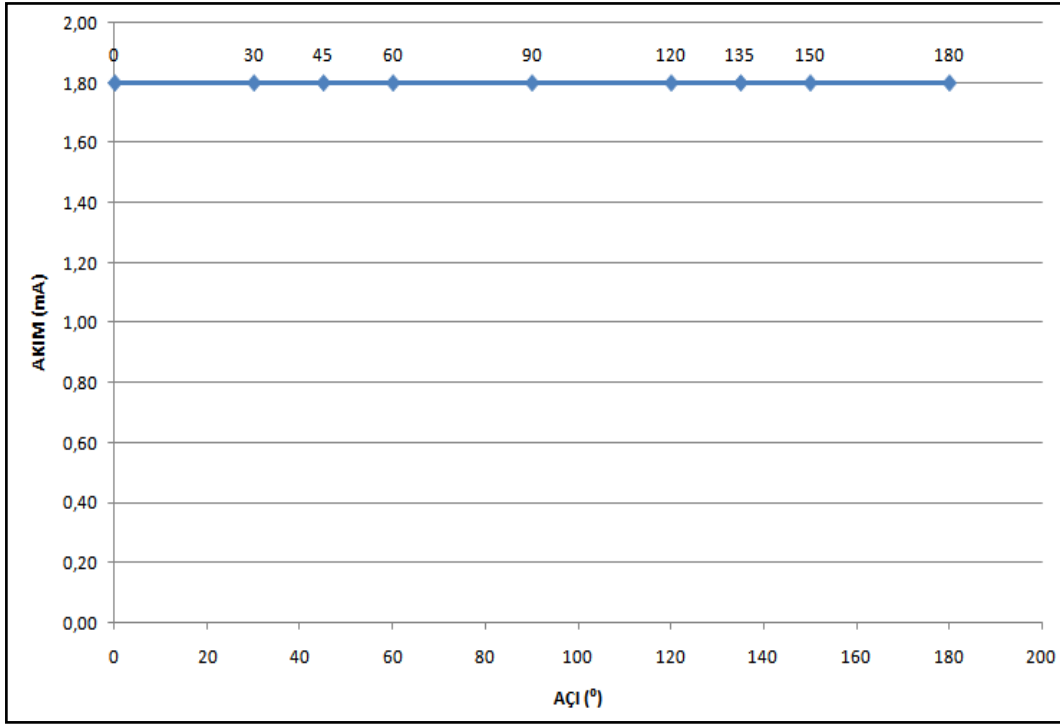
Şekil 4.4. Sabit durumda güneş panelinin açık devre geriliminin açığa bağlı değişimi



Şekil 4.5. Sabit durumda güneş panelinin kısa devre akımının açığa bağlı değişimi



Şekil 4.6. Hareketli durumda güneş panelinin açık devre geriliminin açığa bağlı değişimi



Şekil 4.7. Hareketli durumda güneş panelinin kısa devre akımının açıya bağlı değişimi

Yapılan ölçüm ve ölçüm sonucu çizilen grafiklerden de görüldüğü gibi, güneş takip sistemlerinin güneş panelleri ile birlikte kullanımı büyük önem arz etmektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Güneş enerjisinin kaynak olarak kullanıldığı bu çalışmada güneş paneli ile gerilim üretilmiş, bu gerilim şarj devresinde sabitlenerek akünün şarj kontrolü yapılmış, akü şarj akımı ölçülmüştür. Hem oda içerisinde hem de açık havada ölçümler yapılmıştır. Oda içerisinde ölçülen şarj akım değerinin açık havadaki şarj akım değerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Buna dayanak güneş pili sistemlerinde yeterli verimin sağlanabilmesi için güneş panelinin açık havada bulunması gerektiği söylenebilir. Akü şarj devresinde sabitlenen DC gerilimin evirici devresine gelerek AC 'ye çevrildiği ve lambanın yandığı gözlenmiştir.

Deneylerin karşılaştırılması yapıldığında; Boşta akü uçlarındaki gerilim 12.5 V ölçülmüştür. Sistem elemanları bağlandığında güneş ışığının panele gelmesiyle elde edilen enerji ve şarj kontrol devresi yardımıyla akü uçlarındaki gerilim 12.8 V değerine ulaşmıştır. Yani akü dolmaya başlamıştır.

Yüksüz durumda 12.5 V değerinde olan akü uçlarındaki gerilim yüklü durumda yani lambanın sisteme bağlanması ile 12.3 V değerine düşmüştür. Bu düşüşün birinci nedeni deneyde kullanılan panel sayısının yetersizliğidir. Çünkü panelden elde edilen akım tam olarak lambayı beslemeyip, lambanın çalışması için gerekli olan gücün bir kısmı aküden sağlanmaktadır. Bu da akü uçlarındaki gerilimin düşmesine neden olmaktadır. Akü uçlarındaki gerilim düşüşünün ikinci nedeni ise güneş ışınımının yetersizliğidir. Bu tarz gerilim düşüşlerinin olmaması ve sistemin daha verimli bir biçimde çalışması için yüke uygun olarak sisteme bağlanacak panel sayısının artırılması gerekmektedir.

Yapılan diğer deneyde ise şarj kontrol ve evirici devresi bağlı fakat yüksüz durumda iken evirici çıkışındaki gerilim 218 V olarak ölçülmüştür. Yüklü durumda bu değer 215 V değerine düşmüştür. Sistemde kullanılan akü, şarj kontrol devresi ve evirici devresi deneyde kullanılan yükten daha büyük güçteki elemanları çalıştırabilme kapasitesine sahiptir.

Son deneyde ise güneş pillerinin çalışmasını etkileyen dış faktörlerden birisi olan foto-açısız etki incelenmiş ve foto-açısız etkinin güneş pilleri üzerinde yapılan çalışmalarda hiçbir zaman ihmal edilmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

6. ÖNERİLER

Tablo 1.2 'den de görüleceği üzere ülkemizde üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık yarısı doğalgazdan sağlanmaktadır. Ülkemizin enerji gereksiniminin karşılanmasıyla ilgili politikalar belirlenirken; dışa en az bağımlı, temiz ve yenilenebilir kaynaklardan yararlanılmasına öncelik verilmesi, kurulacak tesislerin çevre etkilerinin mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.

Güneş panellerinin en temiz ve güvenilir enerji kaynaklarından biri olduğu, ülkemizin güneşlenme süresi yönünden çok iyi bir bölgede olduğu, güneş enerjisi sistemleriyle ilgili birçok eksikliklere rağmen yasal teşvik ve proje imkânları bulunduğu, ayrıca enerjide dışa bağımlılığı azalttığı ve çevre protokollerine uyum gösterdiği düşünüldüğünde ülkemizde elektrik enerjisini üretmede bu sistemlerin kullanımı çok önemlidir.

Öncelikle güneş pili üretimi üniversiteler haricinde ülkemizde gerçekleşmeli ve yaygınlaştırılmalıdır. Ayrıca güneş pillerinin verimlerinin artırılması ve maliyetlerinin azaltılması yönündeki çalışmalara ağırlık verilmelidir. Foto-açısız etki, nem ve sıcaklık gibi güneş pillerinin çalışmasını etkileyen dış faktörler konusu da verim artırma süreci içerisinde ele alınmalı ve ihmal edilmemelidir. Özellikle yapılmakta olan ve yapılacak olan Ar-Ge faaliyetleri ile foto-açısız etki ortadan kaldırılamıyorsa bu sistemler ile birlikte muhtak en az tek eksen güneş takibi yapabilen bir kapalı döngü güneş takip sistemi kullanılmalıdır.

Şuan için ülkemizin yaklaşık elektrik tüketimi 175 Milyar kWh olarak düşünülürse, günlük ortalama 8 saat ışık süresi, %20 panel verimi ve 1000 W/m²lik bir ışık ile 300 km² lik bir alanın Güneş Panelleri ile kaplanması durumunda (uzun vadede) güneş panellerinin tek başına ülkemizin tüm elektrik ihtiyacını karşılayabileceği söylenebilir. Elbette kısa ve orta vadede diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının (HES 'ler, Rüzgar enerjisi vs.) kullanımı ve doğalgaz gibi dışa bağımlı enerji santralleri yerine nükleer enerji gibi (yaklaşık 20000MW lık kurulu bir güç) dışa bağımlı olmayan kaynakların teşvik edilmesi de gereklidir.

Ülkemizde güneş kolektörleri yaygın olarak su ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bireysel kullanım devlet tarafından desteklediği (çift yönlü çalışan sayaç) takdirde güneş panellerinin de aynı oranda hatta daha yaygın kullanılabileceği öngörülebilir.

Güneş pilleri kullanılarak elektrik üretmek isteyen şahıslar için 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'nda en az 5 Avro Sent'lik alım garantisi (madde 17) verilmiş ve 5784 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu kapsamında 500 kW'lık kurulu güce kadar elektrik üretimi için lisans alma ve şirket kurma zorunluluğu kaldırılmıştır. (Madde 3, Ek fıkra) Fakat uygulamada sadece lisanslı ya da büyük yatırımcıların işine yarayacak tarzda bir sistem kurulmuş durumdadır.

Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri yüksek güçte santral boyutunda sistemler şeklinde olabileceği gibi daha çok görülen uygulaması binalarda küçük güçlü kullanım şeklindedir. Bu sistemlerde örneğin bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen DC elektriğin, AC elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir.

Sade vatandaş ya da küçük çaplı yatırımcılar olarak şu aşamada ortak şebeke sistemine başvurulamıyor. Çünkü bürokratik ya da yasal süreç devam ediyor. Çift yönlü sayaç meselesiyle alakalı bürokraside bazı engeller var. Çift taraf mı KDV 'lendirilecek yoksa tek taraf mı? Şahısların kendi ürettiği elektriğin kullanımdan artan kısmını Enerji Bakanlığı'na satabilmesi için gerekli düzenleme (çift yönlü çalışan sayaç) en kısa zamanda yapılmalıdır. Çift yönlü sayaçların kullanılmasıyla akü maliyeti de ortadan kaldırılmış olacaktır. Bu konuda bürokratik engeller aşıldığı zaman küçük çaplı üretime geçecek binlerce girişimci olacağı ve talep patlaması yaşanacağı öngörülmektedir.

Çalışmamız boyunca enerji olarak elektrik enerjisi üzerinde durulmuştur. Petrol, havadaki sera gazlarının artmasında ve küresel ısınmada çok önemli role sahip bir enerji kaynağıdır. Petrol sonrası dönem için yapılan enerji araştırmalarının sonuçları, sürdürülebilir bir gelecek için en iyi enerji sisteminin güneş-hidrojen enerji sistemi (hibrid sistem) olduğunu göstermektedir. Bu konuya ilgi duyan araştırmacılar için deniz veya okyanuslar üzerine kurulacak yüzen güneş pilleri ile elektroliz sonucu hidrojen üretiminin son derece gerçekleştirilebilir ve üzerinde durulması gerekli bir sistem olduğunu düşünmekteyim.

KAYNAKLAR

- Ahmed, A.**, 1998. Power electronics for technology, Prentice-Hall Inc., USA.
- Arifoğlu, U.**, 2005. Güç elektroniği ders notları, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Bilgin, Z.**, 2006. Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bureau U.S.**, 2004. International Population Reports WP/02, Government Printing Office, US.
- Çetinkaya, H.B.**, 2001. Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Diñçadam, F.**, 2008. Güneş pilleri ile sıcak su elde etme, sokak aydınlatması ve güneş takip sistemi uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Floyd, T.L.**, 2002. Electronic Devices 4th ed, Prentice Hall, New Jersey.
- Goswami, D.Y., Frank, K., Kreider, J.F.**, 2000. Principles Of Solar Engineering 2nd., *Taylor & Francis*, Philadelphia
- Gülgün, R.**, 1999. Güç elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Evi, İstanbul.
- Kalogirou, S.A.**, 1996. Design and construction of a one-axis sun-tracking system, Solar Energy,
- Karamanav, M.**, 2007. Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Karaoğlu, B.**, 1997. Kuantum Mekaniğine Giriş, Bilgitek Yayınları, İstanbul.
- Küpelı, A.Ö.**, 2005. Güneş Pilleri ve Verimleri, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Lüdemann, R.**, 2000. Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Alaska, USA.
- Messenger, R.A., Ventre, J.**, 2004. Photovoltaic Systems Engineering 2nd, CRC Pres, New York
- Nelson, J.**, 2003. The Physics Of Solar Cells, Imperial College Press, London.
- Özdemir, A.**, 2003. Güneş Pili ve Aydınlatma Birimleri Araştırma Geliştirme Projesi Sonuç Raporu, Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü.

- Özgöçmen, A.**, 2007. Güneş Pilleri Kullanılarak Elektrik Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Rumala, S.S.N.**, 1986. A shadow method for automatic tracking, Solar Energy,
- Serway, R.A.**, 1996. Fen ve Mühendislik için Fizik, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Strong, S.J., Scheller, W.G.**, 1993. The Solar Electric House, Sustainability Pres, Massachusetts.
- Şenpınar, A.**, 2005. Bağımsız güneş pilli sistemlerinin bilgisayar ile kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Threlkeld, J.L. ve Jordan, R.C.**, 1958. Trans, Ashrae.
- URL-1, <http://www.eie.gov.tr/T.C.Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü>, Enerji Verimliliği. 14 Ocak 2011
- URL-2, <http://co2now.org/>, Earth's CO2. 14 Ocak 2011
- URL-3, <http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/hansen13/>, Target Atmospheric CO₂. 14 Ocak 2011
- URL-4, <http://www.teias.gov.tr/istatistik2009/index.htm>, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, Türkiye Elektrik Üretim - İletim İstatistikleri. 14 Ocak 2011
- URL-5, <http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12>, International Energy Statistics. 14 Ocak 2011
- URL-6, <http://www.iea.org/stats/unit.asp>, Unit Converter. 14 Ocak 2011
- URL-7, <http://www.ufotr.com/Ufo> Teknoloji A.Ş., Elektromanyetik Spektrum. 14 Ocak 2011
- URL-8, <http://www.eie.gov.tr/T.C.Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü>, Türkiye'de Güneş Enerjisi. 14 Ocak 2011
- URL-9, <http://www.eie.gov.tr/T.C.Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü>, Türkiye'de Güneş Enerjisi Teknolojileri. 14 Ocak 2011
- URL-10, <http://www.eie.gov.tr/T.C.Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü>, Güneş Pilleri. 14 Ocak 2011
- URL-11, <http://www.gunessistemleri.com/fotovoltaik-sicaklik.php>, Sıcaklığın güneş hücreleri üzerinde ki etkisi, 14 Ocak 2011.
- URL-12, <http://www.etaengineering.com>, **Solar Electricity**, 14 Ocak 2011.

Uyarel, A. Y. ve Öz, E.S., 1987. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi.

Ünal, O., 2006. Güneş Pilleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Werner,J.H., 1995. Proceedings of the 13th European PV Solar Energy Conference, Nice, France.

Yiğit, A., ATMACA, İ., 2010. Güneş Enerjisi, Alfa Aktüel Yayınları, Bursa.

Zogbi, R. ve Laplaze, D., 1984. Design and construction of a sun tracker, Solar Energy,

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERDOĞDU, Ercan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 25.11.1980 İzmir
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 505 323 09 36
E-posta : ercan_erdogdu@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik Bölümü	2007
Yüksek lisans	İstanbul Üniversitesi/Fizik Öğr. Bölümü	2003
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2002
Lise	Sakarya Atatürk Lisesi	1997

Yabancı Dil

İngilizce