

ÖZET

BİR FOTOVOLTAİK SİSTEMDEN OPTİMAL GÜCÜN SAĞLANMASI

ZAN, Barış

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Şerafettin EREL

Kasım 2006, 68 Sayfa

Yapılan tez çalışmasında iki farklı fotovoltaik güneş pili kullanılarak değişik koşullardaki davranışları incelenmiştir.

10cm x 18cm boyutlarındaki amorf yapılu bir Si güneş pilinin statik, dinamik, statik reflektör ve dinamik reflektörlü sistem koşullarındaki davranışı incelenerek karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, dinamik reflektörlü sistem kullanıldığında optimum gücün sağlandığı gözlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise 54cm x 120cm boyutlarındaki BP585 marka güneş pili kullanılmıştır. Fotovoltaik pile reflektör monte edilerek her iki durumdaki davranışı incelenmiş ve reflektörün pilin çalışması üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Pili, Dinamik Sistem, Statik Sistem, Optimum Güç

ABSTRACT

GETTING OPTIMUM POWER FROM A PHOTOVOLTAIC SYSTEM

ZAN, Barış

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics, Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şerafettin EREL

November 2006, 68 Pages

In this thesis, the behaviour of two different photovoltaic solar cells in different conditions were studied.

An amorphous Si solar cell of 10cm x 18cm was studied for static, dynamic, reflectored static, and reflectored dynamic systems. The behaviour of this cell for these conditions were compared. In the experiment, it was observed that the optimum power was obtained by the reflectored dynamic system.

In the second step of the work, a BP585 solar cell having dimensions of 54cm by 120cm was used. The behaviour of the photovoltaic cell for two different conditions was obtained and the effect of reflector use on the study of the photovoltaic cell was concerned.

Key Words: Solar Cell, Dynamic Systems, Static Systems, Optimum Power

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması sırasında bilgi ve tecrübelerini esirgmeden özverili bir şekilde bana destek olan ve yol gösteren sayın hocam Doç. Dr. Şerafettin EREL'e, bilimsel konularda desteğini gördüğüm sayın Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN ve sayın Yrd. Doç. Dr. Eyüp TUNA'ya, çalışmam sırasında fedakarlık gösteren aileme ve manevi teşviklerinden dolayı eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	5
2.1. Güneşten Gelen Enerji.....	5
2.2. Güneş Yüksekliği	7
2.2.1. Güneşten Gelen Enerjinin Gün ve Yıl İçindeki Değişimi.....	9
2.3. Fotovoltaik Güneş Pilleri	11
2.3.1. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi.....	11
2.3.2. Yarıiletkenler ve Yarıiletkenlerin Katkılanması	12
2.3.3. Fotovoltaik Pillerin Elektrik Eşdeğer Devreleri	13
2.4. Fotovoltaik Pillerin Çeşitleri	17
2.4.1. Silikon (Si) Solar Piller	18
2.4.1.1. Tek Kristal Silikon	19
2.4.1.2. Multi Kristal Silikon.....	19
2.4.1.3. Amorf Silikon.....	20
2.4.2. Poli Kristal İnce Film	20

2.4.2.1. Bakır İndiyum di Selenit (CIS) ve Kadmiyum Tellür (CdTe).....	21
2.4.3. Tek Kristal İnce Film	21
2.5. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri	24
2.5.1. Fotovoltaik Sistem Çeşitleri	24
2.5.1.1. Bağımsız Sistemler	24
2.5.1.2. Şebekeye Bağlı Sistemler	27
2.6. Güneş Panelleri	28
2.7. Güneş Panellerinin Yerleştirilmesi.....	30
2.7.1. Bina Üzerine Yapılan Montaj	32
2.7.2. Toprak Yüzeye Yapılan Montaj	33
2.8. Fotovoltaik Bir Sistemin Bileşenleri	33
2.8.1. Enerji Depolayıcıları	33
2.8.2. İnvörtörler	39
2.8.3. Doğrultucular	40
2.8.4. Sistemin Şebeke Bağlantısı.....	41
2.9. Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Artırıcı Yöntemler	44
2.9.1. Güneş Takip Sistemleri (Dinamik Sistemler)	44
2.9.2. Reflektörlü Sistemler	44
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	45
3.1. Deney Düzenineğinin Tanıtımı.....	45
3.1.1. Statik Sistem	45
3.1.2. Reflektörlü Statik Sistem	46
3.1.3. Dinamik Sistem.....	47
3.1.4. Reflektörlü Dinamik Sistem	48

3.2. Bir Güneş Paneline (BP585 Model) Uygun Bir Reflektörün Eklenmesi	49
3.3. Deney Sonuçları	52
4. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	60
KAYNAKLAR	63
EK-1 Kırıkkale'ye Ait Güneş Konum Veri Örneği.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

3.1.	Statik sistemdeki amorf yapıdaki güneş piliyle ilgili değerler	52
3.2.	Reflektörlü statik sistemde amorf yapıdaki güneş piliyle ilgili değerler	54
3.3.	Dinamik sistemde amorf yapıdaki güneş piliyle ilgili değerler	56
3.4.	Reflektörlü dinamik sistemde amorf yapıdaki güneş piliyle ilgili değerler	58
4.1.	BP-585 tipindeki bir güneş paneline ait deneysel veriler	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

1.1.	Güneş enerjisinden örnek yararlanma şekilleri.....	3
2.1.	Atmosfere gelen ve yerkabuğuna değişik şekillerde ulaşan güneş ışınması.....	6
2.2.	Güneş yüksekliğinin gösterimi.....	7
2.3.	Güneş açıları, h: yükseklik açısı, z: zenit açısı, A: Azimut açısı	8
2.4.	Güneş ışınlarının dünyaya ulaşması, α : Bulunulan noktanın enlemi, β : Güneşin deklinasyon açısı, z: Zenit açısı $z = \alpha - \beta $	9
2.5.	Hava kütleinin hesaplanması ile ilgili şekiller.....	11
2.6.	Fotovoltaik hücre yapısı ve fotovoltaik olay.	13
2.7.	İdeal fotovoltaik üreticinin eşdeğer devresi ve yük bağlantısı	14
2.8.	Solar hücrenin bir diyotlu eşdeğer devresi (Gerçek fotovoltaik üretici).....	16
2.9.	Fotovoltaik hücrenin akım – gerilim (I-V) karakteristiği ve maksimum güç	17
2.10.	Farklı teknolojili fotovoltaik pillerin 1990 ve 2000 yıllarında piyasadaki dağılımı	23
2.11.	Direk bağlı bağımsız fotovoltaik sistem	25
2.12.	Akü grubu depolamalı bağımsız fotovoltaik sistem	25
2.13.	Şarj kontrollü ve akü grubu depolamalı bağımsız fotovoltaik sistem ..	26
2.14.	AA ve DA yük barındıran bağımsız fotovoltaik sistemler	26
2.15.	Bağımsız hibrit fotovoltaik sistem ile AA ve DA yükler	27
2.16.	Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem.	28

2.17.	Modül ve panelin fotovoltaik hücrelerden oluşumu.....	29
2.18.	Fotovoltaik panellerin kendi arasında (a) seri bağlantı, (b) paralel bağlantı, (c) seri – paralel bağlantı şekilleri	31
2.19.	Enerji depolama sistemleri	35
2.20.	a) Termik enerji depolaması ile fosil veya nükleer yakıtlardan sağlanan kararlı termik giriş. b) Termik enerji depolaması ile güneş gibi değişim gösteren bir termik varsayım.	36
2.21.	Uygulamaya yönelik bir fazlı tristörlü çevirici	42
2.22.	Fotoelektrik gerilimin yüksek frekanslı şebeke bağlantısı.....	43
3.1.	Statik sistemde kullanılan düzenek.	46
3.2.	Reflektörlü statik sistemde kullanılan düzenek.....	47
3.3.	Dinamik sistemde kullanılan düzenek.	48
3.4.	Reflektörlü dinamik sistemde kullanılan düzenek.....	49
3.5.	Reflektörlü BP-güneş pilinden akümülatör-invertör yardımıyla 220 V _{ac} 'nin eldesi.	50
3.6.	Deneyde kullanılan triyak-kontrollü ($\theta = 180^\circ$ esneklik derecesine sahip) ışık kaynağı.	51
3.7.	Dijital radyometrik ışık şiddeti ölçeri	51
3.8.	Statik sistemde V _{OC} (açık devre gerilimi)nin Θ açısıyla değişimi.....	52
3.9.	Statik sistemde I _{SC} (kısa devre akımı)nin Θ açısıyla değişimi.....	53
3.10.	Statik sistemde pil yüzeyine düşen Φ (ışığın yoğunluğu)nun Θ açısıyla değişimi	53
3.11.	Reflektörlü statik sistemde V _{OC} (açık devre gerilimi)nin Θ açısıyla değişimi	54

3.12.	Reflektörlü statik sistemde I_{SC} (kısa devre akımı)nın Θ açısıyla değişimi	55
3.13.	Reflektörlü statik sistemde pil yüzeyine düşen Φ (ışık akı yoğunluğu)nun Θ açısıyla değişimi	55
3.14.	Dinamik sistemde V_{OC} (açık devre gerilimi)nin Θ açısıyla değişimi	56
3.15.	Dinamik sistemde I_{SC} (kısa devre akımı)nın Θ açısıyla değişimi.....	57
3.16.	Dinamik sistemde pil yüzeyine düşen Φ (ışık akı yoğunluğu)nun Θ açısıyla değişimi	57
3.17.	Reflektörlü dinamik sistemde V_{OC} (açık devre gerilimi)nin Θ açısıyla değişimi	58
3.18.	Reflektörlü dinamik sistemde I_{SC} (kısa devre akımı)nın Θ açısıyla değişimi	59
3.19.	Reflektörlü dinamik sistemde pil yüzeyine düşen Φ (ışık akı yoğunluğu)nun Θ açısıyla değişimi	59
4.1.	Deneyde kullanılan Amorf güneş pilinin dört farklı deney sonucunun karşılaştırılması (V_{OC} değerlerinin Θ açısıyla değişimi).....	60
4.2.	Deneyde kullanılan güneş pilinin dört farklı deney sonucunun karşılaştırılması (I_{SC} değerlerinin Θ açısıyla değişimi).....	61

1. GİRİŞ

Enerji, şüphesiz insanlık için vazgeçilmez bir unsurdur. Enerji, bir madde veya maddeler sisteminin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Enerji kaynaklarından enerji üretimi, dönüşümü ve üretilen enerjinin taşınımı oldukça önemlidir. Enerji kaynakları;

- Birincil enerji kaynakları
- İkincil enerji kaynakları

olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Birincil enerji kaynakları, doğada buldukları biçimde değiştirilmeden kullanılabilen kaynaklardır. İkincil kaynaklar ise, birincil kaynakların belli işlemlerden geçirilmesi ile elde edilir ⁽¹⁾.

Yenilenebilir enerji kaynakları fosil kökenli yakıtlara alternatif olarak gündemdedir. Çevreyi kirletmemeleri ve yenilenebilir olmaları en büyük avantajlarıdır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının da dezavantajları bulunmaktadır. Fosil yakıtların tükenme eğiliminde olması yenilenebilir enerjiye önemi artırmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlileri güneş ve rüzgar enerjileri olup genel olarak;

- Güneş enerjisi
- Rüzgar enerjisi
- Jeotermal enerjisi
- Biokütle enerjisi
- Katı atık enerjisi

- Hidrolik enerji
- Dalga ve gel-git enerjisi

şeklinde sıralanabilir ⁽¹⁾.

Bu enerji kaynakları çevreye zararlarının az oluşu nedeniyle çevre dostu olarak bilinmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından mümkün olduğunca yararlanabilmek için değişik araştırmalara gidilmiştir. Bunlardan en önemlisi ise güneş ve rüzgar enerjilerinden birlikte yararlanmaktır. Çünkü geceleri güneş olmaması, rüzgarın ise artması bu enerjilerin birbirlerini tamamlamaları fikrini ortaya atmıştır ⁽²⁾.

Elektrik enerjisi, enerji sektöründe ayrı bir öneme sahiptir. Elektrik enerjisi üretiminde en uygun yöntem ve kaynağı bulmak ve uygulamak asıl amaçtır. Enerji tüketimi ülkelerin gelişmişliği ile doğrudan orantılıdır. Elektrik üretiminde kullanılan fosil yakıtların sınırlı olması ve bu yakıtların bazı ülkeler için dışa bağımlılığı gerektirmesi, yakıt maliyetlerinin fazlalığı, fosil yakıtların çevreye olumsuz etkileri gibi sosyal ve politik nedenlerden dolayı alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı hidrolik enerjidir. Hidrolik enerji akarsular veya yükseltisi bulunan göl ve göletlerden yararlanılarak kullanılır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en eski kullanıma sahip olanı belki de rüzgar enerjisidir. Yel değirmenleri, rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirir. Günümüzde bu şekilde kullanımı hemen hemen hiç kalmamış olmakla beraber rüzgar türbinleri ile yeniden yaşamımızdaki etkinliğini artırmıştır.

Güneş enerjisi bilindiği üzere canlıların yaşam kaynağıdır. Güneş enerjisi, kolektörler ve ısı pompaları yardımıyla ısı enerjisine, güneş pilleri

yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür⁽³⁾. Güneş enerjisinin kontrollü olarak doğrudan kullanılabilmesi tükenmez ve temiz bir kaynak oluşundandır. Aynı zamanda güneş enerjisi ısı ve ışık etmenleri ile dağıtım ve iletim sorununun olmaması nedeniyle diğer kaynaklara göre üstünlükler sağlar ⁽¹⁾. Şekil 1.1'de güneş enerjisinden yararlanma şekilleri görülmektedir.



Güneş ısı toplayıcısı



Fotovoltaik hücre panelleri

Şekil 1.1. Güneş enerjisinden örnek yararlanma şekilleri⁽⁴⁾

Son yıllarda iki ya da daha fazla enerji kaynağından yararlanılarak birbirlerinin eksiklerini giderme yoluna gidilmiştir. Bu kaynaklar yenilenebilir enerji kaynağı olabileceği gibi diğer enerji kaynakları da olabilmektedir. Bu şekilde sistem güvenilirliği ve veriminin de artırılabilirliği düşünülmektedir. Bu alanda ilk göze çarpan uygulamalar rüzgar ve güneş enerjilerinin hibrit kullanımınıdır. Ekonomik katkı sağlamak amacıyla bazen bu sistemler şebeke sistemi ile ortak kullanılabilir. Bu sistemler şebeke sistemi ile ortak kullanılabilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hibrit sistemdeki kullanımı, tek başına kullanımına göre ilk kurulum maliyeti biraz daha artmasına rağmen yapısı daha karmaşık hale gelmektedir. Hibrit enerji sistemlerinde ilk kurulum en az seviyede tutulmaya çalışılırken sistemin güvenilirliğinin olabildiğince yüksek tutulması zorunludur. Sistem planlanırken yılın her mevsimi ve günün her

saatinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunun için en az bir yıllık ölçümlerin yapılması gerekmektedir.

Hibrit enerji sistemlerinde sistem güvenilirliği oldukça önemlidir. Enerji üretiminin sürekliliği sağlanmalıdır. Üretimde kısa süreli kesintilere, üretilen fazla enerjinin daha önceden bazı yöntemlerle depolanması sayesinde izin verilebilmektedir. Üretimdeki daha uzun süreli kesintiler veya üretimin ihtiyacı karşılamadığı durumlarda sistem güvenilirliğini sağlamak amacıyla sistem elemanlarının boyutları gereğinden daha fazla seçilmelidir.

Panellerin verimi güneş ışığının geliş açısına göre değişir. Farklı yöntemlerle çalışan güneş izleme sistemleri kullanılarak güneş panellerinden optimum güç eldesi sağlanmaktadır. Ancak bu durumda ise maliyetin arttığı görülmektedir.

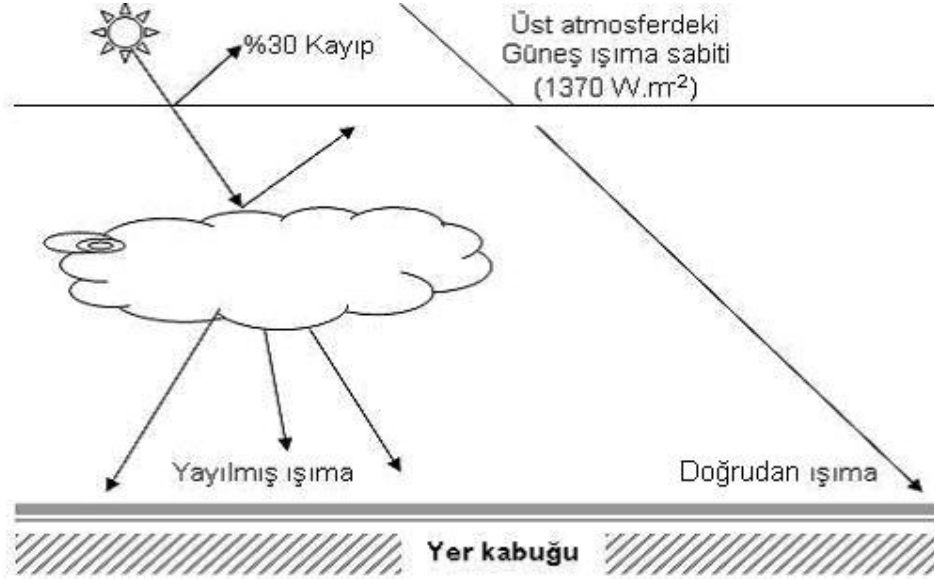
Yapılan bu tez çalışmasında iki farklı boyut ve yapıdaki güneş pilleri ele alınmıştır. Güneş pillerinin statik ve dinamik sistemlerde sağladığı güç durumu, reflektör kullanılıp kullanılmamasına göre karşılaştırılmıştır. Statik, reflektörlü statik, dinamik ve reflektörlü dinamik sistemlerden sağlanan güç değerlerinin karşılaştırılması sonucunda, az bir maliyet ilavesiyle dinamik reflektörlü sistem kullanıldığında optimum gücün sağlanacağı görülmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Güneş pillerinde verim artırıcı yöntemlerin incelenmesinde, güneşin yapısı, güneşten gelen enerji, güneş ışınması, yer kabuğuna hangi yollardan ulaştığı, güneşin günlük ve mevsimlik aldığı konumların bilinmesi büyük önem taşır. Böylece güneş panellerinden yüksek verimin sağlanması mümkün olabilir.

2.1. Güneşten Gelen Enerji

Güneş dünyanın en büyük enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi, güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesine dayalı füzyon enerjisinden kaynaklanmaktadır. Dünya atmosferinin dış yüzeyine gelen güneş enerjisinin şiddeti, sabit kabul edilip 1370 W/m^2 değerindedir, ancak yeryüzünde $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterir⁽⁵⁾. Güneş, enerjisini radyasyonla elektromanyetik dalgalar şeklinde gezegenimize ulaştırır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi gezegene ulaşan ışınımın %70'i dünya atmosferinden içeri girerken %30'u atmosfer, bulutlar, çöller ve kar gibi nedenlerden dolayı uzayın derinliklerine geri yansıtılır⁽⁶⁾. Morötesi ışınlar ise ozon tabakası ile soğrulur.



Şekil 2.1. Atmosfere gelen ve yer kabuğuna değişik şekillerde ulaşan güneş ışımaları

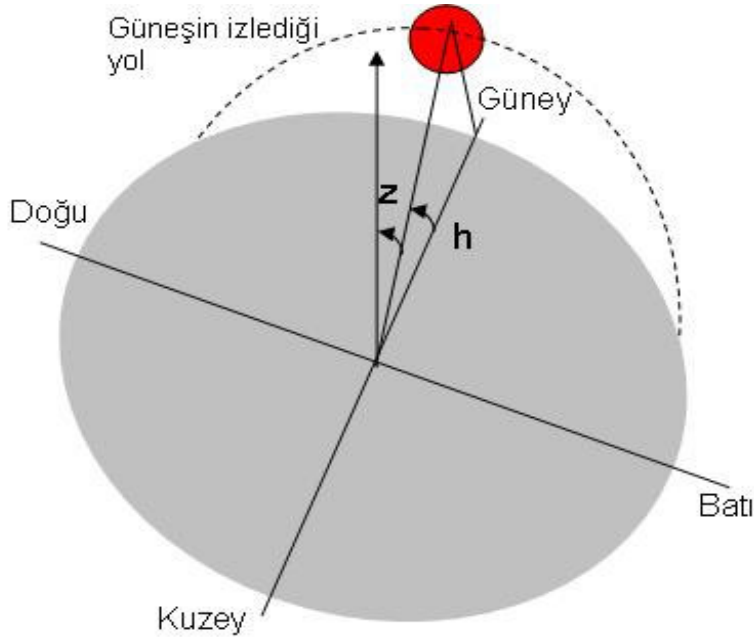
Güneş ile dünyamız arasındaki mesafe yaklaşık olarak 150 milyon km.'dir. Güneşten gelen ışınlar dünya atmosferine girdiğinde yer kabuğuna üç şekilde ulaşır:

- Doğrudan ışımaya: Güneş ışınları atmosferden yer kabuğuna hiçbir engelleyici faktöre maruz kalmadan direk ulaşması şeklinde olur. Güneşin gezegene gelen enerjisinin %70'i atmosferden girer ve bu enerjinin %80'i direk ışımaya yolu ile olur.
- Yayılmış (dağılmış) ışımaya: Atmosfere giren güneş ışınları değişik dalga boylarında atmosferin yoğunluğu, havadaki nem oranı, bulutlanma gibi nedenlerle yeryüzüne dağılmış şekilde de ulaşır. Tam bulutlu bir havada doğrudan ışımaya mümkün olmadığından yer kabuğuna ulaşan tüm ışınlar dağılmış ışınlar olup bu ışınların belirli bir yönü olmadığından her yönden gelebilmektedir.

c. Yansıtılmış ışımaya: Bu ışımaya, yukarıda bahsedilen ilk iki şekilde gelen güneş ışınlarının parlak yüzeylerden yansımaları ile oluşur. Yansımanın olduğu yüzeyin pürüzsüzlüğü ve maddenin cinsi yansıyan ışımaya şiddetini ve dağılımını belirler⁽⁷⁾. Yansıtan cisme reflektör ismi de verilebilir.

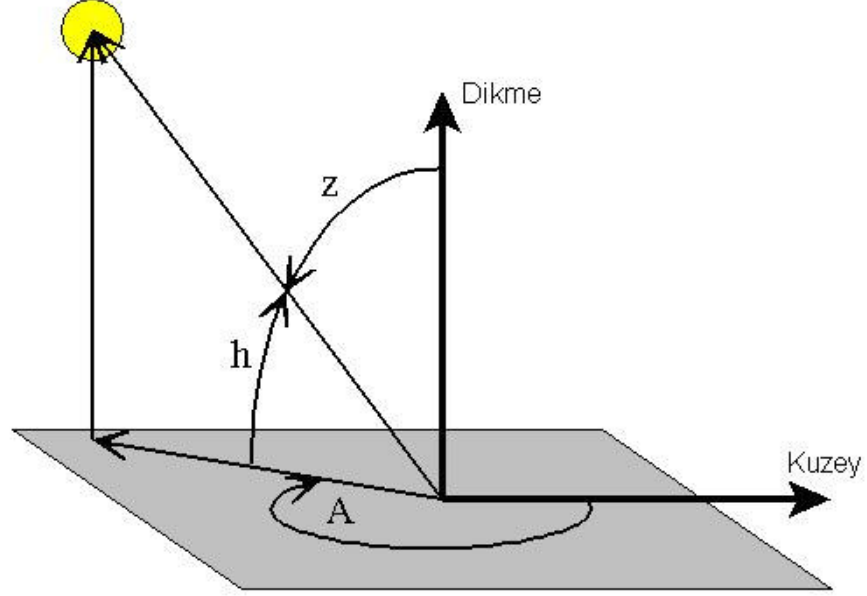
2.2. Güneş Yüksekliği

Güneş ufuk çizgisinden doğar ve deniz yüzeyine göre bir yükseklik izleyerek batar. Bu arada alınan her bir nokta o andaki güneşin yüksekliğini verir. Güneş yükseklik açısı ise Şekil 2.2'de görülmekte olup h ile sembolize edilmiştir.



Şekil 2.2. Güneş yüksekliğinin gösterimi

Zenit ve azimut açıları Şekil 2.3'de görülmektedir. Deklinasyon açısı ise Şekil 2.4'de β ile gösterilmektedir⁽⁸⁾.

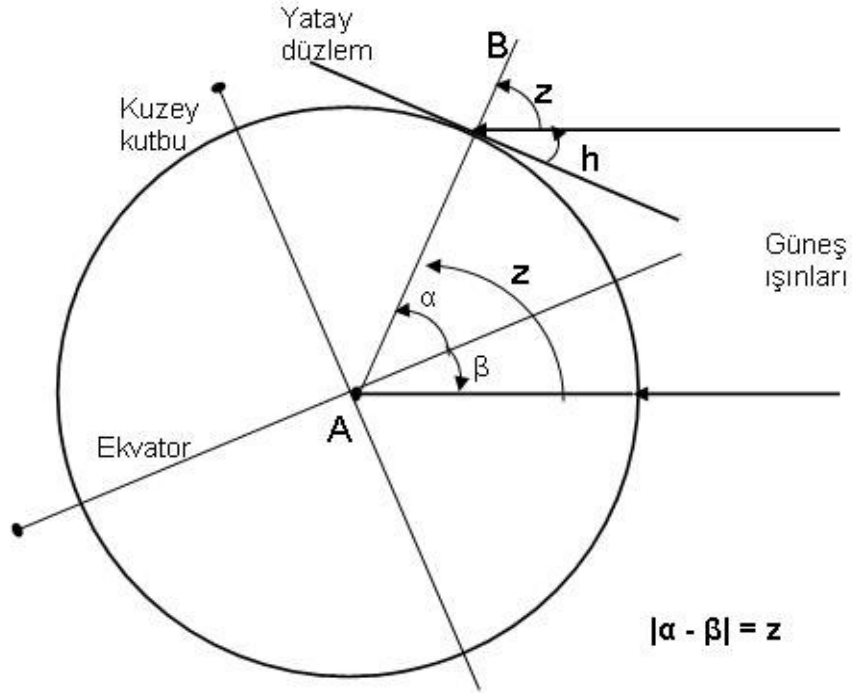


Şekil 2.3. Güneş açıları, h: yükseklik açısı, z: zenit açısı, A: Azimut açısı

Azimut açısı ile zenit açısı veya azimut açısı ile güneş yükseklik açısı kullanılarak güneşin yere göre konumu hesaplanabilir. Zenit ve güneş yükseklik açıları birbirlerini 90° 'ye tamamlarlar.

$$\sin(h) = \cos(z) \quad (2.1)$$

$$h + z = \pi / 2 \quad (2.2)$$



Şekil 2.4. Güneş ışınlarının dünyaya ulaşması, α : Bulunulan noktanın enlemi, β : Güneşin deklinasyon açısı, z : Zenit açısı $z = |\alpha - \beta|$

2.2.1. Güneşten Gelen Enerjinin Gün ve Yıl İçindeki Değişimi

Dünya güneş etrafında eliptik bir yörünge çizer. Dünya 3 Ocakta güneşe en yakın, 4 Temmuzda da en uzak noktadadır. Ayrıca dünyanın güneş etrafında dönüş hızı Ocak ayında daha hızlı, Temmuz ayında da daha yavaştır. Ocak ayında dünya atmosferine güneşten gelen enerji en yüksek değerini (1412 W.m^{-2}) alırken temmuzda en düşük değerini (1322 W.m^{-2}) alır.

Atmosfer dışına birim yüzeye güneşten gelen toplam güneş ışınımı miktarı güneş sabiti olarak bilinir ve genelde E_{eo} ile gösterilir. Dünyanın güneşe olan uzaklığı ile değişen güneş ışınımı değeri güneş sabiti kullanılarak bulunabilir:

$$E_g = \frac{r_0^2}{r_g^2} \cdot E_{e0} = f_g \cdot E_{e0} \quad (2.3)$$

$$f_g = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(360 - \frac{g}{365}\right) \quad (2.4)$$

Burada;

E_{e0} : Güneş sabiti (1353 W.m⁻²),

E_g : Atmosfer dışına herhangi bir günde tüm dalga boylarında gelen ışımaya değeri,

r_g : Güneş – dünya arasındaki anlık uzaklık,

r_0 : Güneş – dünya arasındaki yıllık ortalama uzaklık,

f_g : Güneş sabiti düzeltme faktörü,

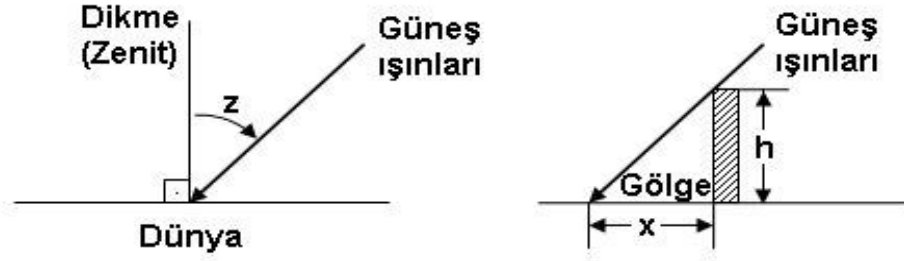
g : 1 Ocak esas alınarak hesap edilen günün kaçınıcı gün olduğu,

şeklinde tanımlanır⁽⁹⁾.

Yerkabuğuna ulaşan ışımayı etkileyen bir diğer faktör de hava kütledir (Air Mass). Güneş ışınları, herhangi bir zamanda, dünyanın sadece belli bir bölgesine ışınlarını atmosfer içinde en kısa yoldan ulaştırır. Bu anda bu bölgede güneş ışınlarının atmosferde kat ettiği yol birim olarak alınır.

$$\text{Hava kütlesi} = 1 / \cos z \quad (2.5)$$

Verilen herhangi bir yer ve zamanda hava kütlenin değeri kolayca hesaplanabilir. Hava kütlenin yüksek değerde oluşu, atmosferin azaltıcı etkisinin daha büyük olduğu anlamına gelir. Hava kütlenin hesaplanması ile ilgili şekiller Şekil 2.5'te görülmektedir⁽¹⁰⁾.



Şekil 2.5. Hava kütlenin hesaplanması ile ilgili şekiller

$$\text{Hava kütlesi} = \frac{1}{\cos z} = \sqrt{1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2} \quad (2.6)$$

x : Gölge uzunluğu

h : gölgesi ölçülen cismin yerden yüksekliği

z : Zenit açısı

DeneySEL çalışmanın yapıldığı yer olan Kırıkkale'ye ait (11 Haziran 2006 tarihi itibarıyla) değerler Ek-1'de verilmiştir⁽¹¹⁾.

2.3. Fotovoltaik Güneş Pilleri

2.3.1. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

1839 yılında Edmond BECQUEREL, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemlemiş ve fotovoltaik olayını bulmuştur. Daha sonraları bu benzer olay selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. ADAMS ve R.E. DAY tarafından gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik piller ilk olarak 1954 yılında Chapin ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu önemli olaydan sonra araştırmalar ve tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için

yapılmış, 1960'lı yılların başından beri uzay çalışmalarında önemli ölçüde kullanılmaktadır⁽¹²⁾.

1973 petrol krizi ile yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla önem verilmiş ve fotovoltaik pillerin maliyetlerini azaltacak çalışmalara başlanılmıştır⁽¹³⁾. Bu çalışmaların sonucunda güneş pillerinin maliyeti azaltılmış ve verimleri artırılmıştır.

Yarıiletken malzemeden imal edilen fotovoltaik güneş pilleri güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirir. Fotovoltaik güneş pillerinin yapımı ve çalışmasının daha iyi anlaşılmasında yarıiletkenler fiziğinin kavranması ayrı bir önem taşır.

2.3.2. Yarıiletkenler ve Yarıiletkenlerin Katkılanması

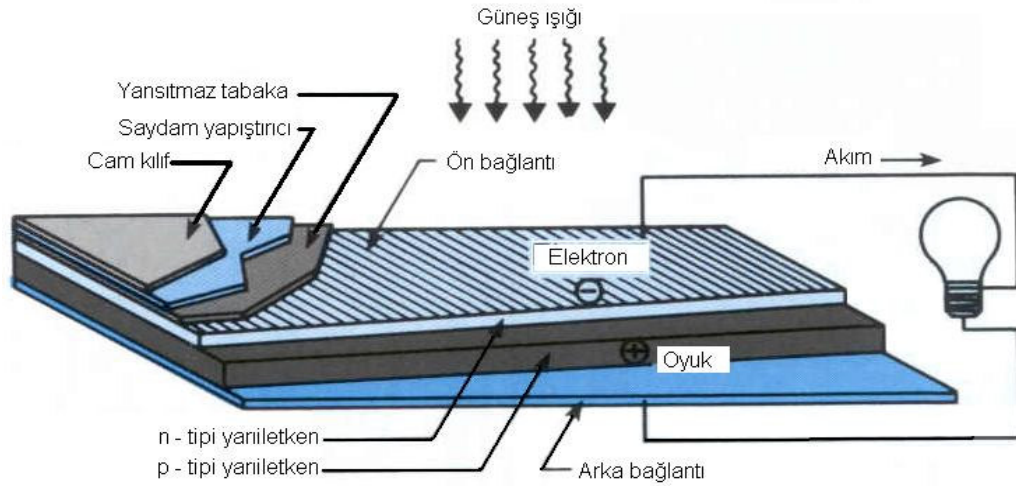
Elementler elektriksel iletkenlik açısından iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olarak sınıflandırılırlar.

Diyot, transistor gibi elektronik gereçlerin yapımında kullanılan yarıiletken maddeler fotovoltaik güneş pilinin de esas malzemeleri olup genelde bu alanda kullanılan yarıiletkenler silisyum, germanyum, arsenik, kadmiyum, tellür gibi maddelerdir⁽¹⁴⁾.

Yarı iletken maddelere farklı katkı malzemeleri katılarak iletkenliği değişmiş yeni maddeler elde edilebilir. Bunun için kullanılacak yarıiletken malzemelerde saflık durumu ayrı bir önem taşımaktadır. Si ve Ge gibi atomlara, son yörüngesindeki elektron sayısı 3 olan bir başka atom

katkılanırsa “p” tipi yarıiletken, son yörüngesindeki elektron sayısı 5 olan bir başka atom katkılanırsa “n” tipi yarıiletken elde edilir.

“n” tipi ve “p” tipi yarıiletken maddeler geniş bir yüzeyde birleştirilirse p/n eklemi oluşur. Yapımı ve çalışması açısından diyotlara benzeyen güneş pillerinin uyarılması ışıkla sağlanıp elektrik akımı ve dolayısıyla elektromotor kuvveti meydana gelir. Hücre yapısı ve fotovoltaj olayı Şekil 2.6’da görülmektedir⁽¹⁵⁾.

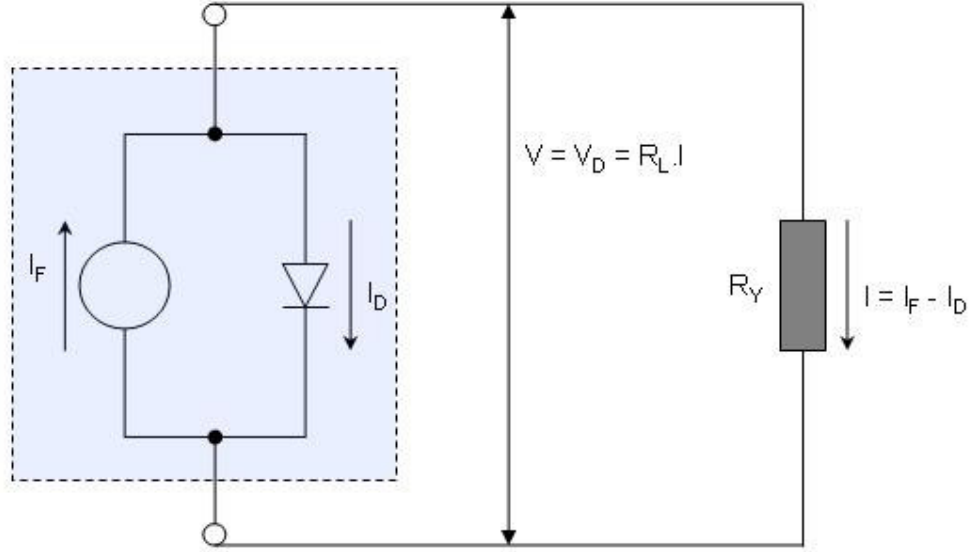


Şekil 2.6. Fotovoltajik hücre yapısı ve fotovoltajik olay.

2.3.3. Fotovoltajik Pillerin Elektrik Eşdeğer Devreleri

Fotovoltajik üreteçler bir akım kaynağı olarak düşünülebilir. Uygulamada 20 ila 80 arasında solar hücre seri şekilde bağlanarak solar modülleri oluşturur. Bu modüller yardımıyla 10 – 40 V. arası gerilim elde etmek mümkündür. Fotovoltajik solar modül bir sandviç benzetilirse solar hücrelerin ön kısmına optik açıdan yüksek geçirgenli cam yerleştirilerek solar

hücre örtülür, arka kısmına ise cam veya metal levha yerleştirilir. Tüm bunların saydam yumuşak plastik bir tabaka ile bir arada tutulması sağlanır. Böylece rutubet ve nemin zararlı etkilerinden korunur. Burada kullanılan plastik genellikle etil vinil asetatıdır (EVA)⁽¹⁴⁾.



Şekil 2.7. İdeal fotovoltaik üreticinin eşdeğer devresi ve yük bağlantısı

Şekil 2.7’de bir fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi verilmiştir⁽¹⁵⁾. Şekilden de anlaşılacağı üzere bir solar hücre, paralel bağlanmış bir diyot ve akım kaynağı içerir. Akım kaynağı, güneş ışınması E ile doğrudan orantılı olan fotoakımı I_F ’yi üretir. Solar hücrenin p – n geçiş alanı bir diyota eşdeğerdir^(14,15).

Basitleştirilmiş eşdeğer devrenin ($I - V$) eşitliği Kirchhoff’un akım kanunundan elde edilebilir (bir düğüm noktasına gelen ve giden akımların toplamı sifira eşittir)⁽¹⁴⁾.

$$I = I_F - I_D = I_F - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{m \cdot V_r}\right) - 1 \right) \quad (2.7)$$

I_F : Fotoakım

I_D : Diyot akımı

I_S : Diyot ters doyum akımı

m : Diyot "ideal faktörü"; $m = 1 \dots 5V_T$

$$V_T = \frac{k.T}{e} \quad (2.8)$$

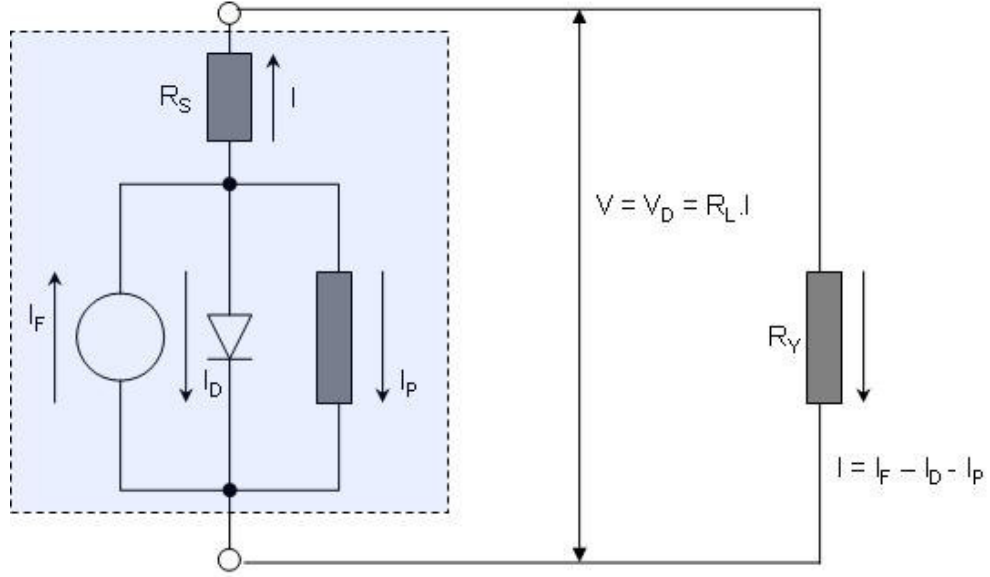
V_T : Isıya bağlı gerilim; (25°C'de $V_T = 25,7\text{mV}$ 'dur.)

k : Boltzmann sabiti; $k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$

T : Mutlak sıcaklık; $[T] = \text{K}$ (Kelvin) $0 \text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$

e : Bir elektronun yükü olup $1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{Cloumb}$ 'tur.

"İdeal fotovoltaiik devre" şeklinde adlandırılan bu basitleştirilmiş eşdeğer devre, elbette solar hücrenin elektriksel akışının en uygun modelini vermez. Gerçek solar hücrelerde, dış bağlantılara kadarki iletimde bir gerilim kaybı gözlemlenebilir. Bu gerilim düşümü bir R_s seri direnci ile ifade edilebilir. Bundan başka sızıntı akımları da gözlemlenebilir ki bu da bir R_p paralel direnci ile açıklanabilir⁽¹⁴⁾.



Şekil 2.8. Solar hücrenin bir diyotlu eşdeğer devresi (Gerçek fotovoltaik üreteç) ⁽¹⁵⁾ .

Kirchhoff'un akım kanunundan elde edilen eşitlik, oluşturulan $I - V$ eğrisi için;

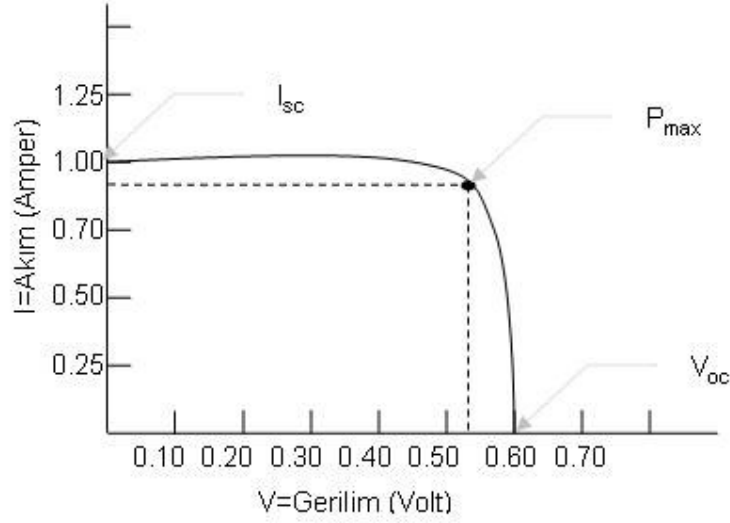
$$0 = I_F - I_D - I_p - I \quad (2.9)$$

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (2.10)$$

şeklinde olur. Buradan;

$$0 = I_F - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I.R_s}{m.V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} - I \quad (2.11)$$

bağıntısı elde edilir⁽¹⁵⁾.



Şekil 2.9. Fotovoltaik hücrenin akım – gerilim (I-V) karakteristiği ve maksimum güç

Fotovoltaik hücrenin karakteristiğini bulmak için açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımını (I_{sc}) ölçmek gerekir. Alınan değerler Şekil 2.9'da gösterildiği üzere bir eğri elde edilmesini sağlar⁽⁶⁾.

2.4. Fotovoltaik Pillerin Çeşitleri

Güneş pillerinin yapımında yarıiletken maddelerin geniş bir kısmı kullanılmakta olup fotovoltaik pillerin çeşitleri üç kısımda toplanabilir⁽¹⁶⁾.

- Silikon (Si): Tek kristal Si, multi-kristal Si ve amorf yapılı Si içerir.
- Poli-kristal ince filmler: Bakır indiyum di selenit (CIS), kadmiyum tellür (CdTe) ve ince film silikon içerir.
- Tek kristal ince filmler: Galyum arsenat gibi yüksek verimli materyalleri içerir.

Silikon diğer yarıiletken materyallerde olduğu gibi çeşitli şekillerde bulunabilir (tek kristal, multi-kristal, poli-kristal ve amorf yapılı). Tek kristal malzemede, kristalin yapıtaşını oluşturan atomlar, tabaka tabaka, çok düzenli şekilde sıralanırlar. Buna karşın, sayısız küçük kristallerden oluşan bir malzemede bu durum bozulmaya uğrar.

2.4.1. Silikon (Si) Solar Piller

İlk fotovoltaik hücreler silikondan yapılmışlardır. Günümüzde hala yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Silikon oksijenden sonra yer kabuğunda en çok bulunan ikinci elementtir. Silikonun yarıiletken materyallerde kullanılabilmesi için ileri saflıkta bulunması gerekmektedir⁽¹⁶⁾.

Tek kristal silikon (single-crystal silicon) düzenli bir moleküler yapıya sahip olup tüm yapı aynı tür kristalden oluşur. Bu düzenlilik elektronların verimli bir şekilde geçişleri için oldukça ideal bir durumdur. Verimli bir fotovoltaik hücre yapmak için, silikon “n” ve “p” tipi oluşturmak üzere başka elementlerle katkılanır.

Yarı kristalize silikonda durum biraz farklı olup, sınırlar oluşturan bazı ufak kristal veya zerrelere içerir. Bu sınırlar elektronların akışına engel olur. Aynı zamanda elektronlar boşluklarla geri birleşerek güneş pilinin çıkış gücünü azaltır. Bununla birlikte, yarı kristal silikon tek kristal silikona oranla çok daha ucuzdur. Bu yüzden araştırmacılar tanecik sınırlarının etkilerini en aza indirmeye çalışmaktadırlar⁽¹⁶⁾.

2.4.1.1. Tek Kristal Silikon

Tek kristal silikon yapımında en yaygın kullanılan teknik Czochralski yöntemidir. Ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli kimyasal ve ısı reaksiyonlardan geçirilmesiyle saf silisyum elde edilir. Ardından silisyum eriyiğine çekirdek denen tek kristal yapıli silisyum parçası batırılır. Çekirdek eriyikten çıkarılır ve soğutulur. Çekirdeğin üzerine külçe şeklinde yığılı bulunan silikon yapı, elmas bir keski ile dilimlere ayrılır. Verimleri %15 civarında olan bu güneş pillerinin üretimi sırasında malzeme kaybı oldukça fazladır^(8,16).

Yüzer bölge silikon yönteminde Czochralski metoduna göre daha saf kristaller üretilir. Çünkü bu yöntemde, Czochralski kristallerini geliştiren pota kullanılarak silikonun kirlenmesi önlenir⁽¹⁶⁾.

Tek kristal silikon teknolojisinin iyi gelişmesine karşın, Czochralski ve yüzer bölge işlemleri karmaşık ve pahalıdır. Kristal üretim işlemlerinin başka bir grubu da genel olarak “şerit filizi” ismiyle anılır. Bu tek kristaller diğer üretimlere göre daha az maliyetlidir. Çünkü doğrudan ince bir yapıya dönüştürülürler ki bu şekli ile tek kristal silikonun silikon devre levhasında kullanımına uygundur. Verimleri %13 – 16 arasındadır^(8,16).

2.4.1.2. Multi Kristal Silikon

Multi kristal silikon gereçler genel olarak tek kristal silikonlara oranla verimleri daha düşüktür. Ancak üretimleri daha ucuzdur. Multi kristal silikon

çeşitli yollardan üretilebilir. En yaygın ticari üretim metodu döküm yöntemini içeren metottur⁽¹⁶⁾.

2.4.1.3. Amorf Silikon

İnce film güneş pili teknolojisi kullanılarak elde edilen pillerin en önde geleni amorf silikon fotovoltaik pillerdir. Kalay oksitle kaplı iletken bir yüzeyin üzerine çöktürme yöntemi ile imal edilirler. Bu yüzeyin arkası daha sonra metalle kaplanır. Verimleri %5 ila %8 arasındadır⁽⁸⁾.

Amorf yapıdaki katının, camların genelinde olduğu gibi tam sıralı bir düzeni yoktur. Kristalize yapıya hiçbir şekilde dönüşmezler ve çok fazla yapısal ve bağ hataları barındırmakla birlikte fotovoltaik sistemlerde kullanımını çekici hale getiren bazı ekonomik avantajları bulunmaktadır⁽¹⁶⁾.

2.4.2. Poli Kristal İnce Film

Poli kristal ince film güneş pillerinde ışık soğurma özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha ince (tek kristalin 1/500'ü kalınlığında) fotovoltaik piller yapılır⁽⁸⁾. Bu teknoloji sayesinde fotovoltaik pillerin gelişimi daha da hızlanmıştır. Bu pillerin maliyeti daha düşük, hafif, esnek ve üretimleri kristal silikon pillere oranla üretimleri daha kolaydır⁽⁷⁾. Yarı iletken malzeme düşük maliyetlerde cam, metal veya plastik folyo gibi geniş tabakalar üzerine kaplanır. İnce film fotovoltaik malzeme genellikle çok kristallidir⁽¹⁰⁾.

2.4.2.1. Bakır İndiyum di Selenit (CIS) ve Kadmiyum Tellür (CdTe)

Bakır indiyum di selenit (CuInSe_2 veya CIS) son derece yüksek bir soğurma özelliğine sahiptir. Öyle ki CIS üzerindeki ışımının %99'u daha malzemenin ilk mikrometrelerinde soğrulur.

Kadmiyum elementi periyodik tablonun ikinci grubunda, tellür ise altıncı grubunda bulunup bunlar CdTe bileşimini oluşturur. Yüksek soğurma katsayısına sahiptir. İnce film büyütme teknolojisinin birçoğu ile kolayca üretimi sağlanır. Böylece geniş yüzey alanlı güneş pili üretiminde CdTe birleşik yarıiletkeni öne çıkmıştır.

2.4.3. Tek Kristal İnce Film

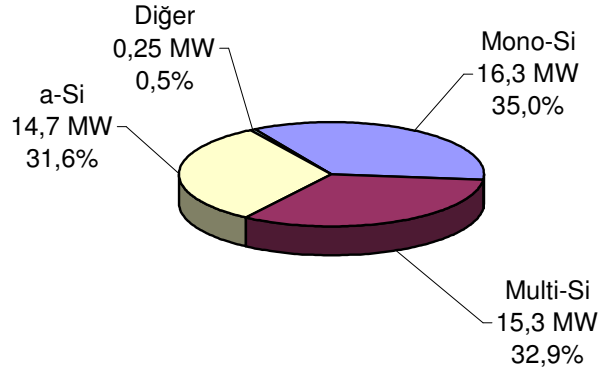
Galyum arsenat (GaAs) yüksek verimli hücreleri, yoğunlaştırıcı sistemler için en uygundur. Son on yıllık zamanda, değişik yoğunlaştırıcı sistemler geliştirilmiştir.

Galyum arsenat (GaAs) galyum ve arsenik elementlerinin karışımı olan bileşik bir yarıiletkendir. Galyum arsenat solar hücrelerde yaygın bir şekilde kullanıldığı gibi ışık yayan diyotlar (LED), lazerler ve diğer optoelektronik gereçlerde de önemli ölçüde kullanılmaktadır.

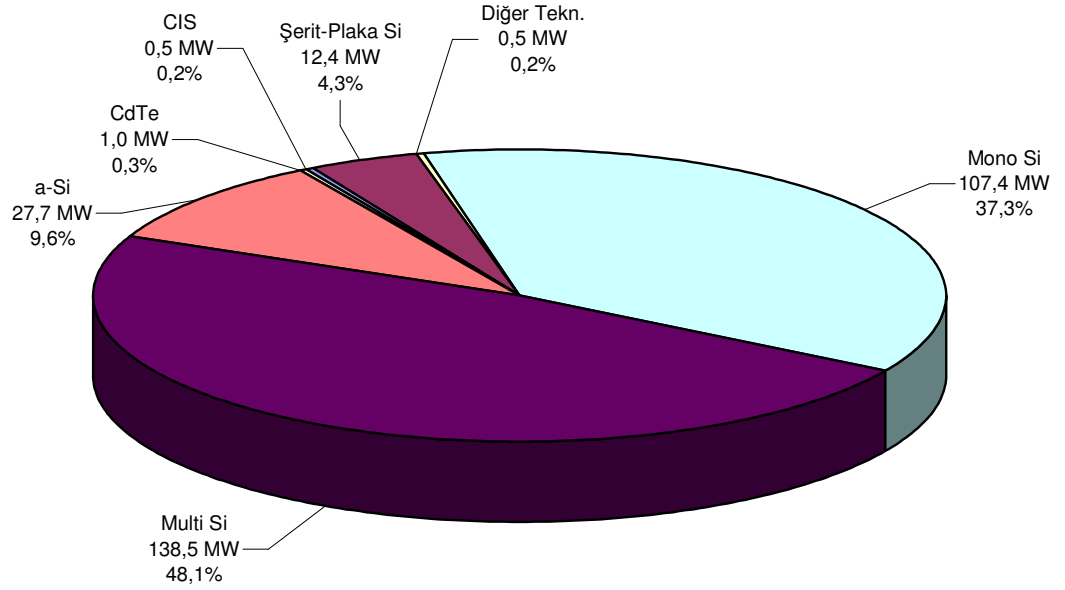
GaAs bant aralığı 1,43 eV'tur. Bu nedenle tek bağlantılı solar hücreler için ideal bir durum göstermektedir. GaAs soğurma özelliğinden dolayı, bir GaAs hücresinin güneş ışığını soğurmasında sadece birkaç mikron kalınlık yeterlidir. Oysa kristal silikon 100 mikron veya daha kalın bir tabakaya gereksinim duyar. Silikon hücrelerden farklı olarak, GaAs hücreler nispeten

ısıya daha duyarsızdır. Hücre sıcaklığı, özellikle yoğunlaştırıcı uygulamalarda, biraz yüksek olabilir. GaAs solar hücrelerinin yapımında alüminyum, fosfor, antimon veya indiyum gibi elementler katkı malzemesi olarak kullanılır. GaAs'ün ışıma zararlarına karşı yüksek dayanımı vardır. Yüksek verimlerinin yanında bu dayanımının olması GaAs'ün uzay uygulamalarında istenen bir madde olmasını sağlamıştır⁽¹⁶⁾.

Dünya piyasasında kullandığı teknolojiye göre kullanılmakta olan güneş pillerine ait grafiksel gösterim Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



1990 (46,55 MW)



2000 (288 MW)

Şekil 2.10. Farklı teknolojili fotovoltaik pillerin 1990 ve 2000 yıllarında piyasadaki dağılımı⁽¹⁷⁾

2.5. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

Fotovoltaik diziler elektriği güneş enerjisinden doğrudan üretilmeleriyle birlikte, bu enerjinin daha kullanışlı olması için uygun şekilde kontrol edilmeli, depo edilmeli, dönüştürülmeli ve belli bir düzende dağıtımı yapılmalıdır. Bu fonksiyonları yerine getirmek üzere bazı parçaların fotovoltaik dizisine ilave edilmesi gerekir⁽¹⁶⁾.

2.5.1. Fotovoltaik Sistem Çeşitleri

Fotovoltaik sistemler başlıca iki kategoride incelemek gerekir;

- Bağımsız sistemler
- Etkileşimli (veya şebeke bağlantılı) sistemler

2.5.1.1. Bağımsız Sistemler

Bu tip sistemler özerk çalışırlar ve elektrik şebekesinden bağımsızdırlar. Bu sistemler uzak yerlerdeki güç talebi için uygundur ve bu sistemlerin fotovoltaik pazarında geniş bir yeri vardır. Bağımsız sistemleri de kendi arasında sınıflandırılabilir:

Direk bağlı sistemler: Direk bağlı sistemler bağımsız fotovoltaik sistemlerin en basit çeşididir. Bu sistemde bir doğru akım yükü, fotovoltaik panele veya dizisine eksi ve artı uçları karşılıklı gelecek şekilde direk bağlanır. Elektrik depolayıcı barındırmayan bu sistem yalnız, fotovoltaik dizi tarafından üretilen gücün ve yükün aynı yerde olduğu durumlarda kullanılabilir. Bu durum Şekil 2.11'de görülmektedir⁽⁶⁾.



Şekil 2.11. Direk bağlı bağımsız fotovoltaik sistem

Bataryalı sistemler: Fotovoltaik dizi tarafından güç üretilir üretilmez her zaman üretilen bu gücün kullanımı söz konusu olmayabilir. Bağımsız fotovoltaik sistemlerde, akü grupları tarafından enerji depolanması genellikle gereklidir. Bu çeşit sistemlerin bazısında akü grubu şarj kontrolü kullanılmaz. Yük profilinin iyi tanımlandığı yerler ile bataryanın fotovoltaik diziyeye oranla daha büyük değerde olduğu yerlerde bu sistemler kullanılır. Bu, düşük şarj değerini doğurur. İlgili blok şema Şekil 2.12’de görülmektedir.



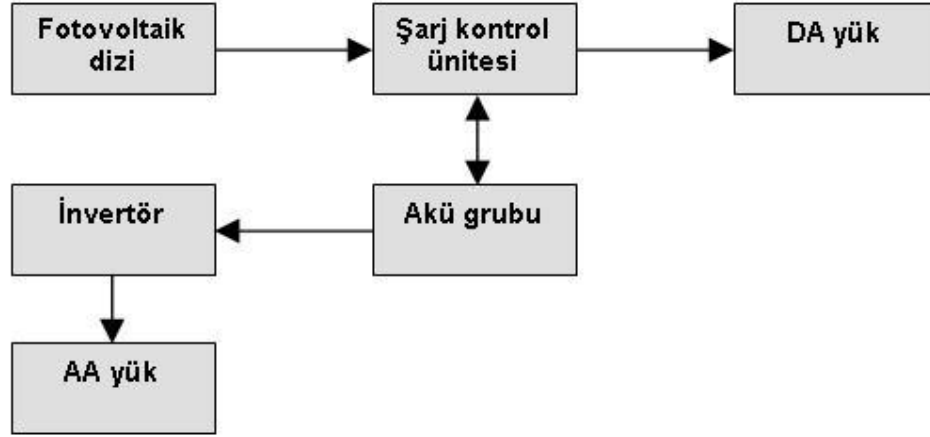
Şekil 2.12. Akü grubu depolamalı bağımsız fotovoltaik sistem

Şarj kontrollü bataryalı sistemler: Yükün değişken ve iyi tanımlanamadığı durumlar ile bataryanın, yük ve fotovoltaik dizinin birbirine göre optimal veya sınırda ölçülendirildiği durumlarda bataryayı aşırı şarj ve deşarjdan korumak için gerekli olmaktadır. Bu durum Şekil 2.13’de görülmektedir.



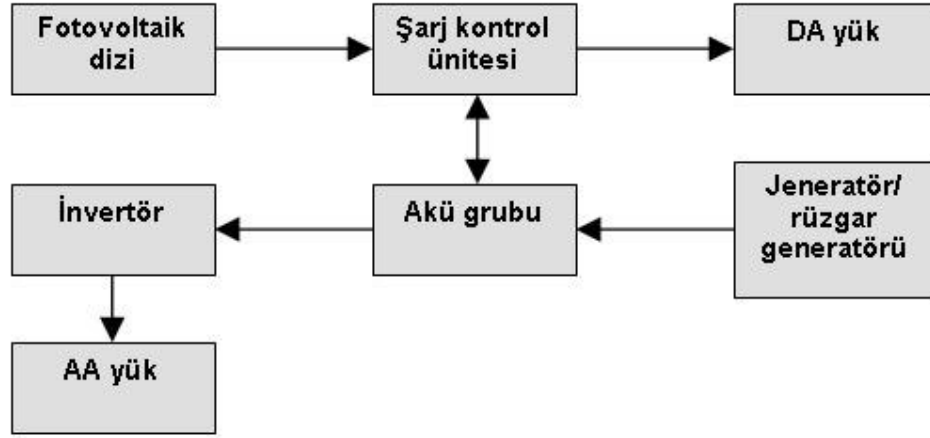
Şekil 2.13. Şarj kontrollü ve akü grubu depolamalı bağımsız fotovoltaik sistem

Batarya depolamalı ve AA ile DA yükler: Bazı hallerde alternatif akım ve doğru akım yükler için her iki gerilim türüne de ihtiyaç duyulur. Bu durumda bir invertör gereklidir. AA ve DA yük barındıran bağımsız fotovoltaik sistemler Şekil 2.14'te görülmektedir.



Şekil 2.14. AA ve DA yük barındıran bağımsız fotovoltaik sistemler

Hibrit sistemler: Fotovoltaik pillerle birlikte bir ya da daha fazla enerji kaynağının, akü gruplarını beslediği sistemlerdir. Fotovoltaik hibrit sistemlerde genel olarak kullanılan enerji kaynakları rüzgar türbini jeneratörleri ve dizel, gaz veya petrol yakıtlı makine jeneratörleridir. Bir hibrit enerji düzeneği şeması Şekil 2.15'te görülmektedir.



Şekil 2.15. Bağımsız hibrit fotovoltaik sistem ile AA ve DA yükler

Rüzgar enerjisinin değişken olması elde edilen enerjinin de değişken olmasına neden olur. Türbinin kurulacağı kule yüksekliği artırılarak ve iyi bir yer seçimiyle rüzgar değişkenliği en aza indirilmiş olur.

Hibrit enerji sistemlerinde üretilen enerjinin ve depolamanın yetersiz olduğu zamanlarda dizel jeneratörlerden yararlanır. Ancak dizel jeneratörün anma değerinde veya bu değere yakın değerlerde çalıştırılması veriminin en yüksek seviyede olmasını sağlar.

Sisteme dahil edilen dizel jeneratörle sistem güvenilirliği artarken sistem bağımsızlığı azalır⁽¹⁸⁾.

2.5.1.2. Şebekeye Bağlı Sistemler

Bu sistemlerde şebekeyle bağlantılı çalışma için bir ara yüze ihtiyaç vardır. Genel olarak bu sistemlerde destekleme ve enerji depolamaya ihtiyaç duyulmaz. Fotovoltaik sistem tarafından üretilen güç, ilk olarak şebekeye

dengeli bir şekilde dağıtılmış sistem yüklerine ulaştırılır. İlgili diyagram Şekil 2.16'da görülmektedir.

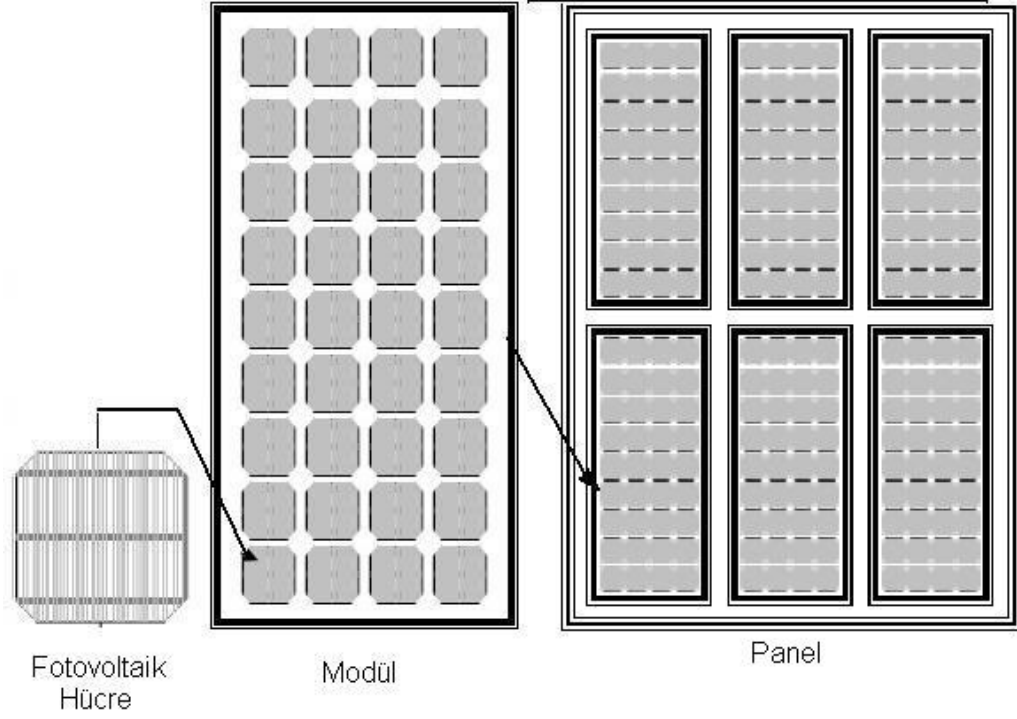


Şekil 2.16. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem⁽¹⁹⁾ .

2.6. Güneş Panelleri

Güneş panelleri solar hücrelerden, solar hücreler ise yarıiletkenlerden elde edilir⁽²⁰⁾. Güneş panellerinin en büyük dezavantajı ilk kurulum maliyetlerinin ürettiği enerjiye göre yüksek olması. Kullanılan teknolojiye göre fiyatları, kullanım ömürleri, üzerlerine düşen güneş ışığına göre ürettikleri enerji miktarları değişmektedir. Ortalama kullanım ömürleri 10 – 20 yıldır.

Güneş panelleri solar hücrelerin seri bağlanması ile oluşur. 25 °C hücre sıcaklığı, 1 m/s rüzgar hızı ve 1000 W/m² güneş ışınımı altında elde edilen çıkış gücü maksimum güç (Wp) olarak belirlenir⁽¹⁸⁾.



Şekil 2.17. Modül ve panelin fotovoltaik hücrelerden oluşumu

Güneşin gün içinde konum değiştirmesi, hatta mevsimlere göre farklılık göstermesi panele gelen güneş ışığının şiddetini etkilemektedir. Gün içinde üretilen enerjinin bir kısmı bataryalarda depo edilir. Böylece güneş ışığının olmadığı veya yetersiz olduğu durumlarda sistem bataryalardan beslenir. Gün içinde hem yükün beslenmesi hem de bataryalara enerji depolanabilmesi için planlamada güneş panellerinin sayısı artırılır ve bu da kurulum maliyetini olumsuz etkiler. Modül ve panellerin fotovoltaik hücrelerden oluşumu Şekil 2.17’de görülmektedir.

Güneş ışığının geliş açısına göre panellerden elde edilen verim değişir. Verimi olabildiğince yüksek tutmak için güneş ışığını izleyen, konumunu güneş ışınlarına göre ayarlayan sistem düzenlemek ise maliyeti artıracaktır⁽¹⁸⁾. Güneş panellerinin verimi ışığın geliş açısıyla orantılı olup,

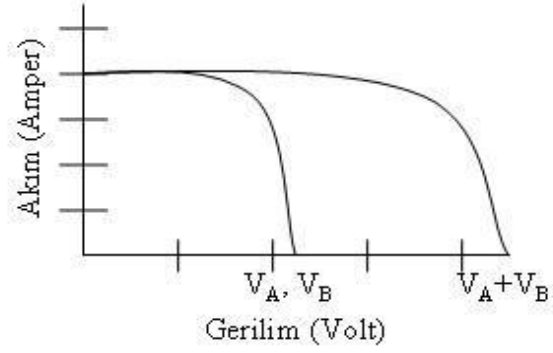
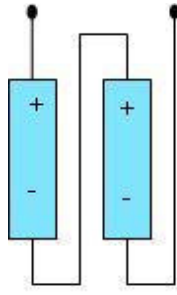
optimal verimin eldesinde güneş ışığını izleyen sistemler önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak bu durum kurulumu ek maliyet getirir.

2.7. Güneş Panellerinin Yerleştirilmesi

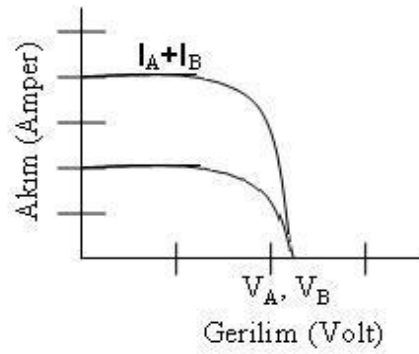
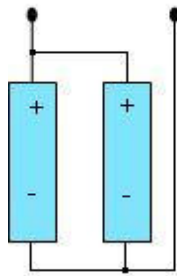
Bir solar modülün çıkış gücü üretici firma tarafından W_p (pik güç) şeklinde belirtilir ve “Standart Test Conditions – Standart Test Koşulları” (STC) ile derecelendirilir. Uygulamaların çoğunda, aydınlanma 1000 Wm^{-2} 'in altındadır (pyranometre ismi verilen gerçek aydınlanma ölçümünde ise ortalama değer 200 ila 500 Wm^{-2} arasındadır) ve solar hücre sıcaklığı ise 40 ila 60°C arasındadır. Işıma, modül yüzeyine genellikle dik olmadığı gibi hava kütlenin 1,5 olması bile çok nadir gözlemlenebilir. Aynı zamanda modülün bir parçası bazen ağaçlar, binalar veya modül yüzeyini kirleten etkilerin modül yüzeyinde birikmesi gibi nedenlerle gölgelenip, çalışma performansı önemli ölçüde etkilenir^{14,21}), montajı bina üzerine ve toprak yüzeye yapılır.

Fotovoltaik üreteçler istenilen gerilim ve akım değerleri öngörülen güç çerçevesinde seri ve/veya paralel bağlanırlar. Güneş hücreleri bu şekildeki bağlantıları ile panelleri oluştururlar. Paneller de kendi aralarında seri-paralel bağlanarak güneş dizilerini oluştururlar. Bu durum Şekil 2.18'de görülmektedir⁽⁶⁾.

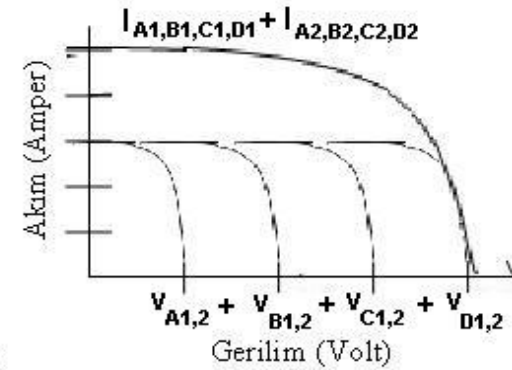
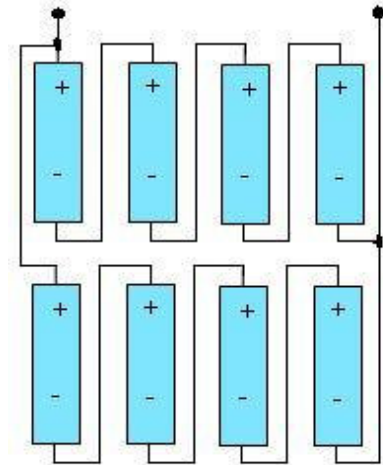
Güneş panellerinin yerleştirileceği bölgenin seçimi oldukça önemlidir. Ağaç, bina gibi gölge edici nesnelere bulunabilir. İlk kurulumda bunların durumu göz önüne alınmalıdır. Ayrıca panellerin birbirlerini de gölgelemesine engel olacak düzenleme yapılmalıdır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.18. Fotovoltaik panellerin kendi arasında (a) seri bağlantı, (b) paralel bağlantı, (c) seri – paralel bağlantı şekilleri

2.7.1. Bina Üzerine Yapılan Montaj

Tüm montajlar, her türlü tamir ve bakım durumlarını göz önüne alacak şekilde tasarlanmalıdır. Bina üzerine yapılan montajlar kendi arasında dörde ayrılır. Birincisinde, modül ayaklar üzerinde bina üzerine oturtulmuştur ve yüzeye paraleldir. Eğimli çatılı binalar için uygundur. Çatıya montaj için panelleri tutturmak gerekir ve bu genellikle panelin köşelerine yerleştirilen bağlama aparatları ile gerçekleştirilir.

Diğer bir montaj şekli de askılı olanıdır. Bu şekilde modül ile çatı arasındaki açı sıfır değildir. Bir ucu çatıya tutturulmuş, diğer ucu bir askı yardımıyla çatıdan uzaklaştırılmıştır. Bu şekilde montaj zorlaşacak, donanımın kurulma maliyeti artacaktır ve bu haliyle bu yöntem fazla avantajlı değildir.

Tümleşik montajda çatı malzemesinin yerine fotovoltaik gereç konur. Bu şekildeki montajda işçilik maliyeti genel olarak artar. Bu metodu sadece deneyimli kişiler planlamalıdır.

Doğrudan montajda panel dizisi doğrudan çatı malzemesine bağlanır. Çatı ile panel arasında çok az bir hava aralığı kalır. Deneysel sonuçlar bu yöntem için pek de cesaret vermemektedir. Panel çalışma sıcaklığı diğer montaj şekillerine göre çok daha fazladır. Bunun sonucunda verim düşer. Bu montaj şeklini kullanmak, ince film modüllerde istenebilir. Çünkü bu modüller çalışma sıcaklığına hassas değildirler. Ancak çeşitli kristal silikon modüller için tavsiye edilmez.

2.7.2. Toprak Yüzeye Yapılan Montaj

Toprak zemine yapılan montaj üçe ayrılır. Bunlardan ilki askılı sistemdir. Basit kurulum donanımı kullanılır. Büyük ve küçük güneş pili dizileri için adapte edilebilir. Birçok fotovoltaik pil üreticileri ve fotovoltaik gereç temin edicileri askılı montaj için gerekli donanımı sunarlar.

Direk üzerine kurulu sistemler sadece bir kısım modülleri kapsar. Bu sistemde modül bir direk üzerine yerleştirilmiştir. Modül sayıları ve direğin yerden yüksekliğine bağlı olarak rüzgarlı havalardan etkilenmemesi için direğin tabanı betonla sabitlenir. Bina dışı aydınlatma bu tipin uygulamasına iyi bir örnektir.

İzleyici sistemler üzerine kurulu fotovoltaik dizilerde güneş ışığından daha fazla yararlanmak esas alınmıştır. Bir sistem tarafından paneller güneşe yöneltilir.

2.8. Fotovoltaik Bir Sistemin Bileşenleri

2.8.1. Enerji Depolayıcıları

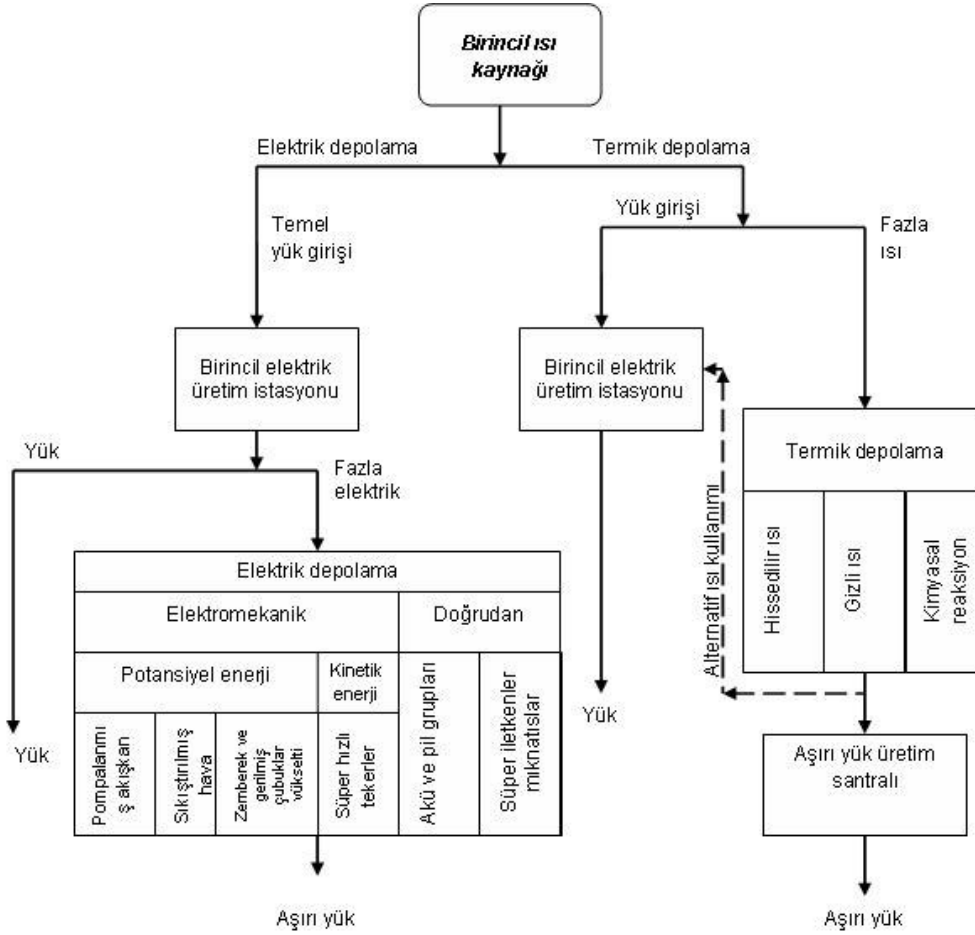
Sistemde üretilen ve tüketimden arta kalan enerjinin depolanması, üretimin tüketimi karşılayamadığı zamanlarda kullanmak için gereklidir.

Sistem güvenilirliği, saatlik, günlük ve mevsimlik değişimlerle nitelendirilir ve sistemden elektrik enerjisi talep edilirken çoğu durumda sistem sabit bir kapasiteye sahiptir. Bu durumda enerji depolamasına ihtiyaç duyulur. Depolama kapasitesini seçmek için, anormal durumlarda santralin

plansız kapanması ve bakım için programlı kapanmada korumaya almak için makul bir aşırılık ile maksimum talebi karşılamanın toplamı hesap edilir.

Gündüz ile gece, iş günleri ile hafta sonları, kış ile yaz arasında talepte gözle görülür değişmeler olur. Talebin hafta sonları düşüğe geçtiği yerler olan endüstri ve ticari bölgelerde çok sayıda sert iniş çıkışlar meydana gelebilir. Elektrik üretiminde eğer yenilenebilir enerjinin formlarından olan rüzgar ve güneş enerjilerini kullanıyorsa bu durumlarda daha büyük kapasiteli enerji depolarına ihtiyaç duyulur. Bu santrallerin giriş enerjileri kesikli olduğu için çıkışları da sert iniş çıkışlara sahiptir. Bunların dönüşüm sistemleri de diğer geleneksel santrallerininkine göre daha pahalıdır⁽²²⁾.

Enerji depolamanın amacı, mevcut güç santrallerinin kararlı yüksek çıkışının garanti edilmesiyle, elektrik enerjisindeki talebin ani iniş çıkışlarından doğan dezavantajları gidermektir. Talep üretim kapasitesinden az olduğunda enerji depolanır. Talep fazla olduğunda ise bu enerji kullanılır. Böylece günün veya haftanın belirli zamanlarındaki kısa süreli en yüksek elektrik talebini karşılayabiliyorken aynı zamanda güvenilir, hızlı, verimli ve ekonomik elektrik enerjisi sağlanmış olur. Bir enerji depolama sistemi Şekil 2.19'de görülmektedir⁽²²⁾.



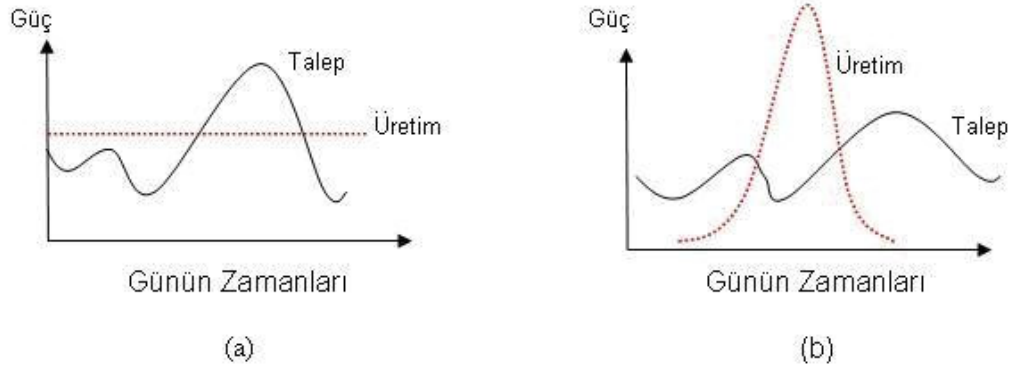
Şekil 2.19. Enerji depolama sistemleri⁽²²⁾

Kullanışlı sistemlerde enerji depolama yöntemleri temelde elektriksel depolama ve termik depolama olmak üzere iki genel yaklaşıma sahiptir. Şekil 2.19'da görüldüğü gibi elektriksel depolama da kendi içinde bölümlere ayrılabilir⁽²²⁾:

1. Elektromekanik enerji depolaması
 - a. Potansiyel, pompalanmış akışkan
 - b. Potansiyel, sıkıştırılmış hava
 - c. Potansiyel, zemberekler, bükme çubukları, yığın yükseltmesi
 - d. Kinetik, yüksek hızlı tekerler

2. Doğrudan elektrik enerjisi depolaması

- a. Akü – pil grupları
- b. Süper iletken bobinleri



Şekil 2.20. a) Termik enerji depolaması ile fosil veya nükleer yakıtlardan sağlanan kararlı termik giriş. b) Termik enerji depolaması ile güneş gibi değişim gösteren bir termik varsayım.

Birincil elektrik üretim santralleri sürekli temel yük modunda çalıştırılırlar. Böylece talebin düşük olduğu zamanlar aşırı elektrik üretimi meydana gelir. Elektrik depolaması sonra aşırı talepte kullanmak için fazla üretilen elektriği tutar. Şekil 2.20.a'da fosil yakıtlı bir santralde üretilen kararlı enerji ve buna karşılık değişken bir talep gözükmektedir. Şekil 2.20.b'de ise güneş enerjisi gibi bir enerjinin değişken üretiminin değişken talebi karşılaması gözükmektedir. Her iki durumda da üretimin fazla olması durumunda enerji depolanmakta, aksi durumda depolanan enerjiden kullanılmaktadır. Bu arada depolama esnasında ve depolanmış kullanırken dönüştürmede oluşacak kayıplardan dolayı toplam enerji depolaması, toplam enerji üretiminden daha çoktur⁽²²⁾.

Termik depolamada ise tüm düzenlemeler, düşük talep periyodunda enerjinin termal formda depolanması ve fazla talep periyodunda ise bu enerjinin geri salınması esasına dayalıdır. Birincil elektrik santralleri aşırı yük saatleri dışındaki zamanlarda gerçek zamanlı elektrik talebini karşılamak için çalıştırılırlar. Santrale giren, fosil ve nükleer yakıtlardan elde edilen kullanılabilir termik enerji esasen değişmez olabilirken (Şekil 2.20.a), güneş enerjisinde olduğu gibi değişimler de gözlenebilir (Şekil 2.20.b)⁽⁶⁾.

Termik depolama planları şunları içine alır:

- Hissedilir ısı
- Gizli ısı
- Kimyasal reaksiyon

Geniş kullanımlı enerji depolamaları için çeşitli elektrik ve termik enerji depolama projelerinin hepsinin uygun olduğu söylenemez. Zemberekler, bükme çubukları ve yığın yükseltmesi gibi seçenekler çok küçük kapasiteli sistemlerdir ve saatler, oyuncaklar, görüntülü ve sesli makineler, çalgı aletleri gibi küçük aletleri beslemek için kullanılırlar. Uçuş hız tekerleri ve akü – pil grupları gibi diğer sistemler gelişme safhasındadır ve orta düzey depolamalar için uygundur. Pompalanmış akışkanlar, sıkıştırılmış hava ve süper iletkenlik gibi az sayıdaki uygulamalar büyük enerji depolamaları için uygun gözükmemektedir.

Pompalanmış akışkan ile **sıkıştırılmış hava** birbirine benzer. Her iki sistemde de potansiyel enerji depolanır ve büyük enerji depolaması için uygundur. Pompalanmış akışkan sistemi en gelişmiş sistemdir. Pompalanmış akışkan sistemi potansiyel enerji (PE) kanununa uygundur.

$$PE = \frac{g}{g_c} mH \quad (2.12)$$

PE : Potansiyel enerji, J

g : Yerçekimi ivmesi = 9,81 m/s²

g_c : Dönüştürme faktörü =1,0 kg/(N*s²)

m : Kütle, Kg

H : Yükseklik, m

Suyun pompalanması ile oluşan bu enerji depolama yöntemi yer altı ve yer üstü olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir. Ancak bu yöntemi uygulayabilmek için uygun topografya özelliklerine sahip yerler bulma zorunluluğu vardır. Üst ve alt seviyede iki su haznesi, bunları birbirine bağlayan bir kanal, kanalın uygun bir yerinde de güç santrali şeklinde yapılan bu sistemde, iki su rezervi arasının mümkün olduğunca farklı yükseltileri olmalı ve yatayda uzunluğun mümkün olduğunca az olması sağlanmalıdır. Yatay uzunluğun yüksekliğe oranı 2'den küçük olması çok uygundur ($L/H < 2$). Buna rağmen bu oran hali hazırda çoğu uygulamada 4 ile 6 arasındadır ve bazen 10'a kadar yükselebilmektedir. Bununla birlikte iyi topografyaya sahip uygun yerler her yer için uygun olmayabilmektedir.

Hava, enerjinin talepten fazla üretildiği zamanlarda sıkıştırılmış hava depolama ünitesi tarafından sıkıştırılır ve sarnıç, mağara vb yerlerde depolanır. Talebin üretimi aştığı zamanlarda ise bu yerlerden depolanmış hava, hava türbini vasıtasıyla geri alınır. Bu yönüyle sıkıştırılmış hava pompalanmış suya benzer.

Yüksek hızlı tekerler dediğimiz yöntem üretimin talebin üzerinde olduğu zamanlarda fazla enerjiyi kinetik enerji şeklinde depolar. Her bir makine için belli sayıda irili – ufaklı silindirler bulunur. Silindirlerce sağlanan enerjinin bir kısmının depolanması ile ve gücün kesildiği zamanlarda geri boşalması yardımıyla sistem çalışır. Enerjinin geri alınması şafttan sağlanan hız ve güç sayesinde kararlı ve devamlıdır. Bu yöntem son zamanlarda araç motoru tasarımcıları tarafından oluşturulmuştur.

Elektrik depolama yöntemi ise akülerde kullanılmaktadır. Seri bağlı belli sayıda hücrelerden oluşmuştur (örneğin 12 Voltluk bir batarya için 6 hücre). Her bir hücre birkaç kurşun levha içerir. Levhalar süngerimsi gri renkli kurşunla (Pb) doldurulmuş şebeke vasıtasıyla paralel bağlanmıştır. Bu kısım anottur. Bunların öteki kısmını benzer bir tasarım oluşturur. Ancak katodu oluşturan bu kısım kurşun oksit (PbO_2) içerir. Tüm plakalar, elektrolit görevi gören sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi suya daldırılmıştır. Her bir hücrenin elektroliti kendi bölmelerinde ayrı ayrı barındırılırlar⁽²²⁾.

2.8.2. İnvörtörler

Hibrit sistemlerde üreteçlerden sağlanan alternatif akım doğru akıma çevrilir ve doğru akım şeklinde depo edilir. D.A üreteçlerinden doğrudan alınan gerilim veya depolayıcılardan alınan D.A gerilimi A.A ile çalışan aygıtlarda kullanabilmek için invertör kullanılması gerekir. Küçük ölçekli yükleri beslemede genellikle tek fazlı invertörler kullanılırken, büyük güçlü hibrit sistemlerde üç fazlı invertörler kullanılır⁽¹⁸⁾.

Şebekeden bağımsız çalışan hibrit sistemlerde sinüs, kare veya merdiven çıkışa sahip invertörler kullanılmaktadır. Sinüs çıkış verenleri ideal olanlardır. Kare dalga çıkışlılarda yük, motor olduğunda pek tercih edilmezler, bu tür invertörler aydınlatma uygulamaları için genellikle kullanılırlar. Merdiven çıkışlı invertörler ise hassas olmayan elektronik cihazların çalıştırılmasında ve bazı motor uygulamalarında kullanılırlar. Invertör çıkışındaki harmonikler; bilgisayar, buzdolabı, çeşitli motorlar gibi cihaz ve makinelerin çalışmasında düzensizliklere neden olabilmektedir. Bu tür yerlerde tam sinüs çıkışlı invertörler tercih edilir. Tam sinüs çıkışlı invertörler daha pahalıdır⁽¹⁸⁾.

Endüktif ve kapasitif yüklerin ilk çalıştırılmaları anında yüksek akım çekmeleri dolayısıyla invertörlerin korumaya geçmesine neden olmaktadır. Gelişen teknoloji ile kısa süreli gücün, nominal gücün 6 katına kadar müsaade edilebilmektedir. Verim anma değerinin %80-90'ında en yüksektir. Düşük güçte çalıştırıldıklarında verimleri de düşer. Devrede yük yokken invertörler yine de az da olsa güç harcarlar.

2.8.3. Doğrultucular

Üretilen AA gerilimli elektriğin bataryalarda depo edilmesi ve/veya DA kullanan alıcıların beslenmesinde doğrultma işlemi yapılır. Bunun için gerekli yarıiletken devre elemanlarının kullanımı kaçınılmazdır.

2.8.4. Sistemin Şebeke Bağlantısı

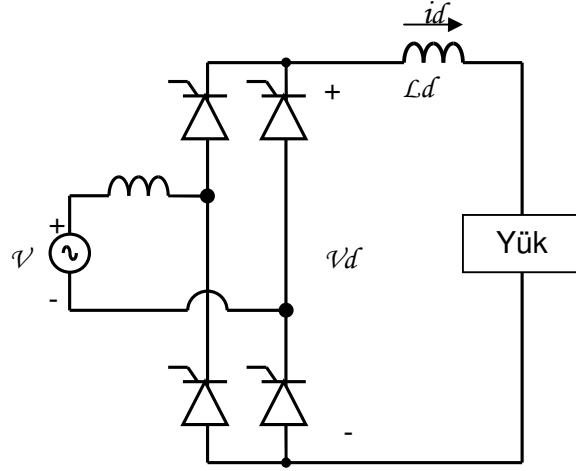
Yenilenebilir enerjilerden elektrik enerjisi elde etmede bunların şebekeye bağlanmaları için bir ara yüz devreye gereksinim duyulur. Bununla birlikte enerji depolama gereçlerinin de yine aynı şekilde şebeke bağlantılarında ara yüz devreye ihtiyaç duyulur.

Çok sayıda güneş pili aralarında seri ve paralel bağlanarak güneş dizileri oluştururlar. Bu piller güneş ışığına maruz kaldıklarında doğru akım üretir. Farklı güneş ışığı ve sıcaklıklarda güneş pilinin akım – gerilim eğrisi de farklılık gösterir. Bununla birlikte aynı ışık ve sıcaklık için de iki çalışma bölgesi görülür. Bunlar, sabit gerilim ve sabit akım bölgeleridir. Pil kısa devre olduğunda, akım sınırlandırılmaktadır. En büyük güç noktası iki çalışma bölgesinin kesiştiği dirsekte oluşur. Fotovoltaik pilin sağladığı en büyük güç noktasında çalıştırılması istenir⁽²³⁾.

Dizinin en büyük güç noktasında çalışması “boz ve ayarla” (dithering tekniği) isimli bir yöntemle sağlanır. Bu yöntemde birkaç saniye aralıklarla düzenli bir biçimde çekilen akım değiştirilir ve aynı zamanda çıkış gücü gözlemlenir. Akımın artması, gücün artmasını sağlıyorsa akım, güç azalmaya başlayıncaya kadar artırılmaya devam edilir. Eğer akımın artırılması gücün azalmasına neden oluyorsa, güç artışı başlayıncaya kadar akım azaltılmaya devam edilir.

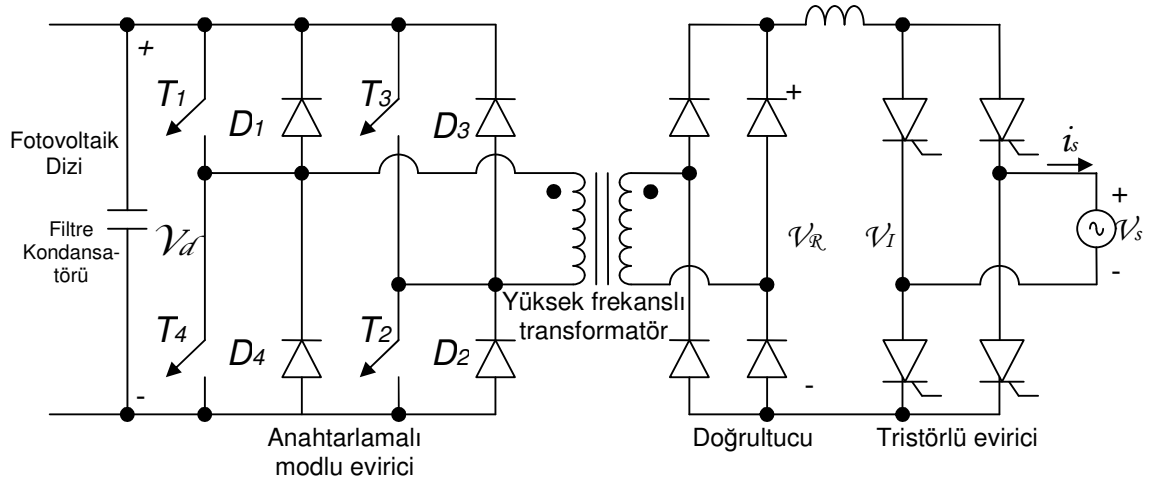
Şebeke bağlantısı bir ve üç fazlı olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Bir fazlı bağlantı için Şekil 2.21’de görüldüğü üzere “şebeke frekanslı ve faz kontrollü çevirici” güneş pilinde üretilen elektrik enerjisini şebekeye iletmek üzere kullanılabilir. Böyle bir çeviricinin evirme modunda çalıştırılması,

yalıtımının ise 50Hz.'lik transformatörle yapılması sağlanır. "Darbe genişlik modülasyonlu çeviricinin kullanılması da bir başka seçenektir. Burada da yalıtım 50Hz.'lik bir transformatörle sağlanmaktadır. Ancak akım fazının şebeke gerilimi ile aynı olacak şekilde ayarlanabildiği için, yalıtım amacıyla yüksek frekanslı bir transformatör kullanan bir sistem daha ekonomiktir⁽²³⁾.



Şekil 2.21. Uygulamaya yönelik bir fazlı tristörlü çevirici⁽²³⁾.

Şekil 2.22'de yalıtımı yüksek frekanslı bir trafo ile sağlayan bir ara yüz çeviricisi gösterilmiştir. Burada, doğru gerilim önce yüksek frekanslı alternatif gerilime çevrilmekte, daha sonra bir yüksek frekans transformatörüyle gerilim ayarı ve yalıtım sağlanmakta ve doğrultulmaktadır. Bu gerilim şebeke anahtarlamalı tristörlü bir evirici üzerinden şebekeyi beslemektedir.



Şekil 2.22. Fotoelektrik gerilimin yüksek frekanslı şebeke bağlantısı⁽²³⁾.

Hat akımının hem sinüs biçimli hem de şebeke gerilimiyle aynı fazda olması gerektiğinden, şebeke gerilimi ölçülerek i_s akımı için referans işaret oluşturulur. Bu akımın genliği daha önce incelendiği üzere en büyük güç kontrolörü tarafından “dithering” yöntemiyle belirlenir. Bu akım trafosunun sarım sayısı ile çarpılarak anahtarlama konumunda çalışan eviricinin çıkışında referans olarak kullanılır. Akım ayarlı kontrol yöntemiyle eviricinin referans akımı vermesi sağlanır. Şekil 2.22’de verilen şebeke frekanslı ve tristörlü evirici çok küçük bir sönüm açısı γ ile çalışır. Bunun nedeni, şebeke geriliminin doğal sıfır geçişleri civarında, kontrol edilmesi gereken akımın çok küçük olmasıdır⁽²³⁾.

Üç fazlı bağlantı birkaç kW’ın üzerindeki değerlerde kullanılır ve genel itibarıyla bir fazlı sistemle benzerlik gösterir.

2.9. Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Artırıcı Yöntemler

2.9.1. Güneş Takip Sistemleri (Dinamik Sistemler)

Güneşin gün ve yıl içindeki hareketleri irdelenmiş olup, güneş panelinden sağlanan en yüksek seviyedeki elektrik enerjisi, güneş ışınları panele dik geldiği durumdadır. Dolayısıyla güneşin günlük ve yıllık hareketlerine göre panel güneşe yönlendirilirse panelden optimum verim elde edilebilmektedir⁽²⁴⁻³³⁾. Ayrıca yoğunlaştırıcı kullanılarak da panel verimi artırılabilir⁽³⁴⁾.

Güneşten gelen ışınlar yer kabuğuna üç şekilde ulaşır. Bunların en çok enerji içereni direk güneş ışınması şeklindedir. Enerjinin belli bir miktarı ise yayılmış ışınla ile yer kabuğuna ulaşır ve geniş bir açıda yayılır.

Yapılan teorik bir çalışmada dinamik bir sistemin statik sisteme göre %57 civarında daha avantajlı olduğu hesaplanmıştır⁽³⁵⁾. Ancak bu durum atmosfer etkilerinin göz ardı edildiği durumlar için geçerli olduğu kabul edilmiştir.

2.9.2. Reflektörlü Sistemler

Güneş panellerine basit bir yansıtıcı ekleyerek panel yüzeyine düşen güneş ışınması artırılabilir. Bu şekildeki düzeneklere reflektörlü sistemler denir. Kullanılacak reflektör basit bir ayna olabileceği gibi ışığı yansıtan herhangi bir gereç de olabilir. Yansıtıcı geniş bir yüzeyi kaplayabilir ve parabolik şekliyle daha büyük oranda ışığı kolektör üzerinde yoğunlaştırılabilir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Deney Düzenine Tanıtımı

Yapılan deneysel çalışmada 10cm x 18cm boyutlarında amorf yapıli Si güneş pili ile 54cm x 120cm boyutlarında BP 585 tipinde güneş paneli kullanılmıştır. Amorf yapıdaki güneş pilinin statik, dinamik, reflektörlü statik ve reflektörlü dinamik durumlarındaki davranışları laboratuvar koşullarında (V_{oc} ve I_{sc} açısından) incelenerek karşılaştırılmıştır. Güneş panelinin gerçek ortamda reflektörlü ve reflektörsüz durumuna göre davranışı (V_{sc} ve I_{sc} değerleri) ele alınmış ve reflektörün palden sağlanan güç üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.1.1. Statik Sistem

Deneyde, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi amorf yapıdaki güneş pili kullanılmış, elde edilen değerler dijital avometre yardımıyla ölçülmüştür. Pil yüzeyi yere 37° olacak şekilde yerleştirilmiştir. Işık kaynağının yatay eksenle yapmış olduğu belirli açı aralıklarındaki ($\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$) hareketi sağlanmış, buna karşın fotovoltaik pilden sağlanan değerler (V_{oc} , I_{sc} ve Φ) Çizelge 3.1'de verilmiştir. İlgili grafikler ise Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.1. Statik sistemde kullanılan düzenek.

3.1.2. Reflektörlü Statik Sistem

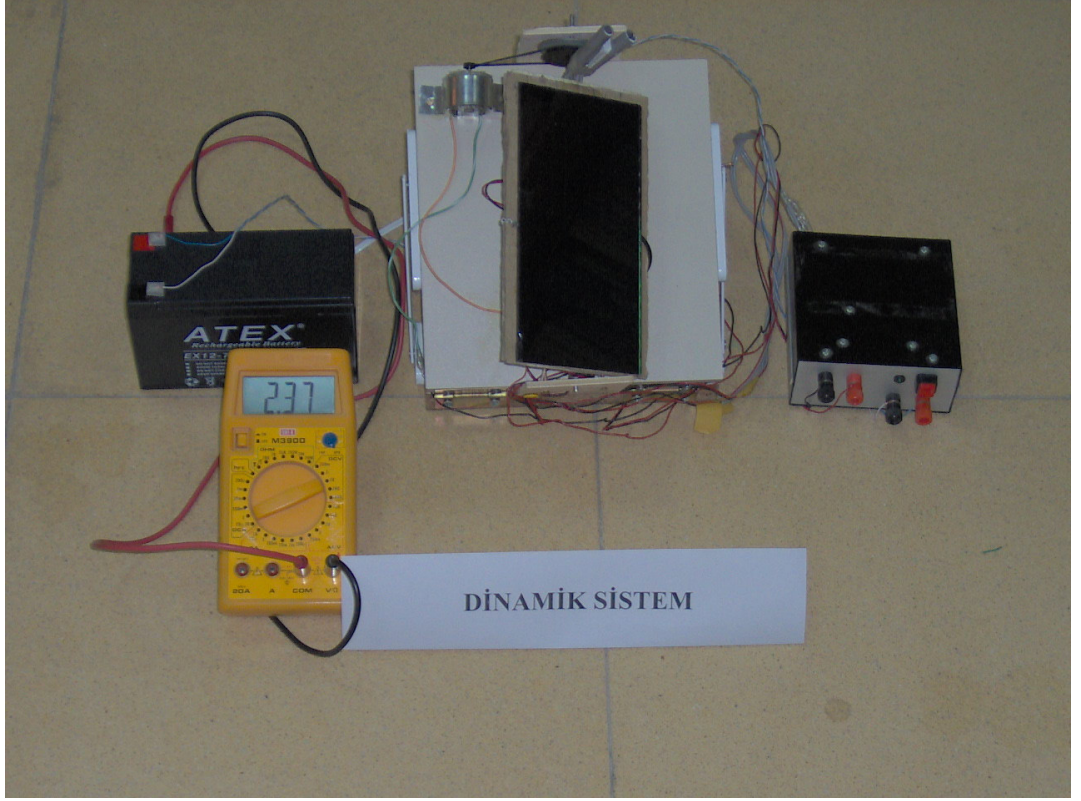
Deneyde kullanılan reflektörlü statik sistem ile ilgili deney düzeneği Şekil 3.2'de görülmektedir. Statik sistemden farklı olarak düzeneğe $\gamma=135^\circ$ olacak şekilde bir reflektör yerleştirilmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 3.2'de, ilgili grafikler ise Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Reflektörlü statik sistemde kullanılan düzeneç.

3.1.3. Dinamik Sistem

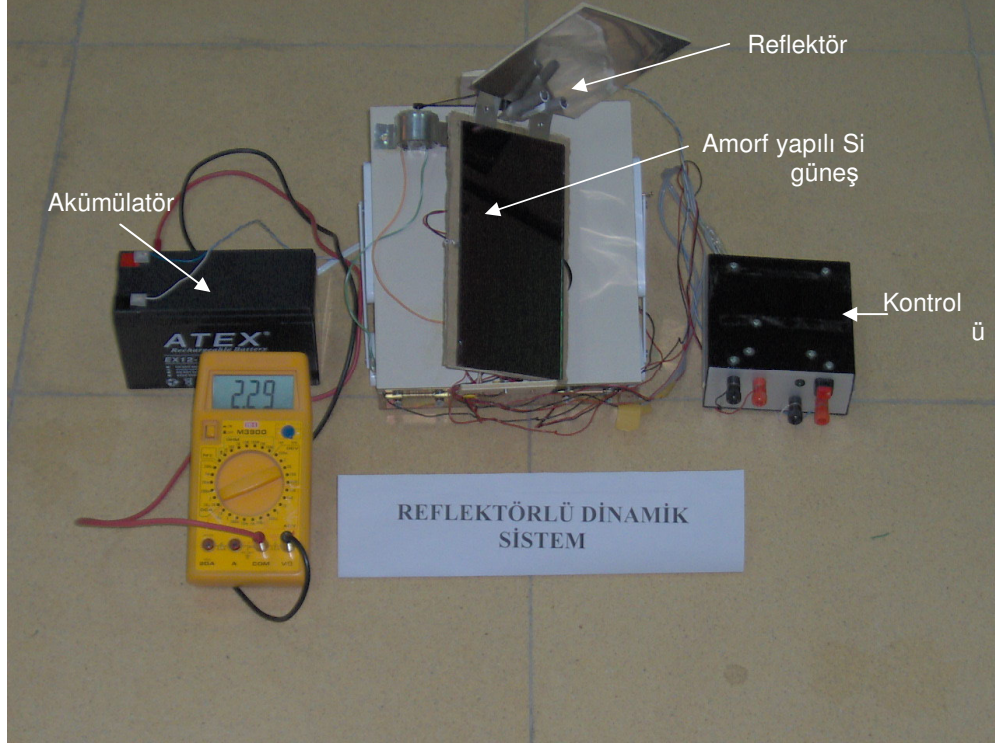
Dinamik sistemde kullanılan deney düzeneği Şekil 3.3'de görülmektedir. Güneş pil yüzeyi ışık kaynağını optoelektronik olarak izleyecek şekilde tasarlanmıştır. Işık sensörleri olarak iki adet LDR kullanılmış, uygun elektronik komparatör devresiyle elektrik motoru tahrik edilmiş ve pil yüzeyi hareketli hale getirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 3.3'de, ilgili grafikler ise Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.3. Dinamik sistemde kullanılan düzenek.

3.1.4. Reflektörlü Dinamik Sistem

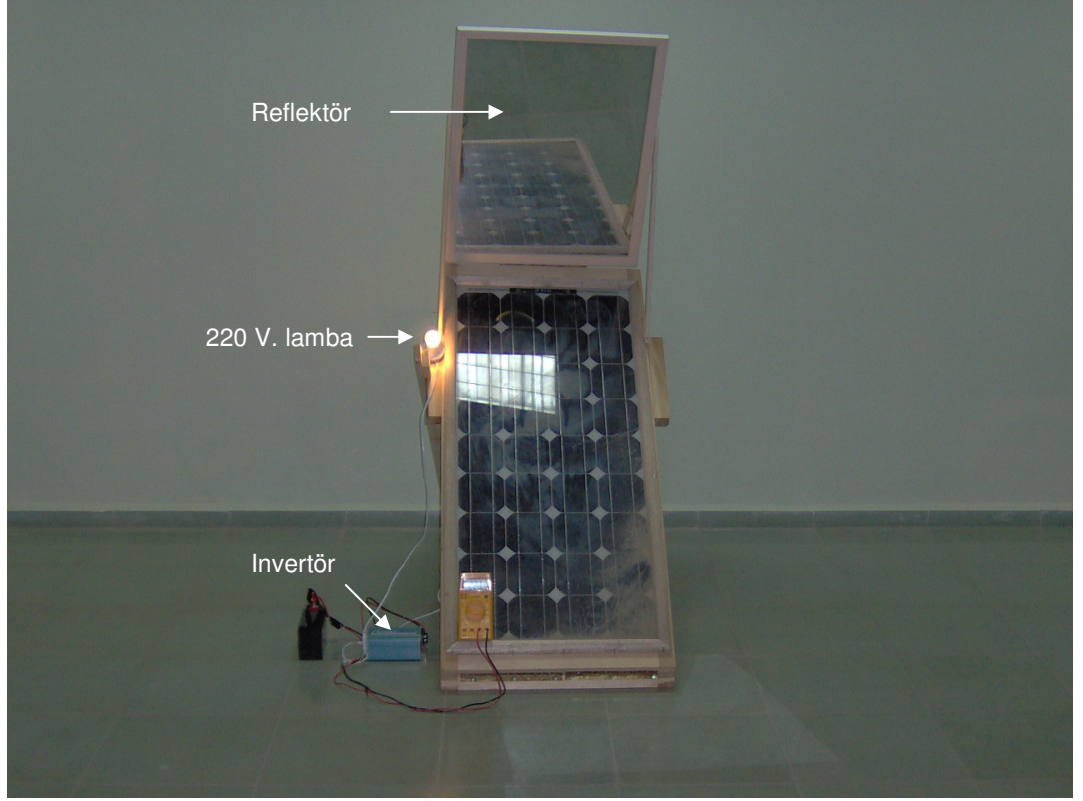
Reflektörlü dinamik sistem, dinamik sistem düzeneğinin hemen hemen aynısıdır. Farklı olarak düzeneğe reflektör ilave edilmiştir ($\gamma=135^\circ$ olacak şekilde). İlgili deney düzeneği Şekil 3.4'deki gibidir. Elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 3.4'de, ilgili grafikler ise Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da görülmektedir.



Şekil 3.4. Reflektörlü dinamik sistemde kullanılan düzenek.

3.2. Bir Güneş Paneline (BP585 Model) Uygun Bir Reflektörün Eklenmesi

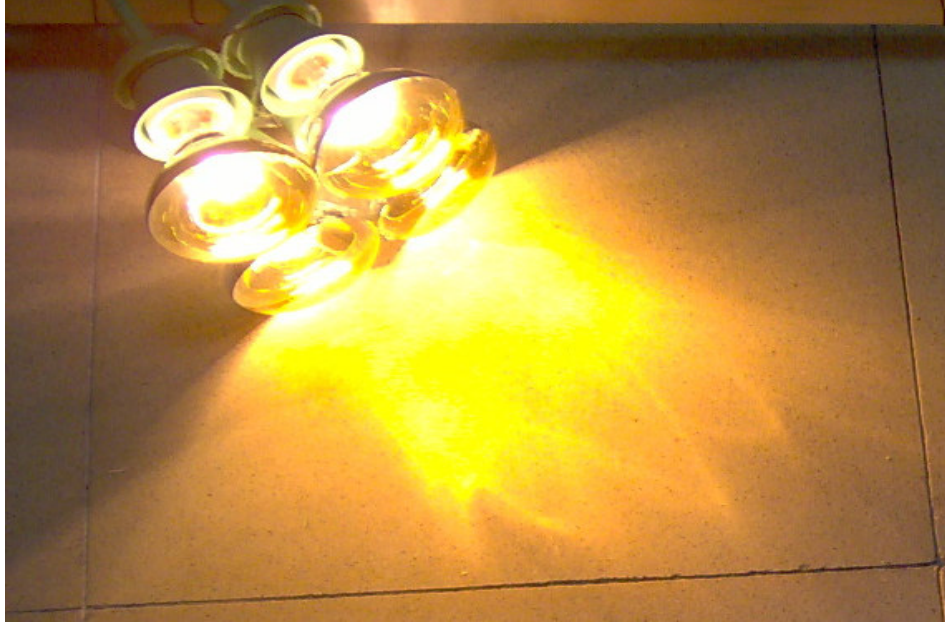
Yapılan deneysel çalışmada, Şekil 3.5’de görüldüğü gibi, bir güneş paneline reflektör eklenerek panelin reflektör üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen elektrik enerjisi akümülatörde depo edilmiş ve invertör yardımıyla AA 220 Volt, 50 Hz. elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Reflektörlü BP-güneş pilinden akümülatör-invertör yardımıyla 220 V_{ac} 'nin eldesi.

Laboratuar ortamında yapılan tüm deneysel çalışmalarda Şekil 3.6'da görülen ışık kaynağı kullanılmıştır. Triyak kontrollü, tungsten flemanlı ışık kaynağıyla değişken ışık akısı elde edilmiştir.

Işık kaynağı yatay eksenle 0° – 180° arasında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Fotovoltaik pil yüzeyine düşen ışık akısı ise Şekil 3.7'de görülen MACSOLAR marka dijital radyometrik ışık şiddeti ölçüm aygıtıyla ölçülmüştür.



Şekil 3.6. Deneyde kullanılan triyak-kontrollü ($\theta = 180^\circ$ esneklik derecesine sahip) ışık kaynağı.



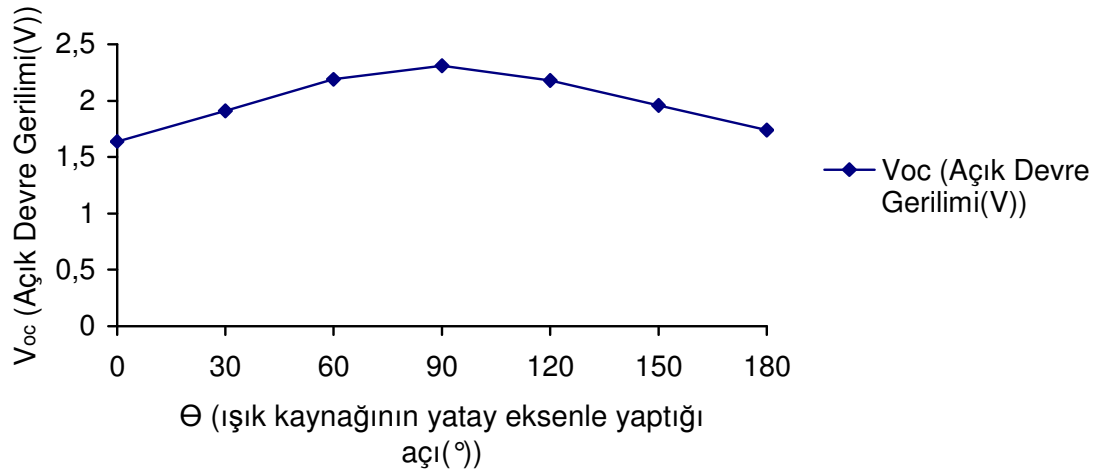
Şekil 3.7. Dijital radyometrik ışık şiddeti ölçeri

3.3. Deney Sonuçları

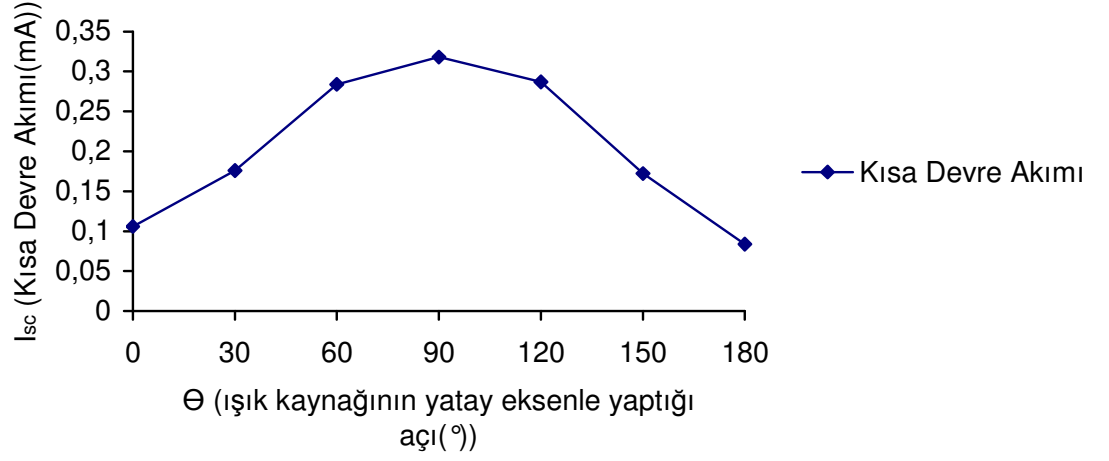
İki farklı güneş piliyle ilgili yapılan deneysel çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. Statik sistemde amorf yapıdaki güneş piliyle ilgili değerler

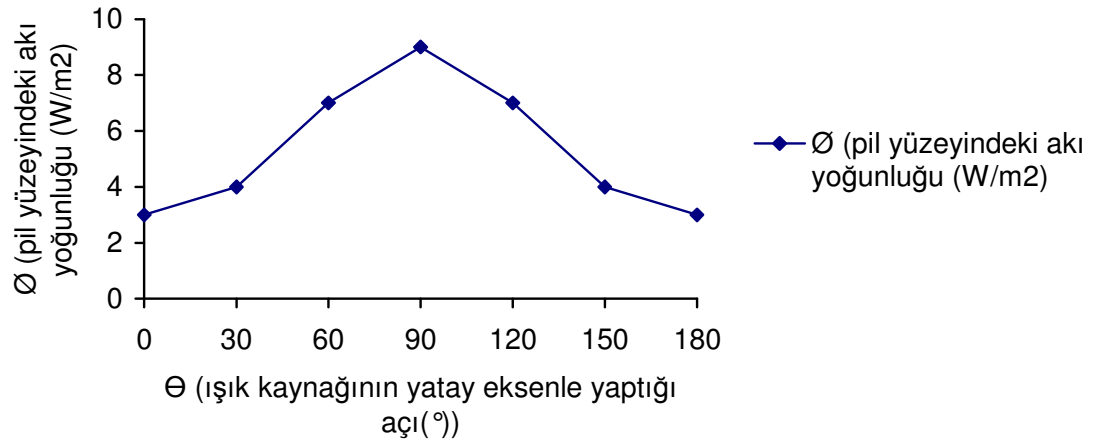
Θ (ışık kaynağının yatay eksenle yaptığı açı(°))	V_{oc} (Volt)	I_{sc} (mA)	Φ (pil yüzeyindeki akı yoğunluğu (W/m^2))	Pil yüzeyinin yatay eksenle yaptığı açı
0°	1,64	0,106	3	37°
30°	1,91	0,176	4	37°
60°	2,19	0,284	7	37°
90°	2,31	0,318	9	37°
120°	2,18	0,287	7	37°
150°	1,96	0,172	4	37°
180°	1,74	0,084	3	37°



Şekil 3.8. Statik sistemde V_{oc} (açık devre gerilimi)nin Θ açısıyla değişimi



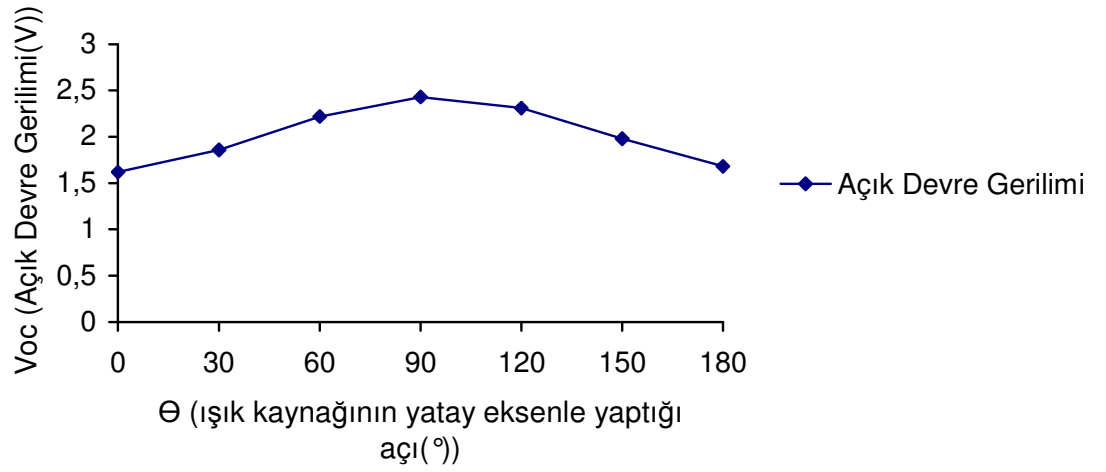
Şekil 3.9. Statik sistemde I_{sc} (kısa devre akımı)nun Θ açısıyla değişimi



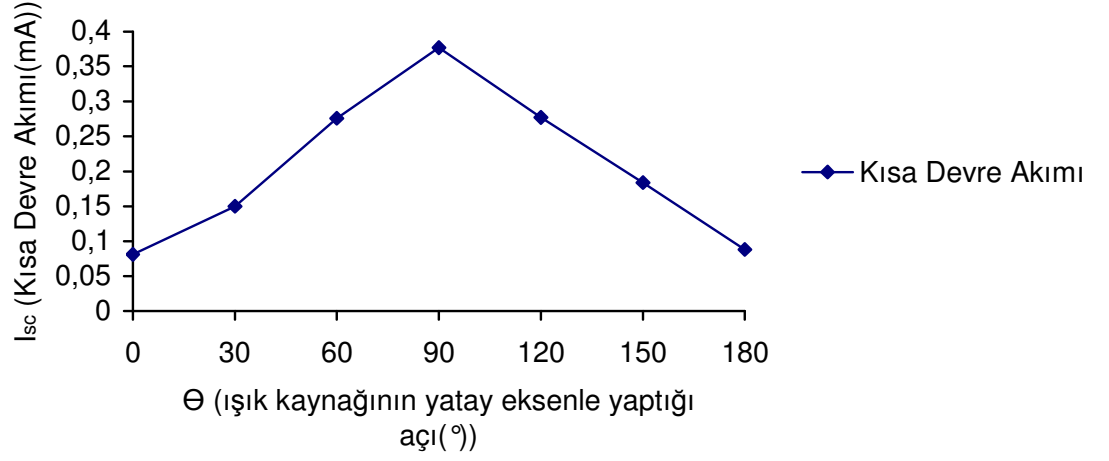
Şekil 3.10. Statik sistemde pil yüzeyine düşen Φ (ışığın yoğunluğu)nun Θ açısıyla değişimi

Çizelge 3.2. Reflektörlü statik sistemde amorf yapıdaki güneş piliyle ilgili değerler

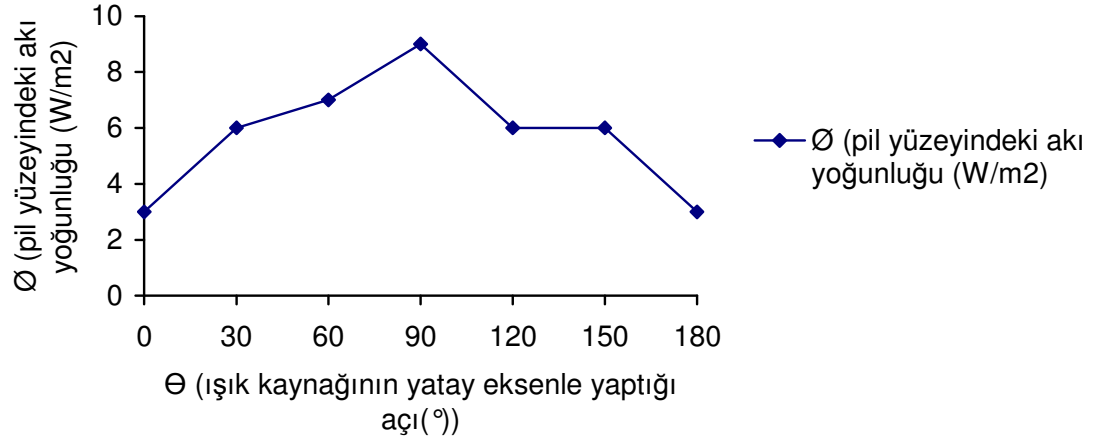
Θ (ışık kaynağının yatay eksenle yaptığı açı)	V_{oc} (Volt)	I_{sc} (mA)	\emptyset (pil yüzeyindeki akı yoğunluğu (W/m^2))	γ (Reflektörle pil yüzeyi arasındaki açı)	Pil yüzeyinin yatay eksenle yaptığı açı
0°	1,62	0,081	3	115°	37°
30°	1,86	0,150	6	115°	37°
60°	2,22	0,276	7	115°	37°
90°	2,43	0,377	9	115°	37°
120°	2,31	0,277	6	115°	37°
150°	1,98	0,184	6	115°	37°
180°	1,68	0,088	3	115°	37°



Şekil 3.11. Reflektörlü statik sistemde V_{oc} (açık devre gerilimi)nin Θ açısıyla değişimi



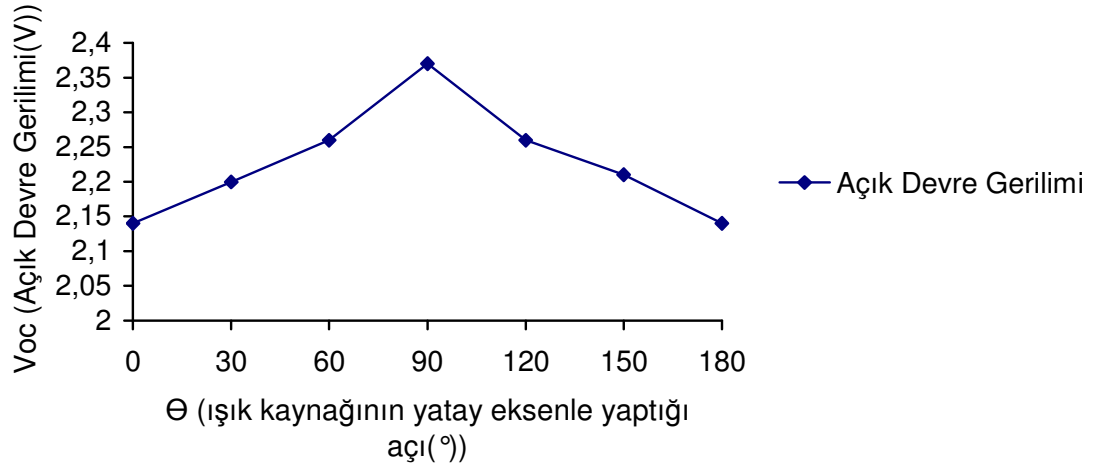
Şekil 3.12. Reflektörlü statik sistemde I_{sc} (kısa devre akımı)nın Θ açısıyla değişimi



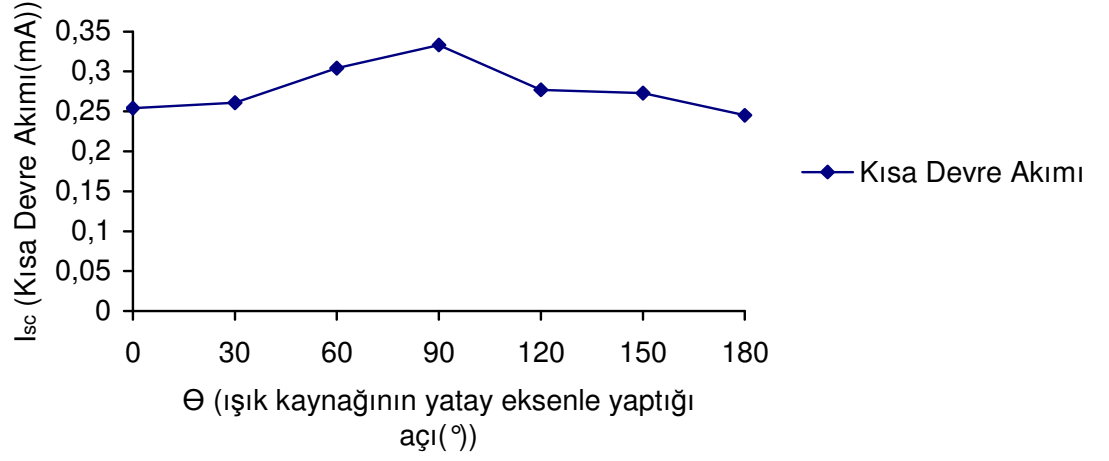
Şekil 3.13. Reflektörlü statik sistemde pil yüzeyine düşen Φ (ışık akı yoğunluğu)nun Θ açısıyla değişimi

Çizelge 3.3. Dinamik sistemde amorf yapıdaki güneş piliyle ilgili değerler

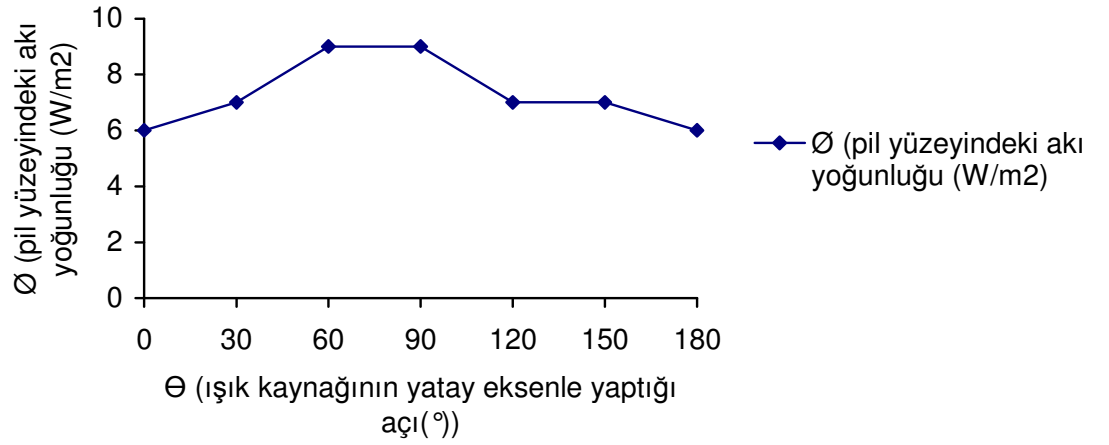
Θ (ışık kaynağının yatay eksenle yaptığı açı)	V_{oc} (Volt)	I_{sc} (mA)	\emptyset (pil yüzeyindeki akı yoğunluğu (W/m^2))	Pil yüzeyinin yatay eksenle yaptığı açı
0°	2,14	0,254	6	37°
30°	2,20	0,261	7	37°
60°	2,26	0,304	9	37°
90°	2,37	0,333	9	37°
120°	2,26	0,277	7	37°
150°	2,21	0,273	7	37°
180°	2,14	0,245	6	37°



Şekil 3.14. Dinamik sistemde V_{oc} (açık devre gerilimi)nin Θ açısıyla değişimi



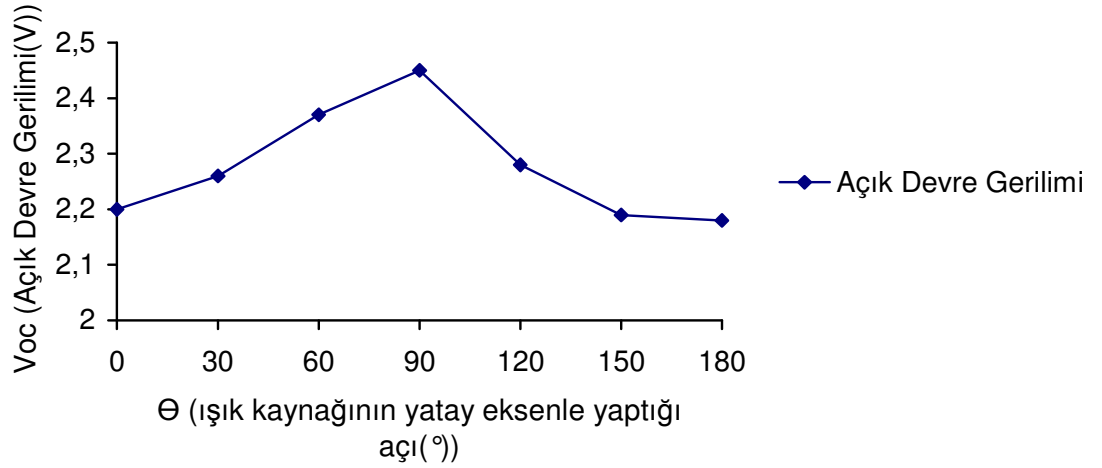
Şekil 3.15. Dinamik sistemde I_{sc} (kısa devre akımı)nın Θ açısıyla değişimi



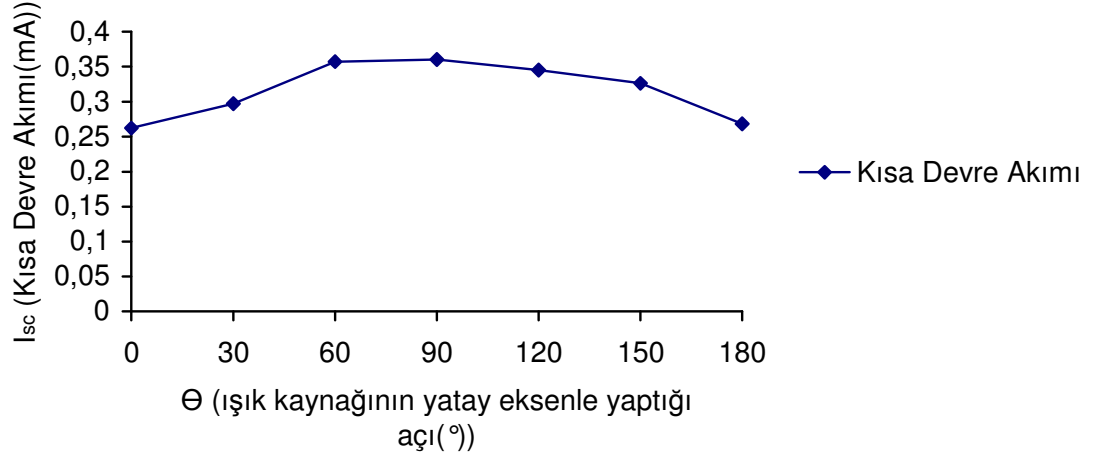
Şekil 3.16. Dinamik sistemde pil yüzeyine düşen Φ (ışık akı yoğunluğu)nun Θ açısıyla değişimi

Çizelge 3.4. Reflektörlü dinamik sistemde amorf yapıdaki güneş piliyle ilgili değerler.

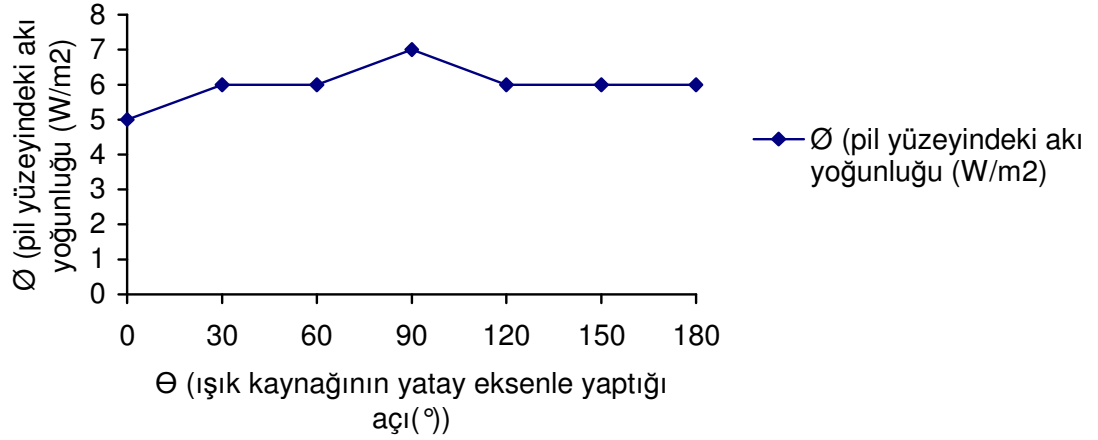
Θ (ışık kaynağının yatay eksenle yaptığı açı)	V_{oc} (Volt)	I_{sc} (mA)	Φ (pil yüzeyindeki akı yoğunluğu (W/m^2))	γ (Reflektörle pil yüzeyi arasındaki açı)8	Pil yüzeyinin yatay eksenle yaptığı açı
0°	2,20	0,262	5	115°	37°
30°	2,26	0,297	6	115°	37°
60°	2,37	0,357	6	115°	37°
90°	2,45	0,360	7	115°	37°
120°	2,28	0,345	6	115°	37°
150°	2,19	0,326	6	115°	37°
180°	2,18	0,268	6	115°	37°



Şekil 3.17. Reflektörlü dinamik sistemde V_{oc} (açık devre gerilimi)nin Θ açısıyla değişimi



Şekil 3.18. Reflektörlü dinamik sistemde I_{sc} (kısa devre akımı)nın Θ açısıyla değişimi

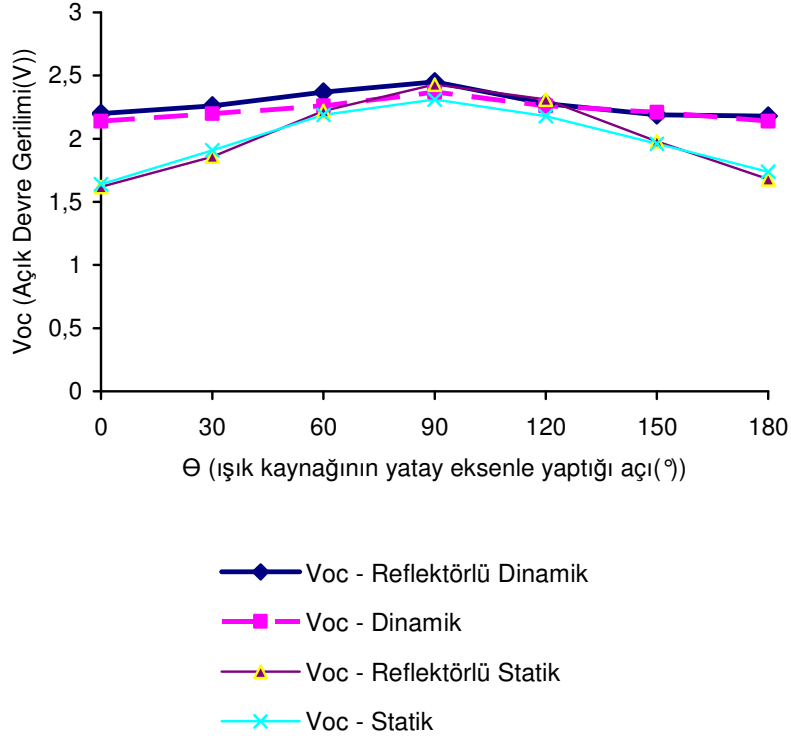


Şekil 3.19. Reflektörlü dinamik sistemde pil yüzeyine düşen Φ (ışık akı yoğunluğu)nun Θ açısıyla değişimi

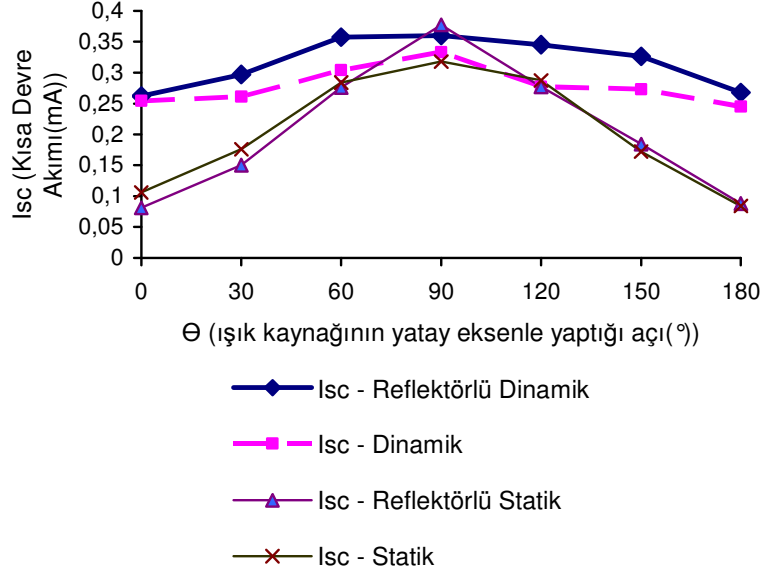
Amorf yapıdaki Si güneş pilinin 4 farklı şekildeki davranışı ilgili şekillerde verilmiş olup, güneş pilinin sıcaklığı tüm deneylerde sabit tutulmuştur.

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yapılan deneysel çalışmada farklı iki tipte güneş pili ele alınarak belli koşullar altındaki davranışları incelenmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında amorf yapıda (10cm x 18cm boyutlarında) güneş pili statik, reflektörlü statik, dinamik ve reflektörlü dinamik sistemlerde incelenmiş ve elde edilen değerler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de karşılaştırılmıştır. Her iki şekilden görüleceği gibi reflektörlü dinamik sistemin, diğer üç sisteme göre oldukça avantajlı olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan Amorf güneş pilinin dört farklı deney sonucunun karşılaştırılması (V_{oc} değerlerinin Θ açısıyla değişimi).



Şekil 4.2. Deneyde kullanılan güneş pilinin dört farklı deney sonucunun karşılaştırılması (I_{sc} değerlerinin Θ açısıyla değişimi).

Deneyisel çalışmada kullanılan fotovoltaik kaynak ise BP585 tipindeki fotovoltaik paneldir. Panel reflektörlü ve reflektörsüz olmak üzere iki aşamada ele alınmış ve elde edilen değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. BP-585 tipindeki bir güneş paneline ait deneysel veriler.

Reflektörsüz Fotovoltaik Panel (saat 12:52)	Reflektörlü Fotovoltaik Panel (saat 12:48)
V_{oc} :19,62 Volt	V_{oc} :20,2 Volt
I_{sc} :3,00 Amper	I_{sc} :3,76 Amper
W/m^2 :879	W/m^2 :1070
Lux :914x100	Lux :1242x100
T :27°C	T :27°C

Çizelgeden de görüleceği üzere fotovoltaik panele reflektörün eklenmesiyle davranışında belirgin değişimler gözlenmiştir. Kullanılan düzeneğin yardımıyla aynı panelden $\Delta P=17,09W$ 'lık bir güç artışı elde edilmiştir. Kullanılan bu düzeneğin montajının son derece kolay olduğu, fotovoltaik panellerin verimlerinde ise belirgin bir artışa neden olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. T. Tüccar, Türkiye’de Enerji Sorununun Çözümünde Rüzgar ve Güneş Enerjisinin Yeri ve Önemi. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 1997.
2. Öğr. Gör. Dr. M. Engin, Doç. Dr. A. Özdamar, Prof. Dr. M. Çolak, Güneş – rüzgar hibrit enerji sistemi: İzmir Örneği, http://www.obitet.gazi.edu.tr/makaleler/t13_hibrid.htm
3. C. Şen, Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile karşılanması. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2003.
4. http://projectsol.aps.com/energy/energy_life.asp
5. <http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/gunes.html>
6. William R. YOUNG Jr, Emergency Power Systems With Photovoltaics, University of Central Florida – Florida Solar Energy Central, Mayıs 2000
7. Elk. Müh. Hasan Basri ÇETİNKAYA, Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eylül 2001
8. Orhan GÖRMEZ, Farklı Ölçülendirme Yaklaşımları Kullanarak Bağımsız Fotovoltaik Enerji Sistem Tasarımı: Performans – Maliyet Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Makine Anabilim Dalı, Eylül 2003

9. Y. Müh. M. Alp BATMAN, Elektrik Üretimi İçin Güneş Pillerinin Kullanımında Verimi Artırıcı Yeni Bir Yöntem, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs 2001
10. <http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/gunespilleri/fotovoltaik%20guc%20sistemleri.html>
11. <http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/azel.html>
12. http://www.sandia.gov/pv/docs/PVFEffDriving_Charge_Carriers.htm
13. TEİAŞ Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü, APK Dairesi Başkanlığı raporu, Yenilenebilir Kaynaklardan Değişken Üretim Yapan Santrallerin Elektrik Üretim-İletim Sistemine Teknik ve Ekonomik Etkileri ve AB Uygulamaları, Mart 2005
14. Rodrigo Guido ARAUJO, Dr. Stefan KRAUTER, Kim ONNEKEN, Dr. Volker QUASCHNING, “Photovoltaic Energy Systems” – Experiment PE1 – Solar-Modules, <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/>
15. <http://www.cefetba.br/fisica/NFL/PBCN/solar/solardeu.html#fig1>
16. U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy <http://www1.eere.energy.gov/>
17. Mark John KERR, Surface, Emitter and Bulk Recombination in Silicon and Development of Silicon Nitride Passivated Solar Cells, Doktora Tezi, The Australian National University, Filoloji Bölümü, Haziran 2002
18. Mustafa ENGİN, Fotovoltaik – Rüzgar Hibrid Enerji Sisteminin İzmir Koşullarında Tasarımı ve Denenmesi. Doktora Tezi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002
19. www.cariboo.bc.ca/ae/geography/courses/270/text/g270-04.pdf

20. Orhan EKREN, Optimization of a Hybrid Combination of a Photovoltaic System and a Wind Energy Conversion System: İzmir Institute of Technology Campus Area Case, Master Of Science (Yüksek Lisans Tezi), İzmir, Haziran 2003
21. Gülser ÇELEBİ, Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri, Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Der. Cilt **17**, No:3, 17 – 33, 2002
22. Mohamed Mohamed EL-WAKIL, Powerplant Technology, McGraw-Hill Book Co., 1985
23. Ned MOHAN, Tore M. UNDELAND, William P. ROBBINS, Güç Elektroniği – Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım. Literatür Yayıncılık, Eylül 2003
24. V. Poulek, M. Libra, *New solar tracker*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 51, 2, (1998), 113-120
25. H.U. RAUTH, A. DRESS, R. PRUSCHEK, T. WEİDELE, Annually generated electricity of one and two axes solar tracking systems, Proc.13th European PV Solar Energy Conference, Nice/France, 23-27 Ekim 1995, pp.1015-1018.
26. M. S. Imamura, Grid connected PV plants: field experiences in Germany a pursuit of higher solar energy collection efficiency, Solar Energy Materials and Solar Cells, **35**, (1994) 359-374.
27. S. Nann, Potentials for tracking photovoltaic systems and V-troughs in moderate climates, Solar Energy, **45**, (1991) 385-393.

28. J. M. Gordon, J.F.Kreider and P. Reeves, Tracking and stationary flat plate solar collectors: Yearly collectible energy correlations for photovoltaic applications, *Solar Energy*, **47**, (1991) 245-252
29. D. F. Menicucci, The determination of optimum mounting configurations of flat plate photovoltaic modules based on a structured field experiment and simulated results from PVFORM, a Photovoltaic System Performance Model, Sandia Report SAND 85-1251.
30. F. H. Klotz, PV systems with V-trough concentration and passive tracking concept and economic potential in Europe, Proc.13th European PV Solar Energy Conference, Nice (FRANSA) 23-27 October 1995, pp.1060-1063.
31. P. Baltas, M. Tortoreli and P.E. Russell, Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays, *Solar Energy*, **37**, (1986), pp. 147-165.
32. J. M. Gordon and H.J. Wenger, Central-station solar photovoltaic systems: Field layout, tracker and array geometry sensitivity studies, *Solar Energy*, **46**, (1991), pp. 211-217.
33. V. Poulek, M. Libra, New Solar Tracker, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **51**, 2 (1998) 113-120.
34. R. W. Stacey, P.G. McCormick, Effect of Concentration on the Performance of Flat Plate Photovoltaic Modules, *Solar Energy*, **33**, 6, (1984), 565-569

35. M. Libra, V. Poulek, Bifacial PV Modules in Solar Trackers and Concentrators, a New Approach to Supplying Power in Agriculture, in Proc. of the conference "Physical Methods in Agriculture, Approach to Precision and Quality", Prague, August 2001, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Hardbound, (2002), ISBN 0 – 306 – 47430 – 1

EK-1 Kırıkkale'ye Ait Güneş Konum Veri Örneği⁽¹¹⁾.

Kırıkkale, enlem: 39° 50' (kuzey), boylam: 33° 31' (doğu) Tarih: 11 Haziran 2006					
Saatler	Zaman Eşitliği (dakika)	Güneş Denklinasyonu (derece)	Güneş Azimut Açısı	Güneş Yüksekliği	Güneş Zenit Açısının kosinüsü
01	0,49	23,06	Karanlık	Karanlık	0
02	0,48	23,06	45,01	-12,45	0
03	0,47	23,06	55,68	-3,51	0
04	0,46	23,06	65,18	6,54	0,114
05	0,45	23,07	73,98	17,25	0,2966
06	0,44	23,07	82,63	28,5	0,4771
07	0,44	23,07	91,89	39,98	0,6425
08	0,43	23,08	103,06	51,38	0,7813
09	0,42	23,08	119,02	62,14	0,884
10	0,41	23,08	146,72	70,68	0,9437
11	0,4	23,09	191,43	72,98	0,9562
12	0,39	23,09	228,78	67,02	0,9207
13	0,39	23,09	249,59	57,09	0,8396
14	0,38	23,09	262,7	45,93	0,7184
15	0,37	23,1	272,73	34,44	0,5656
16	0,36	23,1	281,59	23,04	0,3914
17	0,35	23,1	290,23	12,01	0,2082
18	0,34	23,11	299,3	1,81	0,0316
19	0,33	23,11	309,32	-7,98	0
20	0,33	23,11	320,71	-16,14	0
21	0,32	23,11	Karanlık	Karanlık	0
22	0,31	23,12	Karanlık	Karanlık	0
23	0,3	23,12	Karanlık	Karanlık	0
00	0,49	23,05	Karanlık	Karanlık	0