

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

**MONOKRİSTAL VE POLİKRİSTAL GÜNEŞ PİLİ MODÜLLERİNİN  
MEVSİMSEL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Alpay ÖZTÜRK**

**Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği**

**DANIŞMAN  
Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK**

**TEMMUZ 2012**

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

**MONOKRİSTAL VE POLİKRİSTAL GÜNEŞ PİLİ MODÜLLERİNİN  
MEVSİMSEL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alpay ÖZTÜRK**

**(092103105)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 20.06.2012**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 16.07.2012**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK (T.Ü.)**

**Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ (T.Ü.)**

**Yrd. Doç. Dr. Bilal ALATAŞ (T.Ü.)**

**TEMMUZ 2012**

Alpay ÖZTÜRK tarafından hazırlanan MONOKRİSTAL VE POLİKRİSTAL GÜNEŞ PİLİ MODÜLLERİNİN MEVSİMSEL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK  
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: Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Bilal ALATAŞ

Tarih:16.07.2012

## ÖNSÖZ

Güneş pili teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, performans ve verimliliklerinin artması, bununla birlikte düşmesi beklenen fotovoltaik sistem maliyetleri, günümüzde artan enerji ihtiyacını karşılamak için önemli bir alternatif olacaktır. Bu tez çalışmasındaki değerli katkılarından dolayı danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ömer Çelik'e teşekkür ederim.

Alpay ÖZTÜRK  
TUNCELİ-2012

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>II</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>III</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>VI</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>VII</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>X</b>
<b>SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....	<b>XI</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>XII</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Genel Bilgiler .....	4
1.1.1. Güneş Enerjisi .....	4
1.1.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli .....	5
1.2. Fotovoltaik Güneş Pilleri.....	6
1.2.1. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Tarihi Gelişimi .....	6
1.2.2. Yarı İletken Maddelerin Katkılanması .....	7
1.2.3. P-N Eklemine Oluşturulması .....	8
1.2.4. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Çalışması.....	9
1.2.5. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Elektriksel Modeli.....	11
1.2.5.1. Fotovoltaik Pildeki Temel Akımlar .....	13
1.3. Fotovoltaik Güneş Pili Çeşitleri .....	14
1.3.1. Kristal Silisyum Güneş Pilleri .....	15
1.3.1.1. Tek Kristalli (Monokristal) Silisyum Güneş Pilleri .....	16
1.3.1.2. Çok Kristalli (Polikristal) Silisyum Güneş Pilleri .....	18
1.3.2. İnce Film Güneş Pilleri.....	19
1.3.2.1. Amorf Silisyum Güneş Pilleri .....	19
1.3.2.2. Kadmiyum Tellür Güneş Pilleri .....	20

1.3.2.3.	Bakır İndiyum Diselenid Güneş Pilleri .....	21
1.3.3.	Diğer Yapılar .....	22
1.4.	Güneş Pillerinde Verim .....	23
1.4.1.	Güneş Pillerinin Verimini Etkileyen Faktörler.....	27
1.4.1.1.	Tam Olmayan Soğurma.....	28
1.4.1.2.	Foton Enerjisinin Tamamının Elektron Hol Çiftinin Oluşturulmasında Kullanılmaması.....	28
1.4.1.3.	Eğri Etkeni.....	28
1.4.1.4.	Sıcaklığın Etkisi.....	29
1.4.1.5.	Güneş Pili Yüzeyindeki Yansıma ve Kirlenme Kayıpları.....	29
1.4.1.6.	Güneş Pili İç Seri Direncinden İleri Gelen Kayıplar .....	30
1.4.1.7.	Toplama Kayıpları .....	31
1.4.1.8.	Güneş Pili Kalınlığı .....	31
1.4.2.	Güneş Pillerinin Verimini Artırmak İçin Kullanılan Yöntemler.....	31
1.4.2.1.	Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) .....	31
1.4.2.2.	Güneş Takip Sistemleri .....	32
1.4.2.2.1.	Tek Eksenli Takip Sistemleri .....	32
1.4.2.2.2.	İki Eksenli Takip Sistemleri .....	33
1.5.	Fotovoltaik Güneş Pili Sistem Türleri .....	34
1.5.1.	Şebekeden Bağımsız PV Sistemler.....	35
1.5.2.	Şebeke Bağlantılı PV Sistemler.....	36
1.5.3.	Karma (Hibrit) Sistemler .....	37
1.5.4.	Güneş Pili Uygulama Örnekleri .....	39
1.5.4.1.	Güneş Pillerinin Aydınlatma Birimlerindeki Uygulamaları.....	39
1.5.4.2.	Güneş Pillerinin Trafik Sistemlerindeki Uygulamaları .....	40
1.5.4.3.	Güneş Pillerinin Su Pompalama Sistemlerindeki Uygulamaları.....	41
1.5.4.4.	Şebeke Bağlantılı Güneş Pili Sistemi Uygulamaları .....	42
1.5.5.	Güneş Pili Uygulamalarının Türkiye 'deki Durumu .....	43
<b>2.</b>	<b>MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>44</b>
2.1.	Materyal.....	44
2.1.1.	Deneyde Kullanılan Güneş Modülleri.....	44
2.1.2.	Deneyde Kullanılan Ölçüm Cihazları .....	46

2.1.3.	Deneyde Kullanılan Depolama Birimi .....	46
2.1.4.	Deneyde Kullanılan Denetim Birimi .....	47
2.1.5.	Deneyde Kullanılan Solar Aydınlatma Lambaları .....	47
2.2.	Metot.....	48
2.2.1.	Güneş Modüllerinin Konumlandırılması ve Denge Ünitesi .....	48
2.2.2.	Bağlantı Şeması .....	49
2.2.3.	Modüllerden Alınan Akım, Gerilim ve Güç Değerlerinin Karşılaştırılması.....	50
2.2.3.1.	Ocak Ayı Verilerinin Karşılaştırılması.....	50
2.2.3.1.1.	Modül Ebatlarına Göre Ocak Ayı Verilerinin Değerlendirilmesi .....	51
2.2.3.2.	Temmuz Ayı Verilerinin Karşılaştırılması .....	56
2.2.3.2.1	Modül Ebatlarına Göre Temmuz Ayı Verilerinin Değerlendirilmesi .....	58
<b>3.</b>	<b>BULGULAR .....</b>	<b>62</b>
<b>4.</b>	<b>SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>64</b>
<b>5.</b>	<b>ÖNERİLER.....</b>	<b>66</b>
	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>68</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>.....</b>

## ÖZET

Fotovoltaik sektörünün güneş pili teknolojisindeki baskın rolünü Kristal silisyum (kristal silikon) güneş pilleri oynamaktadır. Günümüzde de PV pazarının büyük kısmını elinde tutan kristal silisyum pillerinin önümüzdeki yüzyıla kadar sektördeki liderliğini koruyacağı tahmin edilmektedir. Kristal silisyum güneş pili teknolojisinin en yaygın kullanım alanına sahip ürünleri ise monokristal ve polikristal yapılu güneş pilleridir.

Bu tez çalışmasında, monokristal ve polikristal güneş pili modüllerinin, Erzincan şartlarında Enerji İşleri Etüt İdaresi verilerine göre güneşlenme bakımından verimin en düşük olduğu Ocak ayı ve verimin en fazla olduğu Temmuz ayı dikkate alınarak ölçümleri yapılmış ve bu modüllerin performansları birim yüzeylerinde ürettikleri güç miktarı açısından kıyaslanmıştır. Bu çalışma yapılırken şebeke bağlantısız fotovoltaik bir sistem kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda, bu iki ayrı tip güneş pili teknolojisinin farklı mevsimlerdeki performans ve verimlilikleri açısından değerlendirme ve önerilerde bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş Pili Modülü, Monokristal, Polikristal, Fotovoltaik



## **SUMMARY**

### **INVESTIGATION OF SEASONAL PERFORMANCES OF MONOCRYSTALLINE AND POLYCRYSTALLINE SOLAR BATTERY MODULES**

The dominant role played by the photovoltaic sector in the solar battery technology is played by Crystal silicium (crystal silicone) solar batteries. It is predicted that crystal silicium batteries (cells), which hold a large portion of the PV market today, will maintain their lead in the sector until the next century. The most widely used products of crystal silicium solar battery technology are solar batteries that monocrystalline and polycrystalline nature.

In this thesis study, monocrystalline and polycrystalline solar battery modules were measured in Erzincan according to the data of Electric Works Feasibility Administration on the basis of their productivity in January, when insolation was the lowest, and in July, when insolation was the highest, and the performances of these modules were compared in terms of the amount of power they generated on their unit surfaces. During this study, a photovoltaic system without connection to the mains was used.

As a result of the study, evaluations and suggestions were made regarding the performance and productivity of these two different types of solar battery in different seasons.

**Key Words:** The Solar Cell Module, Monocrystalline, Polycrystalline, Photovoltaic

## ŞEKİLLER LİSTESİ

<b>Şekil 1.1.</b>	2009'a kadar tesis edilen fotovoltaik sistemlerde kullanılan modüllerin tipleri ve oranları.....	2
<b>Şekil 1.2-a</b>	Saf silisyumun kristal yapısı .....	8
<b>Şekil 1.2-b</b>	Fosfor katkılanmış silisyumun kristal yapısı (N tipi) .....	8
<b>Şekil 1.2-c</b>	Bor katkılanmış silisyumun kristal yapısı (P tipi).....	8
<b>Şekil 1.3.</b>	PN eklemesinin oluşturulması.....	9
<b>Şekil 1.4.</b>	Güneş pilinin yapısı ve çalışması.....	10
<b>Şekil 1.5.</b>	Güneş hücresi, modül, panel ve solar dizi.....	11
<b>Şekil 1.6.</b>	Bir güneş pilinin eşdeğer elektriksel devresinin gösterimi .....	11
<b>Şekil 1.7.</b>	İdeal bir güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresinin gösterimi .....	12
<b>Şekil 1.8.</b>	Güneş pili teknolojisinin izlediği değişim.....	15
<b>Şekil 1.9.</b>	Czochralski prosesi. ....	16
<b>Şekil 1.10.</b>	Farklı geometrilere sahip tek kristalli (Monokristal) silisyum güneş pilleri.....	17
<b>Şekil 1.11.</b>	Tek kristalli (Monokristal) güneş pili modülü .....	17
<b>Şekil 1.12.</b>	Çok kristalli (Polikristal) güneş pili modülü.....	18
<b>Şekil 1.13.</b>	Amorf silisyum güneş pili modülü.....	20
<b>Şekil 1.14.</b>	Kadmiyum tellür güneş pili modülü. ....	21
<b>Şekil 1.15.</b>	Bakır İndiyum Diselenid güneş pili modülü .....	22
<b>Şekil 1.16.</b>	Güneş pillerinin I-V eğrisi. ....	27
<b>Şekil 1.17.</b>	Bir fotovoltaik pilin veriminin seri dirençle değişimi.....	30
<b>Şekil 1.18.</b>	MPPT ve MPPT olmadan üretilen enerjilerin karşılaştırması .....	32
<b>Şekil 1.19.</b>	Tek eksenli güneş takip sisteminin konumlandırılması. ....	33
<b>Şekil 1.20.</b>	İki eksenli güneş takip sisteminin döner şekilde konumlandırılması. ....	34
<b>Şekil 1.21.</b>	DC ve AC kullanıcıları şebekeden bağımsız sistem blok diyagramı. ....	35
<b>Şekil 1.22.</b>	Şebeke bağlantılı PV santral güç akış diyagramı.....	37
<b>Şekil 1.23.</b>	Evsel uygulamalarda kullanılan şebeke bağlantılı PV sistem güç akış diyagramı. ....	37
<b>Şekil 1.24.</b>	Güneş-Rüzgar hibrit sisteminin blok diyagramı. ....	38
<b>Şekil 1.25.</b>	Güneş-Dizel jeneratör hibrit sisteminin blok diyagramı.....	38

<b>Şekil 1.26.</b>	Güneş pillerinin sokak aydınlatmasında kullanımı. ....	39
<b>Şekil 1.27.</b>	Güneş pillerinin bahçe aydınlatmasında kullanımı. ....	40
<b>Şekil 1.28.</b>	Güneş pillerinin karayollarında kullanımı. ....	40
<b>Şekil 1.29.</b>	Güneş pillerinin trafik ikaz sistemlerindeki kullanımı.....	41
<b>Şekil 1.30.</b>	Güneş pillerinin su pompalama sisteminde kullanımı. ....	41
<b>Şekil 1.31.</b>	Şebekeye elektrik veren bir güneş pili santrali. ....	42
<b>Şekil 1.32.</b>	Çatısı güneş pilleriyle kaplı artı enerjili bir bina.....	42
<b>Şekil 2.1.</b>	Deneyde kullanılan monokristal modül .....	44
<b>Şekil 2.2.</b>	Deneyde kullanılan polikristal modül .....	45
<b>Şekil 2.3.</b>	Deneyde kullanılan G.T. Power Rc ölçüm cihazı.....	46
<b>Şekil 2.4.</b>	Deneyde kullanılan depolama birimi .....	46
<b>Şekil 2.5.</b>	Deneyde kullanılan denetim birimi.....	47
<b>Şekil 2.6.</b>	Deneyde kullanılan solar aydınlatma lambası.....	47
<b>Şekil 2.7.</b>	Monokristal ve polikristal güneş modüllerinin konumlandırılması .....	48
<b>Şekil 2.8.</b>	Denge (Ölçüm) ünitesi gösterimi.....	49
<b>Şekil 2.9.</b>	Deney bağlantı şeması.....	49
<b>Şekil 2.10.</b>	15 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği .....	53
<b>Şekil 2.11.</b>	16 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği .....	53
<b>Şekil 2.12.</b>	17 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği .....	54
<b>Şekil 2.13.</b>	18 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği .....	54
<b>Şekil 2.14.</b>	19 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği .....	55
<b>Şekil 2.15.</b>	2012 Ocak ayında elde edilen birim yüzeylerin günlük ortalama güç değerleri .....	55
<b>Şekil 2.16.</b>	2 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği.....	59
<b>Şekil 2.17.</b>	3 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği.....	59
<b>Şekil 2.18.</b>	4 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği.....	60
<b>Şekil 2.19.</b>	5 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği.....	60
<b>Şekil 2.20.</b>	6 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği.....	61
<b>Şekil 2.21.</b>	2012 Temmuz ayında elde edilen birim yüzeylerin günlük ortalama güç değerleri .....	61

## TABLolar LİSTESİ

<b>Tablo 1.1.</b> Çeşitli gök durumları için toplam ışınım ve bu toplam ışınımında yaygın ışım oranları. ....	5
<b>Tablo 1.2.</b> Türkiye'nin bölgelere göre güneşlenme süreleri.....	6
<b>Tablo 1.3.</b> Bazı güneş pillerinin verimleri.. ....	24
<b>Tablo 1.4.</b> Bazı yarı iletkenlerin enerji bant aralığının sıcaklıkla değişimi. ....	29
<b>Tablo 2.1.</b> Monokristal modülün üretici firma tarafından verilen karakteristik değerleri .....	44
<b>Tablo 2.2.</b> Polikristal modülün üretici firma tarafından verilen karakteristik değerleri ....	45
<b>Tablo 2.3.</b> Monokristal modülden Ocak ayında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri .....	50
<b>Tablo 2.4.</b> Polikristal modülden Ocak ayında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri .....	51
<b>Tablo 2.5.</b> Monokristal Modülün Ocak ayı Birim Yüzey Güç Değerleri .....	52
<b>Tablo 2.6.</b> Polikristal modülün Ocak ayı birim yüzey güç değerleri .....	52
<b>Tablo 2.7.</b> Monokristal modülden Temmuz ayında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri .....	56
<b>Tablo 2.8.</b> Polikristal modülden Temmuz ayında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri .....	57
<b>Tablo 2.9.</b> Monokristal modülün Temmuz ayı birim yüzey güç değerleri .....	58
<b>Tablo 2.10.</b> Polikristal modülün Temmuz ayı birim yüzey güç değerleri .....	58

## SEMBOLLER LİSTESİ

$I_0$	: Ters Doyum Akımı
$V_g$	: Güneş Pili Çıkış Gerilimi
$k$	: Boltzman sabiti
$q$	: Elektrik yükü
$E_{GO}$	: Silikon için bant genişliği
$T$	: Güneş pili sıcaklığı
$I_L$	: Işık tarafından üretilen akım
$T_R$	: Referans sıcaklık (301,18 <sup>0</sup> K)
$I_{OR}$	: $T_R$ referans sıcaklığında güneş pili doyum akımı
$I_{sc} = I_{kd}$	: 25 <sup>0</sup> C ve 1000 W/m <sup>2</sup> 'deki kısa devre akımı
$I_g$	: Güneş Pili Çıkış Akımı
$K_1$	: $I_{SCR}$ için kısa devre sıcaklık katsayısı
$\lambda$	: W/m <sup>2</sup> 'deki solar aydınlanma
$B = n$	: İdealleştirme faktörü (1,92)
$R_p$	: Şönt direnç
$R_s$	: Seri direnç
$V_{ad}$	: Açık devre gerilimi
$I_p$	: Paralel kol akımı
$I_{sat}$	: Diyot akımı
$V_d$	: Diyot gerilimi
$P_m$	: Maksimum güç
$E_g$	: Yasak enerji aralığı
$P_{in}$	: Pil üzerine gelen ışımaya şiddeti
$\eta$	: Güneş pili verimi
$R_L$	: Yük direnci
$kWh$	: Kilowatt-saat
$I_m$	: Maksimum akım
$V_m$	: Maksimum gerilim

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>AC=AA</b>	: Alternatif akım
<b>DC=DA</b>	: Doğru akım
<b>EİE</b>	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi
<b>PV</b>	: Fotovoltaik pil
<b>FF</b>	: Fill Faktörü
<b>MPPT</b>	: Maksimum güç noktası takibi
<b>DMİ</b>	: Devlet Meteoroloji İşleri

## 1. GİRİŞ

Modern yaşamda enerjiye olan bağımlılık gittikçe artmaktadır. Bununla birlikte enerji kaynaklarının gün geçtikçe maliyetinin yükselmesi ve bu kaynakların üretim ve kullanım aşamasında çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, çevreyle uyumlu ve daha temiz enerji kaynaklarına yönelme zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle doğada sürekli var olan ve kendini yenileyebilen temiz veya diğer ismiyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi, çalışma ve yatırımlar günden güne artmıştır. Aralarında güneş enerjisinin de bulunduğu yenilenebilir enerji kaynakları bu fırsatları içlerinde barındıran ve geliştirilmeyi bekleyen yegâne enerji kaynaklarıdır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutan güneş enerjisi, sahip olduğu potansiyel ve kullanım kolaylığı ile diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha kolay bir şekilde yaygınlaşabilecek bir enerji türüdür.

Güneş enerjisi değişik teknolojik uygulamalarıyla birlikte özellikle son yıllarda foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik piller sayesinde elektrik üretiminde de farklı bir alternatif haline gelmiştir. Fotovoltaik piller yardımıyla elektrik üretimi her ne kadar günümüzde ucuz olmasa da, giderek düşen maliyetiyle dikkat çekmektedir (Varınca ve Gönüllü, 2006).

Fotovoltaik terimi “foto” ve “volta” kelimelerinden oluşmaktadır. Foto “ışık”, volta ise elektrik birimi olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik “güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirme” anlamına gelmektedir. Fotovoltaikler için kullanılan ortak kısaltma PV’dir (Quaschnig, 2005).

Fotovoltaik piller yardımıyla elektrik üretimi dünya genelinde çok hızlı bir şekilde artarak büyümektedir. Dünyada 1998’den 2008 yılına kadar fotovoltaik elektriği üreten sistemlerin kurulu kapasitesi, % 1530’luk bir büyüme göstermiştir. Dünya genelinde toplam fotovoltaik elektriğin kurulu kapasitesi 2008 yılı sonu itibari ile 14.730 MW’dır. Çalışan fotovoltaik elektrik sistemlerinin ise 2/3’ü başta İspanya ve Almanya olmak üzere Avrupa ülkelerindedir.

Türkiye’de bulunan Fotovoltaik sistemler genellikle şebekeye bağlı olmayan, trafik sinyalizasyonu, haberleşme, baz istasyonu, erken uyarı sistemleri, katodik koruma sistemleri, denizcilik araçları gibi elektrik şebekesinin olmadığı yerlerdeki uygulamalarda

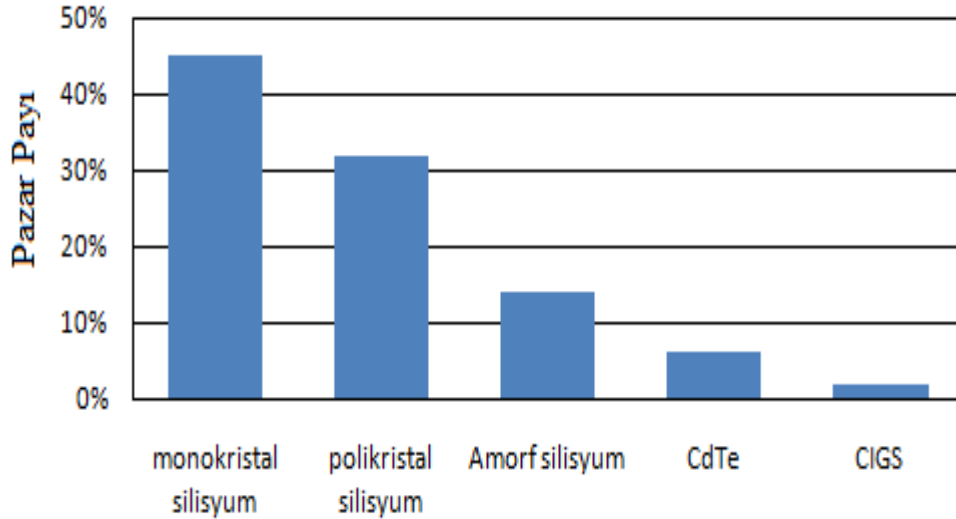
kullanılmaktadır. Türkiye’de kurulu fotovoltaik sistem kapasitesi 2011 yılı sonu itibarı ile tahminen 7-8 MW civarındadır.

Türkiye, güneş enerjisinin ısı uygulamalarındaki hızlı gelişim ve yaygın kullanımına tezat oluştururcasına, ısı yollardan ve fotovoltaik yollardan güneş elektriğinin üretilmesi konusunda, çok yavaş bir gelişime sahiptir.

2005 yılında çıkarılan 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu (YEK), genel olarak, tüm yenilenebilir enerji kaynaklarını kapsar gibi görünmesine rağmen, içerik olarak sadece rüzgar enerjisinin önünü açmış bir kanundu. 29/12/2011 tarihinde 6094 sayılı kanun ile eski kanun metni, tüm yenilenebilir enerji kaynakların önünü açmak için yenilendi.

Yeni kanun ile Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisine farklı tarifeler getirildi. Ayrıca yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi için kullanılacak makine ve teçhizatın yerli olması halinde güneş elektriğinin fiyatının % 20 daha fazla olması imkânı getirilmiştir. Yeni YEK kanununun en orijinal kısımlarından biri bu olmuştur.

Türkiye’de ve Dünya genelinde, kullanımı en yaygın olan güneş pili teknolojisi şekil 1.1.’ de görüldüğü gibi, birinci jenerasyon olarak adlandırılan silisyum esaslı güneş pilleri olup, pazar payı % 83 civarındadır (Altuntop ve Erdemir, 2012).



**Şekil 1.1.** 2009’a kadar tesis edilen fotovoltaik sistemlerde kullanılan modüllerin tipleri ve oranları (Altuntop ve Erdemir, 2012).

Dünyada Fotovoltaik pil üretiminde ise başta gelen ülkeler, ABD ve Japonya’dır. ABD’nin üretimi, dünya piyasasının %30’unu oluşturmaktadır. Japonya ise hesap



makinelerinde kullanılan fotopillerin %80'inden çoğunu üretmektedir. Fransa Dünyadaki yıllık üretimin %5'ini, Avrupa'dakinin ise %30'unu sağlamaktadır. İtalya, Avrupa'daki %25'lik payı ile Fransa'yı izlemektedir. Sonraki sıralarda ise %20'lik pay ile Almanya ve %10'luk pay ile İspanya gelmektedir. Başta Hindistan ve Brezilya olmak üzere güney ülkeleri de dünyadaki üretime % 10'dan fazla katkıları ile dikkat çekmektedirler (Okyay, 2006).

Bu çalışma, birinci bölümün ilk kısmında giriş ve genel bilgiler, ikinci kısmında fotovoltaik güneş pillerinin yapısı ve çalışması, üçüncü kısmında fotovoltaik güneş pillerinin çeşitleri, dördüncü kısmında güneş pillerinin verimi, beşinci kısmında fotovoltaik güneş pili sistem türleri, ikinci bölümde materyal ve metot, üçüncü bölümde bulgular, dördüncü bölümde sonuçlar ve tartışma, beşinci bölümde öneriler şeklinde düzenlenmiştir. Materyal ve metod kısmında; fotovoltaik pil sektörünün en yaygın kullanım alanına sahip ürünlerinden olan monokristal ve polikristal yapılu güneş pili modüllerinin Erzincan şartlarında güneşlenme süreleri bakımından en verimsiz ay olan Ocak ayı ve en verimli ay olan Temmuz aylarında yapılan ölçümlerle mevsimsel anlamda performansları incelenmiş ve birim yüzeyleri cinsinden birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçümlerin yapıldığı bölgede özellikle de şebeke bağlantısız sistemler için hangi teknolojinin daha verimli ve kullanılabilir olduğu konusunda önerilerde bulunulmuştur.

Bu çalışmanın yapıldığı Erzincan ili, Erzincan valiliğinin resmi web sayfasından alınan bilgilere göre; Doğu Anadolu bölgesinin kuzey batı bölümünde yukarı Fırat havzasında 39<sup>0</sup> 02` - 40<sup>0</sup> 05` kuzey enlemleri ile 38<sup>0</sup> 16` - 40<sup>0</sup> 45` doğu boylamları arasında yer almaktadır. Yüzölçümü 11.903 km<sup>2</sup> olup il merkezinin denizden yüksekliği 1.185 metredir.

İklim açısından karasal iklim özelliğine sahiptir. Yıllık sıcaklık ortalamaları 16,6 C<sup>0</sup>'dir. Yağış itibariyle, 380,6'lık (kg/m<sup>2</sup>) yağış ortalamasına sahip olan ilde, en yağışlı mevsim İlkbahar olup, yağışın yüzde 39'u bu mevsimde, yüzde 26'sı sonbahar, yüzde 22'si kış ve yüzde 13'ü de yaz mevsiminde kaydedilmektedir. Yıllık nem ortalaması ise yüzde 62'dir (URL-1, 2012).

## 1.1. Genel Bilgiler

### 1.1.1. Güneş Enerjisi

Güneş; bol, sınırsız, yenilenebilir ve en önemlisi de herhangi bir bedel ödenmeden kolayca erişilebilen bir enerji kaynağıdır. Dünyamızdan uzaklığı 147 milyon kilometre olan güneş biz insanlar ve diğer canlılar için vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır (URL-2, 2011).

Dünyadaki madde ve enerji akışları güneş enerjisi sayesinde mümkün olabilmektedir. Rüzgâr, deniz dalgası, okyanusta sıcaklık farkı ve biyokütle enerjileri, güneş enerjisinin değişim geçirmiş biçimleridir. Güneş enerjisi, doğadaki su döngüsünün gerçekleşmesinde de rol oynayarak, akarsu gücünü yaratmaktadır. Fosil yakıtların da, biyokütle niteliğindeki materyallerde birikmiş güneş enerjisi olduğu kabul edilmektedir (Varınca ve Gönüllü, 2006).

Güneş enerjisi hem konvansiyonel enerji kaynakları hem de diğer temiz enerji kaynaklarına kıyasla çevreye verdiği zarar en az olan enerji kaynağıdır. Kullanım aşamasında küresel ısınmaya neden olan karbondioksit ve diğer sera gazlarından hiçbirini üretmez. Güneş ışınları dünyanın oluşumundan beri yeryüzündeki tüm biyolojik yaşam formları için ana enerji kaynağı olması nedeniyle doğrudan veya dolaylı olarak canlıların yaşamak için gereksinim duydukları enerjiyi sağlamaktadır. Güneş enerjisinin doğal yollar dışında, insanoğlunun yönlendirmesi ile farklı alanlarda kullanılması çalışmaları sonucu önemi daha çok artmıştır (Sağlam, 2006).

Güneş enerjisinin atmosfer dışında,  $1400 \text{ W/m}^2$  olmak üzere, yılda toplam  $3 \times 10^{21} \text{ J}$  kadar enerjisi yeryüzüne ulaşır. Yarıdan fazlası yere inen bu miktarın  $9 \times 10^{20} \text{ J}$  kadarı karalarda, kalanı da denizlerde emilir. Bunun çok küçük bir kısmı ( $0,15 \times 10^{18} \text{ J}$ ) bitki örtüsünce fotosentezde kullanılır. Karadaki enerji yoğunluğu güneşin dik olduğu saatlerde, yatay bir yüzey için  $\text{m}^2$ 'ye 1000 W kadardır (Acaroğlu, 2003).

Güneşten yeryüzüne ulaşan ışınım, dolaysız (direkt) ve dolaylı (yaygın) olarak iki bileşenli bir biçimde ele alınabilir. Dolaysız ışınım, doğrudan güneşten gelen doğrultusu ve yönü bulunan ışınımdır. Yaygın ışınım ise tüm gökyüzünden gelen belirli bir doğrultusu ve yönü bulunmayan ışınımdır. Güneşten gelen ışınımın bir kısmı atmosferden geçerken toz ve su buharı gibi moleküller tarafından saçılarak dağılır. Dağılan bu ışınım yaygın ışınımı meydana getirirler (Enarun, 1987).

Tablo 1.1’de çeşitli gökyüzü şartları için toplam ışınlm ve bu toplam ışınlmda yaygın ışıma oranları verilmiştir.

**Tablo1.1.** Çeşitli gök durumları için toplam ışınlm ve bu toplam ışınlmda yaygın ışıma oranları (Batman, 2001).

	<b>Açık Gökyüzü</b>	<b>Puslu Gökyüzü</b>	<b>Tam Kapalı Gökyüzü</b>
<b>Toplam Işınım</b>	600-1000 W/m <sup>2</sup>	200-400 W/m <sup>2</sup>	50-150W/m <sup>2</sup>
<b>Yaygın (Dolaylı) Işınım</b>	% 10-%20	%20-%80	% 80-%100

### 1.1.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji işleri Genel Müdürlüğünde (DMİ) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınlm şiddeti verilerinden yararlanarak, EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınlm şiddeti 1.311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir. Türkiye, 110 gün gibi yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir ve gerekli yatırımların yapılması halinde Türkiye yılda birim metre karesinden ortalama olarak 1.100 kWh’lik güneş enerjisi üretebilir. Türkiye'nin bölgelere göre güneşlenme süreleri ve metrekare başına toplam güneş enerjisi değerleri Tablo1.2’de verilmiştir. Değerlere bakıldığında Güneydoğu Anadolu bölgesi en çok güneş alan bölgemizdir (Varınca ve Gönüllü, 2006; Sağlam, 2006; Nakir, 2007).

**Tablo1.2.** Türkiye'nin bölgelere göre güneşlenme süreleri (Nakir, 2007).

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

## **1.2. Fotovoltaik Güneş Pilleri**

### **1.2.1. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Tarihi Gelişimi**

Güneşin dünyada bulunan nükleer ve jeotermal enerji kaynakları dışındaki diğer bütün enerji kaynaklarının ana kaynağı olduğu bilinen bir gerçek olmasına rağmen güneş enerjisinden direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren sistemler oldukça yenidir. Bu dönüşümü sağlayan ilk adım 1839 yılında Edmand Becquerel tarafından fotovoltaik etkinin bulunmasıyla atılmıştır. Becquerel'in içerisine elektrotlar daldırılmış bir elektrolite ışınım verilmesiyle gerilim elde etmesinden sonra bu yönde çalışmalara devam edilmiş ve 1914 yılında verimi %1 olan selenyum piller geliştirilmiştir. Günümüzde kullanılmakta olan yarı iletken teknolojisine sahip ilk güneş pilleri ise 1954 yılında Bell laboratuvarında çalışma yapan Chaplin ve ekibi tarafından geliştirilmiştir. Bu piller oldukça düşük verimli yapıları ve güneşten alınan enerjinin ancak % 4'ünü elektrik enerjisine dönüştürebiliyordu. Daha sonra uzay çalışmalarında, uyduların enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere güneş pillerinin kullanılmaya başlanması güneş pillerinin gelişimini hızlandırmıştır. Güneş pillerinin

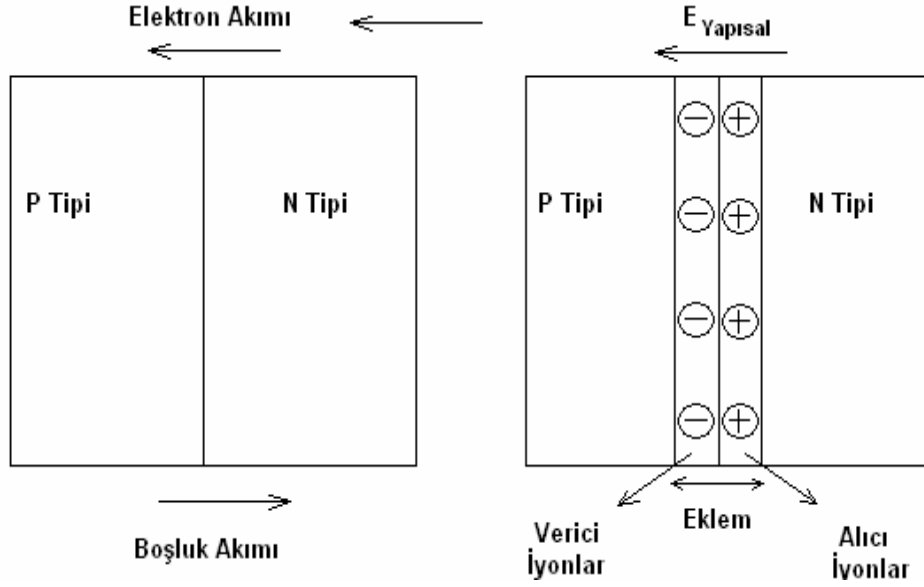
üretim teknolojisi itibariyle maliyetinin yüksek olması uzun yıllar laboratuvar çalışması olarak kalmasına neden olmuştur. Gelişen üretim teknolojileri ve malzeme bilimi sayesinde maliyetleri düşen yüksek verimli (%10-%20) güneş pilleri 1980'den sonra ticari arenada kendisini göstermiş ve kullanımını yaygınlaştırmıştır.

### **1.2.2. Yarı İletken Maddelerin Katkılanması**

Fotovoltaik güneş pilleri fotoelektrik etkiyi kullanarak çalışan yarı iletken teknolojisiyle üretilmiş yapılardır. Bu nedenle yarı iletken maddelere ve bu maddelerin hangi işlemlerden geçerek güneş pillerinin üretiminde kullanıldığına değinmek gerekir. Son yörüngelerinde dört adet elektron bulduran elementlere yarı iletken elemanlar denir. Son yörüngede bulunan bu elektronlara valans elektronları adı verilir. Silisyum, Germanyum vb. gibi yarı iletken elementler periyodik cetvelin IV. grubunda yer alırlar. Yarı iletken maddeler diyot, transistör, triyak, tristör vb. gibi birçok elektronik elemanın yapı taşlarıdır. Fotovoltaik pillerde ise transistör ve diyotlardan farklı olarak P ve N tipi malzemelerin birleştiği yüzeyler büyük tutulmuştur. Bu birleşim arakesatine jonksiyon veya eklem adı verilir (Nakir, 2007).

Yarı iletkenlik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, kadmiyum sülfür, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir. Yarı iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için, N ya da P tipi katkıları gerekmektedir. Katkılama, saf yarı iletken eriyik içerisinde istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesi ile yapılır. N ya da P tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan N tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyumun dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle 5. gruptaki elementlere “verici” ya da “N tipi” katkı maddesi adı verilir. P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element, örneğin alüminyum, indiyum, bor gibi element eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur. Bu elektron yokluğuna “hol” ya da “boşluk” denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de “P tipi” ya da “alıcı” katkı maddeleri denir (Acaroğlu, 2003).

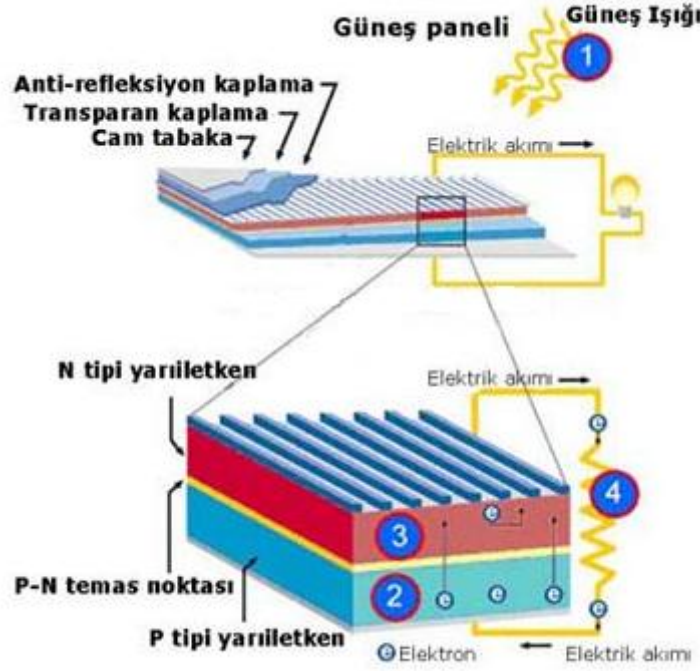




Şekil 1.3. PN eklemının oluşturulması (Okyay, 2006).

#### 1.2.4. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Çalışması

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



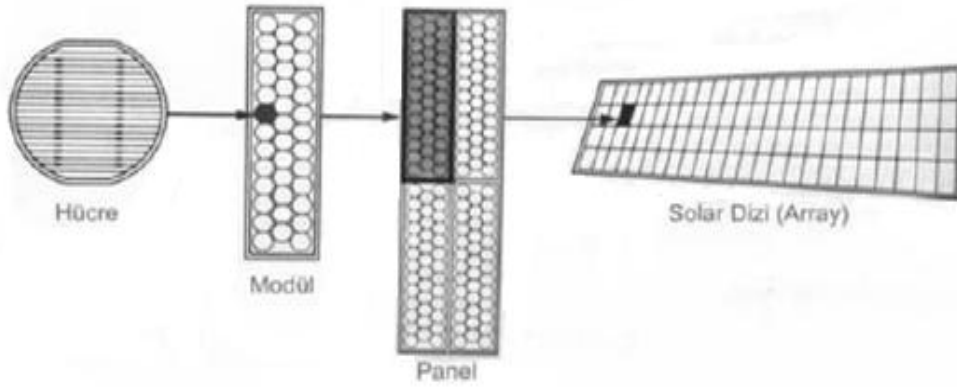
Şekil 1.4. Güneş pilinin yapısı ve çalışması (URL-3, 2011).

Şekil 1.4.'te güneş pillerinin yapısı ve çalışması şematik olarak gösterilmiştir. Numaralandırılmış kısımlarda sırasıyla şu olaylar meydana gelmektedir.

- Güneş ışığı güneş pili üzerine düşer ve fotovoltaik hücreler tarafından absorbe edilir. Güneş pilinde çok elektrona sahip P tipi yarıiletken madde ve az elektrona sahip N tipi yarıiletken madde bulunur.
- Güneş ışığı P tipi yarıiletken maddeden elektron koparır.
- Enerji kazanan elektronlar N tipi yarıiletken maddeye doğru akarlar.
- Bu sabit tek yönlü elektron akışı doğru akımı (DC) yaratır. Elektronlar kurulan devreler boyunca akarak pillerin şarj edilmesinde ya da farklı alanlarda kullanılır ve P tipi yarıiletken maddeye geri döner (URL-3, 2011).

Güneş hücreleri (pilleri) fotovoltaik sistemin (PV sistem) en temel birimidir. Bu hücreler seri ve paralel bağlanarak PV modüllerini, modüller birleşerek panelleri, paneller birleşerek dizileri oluşturur (Çelebi, 2002).



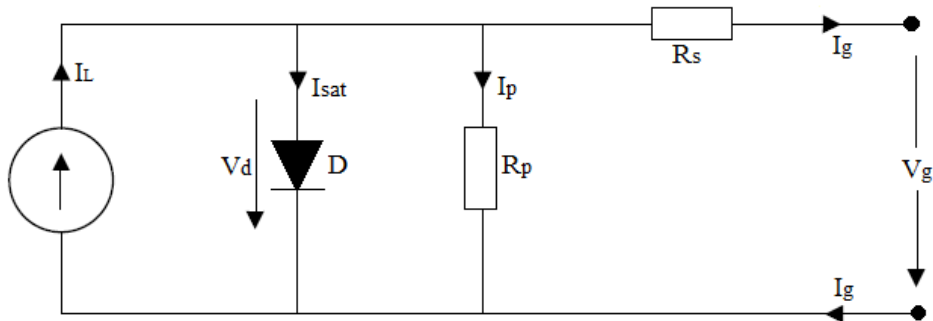


Şekil 1.5. Güneş hücresi, modül, panel ve solar dizi (Çelebi, 2002).

### 1.2.5. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Elektriksel Modeli

Bir güneş pili; güneş ışınımının oluşturduğu fotonlar tarafından meydana getirilen akımı geçirecek durumda olan bir diyot üzerine paralel bağlı, sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Diyotun uçları arasında, potansiyel duvarının alçaldığı miktara eşit bir potansiyel farkı meydana gelir. Bu potansiyel farkına, fotovoltaik elektromotor kuvveti (e.m.k) denir. Fotovoltaik e.m.k; silisyumdan yapılmış güneş pilleri için yaklaşık 0,5 volt, germanyumdan yapılmış piller için yaklaşık 1 voltur.

Güneş pilinin elektrik üretimi bir akım kaynağı ile sembolize edilir. Hücre üzerine düşen ışınım arttıkça elektrik akımı da artmaktadır. Güneş pilinin gövdesi yarıiletken malzeme olduğu için diyotla modellenmiştir. P-N eklem bölgesinde üretilen enerjinin kutuplara iletilmesi sırasında oluşan kayıplar, seri direnç ile gösterilmiştir. Bu seri direnç güneş pili verimini doğrudan etkilemektedir. Şekil 1.6.'da, bir güneş pilinin eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Bir güneş pilinin eşdeğer elektriksel devresinin gösterimi (URL-4, 2012).

Bir güneş pilinin açık devre gerilimi( $V_{ad}$ ), pilden geçen akımın sıfır olması durumunda pil uçlarından ölçülen gerilimdir. Pilin kısa devre akımı ( $I_{kd}$ ) ise, sıfır gerilimde ve aydınlatma altında pilden geçen akımdır. Bu akım seri direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda, ışıkla oluşan akıma eşit olup ışık şiddetine bağlıdır (Çabuk, 1992). İdeal bir güneş pili için  $R_s=0$  ve  $R_p=\infty$  kabul edilebilir. Bu durumda pilin kısa devre şartı altında, yani  $V_d=0$  olması halinde; pilin kısa devre akımı  $I_{kd}$ ,  $I_L$ foto akımına eşit olur. Bu durum,

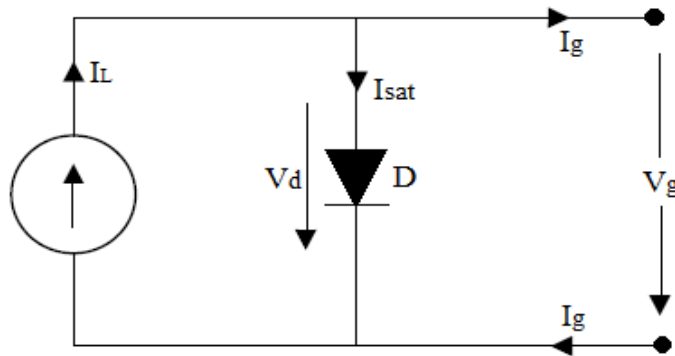
$$I_{kd} = I_L \quad (1.1)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Açık devre şartı altında, yani güneş pili uçlarına bir yük ( $R_L$ ) bağlanırsa,  $R_L=\infty$  için güneş pili içerisinde geçen toplam akım sıfır olacağından; açık devre gerilimi  $V_{ad}$  matematiksel olarak,

$$V_{ad} = \left( \frac{nkT}{q} \right) \ln \left( 1 + \frac{I_L}{I_0} \right) \quad (1.2)$$

bağıntısı ile bulunur.

Burada; k:boltzmann sabiti, T:Mutlak sıcaklık, q:Elektrik yükü ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  Coulomb), n: p-n eklemının ideal olma faktörü,  $I_0$ :Karanlık doyum akımıdır. Düzgün olmayan eklem bölgesi, istenmeyen yabancı maddeler ve kristaldeki boşluklar,  $I_0$  akımının artmasına sebep olur. Güneş pilinin açık devre voltajı fotovoltaiik elektromotor kuvvetine (e.m.k) eşittir. Fotovoltaiik emk, yarı iletken materyalin yasak enerji aralığının ve şönt direncinin artması ile artar;  $I_0$  akımının ve sıcaklığın artması ile azalır. İdeal bir güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi Şekil 1.7.'de gösterilmiştir (URL-4, 2012; Küpeli, 2005; URL-5, 2005).



Şekil 1.7. İdeal bir güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresinin gösterimi (URL-4, 2012).

### 1.2.5.1. Fotovoltaik Pildeki Temel Akımlar

Fotovoltaik akım( $I_L$ ): Fotovoltaik pil üzerine düşen ışık radyasyonu ile doğru orantılıdır.

$$I_L = [I_{SC} + K_1(T - 25)]\lambda/100 \quad (1.3)$$

Ters Doyum akımı ( $I_0$ ):Işık olmadığı zaman diyodun sızma akımının yoğunluğudur.

$$I_0 = I_{OR} \left[ \frac{T}{T_R} \right]^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_{GO}}{B} \left( \frac{1}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (1.4)$$

Diyot akımı ( $I_{sat}$ ): Gerilime ve sızıntı akımı(ters doyum akımı)  $I_0$ 'a bağlıdır ve denklem (1.5) ile ifade edilir.

$$I_{sat} = I_0 \left[ \exp \left( \frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (1.5)$$

Paralel kol akımı ( $I_p$ ): Paralel kol direncindeki eklem gerilimi etkisi ile ortaya çıkan ve denklem (1.6) ile ifade edilen akımdır. Paralel kol direnci  $R_p$ , N ve P eklemleri boyunca akan elektronlara bağlı olarak ortaya çıkan kaybı belirler.

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V_g + I_g \cdot R_s}{R_p} \quad (1.6)$$

Hücreden akan çıkış akımı;

$$I_g = I_L - I_{sat} - I_p \quad (1.7)$$

Yarı iletken direncine, opak elektrot direncine ve bağlantı kayıplarından dolayı ortaya çıkan seri direnç ( $R_s$ ) denklem (1.8) ile gösterilen gerilim düşümüne sebep olur.

$$V_g = V_d - I \cdot R_s \quad (1.8)$$

(1.5) ve (1.6) denklemleri (1.7)'de yerine konulursa;

$$I_g = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_g + I_g \cdot R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_g + I_g \cdot R_s}{R_p} \quad (1.9)$$

denklemleri ile tek bir hücre için genel bir matematiksel model elde edilir. Paralel direnç  $R_p$

çok büyük olduğu için genel olarak sonsuz kabul edilir. Hücre sıcaklığı solar radyasyon yoğunluğu, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi çevre şartlarından etkilenir. Bu faktörlerin tamamı fotovoltaik pildeki ısı transferine etki ederler.

Formülde kullanılan simgelerin açıklamaları şöyledir:

$I_g$  ve  $V_g$  = Güneş pili çıkış akım ve gerilimi

$I_o$  = Güneş pili ters doyum akımı

$T$  = Güneş pili Sıcaklığı  $^{\circ}C$

$k$  = Boltzman sabiti ( $1.380 \cdot 10^{-23}$  Joule/K.)

$q$  = Elektrik yükü ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  Coulomb)

$I_L$  = Işık tarafından üretilen akım

$I_{SC} = 25^{\circ}C$  ve  $1000 \text{ W/m}^2$ 'deki kısa devre akımı

$K_1 = I_{SCR}$  için kısa devre sıcaklık katsayısı  $A/^{\circ}C = 0,0017$

$\lambda = \text{W/m}^2$ 'deki solar aydınlanma

$B = n = \text{İdealleştirme faktörü} = 1,92$

$E_{GO}$  = Silikon için bant genişliği

$T_R = \text{Referans sıcaklık} = 301,18^{\circ}K$

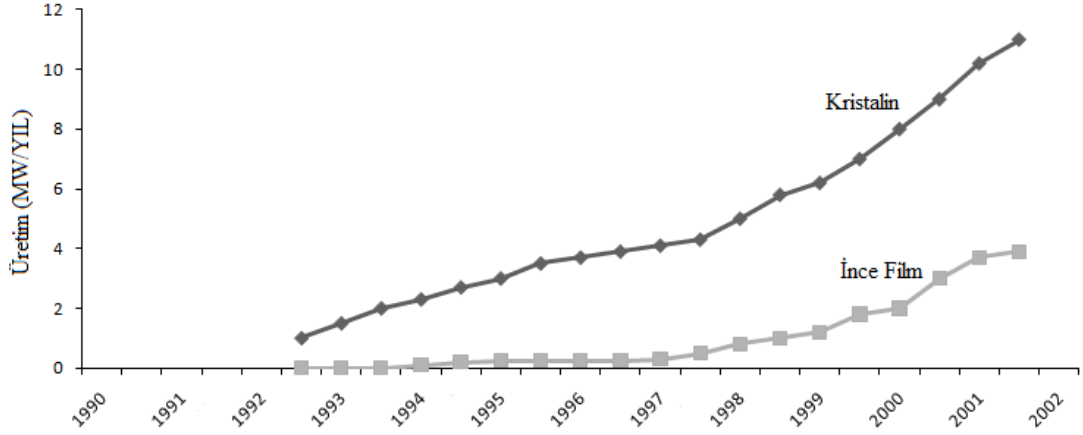
$I_{OR} = T_R$  referans sıcaklığında güneş pili doyum akımı

$R_p$  = Şönt direnç

$R_s$  = Seri direnç (URL-4, 2012; Küpeli, 2005; URL-5, 2005).

### 1.3. Fotovoltaik Güneş Pili Çeşitleri

PV pil üretiminde dünya genelinde kristal-silisyum teknolojisi en çok rağbet gören teknoloji durumundadır. Fakat yapılan çalışmalar ve araştırmalar bu teknolojiye alternatif olacak yeni üretim teknikleri ve materyaller bulma yolunda ilerlemektedir. İnce-Film (Thin-Film) teknolojisinin daha ince tabakalar halinde olması ve kullanım alanlarının daha çeşitli olması gibi etkiler bu konuda yapılan araştırmaları artırmaktadır. Ayrıca maliyeti düşürmek için organik güneş pili teknolojilerine yönelik olan çalışmalar hızlanmıştır (Koç vd., 2007). Güneş pilleri günümüzde genel olarak, kristal silisyum güneş pilleri (Kristalin) ve ince film güneş pilleri olarak sınıflandırılmaktadır. Dünya üzerinde yakın tarihte güneş pili teknolojisinin izlediği değişim Şekil 1.8.'deki gibidir (Kadırgan, 2007).



Şekil 1.8. Güneş pili teknolojisinin izlediği değişim (Kadırgan, 2007).

### 1.3.1. Kristal Silisyum Güneş Pilleri

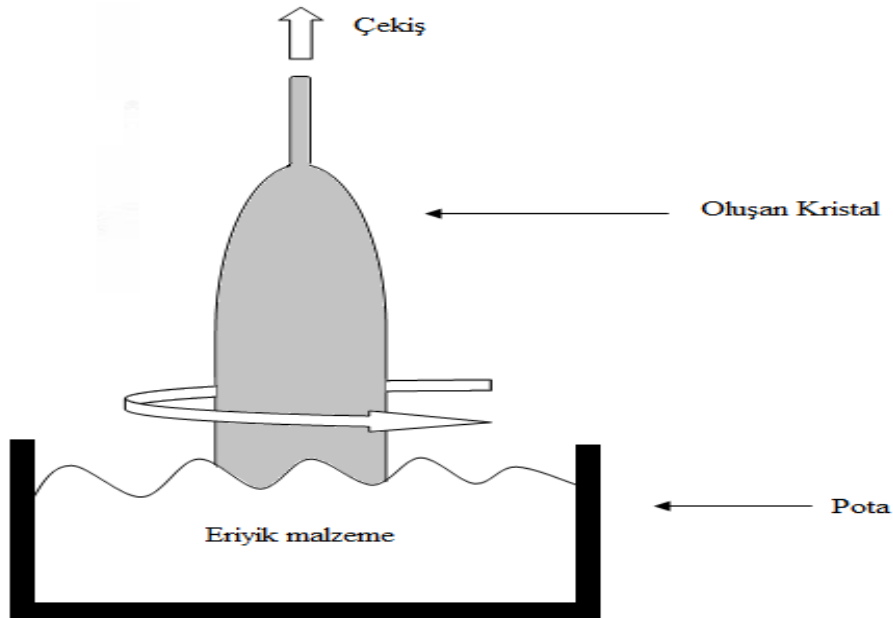
Kristal silisyum (kristal silikon) güneş pilleri güneş pili teknolojisinde daima baskın bir rol oynamıştır. Günümüzde de PV pazarının büyük kısmını elinde tutan kristal silisyum pillerin varlığının diğer teknolojilerin gelişmesiyle yavaş yavaş etkisini kaybedeceği defalarca söylendiyse de, kristal silisyum pillerin en azından önümüzdeki yüzyıla kadar sektördeki liderliğini koruyacağı tahmin edilmektedir (Luque ve Hegedus, 2002). Kristal silisyumun fotovoltaik sektöründe bu kadar baskın olmasının bir nedeni, mikro elektroniğin silisyum teknolojisini oldukça geliştirmiş olmasıdır. Bu birikimden sadece PV dünyası değil, silisyumun kullanıldığı pek çok sektör belli ölçülerde kazanımlar elde etmiştir. Öte yandan mikro elektronik PV teknolojisindeki bazı yenilikler ve gelişmelere de katkı sağlamıştır.

Onlarca yıldır küresel PV pazarında baskın halde yer alan kristal silisyum tipi Czochoralski silikon yapısıdır. Tek kristalli silisyum olarak da adlandırabileceğimiz bu tipin üretim maliyeti oldukça yüksektir. Güneş pillerinin performans, üretim kolaylığı ve dayanıklılığı zaman içinde arttıkça PV pazarı daha da genişlemiş ve yeni alternatifler de ortaya çıkmıştır. 1980'lerde tek kristalli silisyuma alternatif olarak ortaya çıkan yapı da çok kristalli silikon yapısıdır. Bu güneş hücrelerinin maliyeti tek kristallilere göre daha düşükken, kaliteleri ve verimlilikleri de daha az olduğu için iki tip de kendine pazarda belli bir yer edindikten sonra birbirlerini ortadan kaldırmaları söz konusu olmamıştır. Ancak

gelişen teknolojiyle çok kristalli hücrelerin verimlilikleri de artmaya başladığından günümüzde eskiye nazaran piyasada daha etkin bir hale gelmiştir.

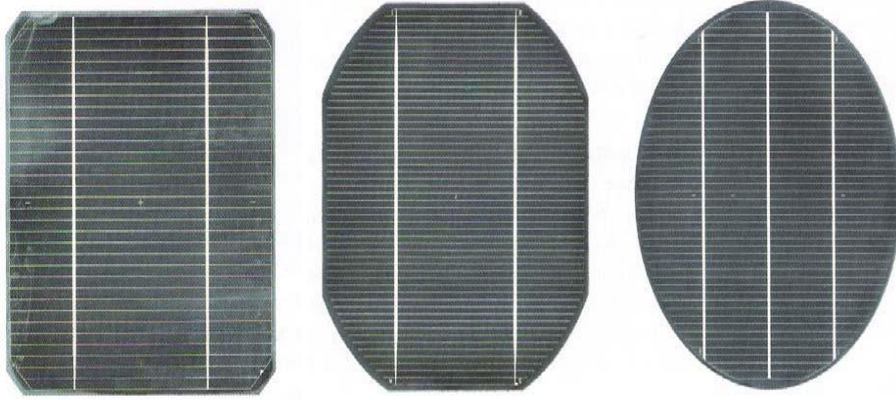
### 1.3.1.1. Tek Kristalli (Monokristal) Silisyum Güneş Pilleri

İlk ticari güneş pilleridir. Yapılarında Czochoralski kristal çekme tekniği ile büyütülen tek kristal yapıli silisyum kullanılmıştır. Fotovoltaik endüstride hala en çok kullanılan yöntemdir. Czochoralski silikon olarak da bilinen tek kristalli silisyumun üretimi için Şekil 1.9'da görülen Czochoralski prosesi uygulanmaktadır. Bu proses sürecince belirli bir yönelimdeki kristal çekirdeği eriyik haldeki silikon banyosuna (erime noktası 1420 °C) daldırılır ve yavaşça döndürülerek banyodan çıkarılır. Bu imalat yöntemiyle 0,3 m çapında ve çeşitli uzunluklarda silindirik tek kristaller elde edilebilir. Silindirik tek kristaller sekizgen çubuklar halinde şekillendirilir ve kesilerek 0,3 mm kalınlığında dilimler (silikon levhalar) elde edilir. Silindirik tek kristallerin şekillendirilmesi ve kesilmesi esnasında silikonun önemli miktarı toz olarak kaybedilir. Verimleri %15 civarındadır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması bu pillerin dezavantajıdır (URL-6, 2011; Koryürek, 2008).



Şekil 1.9. Czochoralski prosesi (Koryürek, 2008).

Üretici firma tasarımına göre büyüme sırasında silisyum n ya da p tipi olarak katkılanır. Yaklaşık 0,5 mm kalınlığında olan silisyum tabakaları elde edildikten sonra, örneğin p-tipi katkılanmış ise üzerine 1nm n-tipi yüzey tabakası oluşturularak eklem diyot oluşturulur. Fotovoltaik pilin tamamlanması, arka yüzeye metal kontak, ön yüzeye uygun metal ağ kontak konulduktan sonra, ön yüzeye bir yansıma önleyici (AR: anti-reflection) kaplanması ile gerçekleşir. Şekil 1.10'da farklı geometrik kesitlere sahip tek kristalli silisyum güneş pilleri ve Şekil 1.11'de tek kristalli güneş pili modülü görülmektedir (Koryürek, 2008).



**Şekil 1.10.** Farklı geometrilere sahip tek kristalli (Monokristal) silisyum güneş pilleri (Koryürek, 2008).



**Şekil 1.11.** Tek kristalli (Monokristal) güneş pili modülü (URL-7, 2011).

### 1.3.1.2. Çok Kristalli (Polikristal) Silisyum Güneş Pilleri

Elektriksel, optik ve yapısal özellikleri tek kristalli pillerle aynıdır. Damarların büyüklükleri kristallerin kalitesi ile doğru orantılıdır. Damarlar arasında süreksizlik, özellikle elektriksel yük taşıyıcıların aktarılmasında önemli ölçüde engelleyici rol oynamaktadır.

Çok kristalli malzemenin elektriksel özelliklerinin, küçülen damar büyüklüğü ile orantılı bozulması; elde edilebilecek verimliliğin tek kristalle karşılaştırıldığında küçük olmasına neden olur. Ancak çok kristalli silisyum üretim teknolojileri daha kolaydır. Maliyeti oldukça düşüktür.

Üretimde en çok kullanılan yöntem dökme yöntemidir. Çok kristalli silisyumda başlangıç malzemesi, tek kristalli silisyumda olduğu gibi hazırlanır. İstenilen saflık derecesi de benzerdir. Erimiş olan yarı iletken kalitesindeki silisyum, kalıplara dökülerek soğumaya bırakılır. Daha sonra elde edilen bloklar kare şeklinde kesilir. Fosforla katkılandıktan sonra arka kontak eklenir. Son olarak da elektriksel kısımlar ön yüze eklenir ve yansıtma önleyici kaplama yapılarak işlem bitirilir. Bu teknoloji ile üretilen malzemelerden elde edilen güneş pillerinin maliyeti düşük verimi azdır. Şekil 1.12’de çok kristalli güneş pili modülü görülmektedir (Öztürk, 2008).



Şekil 1.12. Çok kristalli (Polikristal) güneş pili modülü (URL-7, 2011).



### **1.3.2. İnce Film Güneş Pilleri**

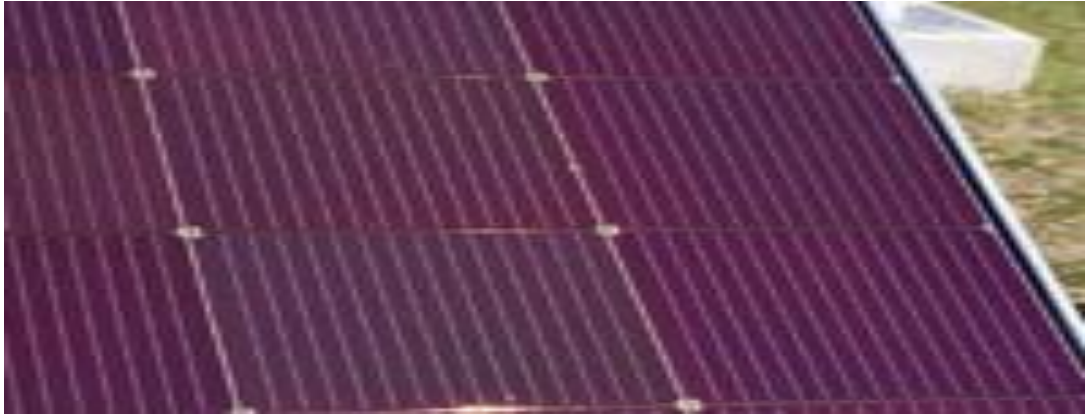
Güneş pillerinde kullanılan malzemenin ve işçiliğın azaltılması, teknolojinin basitleştirilerek maliyetlerinin düşürülmesi yönünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, yarı-iletken malzemenin geniş yüzeyler üzerine ince film şeklinde kaplanması yöntemi çekici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları güneş pilleri üretiminde kullanılabilcek birçok yarı iletken malzemenin düşük maliyetlerde cam, metal ya da plastik folyo gibi tabakalar üzerinde geniş yüzeylere kaplanabileceğini göstermiştir. İnce film fotovoltaiik malzeme genellikle çok kristalli malzemelerdir. Başka bir deyişle ince film yarıiletken malzeme, büyüklükleri bir milimetrenin binde birinden milyonda birine değin değişen damarlardan oluşmaktadır. Yarıiletken malzemenin elektriksel optiksel ve yapısal özellikleri her damar içerisinde fotovoltaiik uygulamalar için çok uygun olsa da, damarlar arası sınırlar da yer alan mikro düzeydeki yapısal kusurlar, çok kristalli malzemede karşılaşılan en önemli problemdir. Optiksel özellikleri uygun seçilen bir yarı iletken malzemede milimetrenin binde biri kadar bir kalınlık içerisinde güneş ışınlarının tümüne yakın bir kısmı soğurulabilir. Dolayısıyla ince film fotovoltaiik malzemede kalınlık, silisyum üzerinde yapılan pillere göre çok daha azdır. Ayrıca ince-film yarı-iletken istenen bir biçimde çok farklı malzeme üzerinde ve geniş yüzeylere kaplanabilir, oysa silisyum piller büyütülen kristalin boyutları ile sınırlıdır. İnce film güneş pilleri arasında üç büyük aday öne çıkmaktadır. Bunlar; amorf silisyum, kadmiyum ve tellür elementlerinden meydana gelen birleşik yarı-iletken kadmiyum tellür ve bakır, indiyum, selenyum elementlerinin bir aralığı olan bakır indiyum diselenid bileşik yarı iletkenidir (URL-8, 2011).

#### **1.3.2.1. Amorf Silisyum Güneş Pilleri**

Soğurma katsayısı çok büyük olan amorf silisyum, 250<sup>0</sup>C dolayındaki sıcaklıklarda geniş yüzeylere düzgün bir şekilde kaplanabilmektedir. Amorf silisyum malzemesini kristalli silisyumdan ayıran özellik, silisyum atomlarının malzeme içindeki düzenlerinin, birinci derece komşu atomların ötesinde gelişigüzel olmasıdır. Malzeme içerisindeki yapı taşlarının bu gelişigüzel dizilişi amorf silisyumun elektriksel iletim kalitesini düşürse de,

uygun yaklaşımlarla yarı iletken içerisine %5-12 oranında hidrojen katılarak elektriksel özellikler fotovoltaik çevirime uygun olan düzeyde tutulabilirler. Amorf silisyum için kullanılan en yaygın teknoloji “ışık boşalım (glow-discharge)”dır. Bu teknikte silane ( $\text{SiH}_4$ ) gazı ve hidrojen karışımı bir çift elektrot arasından geçirilirken elektrotların işaretleri yüksek frekanslarda değiştirilir; bunun sonucu olarak  $\text{SiH}_4$  parçalanarak kararsız  $\text{SiH}_3$  kökçesini (radikalini) oluşturur. İzleyen aşamada, kararsız  $\text{SiH}_3$  elektrotlardan birine giderek bağlanır ve kararlı hale gelir; ardından hidrojen yüzeyden ayrılarak geride silisyumu bırakır; böylece yüzey silisyumla kaplanmış olur. Elektrot üzerinde büyüyen silisyum gazın içerisine bor ya da fosfor katılarak N ya da P tipi yapılabilir.

Amorf silisyum 1980’li yıllarda ince film fotovoltaik alanının en gözde malzemesi olmuştu, 1982’de %10 verimlilik sınırı aşılmış ve 1987’de verimlilikte %12,7’lere kadar çıkmıştır. Son yıllarda bu değer laboratuvarında %15 değerinin üzerine Japon-Amerikan ortaklığı olan Uni-Solar tarafından çıkarılmıştır. Küçük ölçekli güç gerektiren uygulamada (saat pilleri, hesap makinesi vb.) amorf silisyum piller en gözde güç kaynaklarıdır. Yeni gelişimlerde bu piller büyük ölçekli güç gerektiren uygulamalarda da yerini almaktadır. Şekil 1.13’de amorf silisyum güneş pili modülü görülmektedir (URL-6, 2011; URL-8, 2011).



Şekil 1.13. Amorf silisyum güneş pili modülü (URL-7, 2011).

### 1.3.2.2. Kadmiyum Tellür Güneş Pilleri

Periyodik tabloda II. grupta bulunan kadmiyum elementi ile VI. grubunda bulunan tellür elementinin bir araya getirilmesi ile oluşan yarı iletken kadmiyum tellürün oda sıcaklığında yasak enerji aralığı  $E_g=1,5$  eVdir. Bu değer ise güneş spektrumundan

maksimum dönüşüm elde etmek için gerekli olan değere çok yakındır. Hem yüksek ışın soğurma kabiliyeti hem de kolay, düşük masraflı üretim CdTe yarı iletkeninin öne çıkmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda en ideal şartlarda CdTe hücresinden %16,5 verim elde edilmiştir. Bu teknikle yapılan ticari modüllerden ise alınan en iyi verim %11 civarındadır. Fakat kadmiyum elementinin zehirli olması sebebiyle kısıtlamalı ve kontrollü kullanım gibi sorunlar ortaya koymaktadır. Şekil 1.14'te kadmiyum tellür güneş pili modülü görülmektedir (Koç vd., 2007).



Şekil 1.14. Kadmiyum tellür güneş pili modülü (URL-7, 2011).

### 1.3.2.3. Bakır İndiyum Diselenid Güneş Pilleri

İlk bakır indiyum diselenid hücreler 1974 yılında Bell Laboratuvarlarında bir grup tarafından sunuldu. Bakır indiyum diselenid'in fotovoltaiik materyal olarak seçilmesinin sebebi, çok yüksek optik soğurma katsayısı ve hazırlanma maliyetinin düşük olmasıdır (Messenger ve Ventre, 2005).

Bakır indiyum diselenid hücreler, şekilsiz silikon hücrelerde olduğu gibi, ışığa bağlı verim kaybına uğramaz. Bununla beraber, sıcak ve nemli koşullarda kararlılık sorunları

meydana gelir. Bu hücreler şu anda en verimli ince film teknolojisidir. Seri üretimle birlikte, maliyeti kristal silikon hücrelerden çok daha az olmaktadır. Ticari modül verimlilikleri %7,5 ile %9 arasındadır. Yapıları homojendir ve renkleri siyahtır. Şekil 1.15'te bakır indiyum diselenid güneş pili modülü görülmektedir (Şen, 2009).



Şekil 1.15. Bakır İndiyum Diselenid güneş pili modülü (URL-7, 2011).

### 1.3.3. Diğer Yapılar

Bu güne kadar elde edilen en yüksek verime (%24) galyum arsenitten yapılan piller ulaşmıştır. Bu madde ile çeşitli türde piller elde edilebilmekle birlikte, pahalı olduğu için fazla tercih edilmemekte ve daha çok uzay araştırmalarında kullanılmaktadır. Güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünden yararlanabilmesi amacı ile denenen diğer bir yöntem ise, birden fazla ince film yapısının üst üste konmasıyla elde edilen çok eklemlili film yapılarıdır. Bunların dışında, güneş ışınımının yüksek verimli pillerin üzerine optik olarak yoğunlaştırılan sistemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu tür sistemlerde

güneşin hareketini izleyen düzeneklerin yanı sıra, güneş ışığını kıran (mercek) ya da yansıtıcı (ayna) eleman kullanılır (Karamanav, 2007).

#### 1.4. Güneş Pillerinde Verim

Bir güneş pilinin verimi, onun kalitesinin göstergesi olarak çok önemlidir. Yani bir güneş pilinin verimi ne kadar yüksek olursa, pil o derece kaliteli olur (Köse, 1986). Pilin kaliteli olması ise, kullanım alanlarının yaygınlığı ve kullanıcı kitlesinin fazlalığı ile doğru orantılıdır.

Güneş pillerinin çıkış güçleri; diğer dönüşüm sistemleri ile karşılaştırıldığında, daha düşüktür. Yüksek bir çıkış gücü elde edebilmek için güneş pilleri birbirlerine seri ve paralel bağlanarak, güneş pili modülleri ve panelleri ile güneş pili sistemleri kurulmaktadır. Bunun dışında bilim adamları; güneş pillerinin verimini arttırmak amacıyla yaptıkları çalışmalarla, güneş pili teknolojisindeki gelişmelere her geçen gün bir yenisini eklemektedirler.

Bir güneş pilinden sağlanan maksimum gücün, pil üzerine gelen maksimum güce oranına güneş pilinin verimi denir ve  $\eta$  simgesi ile gösterilir (Çabuk, 1992). Güneş pilinin maksimum güç çıkışı  $P_m$  ve optik giriş gücü (atmosfer dışında birim alana düşen güneş enerjisi şiddetidir)  $P_{in}$  olmak üzere güneş pillerinin verimi;

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (1.10)$$

bağıntısı ile elde edilir (Demirci, 1996).

Fotovoltaik güneş pillerinin verimlerinin özetlendiği çizelgelerin geçerlilik süreleri, sürekli gelişimlerine bağlı olarak oldukça kısa olmaktadır (Oktik, 2001). Ancak karşılaştırmalı bir kaynak olması amacıyla bugüne kadar yapılmış bazı yüksek verimli güneş pillerinin verimleri ile yapıları Tablo 1.3'te verilmiştir.

**Tablo 1.3.** Bazı güneş pillerinin verimleri.(ap):aktif alan; (t):toplam alan; (da):seçilmiş aydınlatma alanı; JQA: Japan Quality Assurance; NREL: National Renewable Laboratory (Tercan, 2000).

PİLLER	$\eta$ (%)	Alan <sup>a</sup> (cm <sup>2</sup> )	V <sub>ad</sub> (V)	J <sub>kd</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Test Merkezi <sup>b</sup> (ve Tarih)	Açıklama
Si (kristal)	24.4 ±0.5	4.00 (da)	0.696	42.0	83.6	Sandia (2.98)	UNSW PERL
Si (çoklukristal)	19.8 ±0.5	1.09 (a.p)	0.654	38.1	79.5	Sandia (2.98)	UNSW Eurosolare
GaAs (kristal)	25.1 ±0.8	3.91 (t)	1.022	28.2	87.1	NREL (3.97)	Kopin, GaAs Pencere
GaAs (incefilm)	23.3	4.00 (ap)	1.01127.6	27.6	83.8	NREL (4.90)	Kopin, 5 mm CLEFT
GaAs (çoklu kristal)	18.2 ±0.5	4.011 (t)	0.994	23.0	79.7	NREL (11.95)	RTI, Ge Altaş
InP (Kristal)	21.9 ±0.5	4.02 (t)	0.878	29.3	85.4	NREL (4.90)	Spire, Epitaksiyel
CdTe (polikristal ince film)	16.0 ±0.2	1.0 (ap)	0.840	26.1	73.1	JQA (3.97)	Matsushita 3.5 mm CSS
a-Si <sup>c</sup>	12.7 ±0.4	1.0 (da)	0.887	19.4	74.1	JQA (4.92)	Sanyo
GaIn/PGaAs (çok katlı)	30.3	4.0 (t)	2.448	14.22	85.6	JQA (4.96)	Japan Energy (monolithe)
GaAs/CIS (ince film)	25.8 ±1.3	4.00	-	-	-	NREL (11.89)	Kopin/Boing (4 terminal)

Güneş pillerinin verimini belirleyen üç parametre vardır: Bunlar açık devre voltajı (V<sub>ad</sub>), kısa devre akımı (I<sub>kd</sub>) ve fill faktörüdür (FF). Fill faktörüne doluluk faktörü de denir (Çabuk, 1992, Köse, 1986). Radyasyon kaybı katsayısı, uzay uygulamaları için geçerli olan dördüncü bir parametredir (Köse, 1986). Bu parametrelere sırasıyla değinelim.

1. Açık Devre Voltajı (V<sub>ad</sub>): Pilden geçen akımın sıfır olması durumunda, pil uçlarından ölçülen gerilime denir (Çabuk, 1992). Pilin dış devresine bağlanmış yük direncinin (R<sub>L</sub>), devre direncinden çok daha büyük olduğu durumdaki gerilimdir. Yük direncinin büyük olmasından dolayı, devreden herhangi bir akım geçmez (Köse, 1986). V<sub>ad</sub> veya V<sub>oc</sub> ifadeleriyle gösterilir.

2. Kısa Devre Akımı ( $I_{kd}$ ): Güneş pilinin uçları arasına uygulanan gerilim sıfır olduğunda, aydınlatma altında pilden geçen akımdır. Seri direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda; ışıkla oluşan akıma eşit olup, ışıma şiddetine bağlıdır (Çabuk, 1992). Bu akım devre direncinin, pilin dış devresine bağlanmış yük direncinden ( $R_L$ ) büyük olduğu zaman, yük direncinden geçen akımdır (Köse, 1986).  $I_{kd}$  veya  $I_{sc}$  ifadeleriyle gösterilir.

3. Fill Faktörü (FF): Bir güneş pilinin maksimum çıkış gücünü, açık devre voltajı ve kısa devre akımına bağlı olarak tanımlamak için kullanılan bir parametredir. Fill faktörüne doluluk faktörü de denir ve FF ifadesiyle gösterilir (Çabuk, 1992). Güneş pilinin iç seri direncinden kaynaklanan bir niceliktir. Seri direnç arttıkça fill faktörü azalır (Köse, 1986). Fill faktörü; pilin maksimum çıkış gücünün, açık devre voltajı ile kısa devre akımı çarpımına oranına eşittir (Çabuk, 1992; Köse, 1986).

Buna göre fill faktörü,

$$FF = \frac{P_m}{V_{ad} \cdot I_{kd}} \quad (1.11)$$

bağıntısı ile tanımlanır. FF açık devre voltajının fonksiyonu olarak,

$$FF = \frac{V_{ad}^{ad1} - \ln(V_{ad}^{ad1} + 0,72)}{V_{ad}^{ad1} + 1} \quad (1.12)$$

bağıntısı ile verilir. Burada,

$$V_{ad}^{ad1} = \frac{V_{ad}}{(kT/q)} \quad (1.13)$$

bağıntısı ile tanımlanır.

Bu bağıntıdaki  $kT/q$  ifadesi termal gerilimdir ve oda sıcaklığında değeri 0.02559 V 'dur (Çabuk, 1992). Fill faktörünün değeri, güneş pilinin ideallığının bir ölçüsüdür. İdeal bir güneş pilinde fill faktörü 1 'e eşittir. Bu yüzden herhangi bir güneş pilinde fill faktörünün 1'e yakın olması istenir. Fill faktörünün yüksek olması, güneş pilinin veriminin yüksek olduğunu gösterir. Fill faktörünün büyük olması için seri direncin ( $R_s$ ), diyodun ideal olma faktörünün ( $n$ ), ters doyum akım yoğunluğunun ( $I_0$ ) ve sıcaklığın ( $T$ ) küçük; yasak enerji aralığının ( $E_g$ ) ve şönt direncinin ( $R_p$ ) büyük olması gerekir (Köse, 1986).

Bir güneş pilinin açık devre voltajı ( $V_{ad}$ ), kısa devre akımı ( $I_{kd}$ ), fill faktörü (FF) ve pil üzerine gelen ışıma şiddeti ( $P_{in}$ ) bilindiğinde, güneş pilinin verimi;

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} \quad (1.14)$$

veya

$$\eta = \frac{(V_{ad} \cdot I_{kd}) \cdot FF}{P_{in}} \times 100(\%) \quad (1.15)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

Güneş pillerinin verim ölçümlerinde kabul edilen referans pil yöntemidir. Hava geçirmez şekilde hazırlanan referans pil, test pili ile aynı malzemeden yapılmalı ve aynı spektral tepkiyi vermelidir. Standart test koşullarının sağlanması için pil sıcaklığı  $28 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ve piller üzerine gelen ışımaya şiddeti  $100\text{W/m}^2$  olmalıdır.

Bir güneş pilinin verim ölçümü yapılırken, uygun şartlar altında akım ve gerilim değerleri kaydedilir. Bu değerler kullanılarak güneş piline ait karakteristik akım gerilim eğrisi çizilir. Elde edilen I-V eğrisinden güneş pilinin verimini etkileyen parametreler bulunarak verim hesabı yapılır (Çabuk, 1992).

Bir güneş piline ait I-V karakteristiği elde edilirken üç ayrı yöntem kullanılabılır.

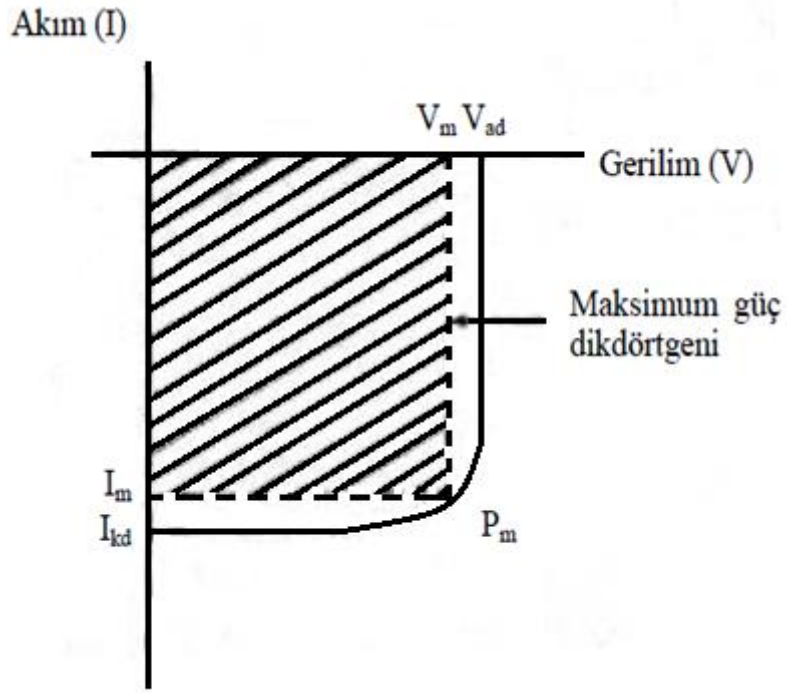
1) Sabit bir ışık şiddeti altında, değişken bir direncin açık devre ve kısa devre durumları arasında değiştirilerek, pilin uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akımın ölçülmesi ile,

2) Güneş pilinin karanlıkta, bir dış DC besleme kaynağı yardımı ile diyot gibi çalıştırılması ile,

3) Şiddeti değiştirilebilen bir ışık kaynağının aydınlatılması altında  $V_{ad}$  ve  $I_{kd}$  değerlerinin ölçülmesi ile elde edilebilir.

Pilden elde edilecek maksimum çıkış gücü, şekilde görüldüğü gibi pilin I-V eğrisi içine çizilebilecek maksimum alanlı dikdörtgenin alanına eşittir. Güneş pillerinin I-V eğrisi şekil 1.16'da verilmiştir (Köse, 1986; Tercan, 2000).





Şekil 1.16. Güneş pillerinin I-V eğrisi (Köse, 1986).

#### 1.4.1. Güneş Pillerinin Verimini Etkileyen Faktörler

Yarı iletken güneş pillerinin verimini etkileyen faktörler vardır. Bu faktörler şu şekilde sıralanır:

- Tam olmayan soğurma(Spektral faktörler)
  - Foton enerjisinin tamamının elektron hol çiftinin oluşturulmasında kullanılmaması
  - Eğri etkeni
  - Sıcaklığın Etkisi
  - Güneş Pili Yüzeyindeki Yansıma ve Kirlenme kayıpları
  - Güneş pilinin iç seri direncinden ileri gelen kayıplar
  - Toplama kayıpları
  - Güneş pilinin kalınlığı
- şeklindedir.

#### **1.4.1.1. Tam Olmayan Soğurma**

Fotovoltaik güneş pilleri yasak enerji aralığına karşılık gelen dalga boylarına sahip olan ışınları soğururlar. Yasak enerji aralığından daha küçük enerjili ışınları soğuramazlar. Soğurma kaybı, yasak enerji aralığında oluşturulacak tuzak seviyeleri ve farklı yasak enerji aralıklı materyallerden çoklu tabakaların oluşturulmasıyla azaltılabilir.

#### **1.4.1.2. Foton Enerjisinin Tamamının Elektron Hol Çiftinin Oluşturulmasında Kullanılmaması**

Yarı iletken güneş pili tarafından yutulmuş fotonların büyük bir kısmı elektron-hol çiftinin oluşması için gerekli olan enerjiden daha büyük enerjiye sahiptirler. Fotonların fazla enerjileri ısıya dönüşür. Bundan dolayı enerji kaybı meydana gelir. Bunu gidermeye yönelik olarak fotonların fazla enerjilerinden elde edilen ve verimliliği düşüren atık ısının modülün alt kısmında bırakılan boşluktaki havaya ya da borulardan geçen suya aktarılmasıyla sıcak su elde edilmesinde, mekan ısıtılmasında kullanılabilen yeni tür modüller geliştirilmiştir.

#### **1.4.1.3. Eğri Etkeni**

Güneş pillerinin ürettiği akım yüzeyine gelen güneş ışınımı şiddetine ve yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişir. Bir güneş pilinin yüzeyine gelen ışınım şiddeti arttığında pil akımı ve gücü doğrusal olarak artar. Güneş pilinin yüzey sıcaklığı arttığında ise pil akımı az miktarda artar gerilimi ise büyük ölçüde düşer.

Bir güneş pilinin verimini etkileyen en önemli özelliklerden biri Fill faktörüdür. Eğri etkeni de denilen bu faktör, maksimum güç noktasına karşılık gelen, maksimum akım ve maksimum gerilim değerleri çarpımının, açık devre gerilimi ve kısa devre akım değerlerinin çarpımına oranı şeklindedir. Fill faktörünün alabileceği en büyük değer 1'dir. Genel olarak 0,6-0,8 değerlerine yakın olur.

Eğri etkeni uygun yasak enerji aralıklı materyallerin seçimiyle ve uygun katkılama seviyeleri ile azaltılabilir. Açık devre ve kısa devre şartları altında çalıştırılan bir güneş pilinin çıkışından herhangi bir güç alınmaz (Demirtaş, 2008).

#### 1.4.1.4. Sıcaklığın Etkisi

Fotovoltaik piller bilinenin aksine yüksek sıcaklıktan ziyade çok düşük sıcaklıklarda yeterli güneş ışınımı aldıkları konumlarda daha verimli çalışırlar. Fotonların elektrona dönüşümü esnasında düşük sıcaklıklarda bu dönüşümlerde kararlılık vardır (URL-9, 2012).

Güneş pillerinin kısa devre akımı sıcaklığın düzgün bir şekilde artmasıyla az miktarda yükselme eğilimi gösterir. Yarı iletken enerji bant aralıkları ise genellikle sıcaklıkla azaldığından açık devre voltajı ve dolum faktörü azalır. Yani sonuçta elde edilen güç daha düşük değerlerde olur. Enerji bant aralığı oda sıcaklığında lineer olarak değişim gösterirken düşük sıcaklıklarda ise doğrusal olmayan bir değişim gösterir. Bazı yarı iletkenlerin enerji bant aralıklarının sıcaklık karşısındaki değişimi Tablo 1.4.' de verilmiştir (URL-10, 2012).

**Tablo 1.4.** Bazı yarı iletkenlerin enerji bant aralığının sıcaklıkla değişimi (URL-10, 2012).

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

#### 1.4.1.5. Güneş Pili Yüzeyindeki Yansıma ve Kirlenme Kayıpları

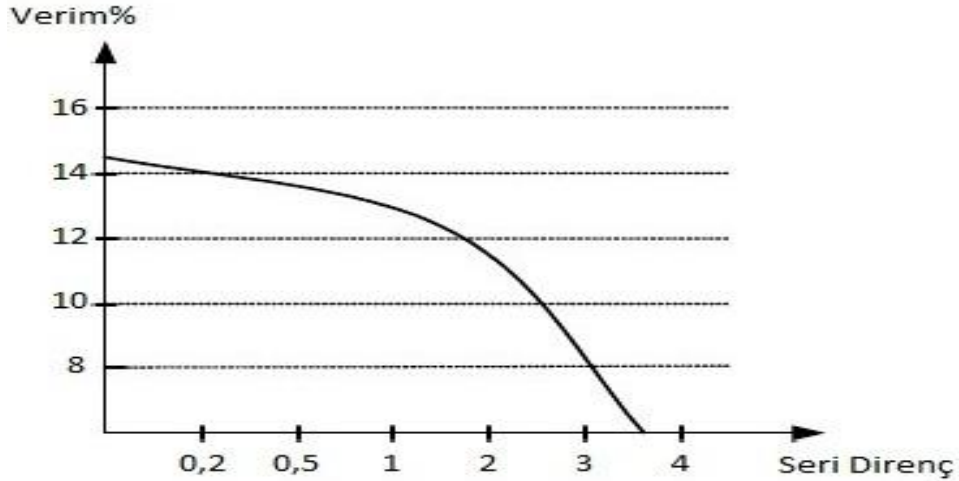
Güneş pilleri üzerlerine gelen ışınımın bir kısmını yansıtırlar ve bu durum güneş pilinin çıkış gücünü olumsuz yönde etkiler. Bunu önlemek için anti yansıtıcı maddeler

kullanılır. Anti yansıtıcı maddeler saydam maddeler olup, buharlaştırma, kimyasal çöktürme ve oksitleme yolu ile güneş pilinin ön yüzeyine kaplanır. Aynı zamanda bu tabaka güneş pilinin yüzeyini çeşitli dış etkilerden de korur. Yansıma kayıpları materyalden materyale göre değişmektedir. Silisyum için yansıma katsayısı oldukça düşüktür.

Ayrıca güneş pillerinin oluşturduğu modüllerin yüzeyindeki kirlenmeler de modül verimliliğini azaltmaktadır. Yapılan araştırmalar, kirlenme durumunda PV performansının % 3,5 oranında düştüğünü göstermiştir. Bu nedenle kirlenmeyi önlemek ve yağmur sularının kolayca akabilmesini sağlamak için modül eğim açısı  $>20^0$  olmalıdır.

#### 1.4.1.6. Güneş Pilinin İç Seri Direncinden İleri Gelen Kayıplar

Seri direnç, farklı tabakalardan geçen akımdan kaynaklanan bir dağılım olduğu kabul edilmektedir. İç seri dirençten dolayı akım gerilim karakteristik eğrisinde sapma meydana gelir. Seri dirençten ileri gelen kayıplar pil teknolojisinin gelişmesiyle giderilebilir. Şekil 1.17’de bir fotovoltaik pilin veriminin seri dirençle değişimi görülmektedir.



Şekil 1.17. Bir fotovoltaik pilin veriminin seri dirençle değişimi (URL-10, 2012).

#### **1.4.1.7. Toplama Kayıpları**

Güneş pilinde ışınların etkisiyle oluşan elektron-hol çiftleri eğer P-N eklem bölgesinden uzakta olmuşlarsa, tekrar birleşmeden dolayı yok olurlar ve bu durum toplama veriminin azalmasına neden olur. Toplama verimi küçük dalga boyları için P tabakasında, büyük dalga boyları için N tabakasında daha fazladır.

#### **1.4.1.8. Güneş Pilinin Kalınlığı**

Güneş pilinin kalınlığı da verim açısından önemlidir. Pil kalınlığı azaldığı zaman geçirilmiş ışınlardan dolayı kayıp artar. Fotovoltaik pilin verimi azalır. Yaygın olarak kullanılan silisyum fotovoltaik pillerin kalınlığı 0,2-0,4 mm arasındadır (Demirtaş, 2008).

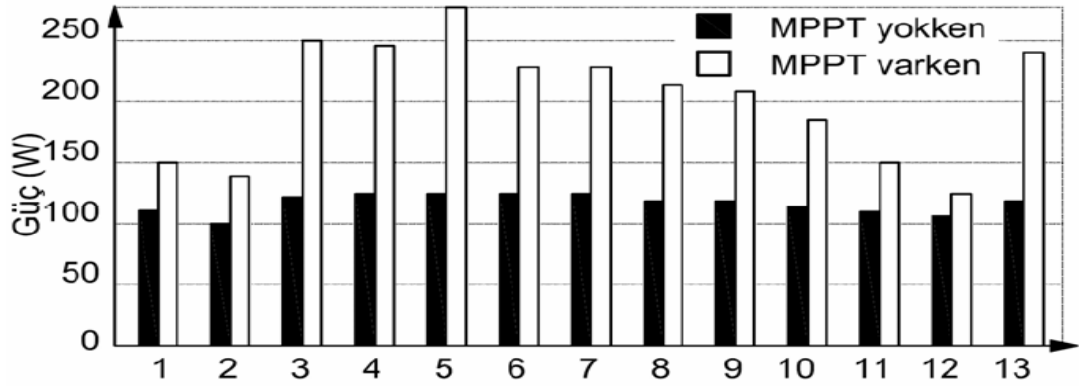
### **1.4.2. Güneş Pillerinin Verimini Artırmak İçin Kullanılan Yöntemler**

#### **1.4.2.1. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)**

Pratik uygulamalarda kullanılan güneş pili (PV) sistemlerini; sistemde kullanılan bileşenlerin ve kontrol sisteminin konumuna bağlı olarak üç farklı kombinasyonda incelemek mümkündür; sistem yükünün hiçbir ara düzenleyici olmadan direkt PV panellerine bağlandığı direkt akuplajlı kombinasyonlar, sistem yükü ile PV paneller arasında bataryaların yerleştirildiği bataryalı kombinasyonlar ve maksimum çalışma noktası izleyicili (MPPT'LI) kombinasyonlar (Fıratoğlu ve Yeşilata, 2003).

Söz konusu olan maksimum güç noktası takip sistemleri (MPPT), PV panel çıkışına bağlanan güç dönüştürücüsünün (invertörün) denetim yapısıdır. PV panel verimleri güneşin verebileceği enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürülebilme oranları ile ifade edilirler. Bu değer pil kalitesine ve yapısına bağlı olarak %16-21 arasındadır. Fakat pillerin karakteristik özelliğinden dolayı akım gerilim oranı dengelenmediğinde bu verim oranı düşmektedir. Dolayısı ile kısıtlı enerjiyi etkili bir şekilde aktarmak günümüz araştırmacılarının ilgi odağı olmuştur. MPPT denetim tekniği PV panelleri verimlerinde kullanılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem pilin verdiği enerjinin en yüksek olduğu

noktayı yakalayan bir denetim yapısıdır. Bu nokta ışınma, sıcaklık, PV panel eğimi, PV panel yaşlanması gibi değişkenlerle değişir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için denetim mekanizması denetim tekniğine bağlı olarak PV panel değişkenlerini değerlendirip güç dönüştürücüsünün referansını gücün en yüksek olduğu noktaya ulaşmayı sağlayacak şekilde değiştirir. MPPT işlemi sayesinde elde edilen enerji kontrolsüz olarak alınan enerjiye oranla %45'ler civarında artırılabilir (Özdemir, 2007).



Şekil 1.18. MPPT ve MPPT olmadan üretilen enerjilerin karşılaştırması (Özdemir, 2007).

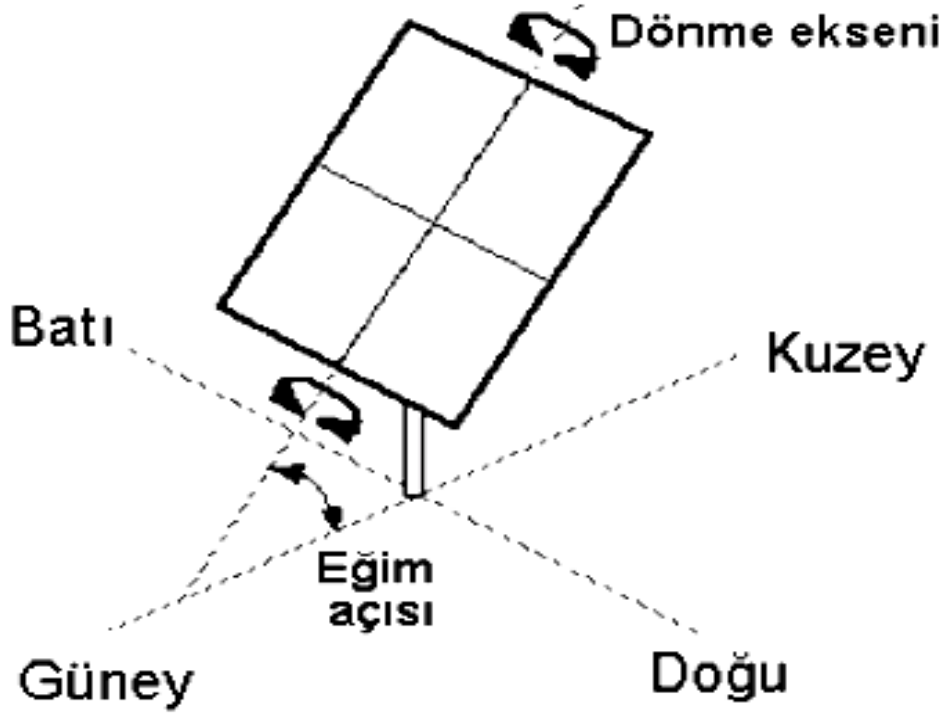
#### 1.4.2.2. Güneş Takip Sistemleri

Güneş panellerinin verimine etki eden etkenlerin başında gün içerisindeki güneşlenme süresi gelmektedir. Güneşlenmenin günün her saatinde en yüksek seviyede tutulması verimi oldukça yükseltmektedir. Güneşlenmeyi en yüksek seviyede tutabilmek için güneş takip sistemleri kullanılmaktadır. Güneş takip sistemleri hareket şekline göre tek eksenli ve iki eksenli olarak sınıflandırılırlar.

##### 1.4.2.2.1. Tek Eksenli Takip Sistemleri

Bu sistemlerde panel sadece tek eksenle hareket etmektedir. Sistem verimliliğini yaklaşık %20-25 oranlarında arttırmak mümkündür. Tek eksenli sistemlerde genelde eksen kuzey-güney hattı üzerinde olup panel doğu-batı doğrultusunda hareket edebilir. Bundan farklı olarak panel doğu-batı hattına yerleştirilir ve hareketi kuzey-güney ekseninde

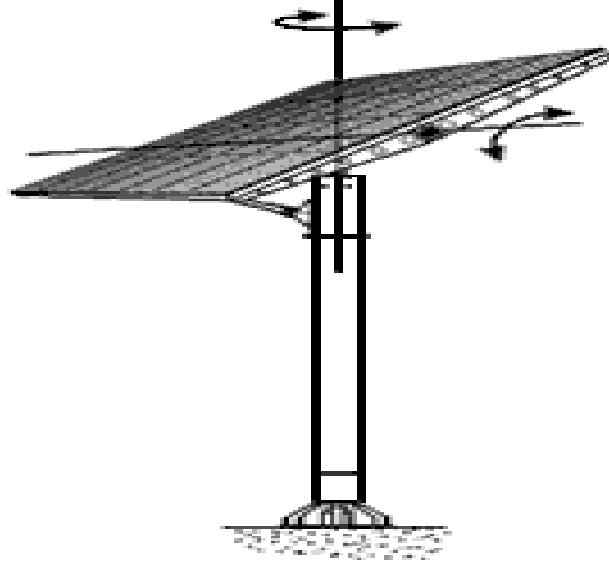
yapabilir. Ayrıca belirli bir eğim açısı ile hareket eden sistemlerde mevcuttur (URL-11, 2012).



Şekil 1.19. Tek eksenli güneş takip sisteminin konumlandırılması (Nakir, 2007).

#### 1.4.2.2.2. İki Eksenli Takip Sistemleri

İki eksenli sistemlerde güneş'in gökyüzündeki konumunu belirten iki açı değeri ile takip gerçekleştirilir. Hem güney-kuzey hem de doğu-batı yönlerinde takip yapan bu sistemlerin verimi tek eksenlilere göre daha fazladır. İki eksenli kontrol sistemi ile panel verimliliği %40-50 oranlarında iyileştirilebilir. Paneller iki eksen de mekanik olarak hareket eder. Kullanılan mekanik sistemlerin kontrolleri bilgisayar ve mikro denetleyiciler ile yapılır. Bu yöntemlerin dışında sensörler ve pozisyon algılayıcılar yardımı ile de mekanik birim yönlendirilebilir.



**Şekil 1.20.** İki eksenli güneş takip sisteminin dönebilir şekilde konumlandırılması (Nakir, 2007).

Bu takip sisteminde eksenlerden biri azimuth eksenidir, diğeri ise zenith ekseninde hareket etmektedir. Azimuth eksenini panelin doğu-batı hattındaki hareketinin, zenith eksenini ise panelin yüksekliğinin ayarlandığı eksenlerdir (URL-11, 2012).

### **1.5. Fotovoltaik Güneş Pili Sistem Türleri**

Fotovoltaik üreteçler (güneş pilleri) aracılığı ile ışık ışınlarından ürettiği elektrik enerjisini, gerektiğinde depolayarak, kullanım alanlarına güvenilir biçimde aktaran öge ve sistemlerin bütünü olarak tanımlanan fotovoltaik (PV) sistemler temel olarak; Enerji üretiminin gerçekleştiği solar diziler, üretilen enerjinin kullanıldığı alanlar (yük) ve bu iki sistemi birbirine bağlayan, yani üretilen enerjinin yüke aktarılmasını sağlayan aygıtların oluşturduğu (denge) alt sistemlerinden oluşur.

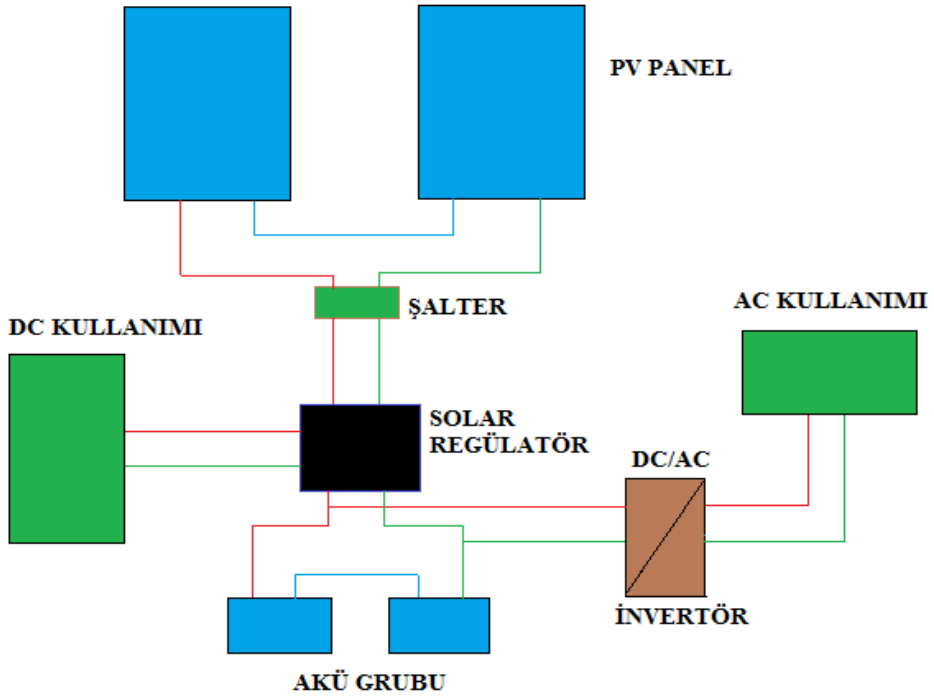
Enerji gereksiniminin özelliklerine, ekonomiye ve şebeke koşullarına bağlı olarak PV sistemler; yükün karşılanmasında yalnızca PV üreteçlerin ve saklama ünitelerinin kullanıldığı; şebekeden bağımsız PV sistemler, PV sistemle genel şebekenin ortaklaşa çalıştığı; şebeke bağlantılı PV sistemler ve geleneksel elektrik üretim donanımlarıyla PV sistemlerin bir arada bulunduğu; Karma (Hibrit) sistemler biçiminde yapılandırılmaktadır (Sakinç ve Sözen, 2008).



### 1.5.1. Şebekeden Bağımsız PV Sistemler

Şebekeden bağımsız PV sistemler yerleşim birimlerinden uzakta olan ve şehir elektrik şebekesinin ulaşmadığı bölgelerde sadece güneş enerjisi ile beslenen sistemlerdir. Genelde bu bölgelere elektrik şebekesinin getirilmesi fotovoltaiik sistemin kurulum maliyetinden daha yüksek olduğundan bu sistemlere olan rağbet fazladır (URL-12, 2011).

Şebekeden bağımsız PV sistemler genellikle stand-alone veya off-grid sistemler olarak adlandırılırlar. Elektrik şebekesi hattına bağlı olmayan bu sistemlerde ihtiyaç duyulan elektriğin tamamı fotovoltaiik sistemden sağlanır. Şebekeden bağımsız PV sistemlerin önemli ünitelerinden biri güneş ışınımının yetersiz kaldığı zamanlarda (veya güneş ışınımının hiç olmadığı gece saatlerinde) ihtiyaç duyulan elektriği sağlayan batarya sistemidir. Batarya sisteminin elemanları akülerdir. Batarya sisteminin kapasitesinin belirlenmesi fotovoltaiik üreticinin toplam gücüne ve sistemin kurulduğu yerin ortalama güneş ışınımı miktarına bağlıdır (Koryürek, 2008). Bu sistemlerde üretilen akım doğru akım (DA) olduğu için, doğru akımla (DA) çalışan yükleri besleyebildiği gibi, bir invertör (evirici) yardımıyla doğru akım alternatif akıma dönüştürülerek alternatif akımla çalışan yükler de beslenebilir (Öztürk ve Dursun, 2011).



Şekil 1.21. DC ve AC kullanıcıli şebekeden bağımsız sistem blok diyagramı (Öztürk ve Dursun, 2011).

Şekil 1.21.'de DC ve AC kullanıcıları şebekeden bağımsız bir sistemin blok diyagramı görülmektedir. Güneş pili sistemlerinin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı tipik uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

- Haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri
- Petrol boru hatlarının katodik koruması
- Metal yapıların (köprüler, kuleler vb) korozyondan koruması
- Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler, hava gözlem istasyonları
- Bina içi ya da dışı aydınlatma
- Dağevleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde TV, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması
- Tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompası
- Orman gözetleme kuleleri
- Deniz fenerleri
- İlk yardım, alarm ve güvenlik sistemleri
- Deprem ve hava gözlem istasyonları
- İlaç ve aşı soğutma (URL-13, 2011).

### **1.5.2. Şebeke Bağlantılı PV Sistemler**

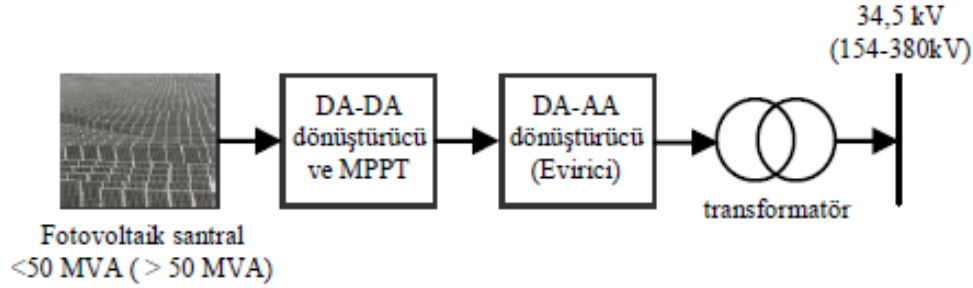
Şebeke bağlantılı PV güç sistemleri iki şekilde tasarlanabilmektedir. Bu sistemlerde;

1. Üretilen doğru akım (DA), evirici vasıtasıyla alternatif akıma (AA) dönüştürülerek doğrudan şebekeyi besler. Yani bir nevi elektrik üretim santrali olarak kullanılır.

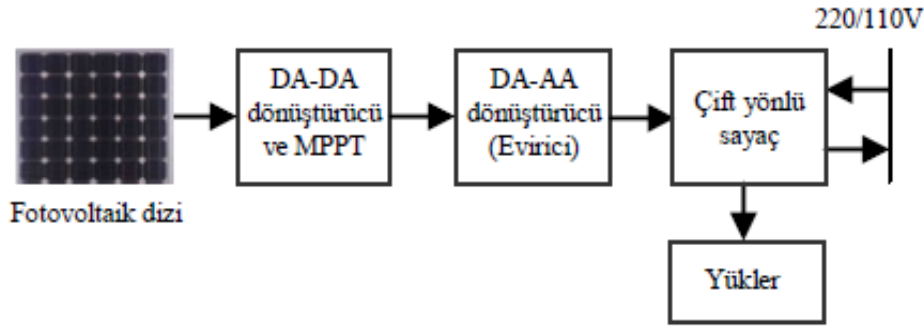
2. Eviriciden sonra çift yönlü sayaç kullanılarak hem çeşitli yükler beslenebilir hem de üretilen fakat kullanılmayan fazla enerji şebekeye verilebilir.

Elektrik üretim santrali olarak kullanılan, sadece şebekeyi besleyen sistemlerde, bağlantı noktası sistemin kurulu gücüne göre değişiklik göstermektedir. Kurulu gücü, 50 MVA'ye kadar olan sistemler 34,5 kV dağıtım hattı gerilim seviyesinden, 50 MVA üzeri olanlar ise 154 kV veya 380 kV iletim hattı gerilim seviyesinden şebekeye bağlanırlar. Bu sistemlerin en önemli avantajı, üretilen enerjinin depolanma ihtiyacının olmamasıdır. Bu

sayede, akü ve şarj kontrol cihazı masrafları ortadan kalkmaktadır. Şekil 1.22.'de elektrik üretim santrali olarak kullanılan, sistemlerin güç akış diyagramı görülmektedir. Şekil 1.23.'de ise, evsel uygulamalarda kullanılan, üretilen enerjinin şebekeye verildiği, harcanan enerjinin şebekeden alındığı sistem görülmektedir (Çalikoğlu vd., 2011).



Şekil 1.22. Şebeke bağlantılı PV santral güç akış diyagramı (Çalikoğlu vd., 2011).



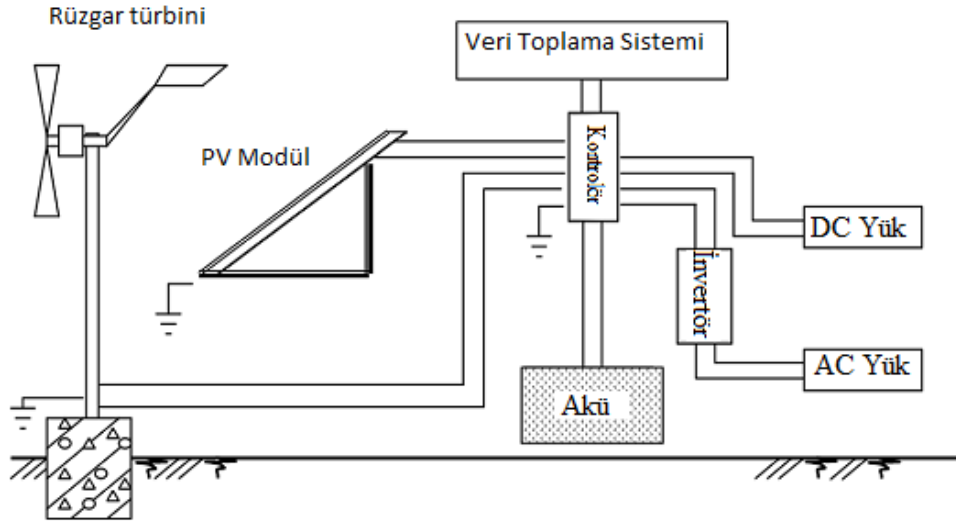
Şekil 1.23. Evsel uygulamalarda kullanılan şebeke bağlantılı PV sistem güç akış diyagramı (Çalikoğlu vd., 2011).

Şebeke bağlantılı bir eviricinin şebekeye aktardığı güç öncelikle yerel yükler tarafından tüketilmektedir. Artan güç ise elektrik şebekesine verilerek daha uzaklarda bulunan yükler tarafından tüketilmektedir. Genellikle 5 kW altındaki güçlerde tek-fazlı şebeke bağlantılı eviriciler, daha yüksek güçlerde ise üç fazlı şebeke bağlantılı eviriciler kullanılmaktadır (Çalikoğlu vd., 2011).

### 1.5.3. Karma (Hibrit) Sistemler

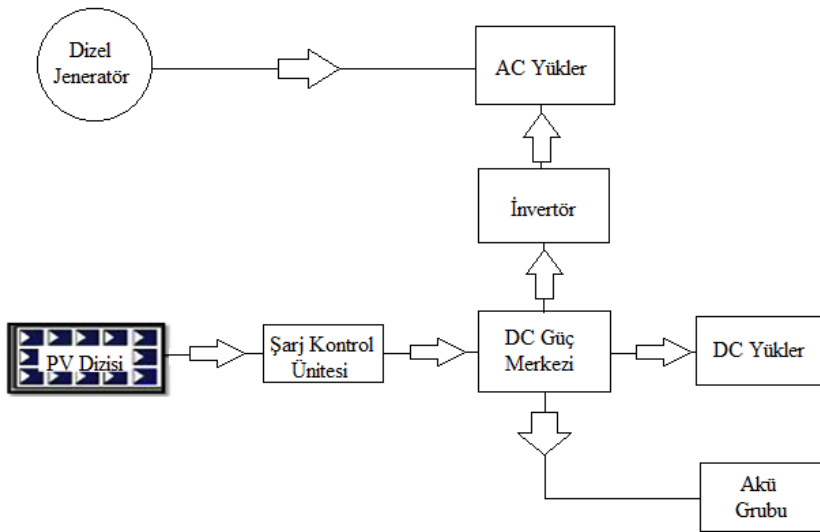
Bu sistemler adından da anlaşılacağı gibi iki ayrı sistemin bir araya gelmesiyle oluşturulmuş sistemlerdir. Kullanılan sistemlerden biri fotovoltaik bir sistem ise diğeri dizel jeneratör veya rüzgar enerjisi gibi değişik yöntemlerle elektrik üreten sistemlerden biri olabilir.

Bu tür sistemlerin en önemli kuruluş amacı elde edilecek elektrik enerjisinde süreklilik sağlayabilmektir. Örneğin hibrit sistem Şekil 1.24'te görüldüğü gibi bir güneş-rüzgar sistemi ise güneşin bol olduğu zamanlarda fotovoltaik sistemden sağlanan enerji, güneş enerjisinin yetersiz kaldığı ve rüzgarın bol olduğu zamanlarda ise rüzgar enerjisinden sağlanan enerji elektrik enerjisinin kullanıldığı sistemi beslemektedir.



Şekil 1.24. Güneş-Rüzgar hibrit sisteminin blok diyagramı (Hongxing vd., 2008).

Diğer bir örnekte ise kurulan hibrit sistem bir güneş-dizel jeneratör olsun. Bu sistemde de yine güneş ışınlarından enerji sağlanabildiği zamanlarda fotovoltaik sistem kullanılır. Fotovoltaik sistemin yetersiz kaldığı durumlarda ise dizel jeneratör elektrik ihtiyacına cevap verir (Koryürek, 2008; Hongxing vd., 2008; Yamegueu vd., 2011).



Şekil 1.25. Güneş-Dizel jeneratör hibrit sisteminin blok diyagramı (Yamegueu vd., 2011).

#### 1.5.4. Güneş Pili Uygulama Örnekleri

Güneş pillerinin en yaygın karşılaşılan kullanımları, aydınlatma birimlerinde, trafik sistemlerinde ve su pompalama sistemlerindeki uygulamaları ile şebeke bağlantılı güneş pili sistemlerindeki uygulamalarıdır.

##### 1.5.4.1. Güneş Pillerinin Aydınlatma Birimlerindeki Uygulamaları

Güneş pillerinin aydınlatma birimlerindeki uygulamalarına örnek olarak; Şekil 1.26'da sokak aydınlatmasındaki kullanımı, Şekil 1.27'de ise bahçe aydınlatmasındaki kullanımı görülmektedir.



Şekil 1.26. Güneş pillerinin sokak aydınlatmasında kullanımı (URL-13, 2011).



Şekil 1.27. Güneş pillerinin bahçe aydınlatmasında kullanımı (URL-13, 2011).

#### 1.5.4.2. Güneş Pillerinin Trafik Sistemlerindeki Uygulamaları

Güneş pillerinin trafik sistemlerindeki kullanımına örnek olarak; Şekil 1.28.'de karayollarındaki kullanımı, Şekil 1.29.'da ise trafik ikaz sistemlerindeki kullanımı yer almaktadır.



Şekil 1.28. Güneş pillerinin karayollarında kullanımı (URL-13, 2011).



**Şekil 1.29.** Güneş pillerinin trafik ikaz sistemlerindeki kullanımı (URL-13, 2011).

### **1.5.4.3. Güneş Pillerinin Su Pompalama Sistemlerindeki Uygulamaları**

Güneş pillerinin su pompalama sistemlerindeki kullanımına örnek Şekil 1.30.'da yer almaktadır.



**Şekil 1.30.** Güneş pillerinin su pompalama sisteminde kullanımı (URL-13, 2011).

#### 1.5.4.4. Şebeke Bağlantılı Güneş Pili Sistemi Uygulamaları

Şebeke bağlantılı güneş pili uygulamalarına örnek olarak; Şekil 1.31.'de şebekeye elektrik veren bir güneş santrali görülmektedir.



Şekil 1.31. Şebekeye elektrik veren bir güneş pili santrali (URL-13, 2011).

Artı enerjili bina adı verilen, çatısı güneş pilleriyle kaplı binalar da, şebeke bağlantılı güneş pili uygulamalarındandır. Bu tür bir bina şekil 1.32.'de yer almaktadır.



Şekil 1.32. Çatısı güneş pilleriyle kaplı artı enerjili bir bina(URL-13, 2011).



### 1.5.5. Güneş Pili Uygulamalarının Türkiye 'deki Durumu

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli göz önüne alındığında; güneş pili sistemleri birçok farklı uygulamalarda çekici bir seçenek olmasına rağmen, ülkemizde yeterince desteklenmemektedir. Bunun sebebi, bu sistemlerin devlet otoritelerine ve toplumumuza geniş ölçüde sağlıklı verilerle tanıtılmamış olmasıdır (Oktik, 2001). Güneş pillerinin Türkiye 'deki kullanımı; ancak elektrik şebekesinin olmadığı, yerleşim merkezlerinden uzak yerlerde ekonomik yönden uygun olmaktadır. Bu nedenle genellikle sinyalizasyon, kırsal elektrik ihtiyacının karşılanması vb. gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ülkemizde halen Telekom istasyonları, Orman Genel Müdürlüğü yangın gözetleme istasyonları, deniz fenerleri ve otoyol aydınlatmasında kullanılan güneş pili kurulu gücü 300 kW civarındadır. Ülkemizde aydınlatma birimi olarak kullanılan güneş pili sistemlerinden iki tanesi Ankara AOÇ Atatürk Evi önünde, iki tanesi Didim Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi'nde, bir tanesi Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) Genel Müdürlük Binası girişinde çalışmaktadır. Ayrıca Didim 'de güneş pilleriyle oluşturulan bir sistem ile çevre aydınlatması yapılmaktadır. EİE Didim Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi 'ne 4.8 kW gücünde şebeke bağlantılı güneş pili sistemi kurulmuştur. Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından, EİE Yenilenebilir Enerji Parkı oluşturulmuştur. Çeşitli alanlarla kullanılan güneş pili sistemleri, sergi amacıyla bu parkta kurulmuştur. Ayrıca Akdeniz'deki Zeytin Adası'nda, bir GSM şebekesinin enerji ihtiyacı güneş pili sistemiyle karşılanmaktadır. Çok hızlı şekilde olmasa bile, ülkemizdeki fotovoltaik uygulamalar gün geçtikçe artmaktadır (URL-13, 2011).

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Deneyde Kullanılan Güneş Modülleri

Deneyde 45'er W. gücünde monokristal ve polikristal olmak üzere iki tip güneş modülü kullanılmıştır. Modüllerin üretici firma tarafından verilen özellikleri Tablo 2.1. ve Tablo 2.2.' de, şekilleri ise Şekil 2.1. ve Şekil 2.2.'de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Monokristal modülün üretici firma tarafından verilen karakteristik değerleri

Peak Power (Pm)	45 Wp.
Peak Current (Im)	2,58 A.
Peak Voltage (Vm)	17,32 V.
Open CircuitVoltage (Voc)	22,56 V.
ShortCircuitCurrent (Isc)	2,76 A.
Weight	4,0 kg
Dimensions	620*540*25mm.
ModuleEfficiency	%11,6



**Şekil 2.1.** Deneyde kullanılan monokristal modül

**Tablo 2.2.** Polikristal modülün üretici firma tarafından verilen karakteristik değerleri

Peak Power (Pm)	45 Wp.
Peak Current (Im)	2,56 A.
Peak Voltage (Vm)	17,34 V.
Open Circuit Voltage (Voc)	22,56 V.
Short Circuit Current (Isc)	2,77 A.
Weight	5,0 kg
Dimensions	665*520*25mm.
Module Efficiency	% 11,1



**Şekil 2.2.** Deneyde kullanılan polikristal modül

### 2.1.2. Deneyde Kullanılan Ölçüm Cihazları

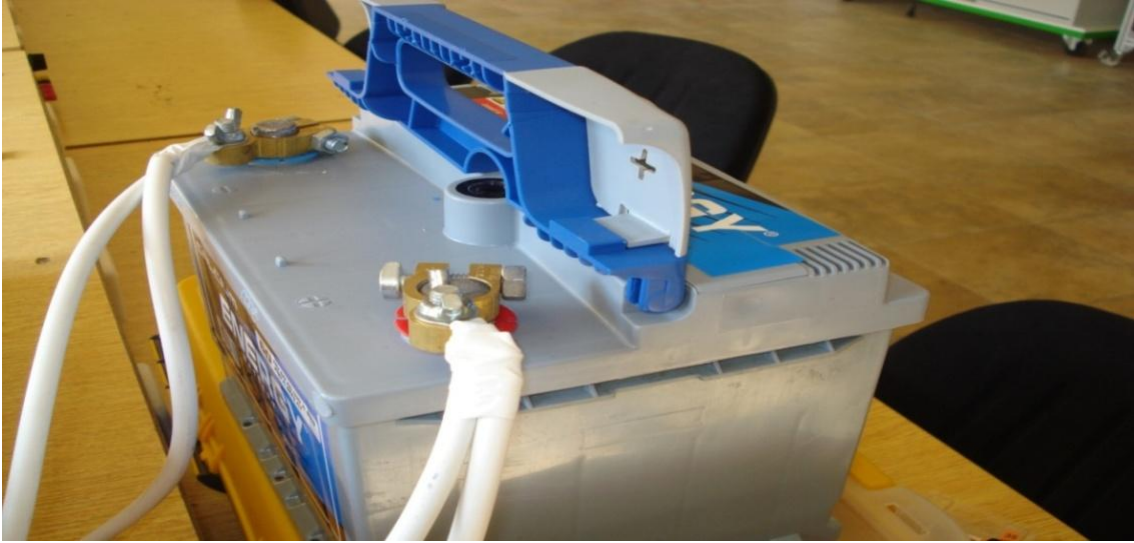


Şekil 2.3. Deneyde kullanılan G.T. Power Rc ölçüm cihazı

Deneyde iki adet 130A. ölçüm kapasitesine sahip, G.T. Power Rc ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz güneş modüllerinden alınan akım, gerilim ve güç değerlerini ölçen elektronik bir cihazdır.

### 2.1.3. Deneyde Kullanılan Depolama Birimi

Deneyde 12V. 60Ah değerlerinde kuru tip akü kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Deneyde kullanılan depolama birimi

#### 2.1.4. Denejde Kullanılan Denetim Birimi



Şekil 2.5. Denejde kullanılan denetim birimi

Denejde Steca marka 12/24 V, 6A şarj denetim birimi kullanılmıştır. Şarj denetim biriminin görevi akünün şarj edilme gerilimini ayarlamaktır. Güneş pilinden alınan gerilim, gelen güneş ışınımına bağlı olarak 0-20 volt arasında sürekli değişim göstermektedir. Ancak akümülatör en fazla 14 V gibi bir gerilimle şarj edilebilir. Daha yüksek bir gerilim akümülatörün hasarına sebep olur. Bunun için şarj regülatörü aküyü maksimum 14 V'a kadar şarj etmektedir. Bu nedenle modül çıkışlarında ölçülen gerilim değerleri bu aralıkta değerler almaktadır. Çalışmada akü ve solar lambalar (yük) denetim birimi üzerinde birleştirilmiştir.

#### 2.1.5. Denejde Kullanılan Solar Aydınlatma Lambaları



Şekil 2.6. Denejde kullanılan solar aydınlatma lambası.

Çalışmada 2 adet DC, 11W, 12Vdeğerinde solar lamba kullanılmıştır.

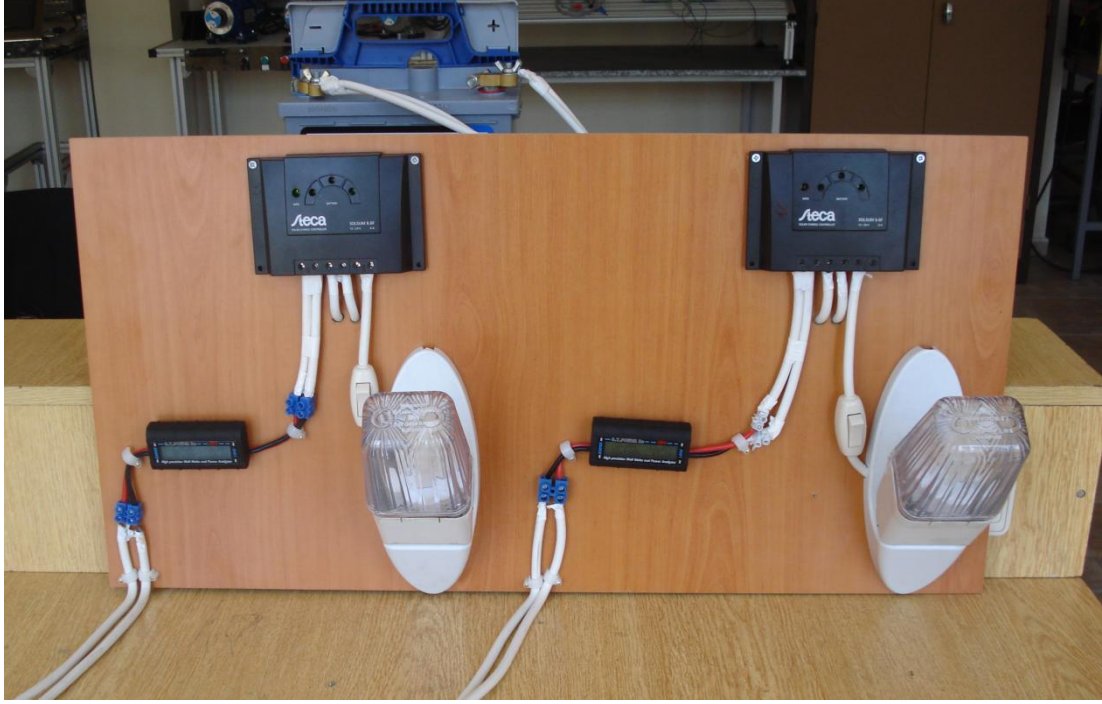
## 2.2. Metot

### 2.2.1. Güneş Modüllerinin Konumlandırılması ve Denge Ünitesi

Bu deneysel çalışmada pyranometre ile aydınlık seviyesi ölçülemediğinden güneş modülleri ayarlanabilir ayakları sayesinde güney cephesine doğru  $65^{\circ}$  lik bir eğimle kurulmuş güneş modülü sehpasına yan yana monte edilerek aynı ortamda ve aynı anda buldukları güneş ışınımı altındaki çıkış değerleri (akım, gerilim, güç) ölçülmüştür. Yapılan çalışmada monokristal ve polikristal güneş modülleri birbirlerinden bağımsız denetim birimleri üzerinden depolama birimi ve yüke (solar aydınlatma lambaları) bağlanmıştır. Diğer bir ifadeyle modül performansları şebeke bağlantısız fotovoltaik bir sistemle incelenmiştir. Şekil 2.7.'de modüllerin konumlandırılması, Şekil 2.8'de denge ünitesinin gösterimi, Şekil 2.9'da ise deney bağlantı şeması görülmektedir.

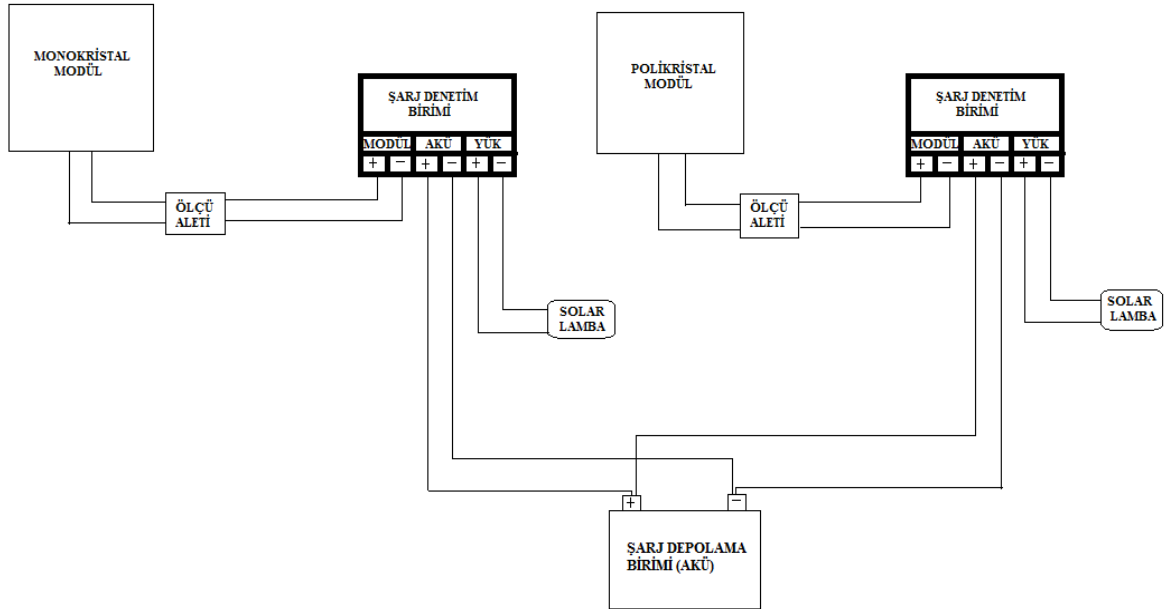


Şekil 2.7. Monokristal ve polikristal güneş modüllerinin konumlandırılması



Şekil 2.8. Denge (Ölçüm) ünitesi gösterimi

## 2.2.2. Bağlantı Şeması



Şekil 2.9. Deney bağlantı şeması.

### 2.2.3.Modüllerden Alınan Akım, Gerilim ve Güç Değerlerinin Karşılaştırılması

Yapılan bu çalışma Erzincan ilinde yapılmıştır ve Enerji İşleri Etüt İdaresi (E.İ.E.) verilerine göre Erzincan ili için güneşlenme bakımından verimin en düşük olduğu Ocak ayı ve verimin en fazla olduğu Temmuz ayı seçilerek modüllerin beş'er günlük ve belirli saat dilimleri arasında, ölçümleri yapılmış ve mevsimsel anlamda monokristal ve polikristal güneş modüllerinin bu aylarda performanslarındaki değişimler ve bu değişimlere neden olan faktörler incelenmiştir.

#### 2.2.3.1. Ocak Ayı Verilerinin Karşılaştırılması

Öncelikle Ocak ayında, beş gün boyunca, kayda değer verilerin alınabildiği saat dilimlerinde, her iki güneş modülü çıkışından alınan anlık, akım gerilim ve güç değerleri Tablo 2.3. ve Tablo 2.4.'de verilmiştir.

**Tablo 2.3.** Monokristal modülden Ocak ayında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

Monokristal Modül									
	15 Ocak 2012			16 Ocak 2012			17 Ocak 2012		
Saat	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GUÇ(W)	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GUÇ(W)	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GUÇ(W)
09:00	0,53	12,27	6,50	0,39	12,32	4,80	0,77	12,26	9,44
10:00	0,64	12,29	7,86	0,55	12,33	6,78	0,55	12,24	6,73
11:00	0,70	12,27	8,58	0,60	12,35	7,41	0,53	12,22	6,47
12:00	0,68	12,28	8,35	0,21	12,30	2,58	0,96	12,36	11,86
13:00	0,58	12,25	7,11	0,18	12,31	2,22	0,61	12,25	7,47
14:00	0,31	12,26	3,80	0,00	12,21	0,00	0,69	12,25	8,45
15:00	0,10	12,18	1,22	0,00	12,24	0,00	0,00	12,02	0,00
16:00	0,00	12,07	0,00	0,00	12,04	0,00	0,00	11,98	0,00
	18 Ocak 2012			19 Ocak 2012					
Saat	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GUÇ(W)	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GUÇ(W)			
09:00	0,41	12,25	5,02	0,46	12,27	5,64			
10:00	0,45	12,26	5,52	0,65	12,32	8,01			
11:00	0,57	12,28	6,99	0,72	12,36	8,89			
12:00	0,94	12,32	11,58	1,02	12,44	12,68			
13:00	0,72	12,27	8,83	0,68	12,33	8,38			
14:00	0,64	12,25	7,84	0,35	12,26	4,29			
15:00	0,37	12,23	4,52	0,12	12,22	1,46			
16:00	0,16	12,19	1,96	0,00	12,03	0,00			



**Tablo 2.4.** Polikristal modülden Ocak ayında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

Polikristal Modül									
	15 Ocak 2012			16 Ocak 2012			17 Ocak 2012		
Saat	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GÜÇ(W)	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GÜÇ(W)	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GÜÇ(W)
09:00	0,23	12,31	2,83	0,10	12,30	1,23	0,48	12,28	5,89
10:00	0,36	12,32	4,43	0,28	12,32	3,44	0,26	12,29	3,19
11:00	0,51	12,32	6,28	0,42	12,36	5,19	0,23	12,27	2,82
12:00	0,42	12,31	5,17	0,05	12,28	0,61	0,77	12,36	9,51
13:00	0,29	12,30	3,56	0,04	12,29	0,49	0,35	12,29	4,30
14:00	0,09	12,24	1,10	0,00	12,19	0,00	0,52	12,29	6,39
15:00	0,00	12,21	0,00	0,00	12,24	0,00	0,00	12,19	0,00
16:00	0,00	12,09	0,00	0,00	12,11	0,00	0,00	12,15	0,00
18 Ocak 2012									
	18 Ocak 2012			19 Ocak 2012					
Saat	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GÜÇ(W)	AKIM(A)	GERİLİM(V)	GÜÇ(W)			
09:00	0,37	12,30	4,55	0,41	12,27	5,03			
10:00	0,42	12,32	5,17	0,58	12,30	7,13			
11:00	0,51	12,33	6,28	0,66	12,32	8,13			
12:00	0,86	12,29	10,56	0,89	12,38	11,01			
13:00	0,65	12,27	7,97	0,57	12,29	7,01			
14:00	0,58	12,25	7,11	0,28	12,22	3,42			
15:00	0,24	12,23	2,94	0,07	12,19	0,85			
16:00	0,00	12,19	0,00	0,00	11,98	0,00			

### 2.2.3.1.1. Modül Ebatlarına Göre Ocak Ayı Verilerinin Değerlendirilmesi

Modüllerin ebatlarının farklı olması nedeniyle elde edilen gücün birim yüzeye oranı farklıdır. Bu nedenle modüllerin birbirleriyle performans açısından mukayese edilebilmeleri için birim yüzeyde ürettikleri güç değerleri dikkate alınmıştır. Bunun için her iki modülün yüzey alanı hesaplanmış ve elde edilen güce oranlanarak 1 cm<sup>2</sup> alanda elde edilen güç değerleri hesaplanmıştır.

Monokristal Modülün Yüzey Alanı: 3348 cm<sup>2</sup>

Polikristal Modülün Yüzey Alanı: 3458cm<sup>2</sup>

olarak belirlenmiştir.

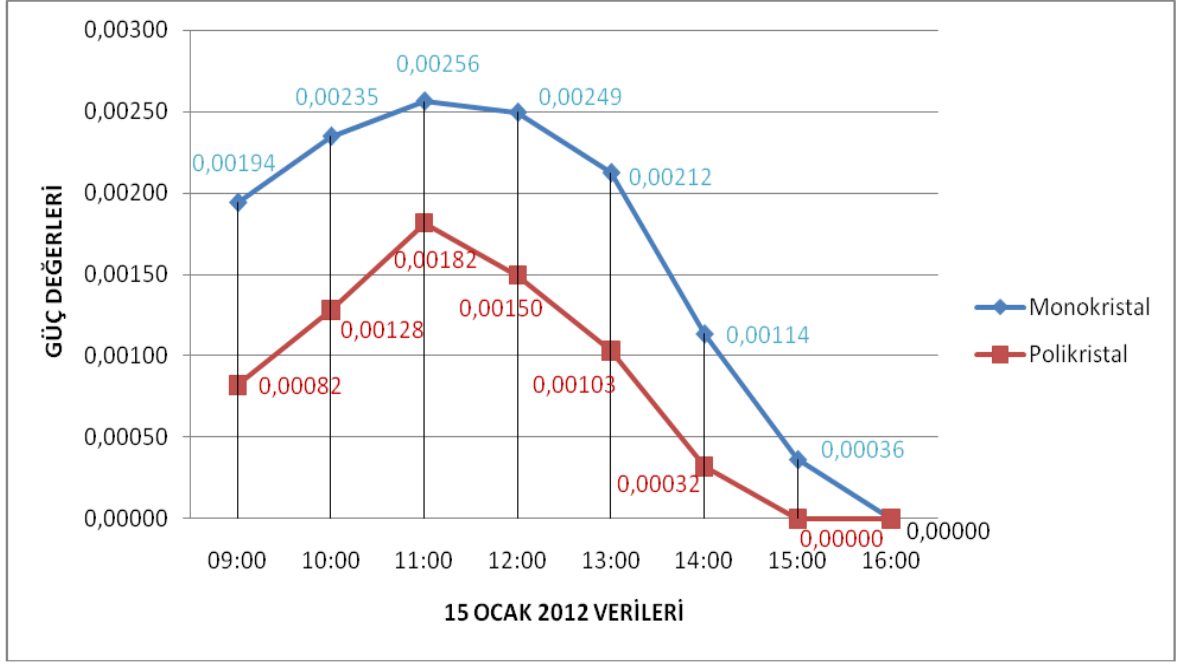
Buna göre Monokristal ve Polikristal güneş modüllerinin Ocak ayında birim yüzeylerinde ürettikleri güç miktarı açısından performansları öncelikle tabloda, sonrasında ise grafiksel olarak sırasıyla verilmiştir.

**Tablo 2.5.** Monokristal modülün Ocak ayı birim yüzey güç değerleri

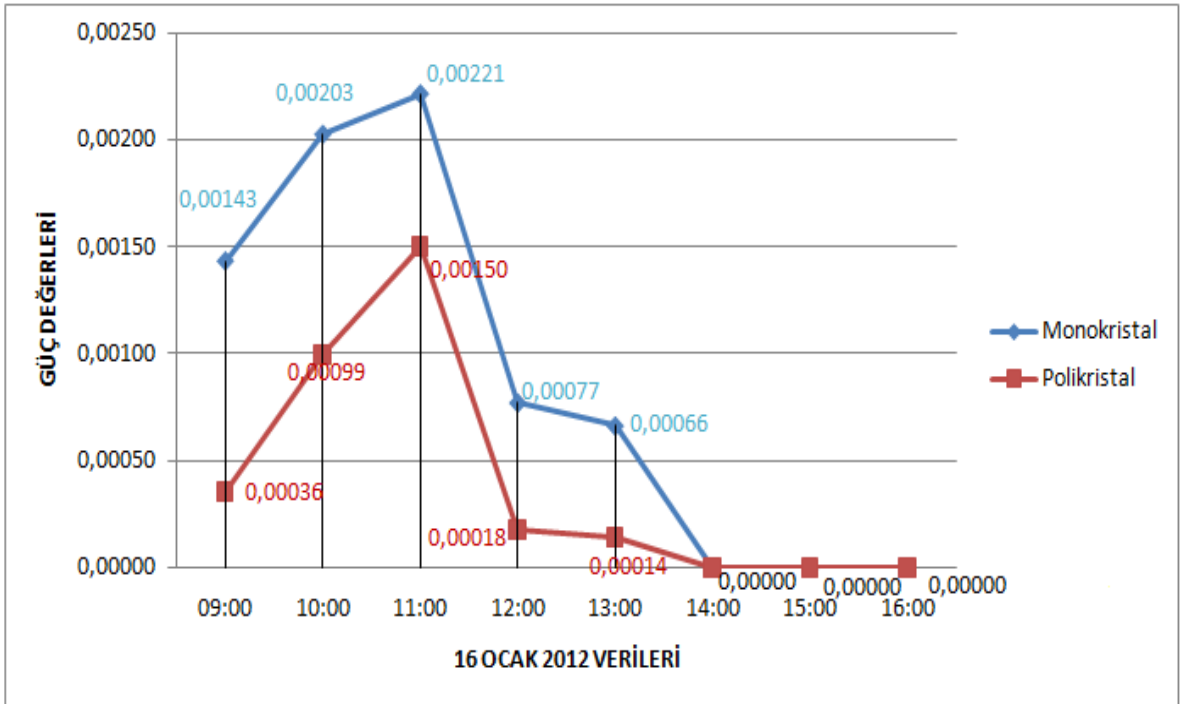
Monokristal Modül Birim Yüzey Güç Değerleri					
	15 Ocak 2012	16 Ocak 2012	17 Ocak 2012	18 Ocak 2012	19 Ocak 2012
Saat	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)
09:00	0,00194	0,00143	0,00282	0,00150	0,00168
10:00	0,00235	0,00203	0,00201	0,00165	0,00239
11:00	0,00256	0,00221	0,00193	0,00209	0,00266
12:00	0,00249	0,00077	0,00354	0,00346	0,00379
13:00	0,00212	0,00066	0,00223	0,00264	0,00250
14:00	0,00114	0,00000	0,00252	0,00234	0,00128
15:00	0,00036	0,00000	0,00000	0,00135	0,00044
16:00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00059	0,00000

**Tablo 2.6.** Polikristal modülün Ocak ayı birim yüzey güç değerleri

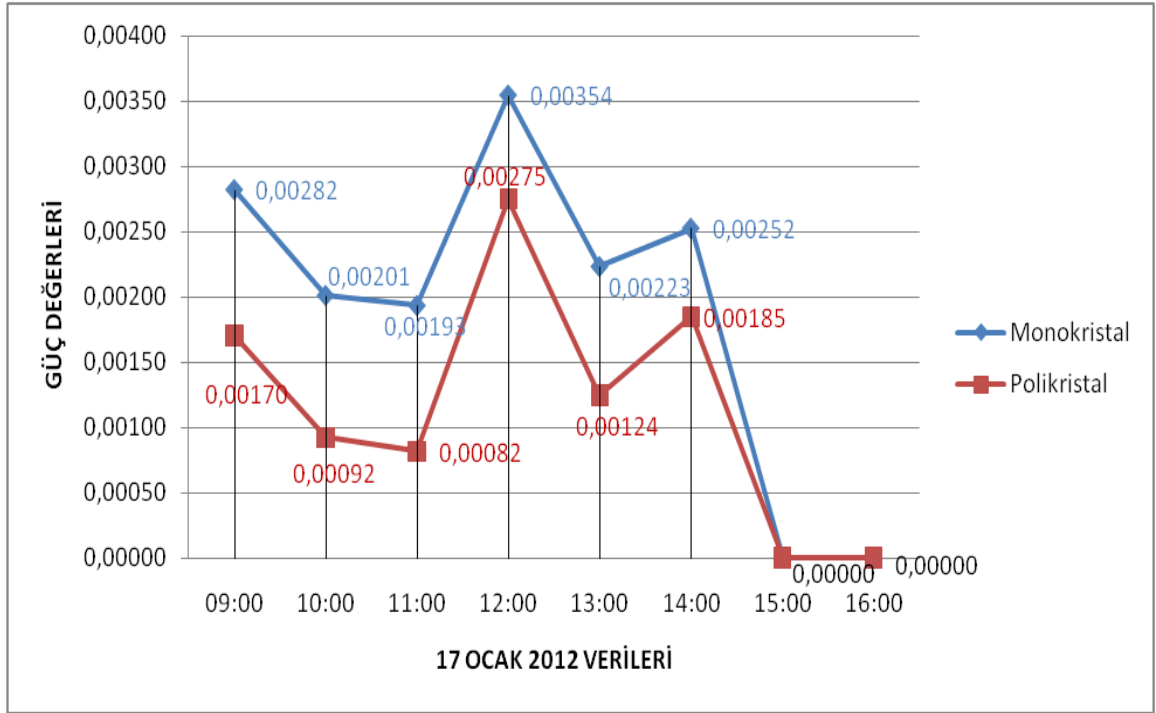
Polikristal Modül Birim Yüzey Güç Değerleri					
	15 Ocak 2012	16 Ocak 2012	17 Ocak 2012	18 Ocak 2012	19 Ocak 2012
Saat	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)
09:00	0,00082	0,00036	0,00170	0,00132	0,00145
10:00	0,00128	0,00099	0,00092	0,00150	0,00206
11:00	0,00182	0,00150	0,00082	0,00182	0,00235
12:00	0,00150	0,00018	0,00275	0,00305	0,00318
13:00	0,00103	0,00014	0,00124	0,00230	0,00203
14:00	0,00032	0,00000	0,00185	0,00206	0,00099
15:00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00085	0,00025
16:00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000



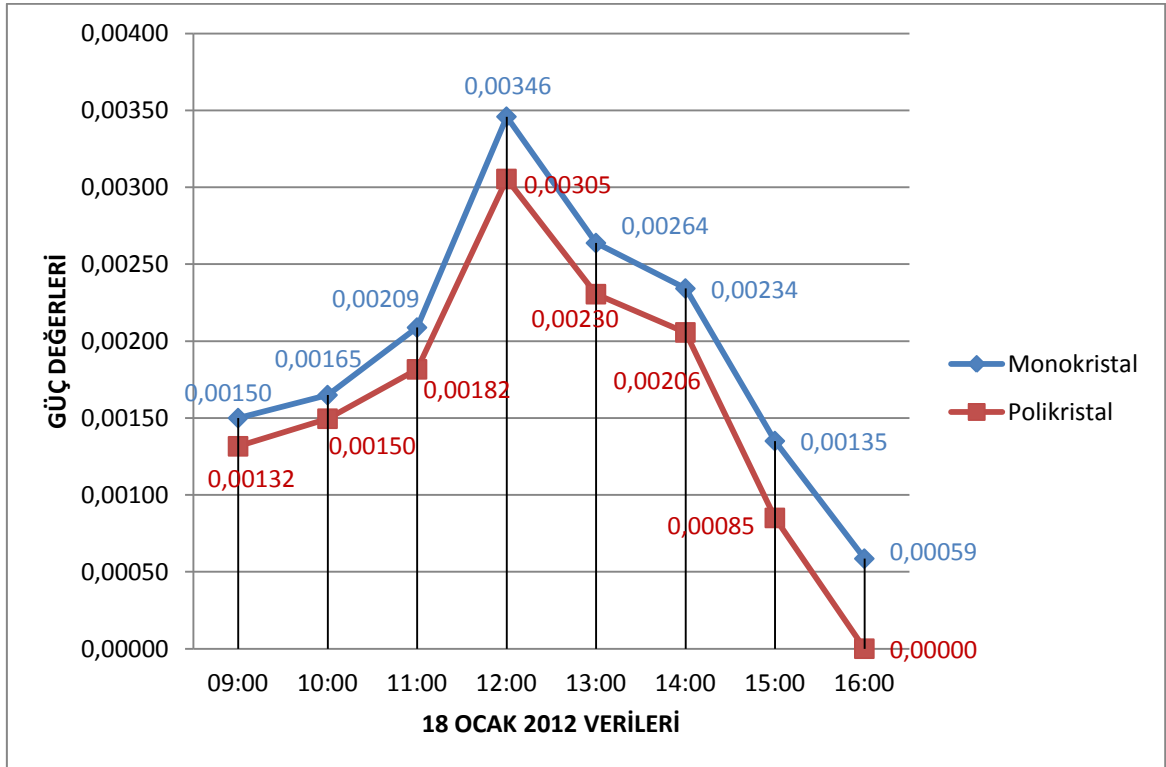
Şekil 2.10. 15 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği



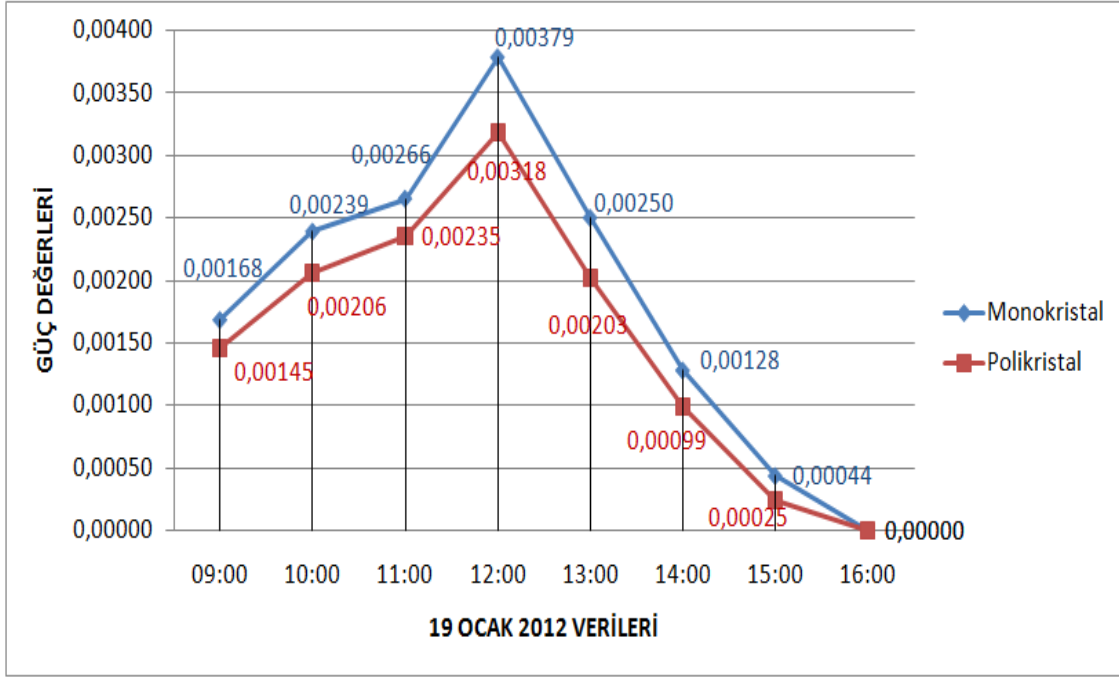
Şekil 2.11. 16 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği



Şekil 2.12. 17 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği

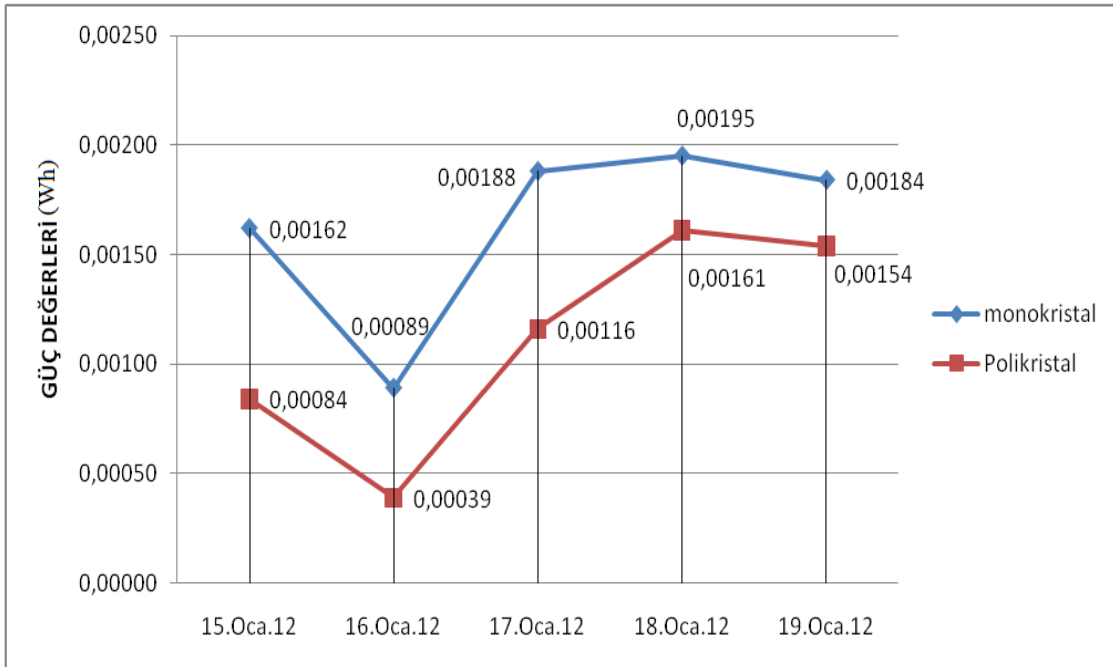


Şekil 2.13. 18 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği



Şekil 2.14. 19 Ocak 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği

Ocak ayında alınan verilere göre birim yüzeyler için hesaplanan günlük ortalama modül performansları ise şu şekildedir:



Şekil 2.15. 2012 Ocak ayında elde edilen birim yüzeylerin günlük ortalama güç değerleri

### 2.2.3.2. Temmuz Ayı Verilerinin Karşılaştırılması

Temmuz ayındaki veriler beş gün boyunca bu mevsimde günlük güneşlenme süresinin fazla olması nedeniyle kayda değer verilerin alınabildiği 07:00-19:00 saat dilimleri arasında alınmıştır. Her iki modülden elde edilen anlık akım, gerilim ve güç değerleri Tablo 2.7. ve Tablo 2.8.'de verilmiştir.

**Tablo 2.7.** Monokristal modülden Temmuz ayında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

Monokristal Modül									
	2 Temmuz 2012			3 Temmuz 2012			4 Temmuz 2012		
Saat	AKIM(A)	GERILIM(V)	GUÇ(W)	AKIM(A)	GERILIM(V)	GUÇ(W)	AKIM(A)	GERILIM(V)	GUÇ(W)
07:00	0,18	12,27	2,21	0,13	12,25	1,59	0,16	12,27	1,96
08:00	0,21	12,28	2,58	0,17	12,27	2,09	0,20	12,27	2,45
09:00	0,44	12,32	5,42	0,22	12,28	2,70	0,34	12,28	4,18
10:00	0,38	12,29	4,67	0,41	12,36	5,07	0,52	12,36	6,43
11:00	1,09	12,41	13,53	0,92	12,42	11,43	1,27	12,49	15,86
12:00	1,14	12,45	14,19	1,15	12,46	14,33	1,05	12,39	13,01
13:00	1,67	12,58	21,01	1,43	12,54	17,93	1,54	12,52	19,28
14:00	1,84	12,77	23,50	1,66	12,61	21,02	1,72	12,66	21,78
15:00	1,56	12,54	19,56	1,24	12,49	15,49	1,36	12,52	17,02
16:00	1,11	12,42	13,79	0,82	12,41	10,18	0,94	12,43	11,68
17:00	0,82	12,38	10,15	0,43	12,36	5,31	0,53	12,37	6,56
18:00	0,55	12,33	6,78	0,11	12,22	1,34	0,24	12,31	2,95
19:00	0,27	12,29	3,32	0,00	12,09	0,00	0,00	12,09	0,00
	5 Temmuz 2012			6 Temmuz 2012					
Saat	AKIM(A)	GERILIM(V)	GUÇ(W)	AKIM(A)	GERILIM(V)	GUÇ(W)			
07:00	0,17	12,26	2,08	0,20	12,28	2,46			
08:00	0,24	12,27	2,94	0,27	12,28	3,32			
09:00	0,37	12,28	4,54	0,43	12,30	5,29			
10:00	0,56	12,32	6,90	0,64	12,33	7,89			
11:00	0,93	12,34	11,48	1,05	12,36	12,98			
12:00	1,96	13,02	25,52	2,04	13,11	26,74			
13:00	2,11	13,13	27,70	2,25	13,27	29,86			
14:00	2,24	13,24	29,66	2,42	13,36	32,33			
15:00	2,08	13,11	27,27	2,27	13,29	30,17			
16:00	2,01	13,05	26,23	2,18	13,26	28,91			
17:00	1,76	12,89	22,69	1,89	13,04	24,65			
18:00	0,87	12,52	10,89	0,98	12,39	12,14			
19:00	0,41	12,38	5,08	0,52	12,32	6,41			

**Tablo 2.8.** Polikristal modülden Temmuz ayında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

Polikristal Modül									
	2 Temmuz 2012			3 Temmuz 2012			4 Temmuz 2012		
Saat	AKIM(A)	GERILIM(V)	GÜÇ(W)	AKIM(A)	GERILIM(V)	GÜÇ(W)	AKIM(A)	GERILIM(V)	GÜÇ(W)
07:00	0,11	12,24	1,35	0,06	12,19	0,73	0,09	12,24	1,10
08:00	0,14	12,25	1,72	0,11	12,24	1,35	0,12	12,26	1,47
09:00	0,37	12,29	4,55	0,13	12,25	1,59	0,24	12,27	2,94
10:00	0,32	12,31	3,94	0,27	12,29	3,32	0,44	12,35	5,43
11:00	0,97	12,38	12,01	0,79	12,37	9,77	1,19	12,45	14,82
12:00	1,07	12,44	13,32	1,03	12,42	12,79	0,92	12,41	11,42
13:00	1,55	12,61	19,55	1,34	12,46	16,70	1,47	12,48	18,34
14:00	1,78	12,72	22,64	1,52	12,57	19,11	1,66	12,68	21,05
15:00	1,43	12,51	17,89	1,15	12,43	14,29	1,32	12,50	16,50
16:00	1,07	12,48	13,35	0,77	12,35	9,51	0,86	12,42	10,68
17:00	0,79	12,37	9,77	0,38	12,32	4,68	0,48	12,33	5,92
18:00	0,64	12,35	7,90	0,13	12,26	1,59	0,28	12,34	3,46
19:00	0,36	12,31	4,43	0,00	12,09	0,00	0,00	12,11	0,00
5 Temmuz 2012									
	5 Temmuz 2012			6 Temmuz 2012					
Saat	AKIM(A)	GERILIM(V)	GÜÇ(W)	AKIM(A)	GERILIM(V)	GÜÇ(W)			
07:00	0,14	12,25	1,72	0,15	12,26	1,84			
08:00	0,22	12,26	2,68	0,22	12,28	2,70			
09:00	0,33	12,27	4,05	0,36	12,27	4,42			
10:00	0,44	12,30	5,41	0,47	12,29	5,78			
11:00	0,85	12,32	10,47	0,95	12,33	11,71			
12:00	1,86	12,72	23,66	1,92	13,09	25,13			
13:00	2,02	13,09	26,44	2,14	13,23	28,31			
14:00	2,13	13,21	28,14	2,29	13,28	30,41			
15:00	1,98	13,07	25,88	2,21	13,25	29,28			
16:00	1,92	13,05	25,06	2,09	13,18	27,54			
17:00	1,67	12,66	21,14	1,91	13,06	24,94			
18:00	0,91	12,46	11,34	1,05	12,35	12,97			
19:00	0,53	12,31	6,52	0,61	12,32	7,52			

### 2.2.3.2.1 Modül Ebatlarına Göre Temmuz Ayı Verilerinin Değerlendirilmesi

Monokristal ve Polikristal güneş modüllerinin Temmuz ayında birim yüzeylerinde ürettikleri güç miktarı açısından performansları öncelikle tabloda, sonrasında ise grafiksel olarak sırasıyla verilmiştir.

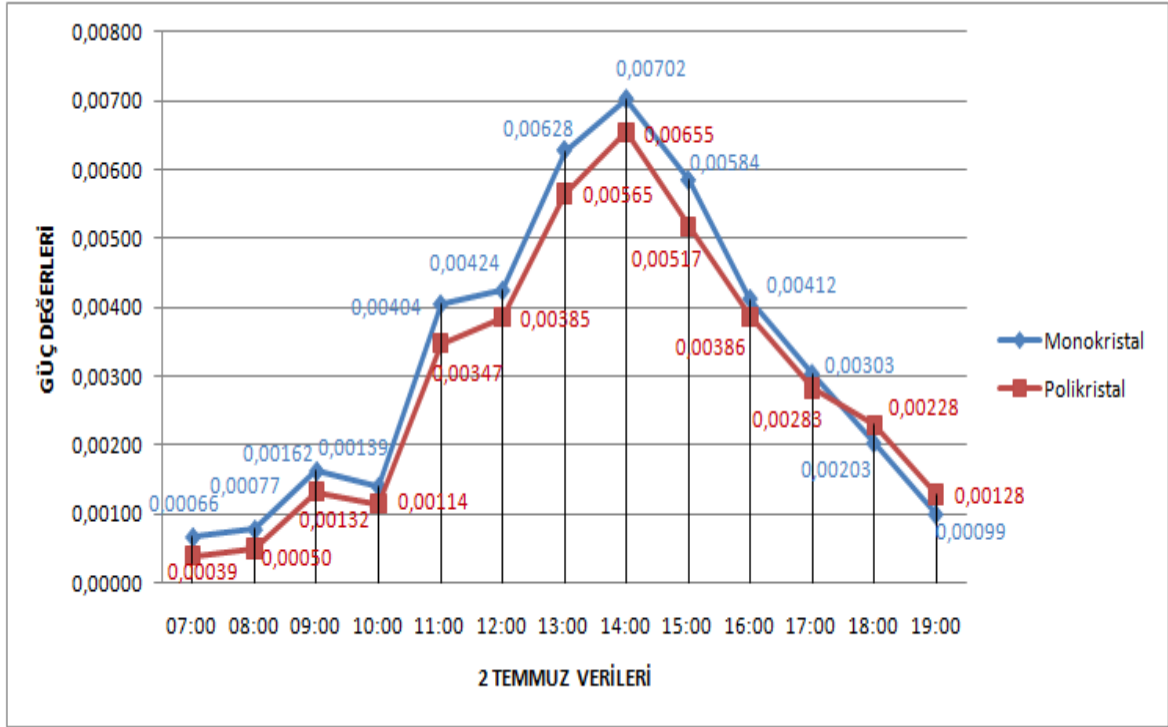
**Tablo 2.9.** Monokristal modülün Temmuz ayı birim yüzey güç değerleri

Monokristal Modül Birim Yüzey Güç Değerleri					
	2 Temmuz 2012	3 Temmuz 2012	4 Temmuz 2012	5 Temmuz 2012	6 Temmuz 2012
Saat	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)
07:00	0,00066	0,00047	0,00059	0,00062	0,00073
08:00	0,00077	0,00062	0,00073	0,00088	0,00099
09:00	0,00162	0,00081	0,00125	0,00136	0,00158
10:00	0,00139	0,00151	0,00192	0,00206	0,00236
11:00	0,00404	0,00341	0,00474	0,00343	0,00388
12:00	0,00424	0,00428	0,00389	0,00762	0,00799
13:00	0,00628	0,00536	0,00576	0,00827	0,00892
14:00	0,00702	0,00628	0,00651	0,00886	0,00966
15:00	0,00584	0,00463	0,00508	0,00815	0,00901
16:00	0,00412	0,00304	0,00349	0,00783	0,00864
17:00	0,00303	0,00159	0,00196	0,00678	0,00736
18:00	0,00203	0,00040	0,00088	0,00325	0,00363
19:00	0,00099	0,00000	0,00000	0,00152	0,00191

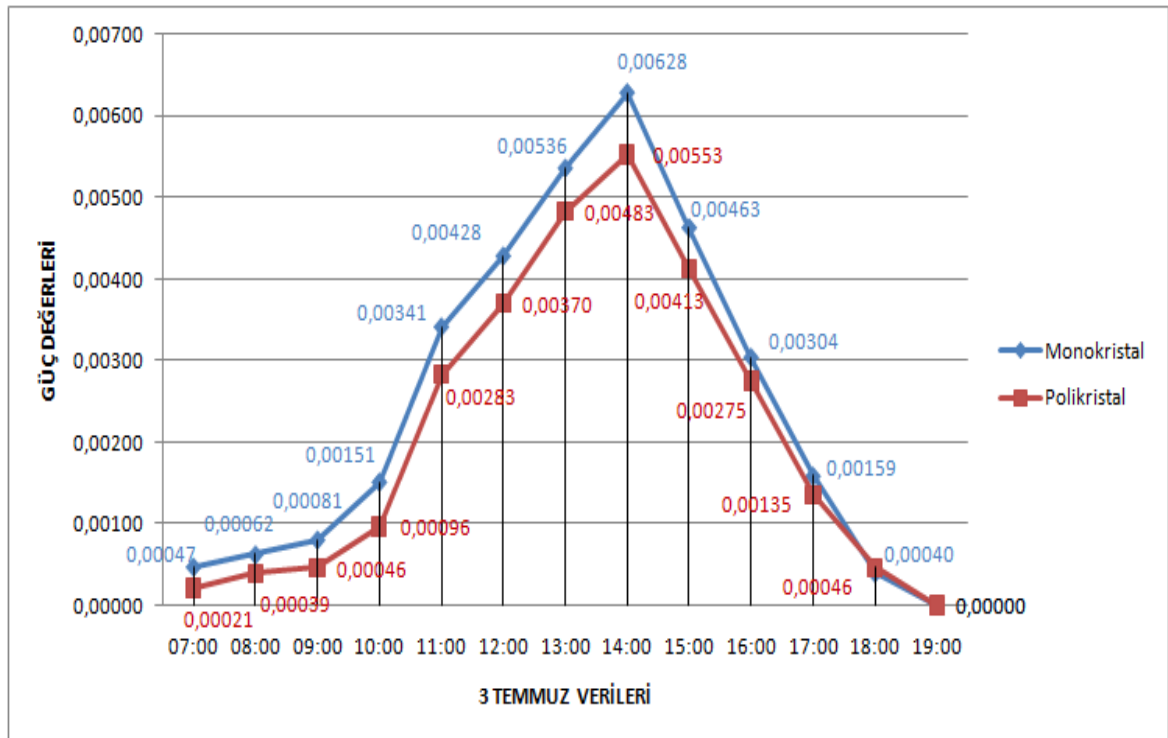
**Tablo 2.10.** Polikristal modülün Temmuz ayı birim yüzey güç değerleri

Polikristal Modül Birim Yüzey Güç Değerleri					
	2 Temmuz 2012	3 Temmuz 2012	4 Temmuz 2012	5 Temmuz 2012	6 Temmuz 2012
Saat	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)	GÜÇ(W)
07:00	0,00039	0,00021	0,00032	0,00050	0,00053
08:00	0,00050	0,00039	0,00043	0,00078	0,00078
09:00	0,00132	0,00046	0,00085	0,00117	0,00128
10:00	0,00114	0,00096	0,00157	0,00156	0,00167
11:00	0,00347	0,00283	0,00429	0,00303	0,00339
12:00	0,00385	0,00370	0,00330	0,00684	0,00727
13:00	0,00565	0,00483	0,00530	0,00765	0,00819
14:00	0,00655	0,00553	0,00609	0,00814	0,00879
15:00	0,00517	0,00413	0,00477	0,00748	0,00847
16:00	0,00386	0,00275	0,00309	0,00725	0,00796
17:00	0,00283	0,00135	0,00171	0,00611	0,00721
18:00	0,00228	0,00046	0,00100	0,00328	0,00375
19:00	0,00128	0,00000	0,00000	0,00189	0,00217

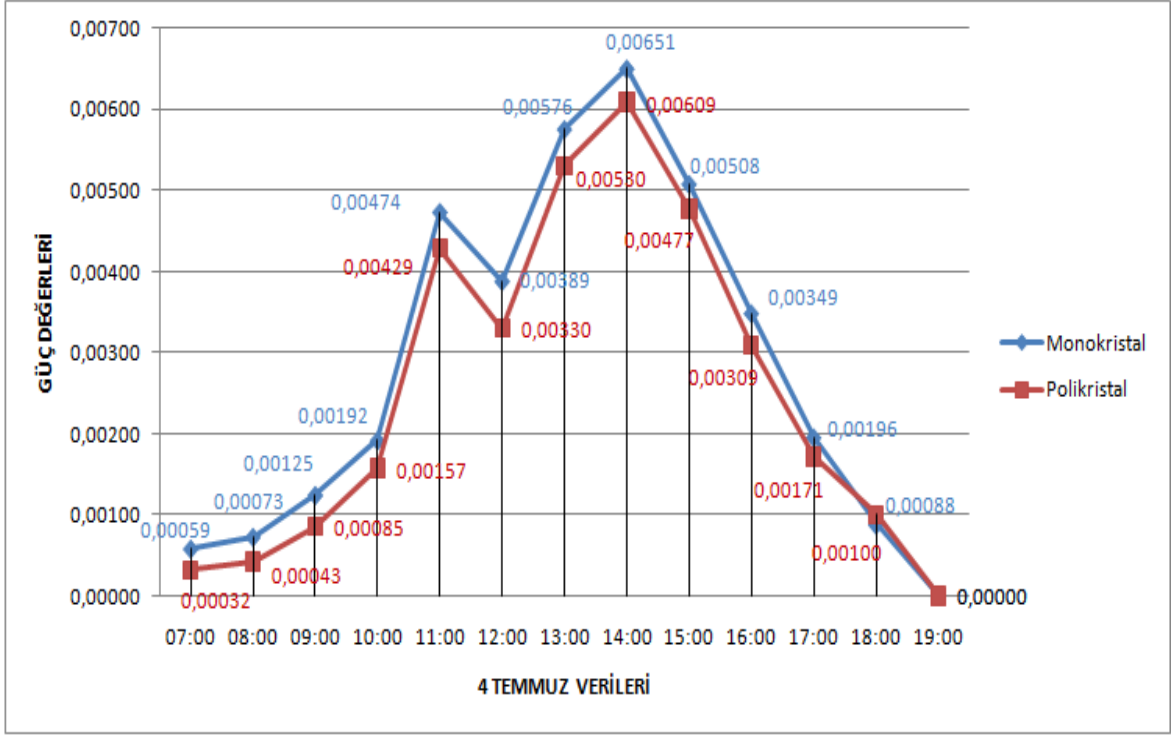




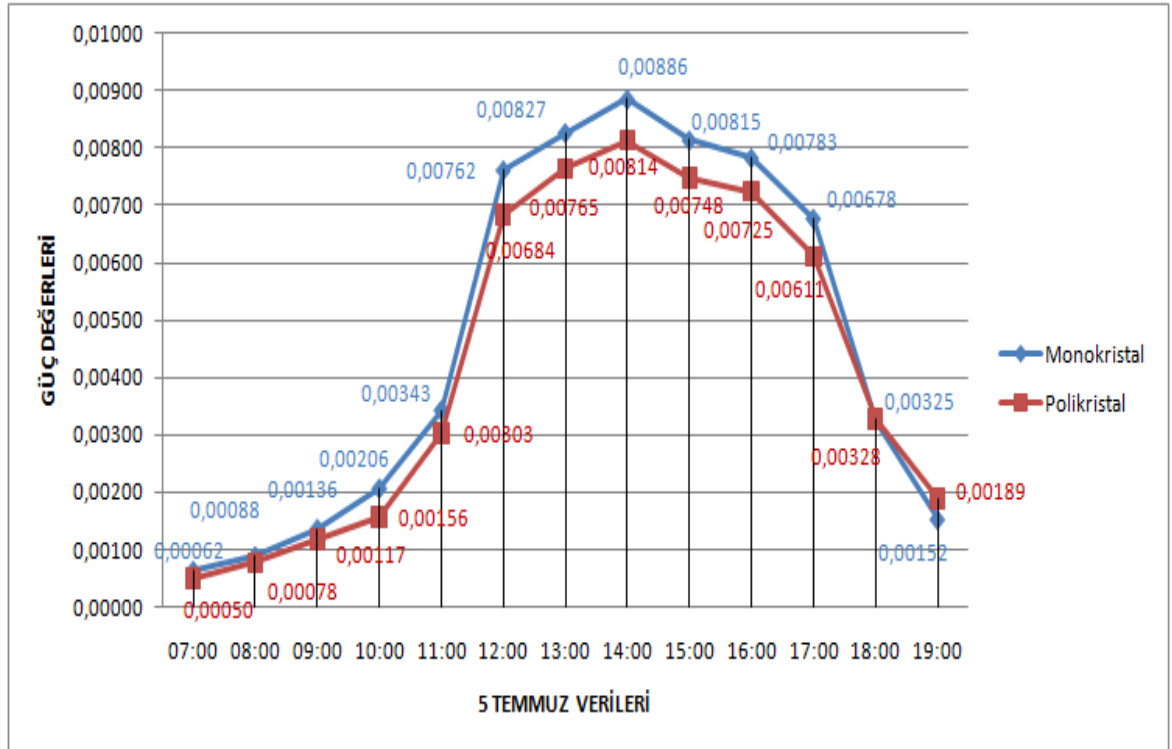
Şekil 2.16. 2 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği



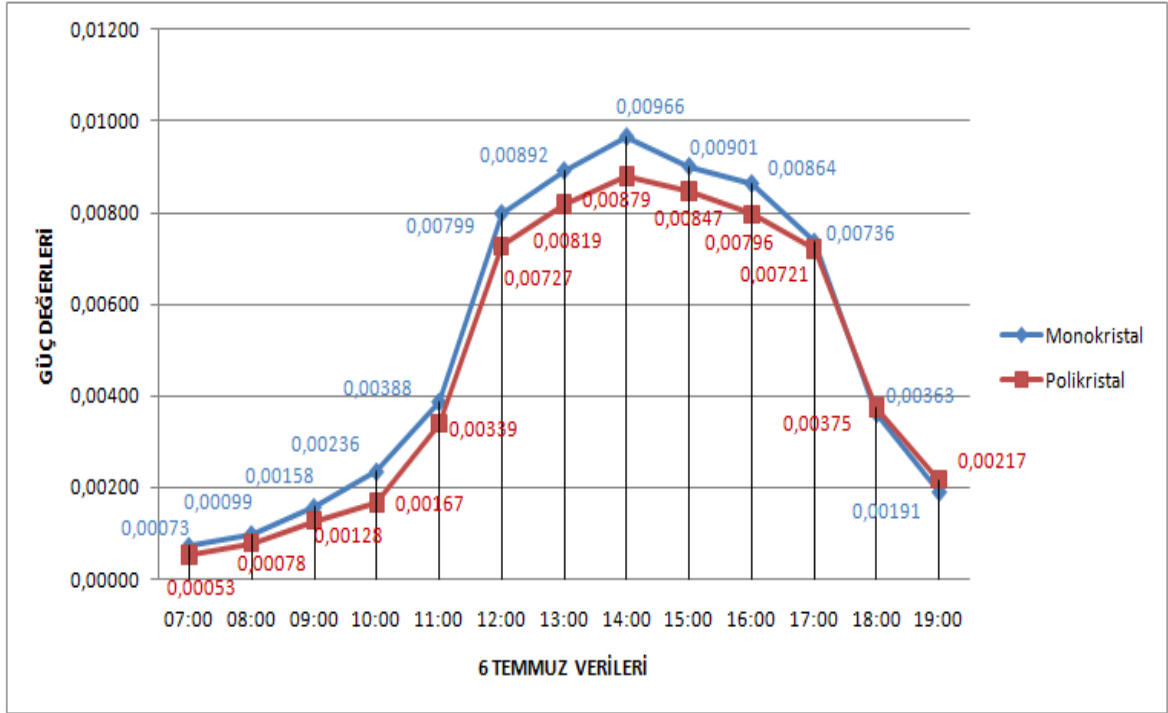
Şekil 2.17. 3 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği



Şekil 2.18. 4 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği

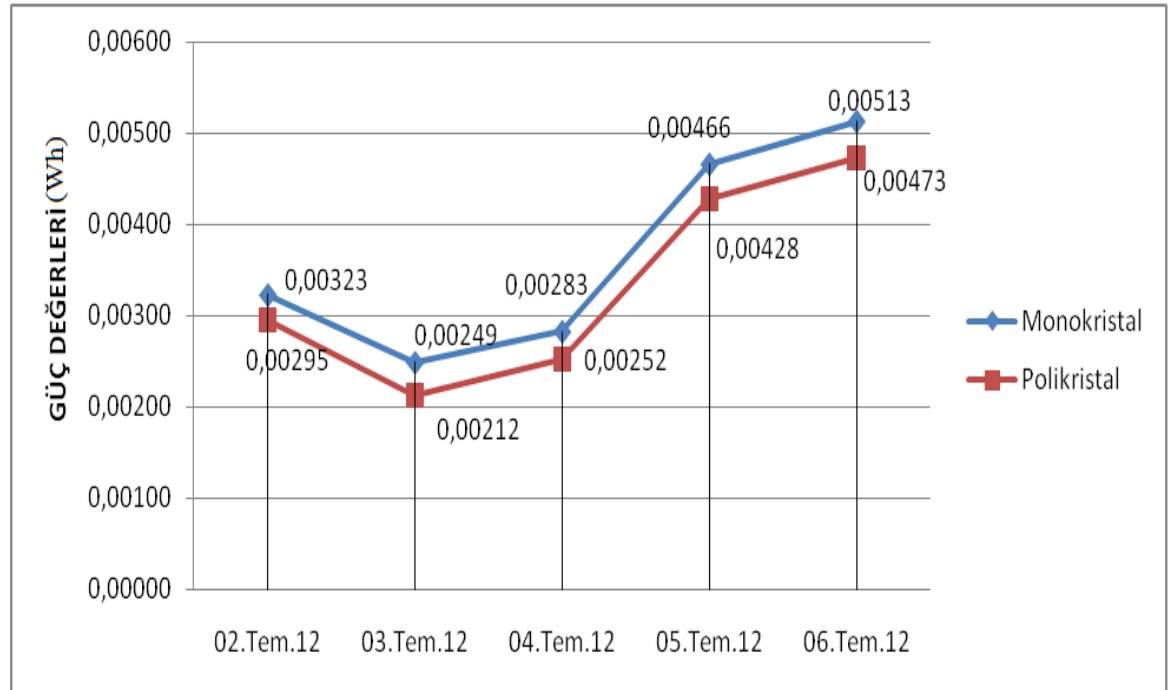


Şekil 2.19. 5 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği



Şekil 2.20. 6 Temmuz 2012 tarihinde elde edilen birim yüzey güç grafiği

Temmuz ayında alınan verilere göre birim yüzeyler için hesaplanan günlük ortalama modül performansları ise şu şekildedir:



Şekil 2.21. 2012 Temmuz ayında elde edilen birim yüzeylerin günlük ortalama güç değerleri

### 3. BULGULAR

Modüllerin Ocak ayı performanslarına bakıldığında, 15 Ocak tarihinde (Şekil 2.10), saat 11:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek değerin kaydedildiği, özellikle saat 14:00'den sonra, monokristal modülle polikristal modülün performanslarının birbirine yaklaşma eğilimi gösterdiği ve saat 15:00'den itibaren polikristal modülden, 16:00'dan itibaren ise monokristal modülden değer alınmadığı gözlenmiştir.

16 Ocak tarihinde (Şekil 2.11), saat 11:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek değerin kaydedildiği, saat 14:00'den itibaren, havadaki bulutlanma ve karanlık ortam nedeniyle her iki modülden de değer alınamamıştır.

17 Ocak tarihinde (Şekil 2.12), saat 12:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek değer kaydedilmiş, saat 15:00'den itibaren, havadaki bulutlanma ve karanlık ortam nedeniyle her iki modülden de değer alınamamıştır.

18 Ocak tarihinde (Şekil 2.13), saat 12:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek değer kaydedilmiş, saat 16:00 da, Monokristal modülde bir değer kaydedilirken, polikristal modülden değer alınamamıştır. Bu tarihte ölçülen değerlerin önceki günlere göre daha verimli olduğu ve birbirine yakın seyrettiği gözlenmiştir.

19 Ocak tarihinde (Şekil 2.14), saat 12:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek anlık değerin kaydedildiği ve bu değer beş günlük ölçümler boyunca birim yüzeylerden alınan anlık en yüksek değer olduğu görülmüştür. Saat 16:00 da ise, her iki modülden de değer alınamamıştır.

Ocak ayı içerisindeki, beş gün boyunca yapılan ölçümler sonucunda monokristal modül veriminin genelde, polikristal modüle göre daha iyi olduğu, güneşlenmenin veya gün ışığının daha iyi olduğu günlerde polikristal modülün verim açısından monokristal modüle yaklaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.15'deki Ocak ayı ortalama güç değerlerine bakıldığında, alınan ölçüm değerleri; gerek günlük güneşlenme miktarı ve süresi, gerekse de zaman zaman havadaki bulutlanma ve karararma açısından düşük değerlerde seyretmiştir. 18 Ocak tarihinde birim yüzeylerde üretilen günlük ortalama güç değerleri açısından her iki modül de en verimli değerlere ulaşmıştır.

Modüllerin Temmuz ayı performanslarına bakıldığında, 2 Temmuz tarihinde (Şekil 2.16) saat 14:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek değerin kaydedildiği,

saat 17:00'den sonra, polikristal modülün monokristal modüle göre daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir. Buna sebep olarak, modül konumlarının sabit olması ve güneşin konum değiştirmesinden dolayı modüllerle yaptığı açı gösterilebilir.

3 Temmuz tarihinde (Şekil 2.17), saat 14:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek değerin kaydedildiği, saat 19:00'dan itibaren, havadaki bulutlanma nedeniyle her iki modülden de değer alınamamıştır.

4 Temmuz tarihinde (Şekil 2.18), saat 14:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek değer kaydedilmiş, saat 19:00'dan itibaren, havadaki bulutlanma nedeniyle her iki modülden de değer alınamamıştır.

5 Temmuz tarihinde (Şekil 2.19), önceki günlere göre havanın daha açık olması nedeniyle, değerler yüksek seyretmiştir. Bu tarihte saat 14:00 'de her iki modül için de gün içerisindeki en yüksek değer kaydedilmiştir.

6 Temmuz tarihinde (Şekil 2.20), her iki modül için de, Temmuz ayındaki ölçümlerde elde edilen en yüksek anlık güç değerlerine saat 14:00 'de ulaşılmıştır. Havanın açık olması nedeniyle modüllerdeki en iyi performanslar bu tarihte alınmıştır.

Temmuz ayı içerisindeki, beş gün boyunca yapılan ölçümler sonucunda monokristal modül veriminin genelde, polikristal modüle göre daha iyi olduğu fakat güneşlenmenin ve gün ışığının daha iyi olduğu bu ay içerisinde polikristal modülün Ocak ayına göre performans açısından monokristal modüle yaklaştığı görülmüştür. Şekil 2.21' de Temmuz ayı ortalama günlük güç değerleri Wh cinsinden verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında Temmuz ayı değerlerinin Ocak ayına göre önemli miktarda artış gösterdiği görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Özellikle şebeke bağlantısız fotovoltaik sistemlerde kullanılan modül kullanımına yönelik yapılan bu çalışmada, iki ayrı tip güneş pili modülü kullanılmıştır.

45 W. gücündeki Monokristal ve Polikristal yapılu güneş pili modülleri birbirinden bağımsız denetim birimleri üzerinden depolama birimi ve yüke bağlanmıştır. Tasarlanan bu sistemle iki ayrı modülün, Ocak ve Temmuz aylarındaki performansları incelenmiştir. Alınan ölçümlerde bu ayların seçilme nedeni, deneyin yapıldığı Erzincan ili için güneşlenme süresi bakımından en verimsiz ayın Ocak, en verimli ayın ise Temmuz olmasıdır. Ocak ayında aydınlık ve karanlık havanın bulunması, hava sıcaklığının ve güneş ışınım şiddetinin düşük olması, Temmuz ayında ise daha çok aydınlık havanın bulunması, hava sıcaklığının ve güneş ışınım şiddetinin yüksek olmasından faydalanılarak modüllerin bu ortamlardaki akım gerilim ve güç değerleri ölçülmüştür. Ölçümler Ocak ve Temmuz aylarında kayda değer verilerin alındığı saat dilimleri arasında alınmıştır. Ölçümleri yapılan modüllerin yüzey alanları üretim teknikleri nedeniyle farklıdır. Bu nedenle iki modülün performansları grafiksel olarak karşılaştırılırken birim yüzeylerinde ürettikleri güç miktarı hesaplanarak, bu değerler üzerinden karşılaştırılmıştır.

Ocak ayı içerisinde modüllerden alınan güç değerlerine baktığımızda, elde edilen en yüksek anlık güç değeri, monokristal modülde 12,68 W olarak kaydedilmiştir. Bu saatte polikristal modülde elde edilen güç değeri ise 11,01 W olmuştur. Bu değerlerin birim yüzeylerdeki karşılığı ise monokristal modül için 0,00379 W polikristal modül için ise 0,00318 W şeklindedir. Ocak ayında modüllerden alınan değerler günlük güneşlenme süresinin az olması, bulutlanma ve karanlık havanın fazla olması nedeniyle düşük değerlerde seyretmiştir.

Temmuz ayında yapılan ölçümlerde, elde edilen en yüksek anlık güç değeri, monokristal modülde 32,33 W olarak kaydedilmiştir. Bu saatte polikristal modülde elde edilen güç değeri ise 30,41 W olmuştur. Birim yüzeyler için hesaplanan değerler ise monokristal modül için 0,00966 W polikristal modül için ise 0,00879 W şeklindedir.

Ocak ve Temmuz aylarında yapılan deneylerde ay sonlarında analizi yapılan ortalama günlük güç değerlerine baktığımızda, Monokristal modülün Temmuz ayı performansının Ocak ayına göre yaklaşık 2,5 kat artış gösterdiği, polikristal modülün ise

yaklaşık 3 kat artış gösterdiği görülmüştür. Bu da karanlık ve bulutlu ortamların polikristal modülün performansını daha olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Ölçümler sonucunda, şebeke bağlantısız sistemler başta olmak üzere fotovoltaik sistemlerde, özellikle de çalışmanın yapıldığı Erzincan ve çevresi için Monokristal modülün Polikristal modüle göre az da olsa daha verimli olduğu görülmüştür.

## 5. ÖNERİLER

Ülkemiz şartları düşünüldüğünde güneş ışınım şiddeti ve sıcaklık verileri ışığında her iki modülden de faydalanılabilir. Ancak özellikle ışınım şiddeti düşük bölgelerde ve şu anki teknoloji itibariyle, monokristal modül kullanımının daha faydalı olacağı söylenebilir.

Bu deneysel çalışmada kullanılan güneş pil modüllerinin maliyet analizi ise modüllerin üretici firma tarafından verilen verim değerleri üzerinden yapılabilir:

Monokristal Modülün yüzey alanı  $3348\text{cm}^2=0,3348\text{ m}^2$

Polikristal Modülün yüzey alanı  $3458\text{cm}^2=0,3458\text{ m}^2$

Doğu Anadolu Bölgesinin yıllık toplam güneş enerjisi  $1365\text{ kWh/m}^2$  olarak verilmiştir.

Monokristal modüle ait üreticinin verdiği verim değeri = % 11,6

Polikristal modüle ait üreticinin verdiği verim değeri = % 11,1

Buna göre modüllerin yıllık üreteceği güçler;

Monokristal modül:  $1365 \times 0,3348 \times 0,116 = 53,0122\text{ kWh}$

Polikristal modül:  $1365 \times 0,3458 \times 0,111 = 52,3938\text{ kWh}$  olarak hesaplanır.

1 Ocak 2012 tarihinde meskenler için elektriğin birim fiyatı 29,578 kuruş olarak belirlenmiştir. Buna göre 1 yılda toplam;

Monokristal modül: 15,679 Lira

Polikristal modül: 15,497 Lira'lık elektrik üretecektir.

Monokristal ve polikristal modüller 150 \$ fiyatla alınmıştır.

1 Ocak 2012 döviz kurlarına göre;

Monokristal modülün fiyatı:  $1,8850 \times 150 = 282,75\text{ Lira}$

Polikristal modülün fiyatı:  $1,8850 \times 150 = 282,75\text{ Lira}$ 'dır.

Modüllerin maliyet fiyatını karşılayabilmeleri için gereken süre ise;

Monokristal modül: 18,03 yıl

Polikristal modül: 18,24 yıl olarak hesaplanabilir.



Gelişen teknoloji ile birlikte Watt başına fotovoltaik pillerin maliyeti her yıl düşmekte ve önümüzdeki yıllarda da düşmeye devam edeceği beklenmektedir. Toplam fotovoltaik sistem maliyetinin büyük kısmını teşkil eden güneş pili maliyetinin düşmesiyle bu tür sistemlerin de maliyeti düşecektir. Artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün biraz daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Buna paralel olarak da klasik enerji kaynaklar hızla tükenmektedir. İleri ki yıllarda arz talep dengesini karşılamak üzere alternatif enerji kaynaklarının kullanılması kaçınılmazdır. Bu alternatif enerji kaynaklarının en önemlilerinden birisi de güneş enerjisidir. Günümüzde pahalı olduklarından dolayı çok fazla kullanım alanı bulamamakla birlikte, bu sistemlerin uzun ömürlü olmaları, çevreyi kirletmemeleri, gürültüsüz çalışmaları, bakım gerektirmemeleri ve en önemlisi enerji kullanımı için para ödenmemesi gibi sebeplerde yakın bir gelecekte yaygın olarak kullanılmaları beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Acaroğlu, M., 2003. Alternatif Enerji Kaynakları, *Nobel Yayınevi*, Ankara.
- Altıntop N., Erdemir D., 2012. Türkiye'de Isıl ve Elektrik Enerjisi Açısından Güneş Enerjisi Sektörünün Gelişimi ve Bugünkü Durumu, *18. International Energyand Environment Fairand Conferance*, İstanbul, 25-27 Nisan 2012, s.137-140,
- Anis,W.R.,and Alfons, H.A., 1994. Photo Voltaic Povered Regulated Cathodic Protection System, *Solar Energy*, Volume 53, No:2, Paper 211-214,
- Batman, M. A., 2001. Elektrik Üretimi İçin Güneş Pillerinin Kullanımında Verimi Arttırıcı Yeni Bir Yöntem, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çabuk, S., 1992. İnce Film SNO<sub>2</sub>/CuO<sub>2</sub> Güneş Pilleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, Adana.
- Çalıkoğlu, S.,Özdemir, E.,Uçar, M., 2011. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinin Güç Kalitesine Etkileri, *IV.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kartepe/Kocaeli, 12-13 Mayıs 2011, s.275-276,
- Çelebi, G., 2002. Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri, *Gazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 17, s. 3.
- Demirci, F., 1996. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörlerin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Demirtaş, M., 2008. Güneş ve Rüzgar Enerjisi Kullanılarak Şebeke ile Paralel Çalışabilen Hibrit Enerji Santrali Tasarımı ve Uygulaması, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Enarun, D., 1987. Bina Tasarım Aşamasında Hacim içindeki Doğal Işık Dağılımını Belirlemek için Bir Model, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fıratoğlu A.Z.,Yeşilata, B.,2003. Maksimum Güç Noktası İzleyicili Fotovoltaik Sistemlerin Optimum Dizayn ve Çalışma Koşullarının Araştırılması, *Fen ve Mühendislik Dergisi*, cilt:5, sayı:1, s.147-158.
- Hankins, M., 1991. Small solar electric systemsfor Africa, *Commen Wealth Science Council Published*, United Kingdom, p. 105.
- Hongxing Yang, Wei Zhou, Lin Lu, Zhaohong Fang, 2008. Optimal Sizing Method Forstand-Alonehybrid Solar–Windsystemwith LPSP Technology by Using Genetical Gorithm *Solar Energy*, Volume 82, Issue 4, Pages 354-367.
- Kadırgan, F., 2007. Güneş Enerjisi Teknolojileri, İ.T.Ü.' de Yapılan Çalışmalar ve Binalarda Uygulamaları, *VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, s.246.
- Karamanav, M., 2007. Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Koç,A., Karakaya, F., Altun, H., 2007. Fotovoltaik Pil Teknolojileri ve Yenilenebilir Enerji Politikaları, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 12. *Ulusal Kongresi*, Eskişehir.
- Koryürek, E., 2008. Fotovoltaik Sistemlerin Binalarda Kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Köse, S., 1986. Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Küpeli, A.Ö., Güneş Pilleri ve Verimleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Luque, A., Hegedus, S., 2002. Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering, John Wiley&Sons, Inc, 2002.
- Markvart, T., 1994, Solar Electricity, *John Wileyand Sons Ltd. Published*, England.
- Messenger, R. A.,Ventre, J., 2005. Photovoltaic Systems Engineering, Second Edition, *Taylor & Francis e-Library*.
- Nakir, İ., 2007. Fotovoltaik Güneş Panellerinde Gts ve Mgts Kullanarak Verimliliğin Arttırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Oktik, S., 2001. Güneş Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri, *Temiz Enerji Vakfı Yayınları*, s.40, Ankara
- Okyay, Y., 2006. Kütahya Koşullarında Fotovoltaik Sistemin Deneysel İncelenmesi ve Ekonomik Analizi, *Yüksek Lisans Tezi* , Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya
- Özdemir, Ş., 2007. Fotovoltaik Sistemler için Mikrodenetleyicili En Yüksek Güç Noktasını İzleyen bir Konvertörün Gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Öztürk., H. Hüseyin, 2008. Güneş Enerjileri ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Öztürk, A., Dursun, M., 2011. 2,10 ve 20 Kva'lık Fotovoltaik Sistem Tasarımı. *Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Elazığ, Mayıs 2011, s.3.
- Quaschnig, V., 2005. Understanding Renewable Energy Systems, Toronto, *On, Canada*, s.117.
- Sağlam, Ş., 2006. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Aydınlatma Sisteminin Bulanık Mantık İle Kontrolü, *Doktora tezi*, M.Ü., Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sakınç, E., Sözen, M.Ş., 2008. Güneş Enerjili Etken Sistemlerin Yapılarda Tasarım Ölçütü Olarak Değerlendirilmesine Yönelik Bir Yaklaşım, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Cilt:23, Sayı:1.
- Şen, H., 2009. Temiz Dünya Ekoloji Derneği, Temiz Dünya Rehberi, *Güneş Enerjisi DSYG Yayınevi*, s.34-39, 44,47,48., İstanbul.
- Tercan, M.B., 2000. Güneş Pili Karakterizasyon Yöntemleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Varınca, K.B., Gönüllü, M.T. 2006. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, *I.Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerji Kongresi*, ESOGÜ, Eskişehir, 21-23 Haziran, s.270

Yamegueu, D., Azoumah, Y., Py. X., Zongo, N., 2011. Experimental Study of Electricity Generation by Solar PV/Diesel Hybrid Systems Without Battery Storage For off-Grid areas Renewable Energy, Volume 36, p.1780-1787.

### **İnternet Kaynakları**

URL-1. (<http://www.erzincan.gov.tr>). Erzincan Valiliği (22.03.2012)

URL-2. (<http://www.gunesenerjisi.gen.tr>). Güneş Enerjisi ve Teknolojileri (26.09.2011)

URL-3. (<http://www.robotiksistem.com/gunes>). Güneş Pilleri (25.10.2011)

URL-4. ([http://www.emo.org.tr/ekler/c7f5e8dcf51a49\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/c7f5e8dcf51a49_ek.pdf) ). Elektrik Mühendisleri Odası (26.03.2012)

URL-5. (<http://www.yildiz.edu.tr/~okincay/dersnotu/gunespilleri1bolum.pdf>). Güneş Pilleri (10.03.2012)

URL-6. (<http://www.dcdenergy.com/g%C3%BCnes/GunesPilininiTipleri.pdf>). Güneş Pili Çeşitleri (20.11.2011)

URL-7. ([http://www.alternaturk.org/gunes\\_pili\\_malzeme.php](http://www.alternaturk.org/gunes_pili_malzeme.php)). Güneş Pili Malzemeleri (30.11.2011)

URL-8. (<http://www.unienerji.com/?p=186>). Güneş Pili Yapımı için Malzemeler (21.11.2011)

URL-9. (<http://web.itu.edu.tr/~kaymak/files/fotovoltaik.pdf>). Fotovoltaik Elektrik Üretiminde Etkili Olan Parametreler (20.02.2012)

URL-10. (<http://elektrikbilim.com/457-gunes-pilleri-gunes-enerjisi>) Elektrik Elektronik Bilim Teknik Paylaşım Platformu (20.02.2012)

URL-11. (<http://www.elektrikport.com>). Güneş Takip Sistemleri (03.04.2012)

URL-12. (<http://gunesenerji.tk/gunes-enerjisi-urunleri>). PV Güneş Enerjisi (15.12.2011)

URL-13. (<http://www.eie.gov.tr>) Enerji İşleri Etüt İdaresi (05.03.2012)

## **ÖZGEÇMİŞ**

Alpay ÖZTÜRK 07.05.1977 tarihinde İskenderun'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da, tamamladı. 2000 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Öğretmenliği bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Erzincan Üniversitesine Okutman olarak atanan Alpay ÖZTÜRK, evli ve bir çocuk babasıdır.