

T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BATMAN'DA FARKLI TEKNOLOJİLERE SAHİP FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Hakkı ÖZTÜRKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Haziran-2016
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hakkı Öztürker tarafından hazırlanan "Batman'da Farklı Teknolojilere Sahip Fotovoltaik Modüllerin Performans Karşılaştırması" adlı tez çalışması …/…/… tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Doç.Dr. Cem TOZLU	……..
Danışman Doç.Dr. Osman PAKMA	.....
Üye Doç.Dr. Ömer GÜLLÜ	……..

Prof. Dr. M. Tahir NALBANTÇILAR
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hakkı Öztürker

Tarih: 02.06.2016

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Batman'da Farklı Teknolojileri Sahip Fotovoltaik Modüllerin Performans Karşılaştırması

Hakkı ÖZTÜRKER

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Osman PAKMA

2016, 74 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Cem TOZLU

Doç. Dr. Ömer GÜLLÜ

Doç. Dr. Osman PAKMA

Bu tez çalışmasında Batman ilinde farklı teknolojilere sahip kurulu toplamda 6,46 kWp güce sahip şebeke bağlantılı sistemin bir yıllık verileri alınmış ve modül performans karşılaştırmaları dış parametrelere göre değerlendirilmiştir. Sistem 2,15 kWp tekli kristal silisyum, 2,15 kWp çoklu kristal silisyum ve 2,16 kWp ince film amorf silisyumdan oluşmuştur. Sistemden elde edilen veriler Haziran 2013-Mayıs 2014 tarihleri arasında 15'er dakika aralıklarla ölçülmüştür. Aynı zamanda gelen güneş ışınımı şiddeti değerleri de ölçülmüş, bu değerler yardımıyla sistem verimliliği ve modül performansları aylara göre karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde her bir modülün aylara göre performanslarında önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Batman, Fotovoltaik sistem, Güneş enerjisi, Güneş hücreleri, Performans Oranı.

ABSTRACT

MS THESIS

PERFORMANCE COMPARİSON OF PHOTOVOLTAİC MODULES OF DİFFERENT TECHNOLOGİES İN BATMAN, TURKEY

Hakkı Öztürker

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHYSİCS

Advisor: Assoc. Prof.Dr. Osman PAKMA

2016, 74 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Cem TOZLU
Assoc. Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ
Assoc. Prof. Dr. Osman PAKMA

In this thesis study one year data of network connected system with different technologies in Batman province which has 6.46 kWp power and their module performance comparisons were evaluated according to external parameters. The system consists of 2.15 kWp single crystal silicium, 2.15 kWp multiple crystal silicium and 2.16 kWp thin film amorphous silicium. The data obtained from the system were measured in 15 minute intervals between June 2013 and May 2014. At the same time solar radiation magnitude was measured and with the help of these data system efficiency and module performances were compared on monthly basis. In the analyses performed it was determined that performances of each module demonstrated significant variety on monthly basis.

Keywords: Batman, Photovoltaic system, Solar energy, Solar cells, performance rate.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada Batman Özel Çözüm İlköğretim Okulu çatısına kurulu 6,45 kWp güce sahip Güneydoğu Anadolu bölgemizde Batman ilindeki ilk şebekeye bağlı fotovoltaik güç sisteminde bulunan farklı teknolojilere sahip modüllerin performans karşılaştırılması ve genel performansı değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan sistem üyesi olduğum Batman Temiz ve Yenilenebilir Enerji Derneği'nin Dicle Kalkınma Ajansı'ndan (DİKA) sağlamış olduğu "Batman İlinde Kurulu Değişik Güneş Enerjisi Modüllerinin Performans Karşılaştırması" isimli ve DİKA-2011-DFD/45 nolu projesinden sağlanmıştır. Bu nedenle Dicle Kalkınma Ajansına ve Batman Temiz ve Yenilenebilir Enerji Derneğine teşekkürlerimi sunarım.

Bu değerli çalışmayı bana layık gören, yoğun çalışma temposu içerisinde bana zaman ayıran ve yüksek lisans öğrenimim boyunca desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım ve yararlanacağım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Osman PAKMA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca bana yardımcı olan Doç. Dr. Ömer Güllü, Yrd. Doç.Dr. İsmail Arsel, Doç. Dr. Nevzat Damla, Yrd. Doç. Dr. Cihat Özaydın hocalarıma ve öğrenim hayatım boyunca bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan aileme teşekkür ederim.

Hakkı ÖZTÜRKER

Batman - 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vi**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**

ÇİZELGE DİZİNİ ..... **xi**

KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ ..... **xii**

1. GİRİŞ ..... Error! Bookmark not defined.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Yöntemi 3

2. TEORİK BİLGİLER **5**

2.1. Güneş Enerjisi 5
2.1.1. Güneş Enerjisi Potansiyeli 7
2.1.2. Güneş Açıları 9
2.1.3. Güneş Işınımı 11
2.2. Güneş Enerjisinden Yararlanma 12
2.2.1. Güneş Kollektörleri 12
2.2.2. Fotovoltaik Güneş Hücreleri 13
2.3. Fotovoltaik Sistemler 14
2.3.1. Şebeke Bağlantılı Sistemler 15
2.3.2. Şebeke Bağımsız (Ada) Sistemler 17
2.3.3. Hibrit Sistemler 18
2.4. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri 19
2.4.1. Fotovoltaik Hücreler 19
2.4.1.1. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri 22
2.4.1.1.1. Kristal Silikon Hücreler 22
2.4.1.1.1.1. Tekli Kristal Yapılı Hücreler 22
2.4.1.1.1.2. Çoklu Kristal Yapılı Hücreler 23
2.4.1.1.2. İnce Film Hücreler 24
2.4.1.1.3. Amorf Yapılı Hücreler 24
2.4.2. Eviriciler 25
2.4.3. Aküler 26
2.4.4. Kablolama Özellikleri 27
2.4.5. Uzaktan İzleme ve Kontrol 29
2.5. Fotovoltaik Sistemlerde Elektriksel Parametreler 31
2.5.1. Güneş Hücresinin Eşdeğer Devresi 31
2.5.2. Güneş Hücresinin Parametreleri ve Karakteristikleri 35
2.5.3. Güneş Hücrelerinin ve Modüllerin Verimlilikleri 37
2.6. Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Faktörler 38
2.6.1. Fotovoltaik Sistemlerde Kayıplar 39
2.6.1.1. Işınım Kayıpları 40

2.6.1.1.1. Gölgelenme Kayıpları....41
2.6.1.1.2. Yansıma Kayıpları....42
2.6.1.1.3. Spektrum Kayıpları....43
2.6.1.1.4. Gölgelenme Kayıpları....43
2.6.1.2. Sistem Kayıpları....44
2.6.1.2.1. Sıcaklık Kayıpları....44
2.6.1.2.2. Kablo Kayıpları....45
2.6.1.2.3. Modül Özelliklerinde Yaşanan Teknik Kayıplar....45
2.6.1.2.4. Uyumsuzluk Kayıpları....45
2.6.1.3. Evirici Kayıpları....46
2.7. Türkiye'de Güneş Enerjisi Mevzuatı ve Projelendirme Aşamaları....47
2.8. Fotovoltaik Sistemlerde Performans Değerleri....49

3. YÖNTEM 53

3.1. Kurulum Yeri 53
3.2. Sistem Bileşenleri 53
3.2.1. Fotovoltaik Modüller 53
3.2.2. Eviriciler 55
3.2.3. Sensörler, Veri Toplama ve Uzaktan İzleme 58

4. SONUÇLAR 61

4.1. Yıllık Güneş Işınımı ve Sıcaklık Ölçüm Sonuçları 61
4.2. Sistem Sonuçları 61
4.3. Performans Değerlendirmeleri 62
4.3.1. Tekli Kristal Silisyum Örgü Sistemi 62
4.3.1. Çoklu Kristal Silisyum Örgü Sistemi 65
4.3.1. İnce Film Amorf Silisyum Örgü Sistemi 67
4.3.1. Karşılaştırmalı Performans Değerlendirmesi 69

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 70

KAYNAKLAR 72

ÖZGEÇMİŞ 74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No — Sayfa No

Şekil 1.1. Güneş enerjisi potansiyel atlası 2
Şekil 1.2. Güneş hücresi teknolojisinin gelişimi 3
Şekil 2.1. Güneş ışınım spektrumu 5
Şekil 2.2. Yıllık güneş ışınımının dünya üzerindeki dağılımının yatay düzleme Yansıtılması 6
Şekil 2.3. Eğimli yüzeyde türetilmiş güneş açıları 10
Şekil 2.4. Güneş ışınımının atmosferi geçerken aldığı yolun değişimi 11
Şekil 2.5. Düzlemsel güneş kollektörleri ve yapısı 13
Şekil 2.6. Konya organize sanayi bölgesi 1 Megawatt güneş enerji santrali 14
Şekil 2.7. Güneş hücresi, Modül ve Güneş dizisi 15
Şekil 2.8. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem 16
Şekil 2.9. Şebeke bağlantılı sistem 17
Şekil 2.10. Şebekeden bağımsız (Ada) Sistem 18
Şekil 2.11. Rüzgar türbini ve panellerden oluşan Hibrit sistem yapısı 19
Şekil 2.12. Fotovoltaik hücre,Modül,Panel ve Dizi oluşumu 20
Şekil 2.13. Fotovoltaik hücre yapısı 21
Şekil 2.14. Tekli kristal güneş hücre yapılı modül 23
Şekil 2.15. Çoklu kristal güneş hücre yapılı modül 24
Şekil 2.16. İnce film hücreler 24
Şekil 2.17. Evirici 25
Şekil 2.18. Solar Aküler 27
Şekil 2.19. Modül Kabloları 28
Şekil 2.20. Modül bağlantıları ve DC kablolar 28
Şekil 2.21. Lokal izleme ünitesi 29
Şekil 2.22. Genel izleme ekranı 30
Şekil 2.23. Uzaktan iletişim ve İzleme yöntemi 30
Şekil 2.24. Silisyum diyot akım ve gerilim eğrileri 32
Şekil 2.25. Karanlık ortamda eşdeğer devre şeması ve grafiği 33
Şekil 2.26. Güneş ışığı altında eşdeğer devre şeması ve grafiği 34
Şekil 2.27. Genişletilmiş eşdeğer devre şeması 34
Şekil 2.28. STC altında kristal hücre ve amorf hücre gerilim karakteristikleri karşılaştırılması 35
Şekil 2.29. Işınıma bağlı açık devre gerilimi ve kısa devre akımı 36
Şekil 2.30. Güneş hücrelerinin doluluk faktörü 37
Şekil 2.31. Fotovoltaik sistemlerde kayıplar 40
Şekil 2.32. Gölgelenme örneği 42
Şekil 2.33. Türkiye'de güneş enerjisi pazarı 48
Şekil 2.34. Güneş enerjisi santrali proje uygulama süreci 48
Şekil 3.1. Batman Özel Çözüm Kolejine kurulan sistemin montajlama süreci 53
Şekil 3.2. Sunstring 5000 eviriciler 55
Şekil 3.3. Sistemde kullanılan SUNlog XL veri kaydedici ve uzaktan izleme için WEBlog cihazı 57
Şekil 3.4. Web ortamında sistemden alınan anlık veri görüntüsü 57
Şekil 3.5. Batman ili Özel Çözüm ilkokulunda 3 farklı modül teknolojisinden oluşan toplam 6,45 kWp gücünde fotovoltaik sistem 58
Şekil 3.6. Kablo bağlantıları (JustenBox Kutusu) 59

Şekil 3.7. Kurulu fotovoltaik sistemin kabaca dizaynı 60
Şekil 4.1. Örgü sistemlerinin Haziran 2013-Mayıs 2014 tarihleri arasında üretmiş olduğu aylık enerji miktarları 62
Şekil 4.2. Normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi ve tekli kristal silisyum Örgü sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretimi değerleri 64
Şekil 4.3. Tekli Kristal silisyum örgü sisteminin aylara göre performans oranları.64
Şekil 4.4. Normalize edilmiş örgü yüzetine düşen ışınım enerjisi ve çoklu kristal silisyum örgü sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretim değerleri 66
Şekil 4.5. Çoklu Kristal silisyum örgü sisteminin aylara göre performans oranları 66
Şekil 4.6. Normalize edilmiş örgü yüzeyin düşen ışınım enerjisi ve ince film amorf silisyum örgü sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretimi değerleri 68
Şekil 4.7. İnce film amorf silisyum örgü sisteminin aylara göre performans oranları 68
Şekil 4.8. Karşılaştırmalı performans değerlendirmesi 69

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge No		Sayfa No
Çizelge 2.1.	Fotovoltaik Hücre Çeşitleri	22
Çizelge 2.2.	Akım ve Gerilim birimleri	32
Çizelge 3.1.	Sistemde kullanılan fotovoltaik modüllerin STC altındaki teknik verileri	54
Çizelge 3.2.	DC Gerilim altında SunString 5000 eviriciye ait teknik veriler	55
Çizelge 3.3.	AC Gerilim altında SunString 5000 eviriciye ait teknik veriler	56
Çizelge 4.1.	Yıllık güneş ışınımı ve sıcaklık ölçüm sonuçları	61
Çizelge 4.2.	Tekli kristal silisyum örgü sisteminin her ay için günlük ve toplam ortalama enerji üretim değerleri	63
Çizelge 4.3.	Çoklu kristal silisyum örgü sisteminin her ay için günlük ve toplam ortalama enerji üretim değerleri	65
Çizelge 4.4.	İnce film amorf silisyum örgü sisteminin her ay için günlük ve toplam ortalama enerji üretim değerleri	67

KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

a-Si	:	Amorf silisyum
AC	:	Alternatif Akım
AM	:	Hava Kütlesi
Ah	:	Amper saat
Cos	:	Kosinüs
Cm	:	Santimetre
DC	:	Doğru Akım
DMT	:	Dünya Meteoroloji teşkilatı
$E_{şebeke}$	:	PV örgü tarafından şebekeye aktarılan enerji
E_g	:	Yasak enerji aralığı
FF	:	Doluluk faktörü
GSM	:	Mobil telefon hattı
G	:	Global ışınım
G_{SC}	:	Güneş sabiti
GES	:	Güneş enerji santrali
H_β	:	Eğimli yüzey üzerinde birim alana gelen ışınım enerjisi
I	:	Devre üzerine düşen akım
J	:	Joule, Enerji birimi
K	:	Kelvin, Sıcaklık birimi
kWh	:	Kilo watt saat
MW	:	Mega watt
MPPT	:	Maksimum güç nokta izleyicisi AC Alternatif Akım
N_{OCT}	:	Nominal çalışma koşullarında hücre ısısı
PV	:	Fotovoltaik (Photovoltaic)
PO	:	Performans Oranı
R_P	:	Paralel direnç
R_S	:	Seri direnç
STC	:	Standart test koşulları altında
Sin	:	Sinüs
T	:	Sıcaklık

T_{atm}	:	Atmosferin geçirgenliği
TEDAŞ:		Türkiye elektrik dağıtım anonim şirketi
V	:	Devre üzerine düşen voltaj
V_{OC}	:	Güneş hücresi açık devre gerilimi
Wp,e	:	Fotovoltaik örgünün STC altındaki kurulu güç değeri
WRC	:	Dünya ışınım merkezi
W_P	:	Maksimum güç
W	:	Güç
ρ	:	Albedo katsayısı
ϕ	:	Enlem açısı
ω	:	Saat açısı
δ	:	Denklinasyon açısı
ψ	:	Güneş azimuth açısı
α	:	Güneş yükseklik açısı
ϕ_z	:	Güneş zenit açısı
γ_s	:	Yüzey azimuth açısı
α_s	:	Güneşin azimuth açısı
β	:	Yüzey eğim açısı
I_{SC}	:	Güneş hücresi kısa devre akımı
η	:	Verimlilik
η_{ref}	:	STC altında maksimum güneş hücresi verimliliği
G_{STC}	:	STC altında tanımlanan ışınım gücü ($1000W/m^2$)
P_{sys}	:	Sistem çıkış gücü
β	:	Modüllerin eğim açısı
μm	:	Mikro metre
U_D	:	Diyot gerilimi
U	:	Fotovoltaik hücre bağlantı gerilimi
I_D	:	Diyot akımı
m	:	Diyot faktörü
s	:	Işınım katsayısıü

η_η	:	Anma verimi
U_L	:	Kayıp katsayısı
^{0}C	:	Santigrad
T_α	:	Modül soğurma katsayısı
T_a	:	Ortam sıcaklığı
Y_f	:	Sistem enerji üretimi
m/s	:	Rüzgar hızı
$H_{\beta,g}$	:	PV örgü yüzeyi üzerinde birim alana düşen günlük ışınım enerjisi
$\eta_{sys,a}$	:	Aylık ortalama günlük sistem verimliliği

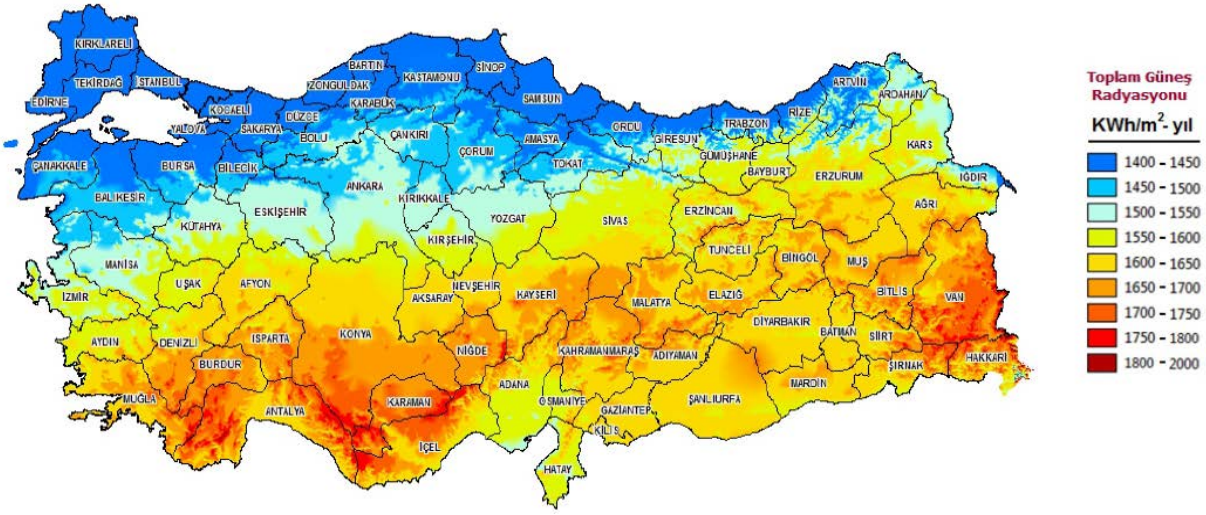
1. GİRİŞ

Günümüzde ihtiyacımız olan enerjiyi elde etmek için kullandığımız fosil yakıtların yenilenebilir olmaması, kaynaklarının hızla azalması ve gelişmekte olan teknoloji ve enerji ihtiyacının fazlalaşması ile birlikte yenilenebilir enerjiye olan ilgi gün geçtikte artmaya başlamıştır. Gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyaçlarını dış ülkelerden karşılama gereksinimleri, ithalat ve ihracat giderleri ve sınırlı enerji rezervlerinin verimli kullanılamaması ülkelerin yenilebilir enerji teknolojilerine ilgisini ve yatırımlarını arttırmıştır. Bunların yanı sıra fosil yakıtlardan enerji elde edilmesi sırasında çevreye verilen zararlar ile ortaya çıkan hava kirliliği gibi sorunlar insan sağlığını gün geçtikçe tehlikeye sokmakta ve farklı enerji arayışlarına girişimlere yol açmıştır. Ortaya çıkan ekolojik sorunların önlenmesi ile ilgili maliyetlerin yüksek olması temiz ve yenilenebilir enerji üretim sistemlerine olan ilgiyi daha da arttırmıştır.

1980'li yılların başından itibaren gelişen teknoloji ile birlikte yenilenebilir enerjiye duyulan ilgi ile birlikte ülkelerin yatırımları ile birlikte günümüzde dünyanın temel enerji ihtiyaçlarının %20-%25'i yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanmaktadır. Güneş enerji sistemleri gelişen teknoloji ile birlikte maliyetlerinde ki düşüş ile birlikte çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini uluslararası alanda kabul görmüştür. Saat, hesap makineleri, yerleşim alanlarından uzak yerlerde kurulan telekomünikasyon uygulamaları ve uzaya gönderilen uydulara entegre edilen fotovoltaik uygulamalar ilk güneş enerjisi uygulamaları olarak hayatımıza girmişlerdir.

Birçok ülke güneş enerjisi üzerine yatırımlarını geliştirmiş ve enerji ihtiyaçlarının bir kısmını yenilenebilir enerji üzerine düzenlemiş iken ülkemizde fotovoltaik teknoloji ileri seviyelere ulaşmanın başlangıcı seviyesindedir. İlerleyen yıllarda Avrupa'da ve ülkemizde fotovoltaik enerjinin çalışmaları ile birlikte 2030 yılı için belirlenmiş kurulu güç hedefi 200 Gigawatt olarak hedeflenmiş ve tahminler doğrultusunda Dünya üzerinde 100 Gigawatt sınırının geçileceği beklentisi ile çalışmalar sürdürülmektedir.

Türkiye bulunduğu coğrafi konum itibariyle sahip olduğu güneş ışınım miktarı ve enerji potansiyeli konusunda birçok ülkeden daha şanslı durumdadır. Yıllık ortalama 2640 saat güneşlenme (günlük 7 saat) ve ortalama ışınım şiddeti 1310 kWh/m² -yıl olduğu ölçülmüştür. Ülkemiz 110 gün gibi yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir ve gerekli yatırımların yapılması durumunda yılda birim metre kare ortalaması olarak 1100 kWh'lık güneş enerjisi üretebilir (Eie, 2006). Şekil 1.1'de Ülkemizdeki güneş enerjisi potansiyelinin illere göre dağılımı gözükmektedir.



Şekil 1.1. Güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA)

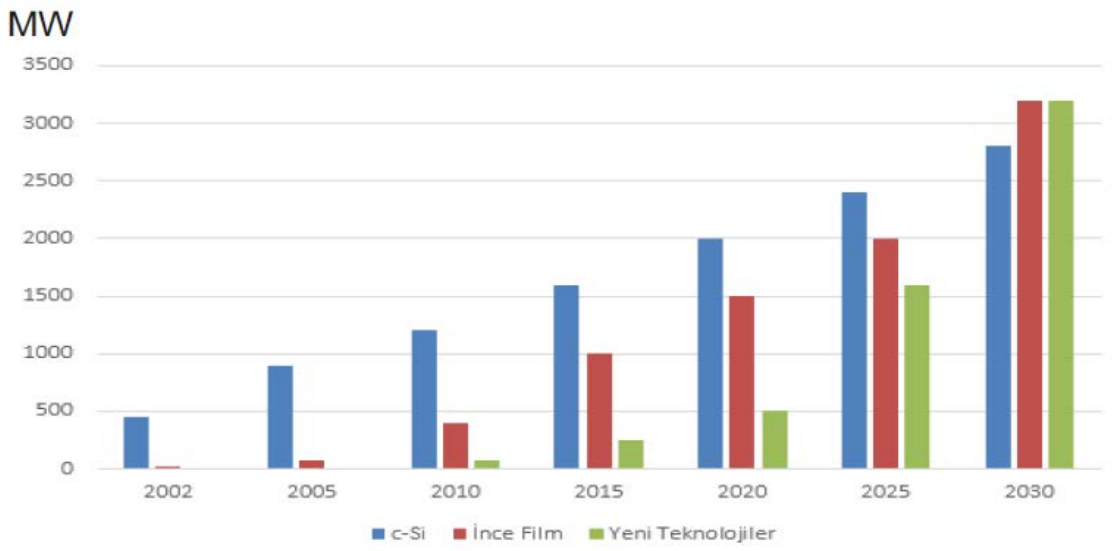
Tez çalışmasının yapılmış olduğu Güney Doğu Anadolu bölgesi Batman ilimiz dikkate alındığında yıllık enerji üretiminin kWp birim alan başına 1550-1600 kWh/m^2-yıl olduğu ve birçok şehrimize göre güneş ışınım potansiyeli açısından daha avantajlı konumda olduğu Şekil 1.1 Güneş enerjisi potansiyel atlasında gözükmektedir. Şekil 1.1'e göre 6,46 kWp gücündeki sistemimizin yıllık enerji üretiminin tahminen 10100 kWh olması beklenmektedir.

Çalışmanın yapıldığı 6,46 kWp gücündeki BIPV (Building İntegrated Photovoltaic) sistemi Batman ilinde kurulmuş olan farklı tipte teknolojileri sahip ilk fotovoltaik sistemdir. BIPV sistemler çatı üzerine ya da çatı cephelerine yerleştirilirler. Çatı üzerine kaplanan modüller binaya estetik açıdan farklı bir görünüm kazandırmaktadırlar (Messenger, 2003).

Fotovoltaik sistemler şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız (ada sistem) sistemler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Şebekeden bağımsız (ada) sistemlerde, sistem enerji ihtiyacına göre projelendirilir ve enerji ihtiyacı boyutunda kurulur. Fakat bu sistemlerde enerji üretimi, çoğunlukla tüketicilerin anlık ihtiyaçlarına eşit olmadığından dolayı genellikle depolayıcılar (aküler) vasıtasıyla kullanılırlar. Şebeke bağlantılı sistemlerde ise üretilen enerjinin depolanması görevini elektrik şebekesi üstlenmektedir. Dünya genelinde fotovoltaik sistemler şebeke bağlantılı olarak tasarlanmaktadır ve çalıştırılmaktadır. Sistemlerden elde edilen elektrik için ödenen ücret nedeni ile üretilen enerji genellikle elektrik şebekesine verilmektedir.

Güneş enerji sistemlerinin büyüklükleri birbirine paralel veya seri olarak bağlanmış paneller ile oluşmaktadır. Sistem verimliliği güneş hücrelerinin üretim aşamasında katkılanan malzemeler ile araştırılmakta ve maksimum verim elde edilmeye çalışılmaktadır. Laboratuvar çalışmaları ve gelişen teknoloji ile birlikte artan verimlilik sayesinde ve maliyet miktarlarında ki azalma ile birlikte fotovoltaik endüstrisi üzerine yapılan yatırımlar artmaktadır.

2005 yılında üretilen güneş hücrelerinin %94'ü tek ve çok kristalli güneş hücrelerinden oluşmakta iken %6 payı olan ince film teknolojisi, arge çalışmaları ile birlikte 2010 yılında dünya güneş hücresi üretiminin %20 miktarına ulaşmıştır. 2030 yılında yapılacak olan çalışmalar ile birlikte ince film teknolojisi ve geliştirilecek diğer yapılar ile birlikte üretilecek farklı yapıdaki güneş hücrelerinin kapasitesinin silisyum hücrelerden fazla olması beklenmektedir.



Şekil 1.2. Güneş hücresi teknolojisinin gelişimi (www.epia.org/)

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Yöntemi

Dünya üzerinde yaşanan teknolojik gelişmeler ve enerjiye duyulan ihtiyaç ile birlikte fosil yakıtların rezervlerinin azalması ülkelerin ve yatırımcıların yenilenebilir enerji endüstrisine olan ilgisini arttırmış ve son yıllarda yapılan yatırımlar ciddi önem b nortaya koymuştur. Ülkelerin enerji üzerine dışa bağımlılıklarının azalması için yenilenebilir enerjiye olan ilgi ve gereklilik artmıştır. Ülkeler fosil yakıtların azalması ile birlikte ilk olarak nükleer enerjiye ilgi göstermiş fakat 2. Dünya savaşı sırasında

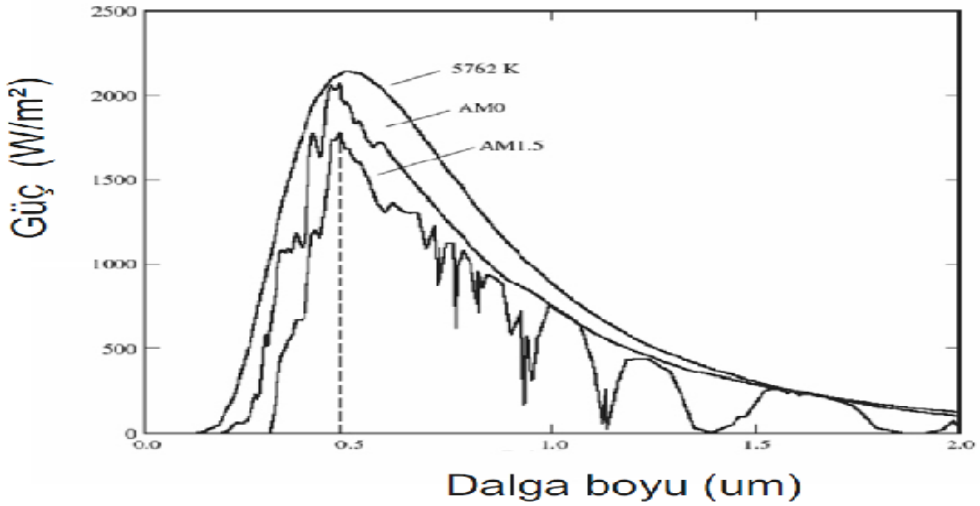
kullanılan nükleer bombanın zararları ve çevresel etkisinin uzun yıllardır sürmesiyle yenilenebilir enerji alanlarına yönelmeleri daha çok hızlanmıştır. Güneş, rüzgar, hidroelektrik, biokütle vb. gibi çevre dostu enerjilere olan duyarlılık daha çok artmıştır.

Bu çalışmada Batman ilinde bulunan Özel Çözüm İlkokulu yerleşkesi çatısında kurulu bulunan 6,46 kWp gücündeki şebeke bağlantılı sistemin bir yıllık verileri alınmış ve modül performans karşılaştırmaları dış parametrelere (ışınım vs.) göre değerlendirilmiştir. Sistem verimliliği ve modül performansları aylara göre karşılaştırılmış ve sistem verimliliğine olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma ile güneş enerjisi bakımından Güney Doğu Anadolu bölgesi Batman ili bölgesinde fotovoltaik sistemlerin uygulanabilirliği ve elde edilecek kazanımların hesaplanması amaçlanmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1 Güneş Enerjisi

Güneş ısı ve ışık yayan yüksek sıcaklıktaki bir gaz kütlesidir. Güneşin yapısında bulunan %81,76 oranında Hidrojen (H) ve %18,17 oranında Helyum (He) atomları vardır. Doğan bir füzyon reaktörü olan güneş saniyede 564 milyon ton Hidrojen (H) atomu ve 560 milyon yon Helyum (He) atomuna dönüşmektedir. Güneş, 4 protonun 1 Helyum çekirdeğine dönüşmesi (füsyon) sonucunda $3,87x10^{26}$ J enerji açığa çıkmakta ve bu enerji elektromanyetik ışınım (radyasyon) şeklinde uzaya yayılmaktadır. Dünyaya güneşten gelen enerji miktarı, dünyada kullanılan bir yıllık enerji miktarının yaklaşık yirmi bin katıdır (Anonymous, 2004).



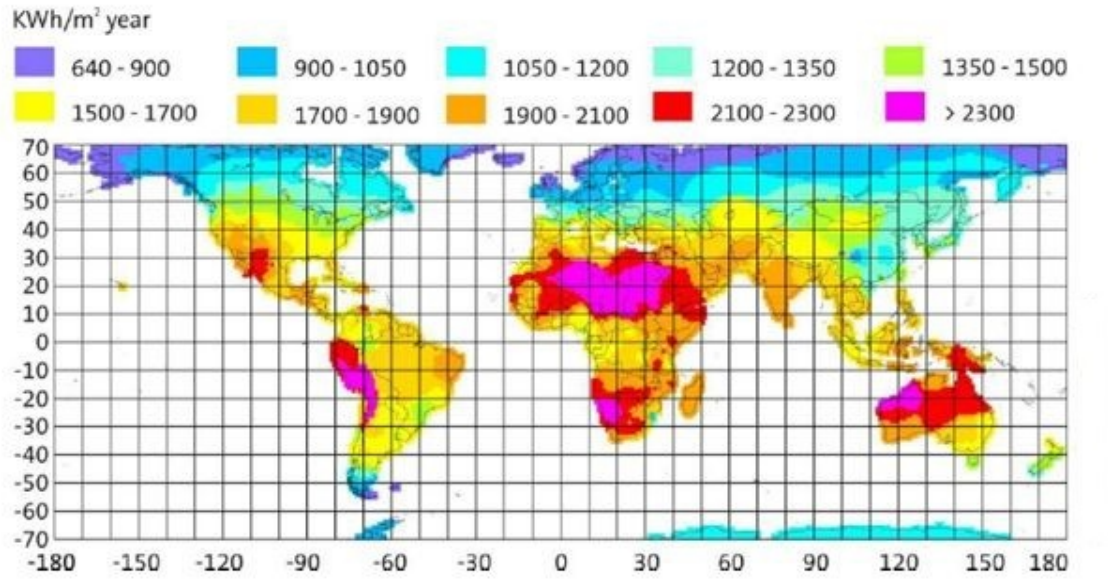
Şekil 2.1. Güneş ışınım spektrumu (Anonymous,2006)

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi güneş 5800 K sıcaklıkta siyah cisim ışıma spektrumuna sahiptir (Foukal, 1990). 5800 K sıcaklıkta siyah cisim ışımasına sahip bir gücün yaydığı ışıma enerjisi $4x10^{23}$ Kw civarındadır. Hesaplar isek 100 Watt güç harcayan bir ampulün 400 trilyon katı kadar bir ışınım gücü olarak varsayılabilir. Güneş yaklaşık küresel hacimde olduğundan dolayı homojen olarak enerjisini yayar ve dünya atmosferinde soğrulduktan sonra yeryüzüne ulaşır. Her metre kareye düşen güç ortalama 1.000 watt/m² civarındadır.

Dünya atmosferine ulaşan ve geri yansıma yapan ışınımlar ve atmosfer dışına yayılan güneş ışınımının spektral dağılımı fotovoltaik sistemlerde güç dönüşümlerini

yapan hücre seçiminde belirleyici özelliklerdendir. Dünya yüzeyindeki herhangi bir noktaya ulaşan güneş ışınımının spektral dağılımı, atmosfer dışı dağılım ve atmosferik bileşenlerin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Yeryüzüne ait bu spektral ışınım değerlerinin dağılımı fotovoltaik sistemler için önemli bir faktördür.

Güneş sabiti G_{SC}, atmosfer dışında birim alana dikey olarak gelen güneş ışınımlarının tüm dalga boylarını içeren birim zamandaki toplam güneş ışınım enerji miktarıdır. Uzay ile ilgili çalışmalar yapan kuruluş NASA, güneş sabit değerini yaptığı ölçümler sonucu G_{SC} =1353 W/m^2 olarak belirlemiştir. Bu değer 1971 yılından itibaren güneş ışınım değeri olarak hesap edilmeye başlamıştır. Dünya ışınım merkezi (WRC) ise güneş sabiti değerini G_{SC} =1367 W/m^2 olarak kabul etmektedir. Işınım hesaplamalarında güneş sabiti değeri olarak dünya ışınım merkezinin belirlediği değer kabul edilmektedir (Iqbal, 1983).



Şekil 2.2. Yıllık güneş ışınımın dünya üzerindeki dağılımının yatay düzleme yansıtılması

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi atmosfere yansıyan güneş ışınımı dünya yüzeyindeki farklılıklardan dolayı güneş enerjisi bölgesel olarak büyük farklılıklar göstermektedir.

Güneş ışınımları direkt olarak yeryüzüne ulaşamazlar. Güneş ve dünya arasındaki uzaklıktan kaynaklanan kayıp ile birlikte atmosfere ulaşan ışınım miktarı azalır. Atmosfere ulaşan ışınımın atmosfer içinde bulunan moleküller tarafından bir kısmı soğrulur ve yön değiştirerek yine enerji potansiyelinin bir kısmını kaybederler. Işınımın bir kısmı atmosfer tarafından uzaya doğru geri yansıtılır ve bir kısmı da

yeryüzüne ulaşır. Güneş paneli üzerine ulaşan ışınımın da bir kısmı panel yapısından ve hücre yapısında kaynaklı atmosfere geri yansır ve bir kısmı emilir. Emilen kısımda da yine hücre yapısında kaynaklı ışınım alt yüzeyden geçirilerek enerji kaybı yaşanır.

Gelen ışınım kaynağı güneş olduğu anlarda yeryüzünden yansıyan ışınlara genel adıyla albedo (ρ) ismi verilmiştir. ρ belirli bir yüzey üzerinden yansıyan ışınımın, yüzey üzerine düşen toplam ışınım miktarı olarak tanımlanmıştır. Fotovoltaik uygulamalar için albedo değeri önemli bir faktör olarak önem kazanmış ve yüzeyin cinsine bağlı olarak 0,2 ve 0,8 arasında farklı değerler alınarak hesaplamalarda kullanılmaktadır. Eğimli bir yüzey üzerindeki toplam (global), G, güneş ışınımı doğrudan, yayılmış ve yansıyan ışınımların toplamıdır (Rüther, 2002).

Güneş enerjisinden yararlanılma konusundaki çalışmalar gelişen teknoloji ile birlikte 1970'li yıllardan sonra hız kazanmış, güneş enerji sistemleri endüstrisi verimlilik konusunda çalışmalarını hızlandırmış ve maliyet açısından azalma göstererek dünyada çevresel bakımdan temiz bir enerji kaynağı olarak güneş enerji sistemleri kendisini kabul ettirtmiştir.

2.1.1. Güneş enerjisi potansiyeli

Ülkelerin artan nüfus yoğunluğuna bağlı enerji ihtiyaçlarının artması ve fosil yakıtların rezervlerinin azalması ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi sanayileşme ile birlikte zamanla artmıştır. Güneş, rüzgar, jeotermal, dalga ve biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli ve maksimum verimlilik ile kullanılabilmesi için araştırmalar gün geçtikçe hız kazanmıştır. Güneş enerjisinin maksimum verimlilik ile kullanılabilmesi için gerekli teknik ve fiziksel özelliklerin ve kaynağın kullanılmak istendiğini bölgenin ışınım miktarlarının yıl boyunca hesaplanması ve ölçülmesi gereklidir.

Güneş enerji sistemlerinin kullanılacağı bölgede, alanın enerji potansiyelinin belirlenebilmesi için yapılan tahminler gerçek ölçüm sonuçlarının yerini hiçbir zaman tam olarak belirleyememiştir. Yapılan tahminler, coğrafi bilgiler, modelleme yöntemleri, hesaplama ve doğrudan sonuç ölçüm alma gibi hesaplamalar projelendirme aşamalarında kullanılmaktadırlar. Fakat net sonuç almak için bu ölçüm ve hesaplamalar yeterli değildir. Dünya Meteoroloji Teşkilatı (DMT) fotovoltaik sistemlerin tasarımı ve hesaplamaları için gerekli olacak ölçümleri meteorolojik değişkenleri, ölçüm yöntemlerini, kullanılması gereken birimleri ve hesaplamaları belirlemiştir. Enerji

potansiyelini hesaplamada sistemlerin güneşlenme süreleri, doğrudan ışıma ve yayınık ışıma sürelerini, albedo ve toplam güneş ışıması değişkenlerinin ölçülmesini belirlemiş, bu ölçüm sonuçları ile birlikte yeryüzüne ulaşan toplam ışınım miktarı (irradiance) şiddetini hesaplanması sağlanmıştır.

Işınım miktarı birimi W/m^2'dir ve standart test koşullarında (STC) ölçülen değer, yazın güneşin dik geldiği anda deniz seviyesinde yeryüzüne ulaşan ışınım miktarı 1.000 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Bu ışınım "tam güneş" ya da "tepe güneş" olarak tanımlanmıştır.

Yeryüzüne ulaşan küresel güneş ışıması (Global solar radiation) ile dünya dışı güneş ışıması (extraterrestrial radiation) arasındaki ilişki atmosferik şeffaflık (transparency) ölçütünü verir ve berraklık indeksi (clearness index) olarak adlandırılır. Berraklık indeksi sadece güneş ışımasının atmosferde katettiği, hava indeksi (air mass) olarak tanımlanan fiziksel yolla ilgili değil, aynı zamanda atmosferin gaz bileşimi ve bulutluluğuyla da ilgilidir. Seçilecek olan alanın güneş iklimini doğru analiz edebilmek için berraklık indeksinden faydalanılır. Fotovoltaik modüller yatay düzleme belli bir açıyla yerleştirildikleri için, modül yüzeyine gelecek olan ışıma meteorolojik ölçümlerin hesaplamaya tutulmasıyla elde edilir.

Güneş enerjisinin potansiyelinden daha fazla verim elde edebilmek için en doğru meteorolojik iklim bilgilerinin, ışınım zaman aralıklarının ve konumunun bilinmesi gereklidir. Fotovoltaik sistemlerin boyutlandırılmasında enerji üretim tahmininde, gölgelenme etkisinin belirlenmesinde, eğim açısı optimizasyonunda da bu saatlik veya günlük güneş ışıması ölçümleri esas teşkil eder (Luque ve Hegedus, 2002).

Güneş enerjisi uygulamalarında, kendine has güneş ışıması elemanının ölçüm ve bilgisinden yararlanılır. Bu elemanların en kabul görmüşleri şunlardır;

- Aylık olarak günlük güneşlenme süresi ortalaması ve yıl içerisindeki seyri.
- Aylık olarak günlük küresel toplam güneş ışıması ortalaması ve yıl içerisindeki seyri.
- Aylık olarak günlük yayınık güneş ışıması ortalaması ve yıl içerisindeki seyri.
- Aylık olarak günlük doğrudan güneş ışıması ortalaması ve yıl içerisindeki seyri. (Alnaser , 2004)

2.1.2. Güneş açıları

Fotovoltaik sistemlerin kurulumunda güneş ışınımlarının hesaplanması ve doğru tahminlerin yapılabilmesi için sistemin modüllerinin kurulacağı açı belirlenmelidir. Bulunduğumuz yeryüzü üzerinde belirli bir noktanın konumu güneş ışınlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Güneş ışınımlarının belirlenmesinde enlem ϕ, saat açısı ω, deklinasyon açısı δ gibi temel açıların bilinmesi şarttır.

Deklinasyon açısı δ; Dünya yüzeyine gelen güneş ışınlarının ekvator düzlemi ile yapmış olduğu açıdır. Bu açı; güneşin merkezinden dünyanın merkezine çizilen bir doğru ile bu doğrunun ekvator düzlemi üzerindeki iz düşümü arasında oluşan açı ile bulunabilir. Deklinasyon açısı bir yıl boyunca $22{,}5^0$ -$23{,}5^0$ arasında değerler almaktadır (Ramsey,2003). Denklinasyon açısı 2.1'de ki ifade ile hesaplanabilir.

$$\delta = 23,45 \sin\left[\frac{360}{365}(284+n)\right] \qquad (2.1)$$

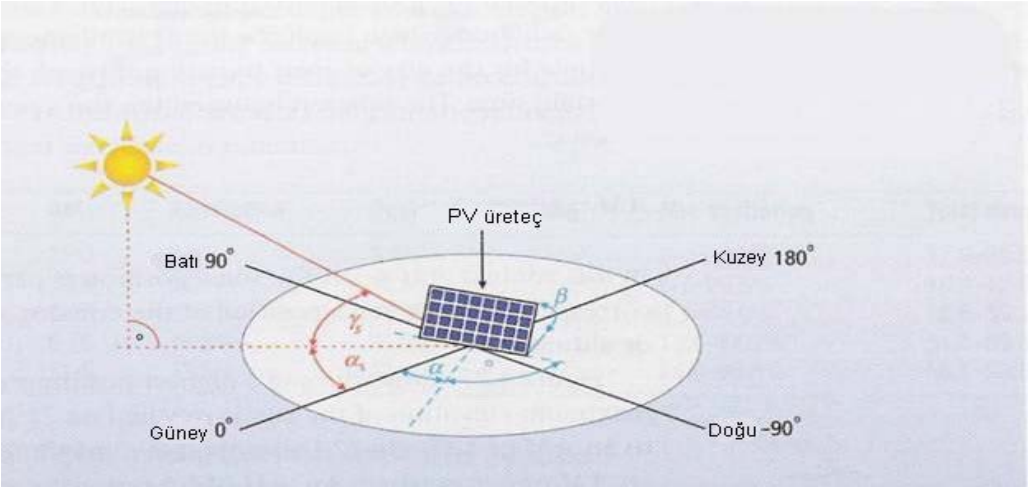
n değeri burada gün sayısı olup 1 ile 365 arasında gün sayısına bağlı değer alır. Deklinasyon açısının birimi derecedir.

Enlem açısı ϕ; Belirlenen konumun enlem derecesidir.

Saat açısı ω ;Belirli konumun boylamı ile güneş ışınlarının belirttiği boylam arasında kalan açıdır. Güneş öğlesi ile (saat 12) ilgili zaman arasındaki saat farkının 15 sayısı ile çarpılmasıyla bulunur. Her 15^0 saat açısı (boylam farkı) zaman olarak 1 saate tekabül eder. Öğleden önceleri (-) , öğleden sonra ise (+) olarak alınır.

Üç temel açının yanı sıra güneş ışınımların hesaplanabilmesi için farklı açı bağıntıları tanımlanmıştır. Bu açılar güneş zenit açısı θ_z, güneş yükseklik açısı α ve güneş azimut açısı ψ . Fotovoltaik sistemlerde en önemli koşul güneş ışınımından maksimum düzeyde faydalanılması gerekliliğidir. Bunun için güneş ışınlarının geliş açısı ve yüzey azimut açısıda (γ_s) belirtilmelidir.

Yüzey azimut açısı θ : Eğik yüzeyin normalinin yatay düzlemdeki izdüşümünün güneyle doğrultusunun yaptığı açıdır. Güneye tam dönük zaman için sıfır, batıya doğru yönelimde pozitif ve doğuya doğru yönelimde negatif değer olarak alınır.



Şekil 2.3. Eğimli yüzeyde türetilmiş güneş açıları (Duffie ve Beckman, 2013)

α : PV üretecin azimuth açısı α_s : Günesin azimuth açısı

β : PV üretecin tilt açısı γ_s : Güneş yükseklik açısı

Zenit açısı θ_z : Yatay yüzey için tanımlanan güneş geliş açısıdır (Şekil 2.3). Denklem (2.2) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\omega\cos\delta + \sin\phi\sin\delta \tag{2.2}$$

$\theta_z + \alpha = 90^0$ olduğunda güneş yükseklik açısının sinüsü Zenit açısının kosinüsüne eşittir ($\cos\theta_z = \sin\alpha$).

Güneş yüksekliği açısı α_s : Konumu belirlenen yüzeye gelen direkt güneş ışınımı ile yatay yüzey arasında kalan açıdır.

Güneş geliş açısı θ : İncelenen yüzey ile direkt gelen güneş ışınımını ile yüzeyin normali arasındaki açıdır. Denklem (2.3) veya (2.4) ifadesi ile hesaplanabilir (Duffie ve Beckman, 2013).

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\varphi\cos\beta - \sin\delta\cos\varphi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\varphi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\varphi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \tag{2.3}$$

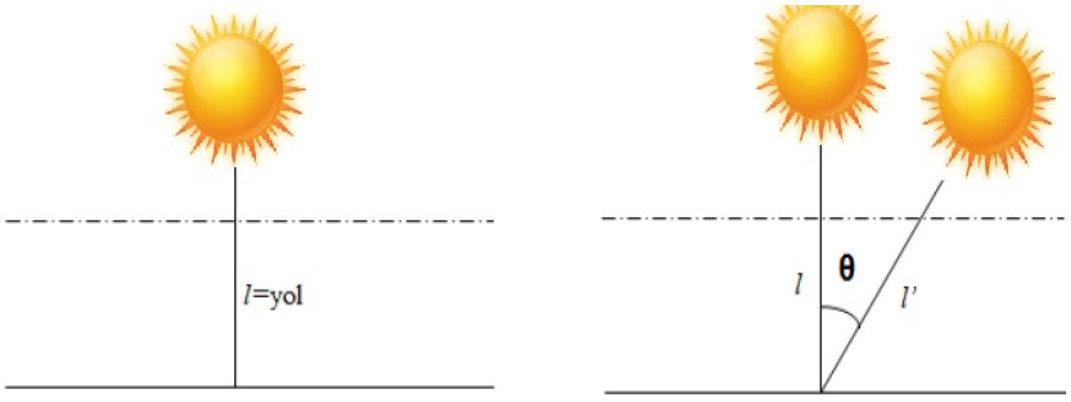
$$\cos\theta = \cos\theta_z\cos\beta + \sin\theta_z\sin\beta\cos(\gamma_s - \gamma) \tag{2.4}$$

2.1.3. Güneş ışınımı

Dünya yüzeyine gelen ışınım 5800 K sıcaklıkta siyah cisim ışıması olarak bilinmektedir. Atmosfer tarafından güneş ışınımının emilimi siyah cisim ışımasına benzemektedir ve izotropik bir olaydır. Güneş ışınları dünya yüzeyin dik geldiği anda ışınım yoğunluğu 1353 kW/m² 'dir ve bu değer güneş sabiti olarak bilinmektedir. Alınan bu ölçüm değerleri spektral olarak AM0 olarak belirlenmiştir. Hava kütlesi (AM) dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınımının yoğunluğu ve spektral miktarı etkisinin atmosferde ne kadar soğurulduğunun bir ölçüsüdür ve hesaplanabilmektedir (Green, 1981).

Hava kütlesi (AM) değeri hesaplanabilmekte olup denklem 2.5'te ki formül ile bulunabilir. Hava kütlesi değeri güneş hücrelerinin performanslarını karşılaştırmak için kullanılır. Toplam 1 Kw/m² güç yoğunluğuna normalize edilen AM 1.5 (θ=48.2^0) spektrumudur (Luque ve Hegedus, 2011).

$$\text{Hava Kütlesi (AM)} = \frac{\iota}{\iota'} = \frac{1}{\cos\theta} \qquad (2.5)$$



Şekil 2.4. Güneş ışınımının atmosferi geçerken aldığı yolun değişimi

Güneş ışınımı, atmosfere girdiği andan itibaren elektromanyetik dalga yoluyla ışınım yayılır. Dalga boyu 0,7 μm'den büyük olan ışınımlar kızılötesi, 0,4 μm'dan küçük olan ışınımlar mor ötesi ışınımlar olarak nitelendirilmiştir. Görülebilen ışınım ise mor ötesi ile kızılötesi ışınımlar arasında kalan bölgedir. Siyah cisim ışıması spektrum değeri 0,2 ile 0,3 μm arasında değişmektedir. Güneş enerjisinin yaklaşık olarak %48'i

($656 W/m^2$) yeryüzüne görülebilir spektrumda ulaşmaktadır. %6'sı ($88\ W/m^2$) mor ötesi spektrumda ve yaklaşık %45'i ($623 W/m^2$) kızılötesi spektrumda yeryüzüne ulaşır. Yeryüzüne ulaşan güneş spektrumu güneş ışınının atmosferin ne kadarından geçtiğine bağlıdır ve hava kütlesi cinsinden ölçülmektedir (İbrahim, 2006).

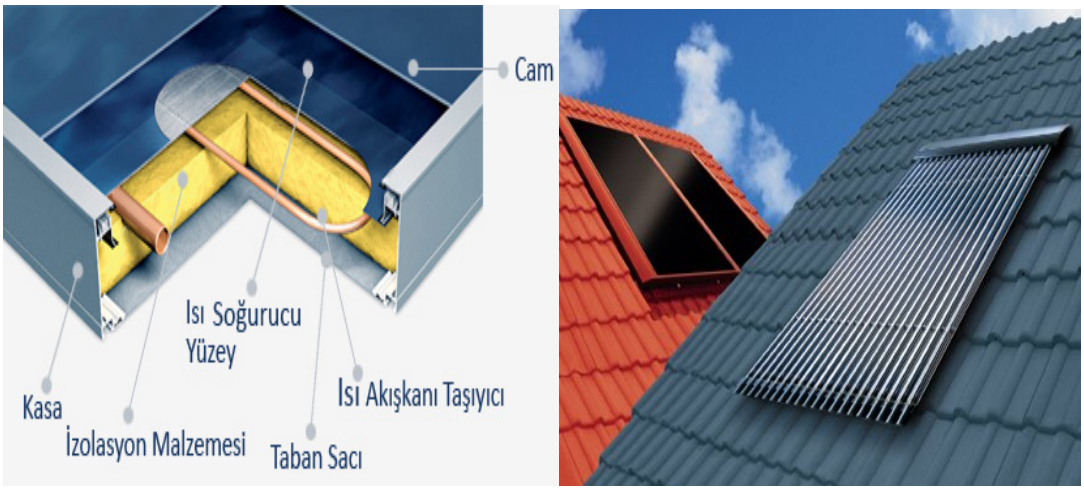
2.2. Güneş Enerjisinden Yararlanma

Dünya üzerinde kutuplar hariç gün boyunca neredeyse her gün kullanılabilme potansiyeli olan güneş enerjisi, yenilenebilir ve çevreci olması nedeniyle de yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok tercih edilenidir. Ham madde kaynağı olarak sonsuz bir enerji yapısına sahip olması dolayısıyla yatırımcılarında ilgi odağıdır. Bu nedenlerden dolayı güneşten yararlanılma konusunda teknolojik gelişmeler ile birlikte farklı alanlarda güneş enerjisinden yararlanılmaya başlanılmıştır.

Günümüzde güneş enerjisinden yararlanılma yöntemleri daha çok iki farklı alanda gelişme göstermiştir. Bu alanlardan biri, güneş panelleri kullanılarak hava ya da sıcak su ısıtma için kullanılan Güneş kollektörleridir. Kurulan sistem sayesinde tonlarca su zahmetsizce ve günlük hesaba dönüştürüldüğünde çok uygun fiyatlara ısıtılabilmektedir. Bir diğer yararlanma yöntemi ise fotovoltaik paneller vasıtasıyla güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi büyük tesisler, santraller şeklinde olabileceği gibi evlerde ve enerjiye ihtiyaç duyulan her alanda istenilen nitelikte uygulanabilmektedir.

2.2.1. Güneş kollektörleri

Güneşten yararlanma konusunda ilk uygulamalardan olan güneş kollektörleri bina ve benzeri yapılarda çatı katlarına güneşten yararlanılabilecek konumda projelendirilmiş hava ya da su ısıtmak için kullanılan sistemlerdir. Kullanılacak olan yörenin iklim şartları ve enlem özellikleri dikkate alınarak, güneşten en fazla verimle yararlanılabilecek şekilde sabit bir açıyla monte edilirler.



Şekil 2.5. Düzlemsel güneş kollektörleri ve yapısı

Şekil 2.5'de görülen güneş kollektörleri genel olarak çatı uygulamalarında daha çok kullanılırlar ve sıcaklıkları 70^{0} C'ye kadar yükselebilmektedir.

Güneş kollektörlerinde su depolama imkânı panellere ekli boyler ile depolanmakta ve ısınan suyun yoğunluğu azaldığında, su otomatik olarak takviye edilerek su seviyesi yükselmekte ve depolama tankının üst kısmından sisteme katkılanmaktadır. Depolama tankı (boyler) alt kısmındaki soğuk su bölgesi ise, yer çekimi kuvveti ile güneş kollektörünün alt kısmına ulaşıp, kollektör ve depolama tankı sıcaklığı eşit oluncaya kadar sıcak su dolaşımı devam eder. Güneş kolektörlerinde güneş ışınımının şiddeti ne kadar artarsa suyun dolaşım hızı da artar.

Çatı üzerine monte edilen güneş kollektörleri, tüm çatıya kaplama olarak monte edilebilir veya şekil 2.5'de görüldüğü gibi çatı kaplama malzemesinin üzerinde eğime uygun şekilde monte edilebilir.

2.2.2. Fotovoltaik güneş hücreleri

Güneş enerjisinden maksimum verimlilikte yararlanabilmek için güneş hücrelerinin yapısı içinde arge çalışmaları her geçen gün teknoloji ile birlikte artmıştır. Yapılan çalışmalar ile farklı güneş hücreleri yapıları ile birlikte azalan maliyet kazanımları ile birlikte fotovoltaik sistemler yenilenebilir enerji sistemleri konusunda hızla önem kazanmaktadırlar.

Güneş ışınımlarını elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemler, ilk kullanım alanları olan hesap makineleri, saatler gibi miliwatt gücündeki çalışmalar ile

başlamış, günümüzde ise gelişen teknoloji ile birlikte megawatt gücündeki elektrik santralleri gibi enerji uygulamalarına kadar gelişmişlerdir. Şekil 2.6'da ülkemizde Konya Organize Sanayi bölgesinde kurulan 1 Megawatt gücündeki güneş enerji santrali görülmektedir.



Şekil 2.6. Konya Organize Sanayi Bölgesi 1Megawatt Güneş Enerji Santrali

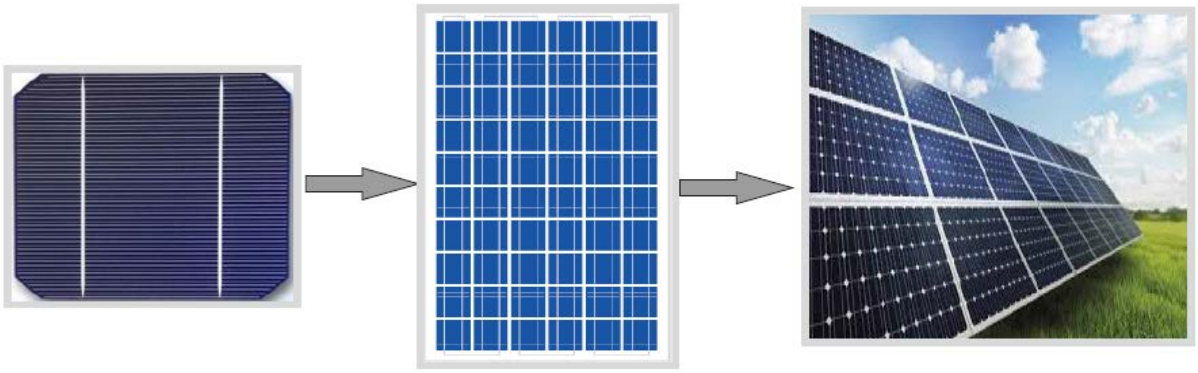
Fotovoltaik sistemleri oluşturan diziler, modüler hal ile birlikte seri veya paralel bağlanmış halde birlikte çoğaltılabilen sistemler olduğu için duyulan enerji ihtiyacına ve yeterli alan büyüklüğüne göre istenilen özelliklerde büyütülebilirler. Fotovoltaik sistemlerin kullanım talimatlarının basit olması ve bakım maliyeti gibi ihtiyaçların az olması ile birlikte enerji masrafının olmayışı üretilen enerjiden elde edilen kazanımın kWh başına enerji maliyetini de azaltmaktadır. Modüllerin kullanım ömürlerinin uzun oluşu (20-25 yıl) ile birlikte yapılan hesaplamalar doğrultusunda fotovoltaik sistemler uzun zamana yayınmış kaliteli bir enerji kaynağı olarak nitelendirilmişlerdir.

2.3. Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler isim olarak İngilizce kelime olan "photo" ve "voltaic" kelimelerinden anlamlarını almışlardır. "Photo" ışık ve "voltaic" elektrik anlamına

gelmektedir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için fotovoltaik terimi kullanılmıştır.

Fotovoltaik sistemlerin en küçük yapıları güneş hücreleridir. Güneş hücrelerinin üzerine güneş ışığı düştüğü an iki kontak ucunda yaklaşık olarak 0,7 V değerinde bir DC gerilim oluşmaktadır ve bu gerilim açık devre gerilimi olarak bilinir. İki uç arasına herhangi bir yük bağlandığında bu değer azalmakta ve ortaya çıkan değer fotovoltaik bir sistem uygulaması için yeterli olmamaktadır. Gerekli olan gerilim ve akım değerlerini elde edebilmek için güneş hücrelerini birbirine seri veya paralel olarak bağlayıp istenilen akım ve gerilim değerlerini oluşturabiliriz. Birden fazla güneş hücresinin seri veya paralel bağlanarak oluşturduğu yeni yapı modül olarak bilinir. Modüller tek başına istenilen yüksek akım ve gerilimleri karşılayamazlar ve onlarda kendi içlerinde birbirleriyle bağlanarak güneş dizisini oluştururlar. Şekil 2.7'de güneş hücresi, modül ve güneş dizi yapısı görülmektedir.



Şekil 2.7. Güneş hücresi, modül ve güneş dizisi

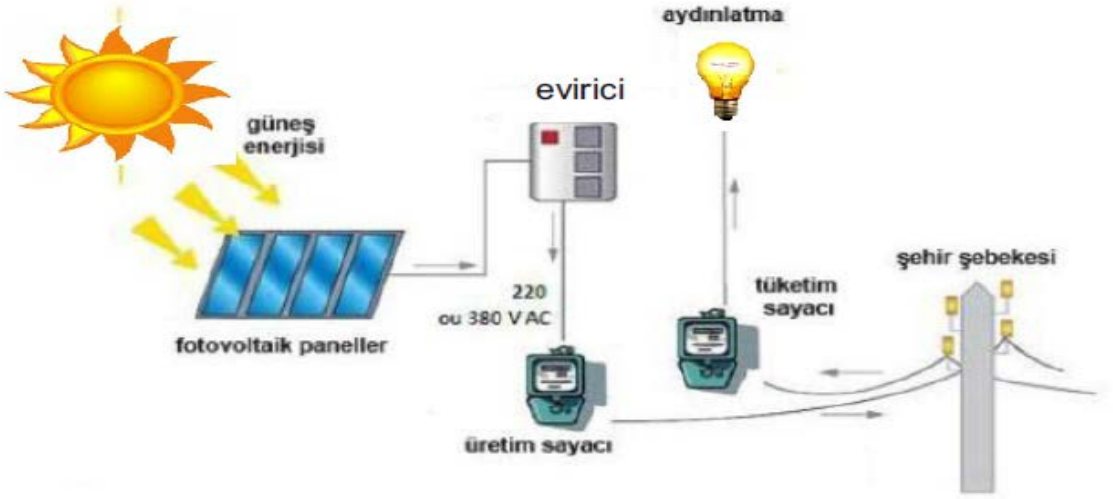
Güneş panellerine bağlanan eviriciler elde edilen enerjiyi , doğru akımı alternatif akıma çevirmek için kullanılır ve ihtiyaç olan alanlarda kullanılır. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yöntemleri kullanım alanlarına göre şebekeden bağımsız (stand alone-Ada sistemleri) , şebekeye bağlantılı (grid-connected) sistemler ve hibrit sistemler olmak üzere üç farklı alanda incelenebilirler.

2.3.1. Şebeke bağlantılı sistemler

Üretilen elektrik enerjisinin doğrudan şebekeye aktarıldığı sistemlerdir. Şebeke kaynağı ile birlikte paralel olarak çalışırlar. Sistem bileşenleri olarak paneller, bağlantı

kutuları, doğru akım kabloları, doğru akım kesici (yalıtım için), alternatif akım kabloları ve çevirici sistem bileşenleri bulunmaktadır. Çeviriciler (evirici) üretilen DC akımı şebekenin kullanmış olduğu AC akıma çevirerek şebekeyi besler yada anlık ihtiyaç duyulan enerji ihtiyacını karşılarlar. Üretilen enerji miktarı anlık ihtiyaç duyulan enerji miktarından fazla olabilir ve fazla olan enerji şebekeye aktarılır. Bu durumda kullanılan sistemde çift yönlü sayaç veya özel üretilen elektronik sayaçlar kullanılabilir.

Şebeke bağlantılı sistemlerde amaç; sistemin ürettiği elektrik enerjisini güneşin battığı, bulutlu havalar vs. gibi güneşin olmadığı anlarda ihtiyaç duyulan enerjiyi şebeke enerjisinden kullanarak sistemin çalışmasına devam etmesi olarak açıklanabilir. Şekil 2.8 ve şekil 2.9'da şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler görülmektedir.



Şekil 2.8. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem

Şebeke bağlantılı fotovoltaik uygulamalar ülkelerin yatırım destekleriyle birlikte 1990'lı yıllarda uygulamalar hız kazanmış ve Almanya başta olmak üzere Japonya ve Amerika gibi ülkelerde bina entegreli sistemler uygulanmaya başlanmıştır.

Almanya gibi güneş enerjisine devlet desteği sağlayan ülkelerde evlerde güneş enerjisi uygulamaları yatırımları daha çok hızlı artmış ve devletler üretilen her kWh enerji başına yatırımcılara belli miktarlarda sübvansiyon sağlamışlardır. Almanya da geriye dönük ödeme planları uygulanmış ve devlet yatırımcılara 0,5 $ sübvansiyon ile teşvik vermiştir. İspanya, Hollanda gibi ülkelerde de yatırımcılara destek uygulanabilir olmuştur. Güneş enerjisinin gün geçtikçe ilgi odağı olmasıyla birlikte en büyük yatırım desteğini Japonya hükümeti sistem kuran evler için toplam sistem maliyetinin %30'una

katkı sağlayarak ve elektrik faturalarının sistemin ürettiği elektrik ile şebekeden kullanılan enerji arasındaki fark üzerinden belirlemesiyle sağlamıştır (Maycock, 2002).

Enerji gereksinimlerinin daha fazla olduğu alanlarda kurulan Megawatt gücündeki sistemlerde şebekeye bağlı sistemler olarak dizayn edilmektedir.



Şekil 2.9. Şebeke bağlantılı sistem

2.3.2. Şebeke bağımsız (ada) sistemler

Şebeke hattından uzak yerlerde gerekli elektrik enerjisinin elde edilmesi için kurulan fotovoltaik sistemler ada (şebekeden bağımsız) sistemler olarak bilinirler. Şehir merkezinden uzak dağ evleri, açık denizler vs. gibi yerlerde elektrik hattının bulunmadığı alanlarda kullanılmak için tasarlanan en uygun sistemlerdir. Sistemin güvenilirliği ve güneş ışınımının olmadığı zamanlarda gerekli enerji üretilen enerjinin depolanmasını sağlayan aküler tarafından sağlanır. Akümülatörler gün boyu paneller ile şarj edilirler. Akülerin uzun ömürlü kullanılmaları için sistemde şarj kontrol üniteleri (charge controller) kullanılır. Şebeke bağlantılı sistemler gibi ihtiyaç duyulan enerji AC akım gerektiriyor ise eviriciler kullanılır. Fakat kullanılacak olan cihazlar DC akım ile çalışıyor ise eviricilere gerek yoktur.

Şebekeden bağımsız sistemler enerji ihtiyacının çok fazla olmadığı, şebeke hattına uzak ve enerji kaynaklarına uzak alanlarda kullanılmaları tavsiye edilir. Şekil

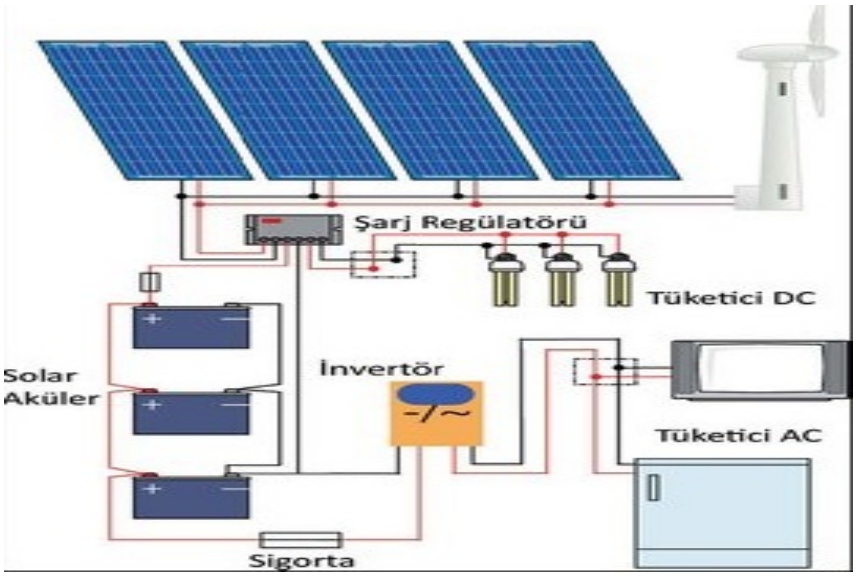
2.10’da şebeke bağımsız bir sistem ve dağ evinde kullanılan güneş panelleri gözükmektedir.



Şekil 2.10. Şebekeden bağımsız (ada) sistemler

2.3.3. Hibrit sistemler

Fotovoltaik sistemlerin yanı sıra diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının paneller ile birlikte paralel olarak çalışarak oluşturulan sistemlere hibrit sistemler denir. Sistemde elektrik enerjisini depolayıcı görev olarak yapan aküler her iki farklı sisteme de bağlı olarak çalışır. Örneğin güneş potansiyeli olan bir yerde güneş panellerinin kullanılması ile birlikte rüzgar potansiyeli olan bir alanda rüzgar türbinlerinden de yararlanılarak iki farklı sistem aynı anda uygulanabilir. İki farklı enerji üretimi birlikte depolanabilir ve aynı anda kullanılabilir. Şekil 2.11’de güneş ve rüzgar enerjilerinden oluşan bir hibrit sistem yapısı gözükmektedir.



Şekil 2.11. Rüzgar türbini ve panellerden oluşan hibrit sistem yapısı

2.4. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

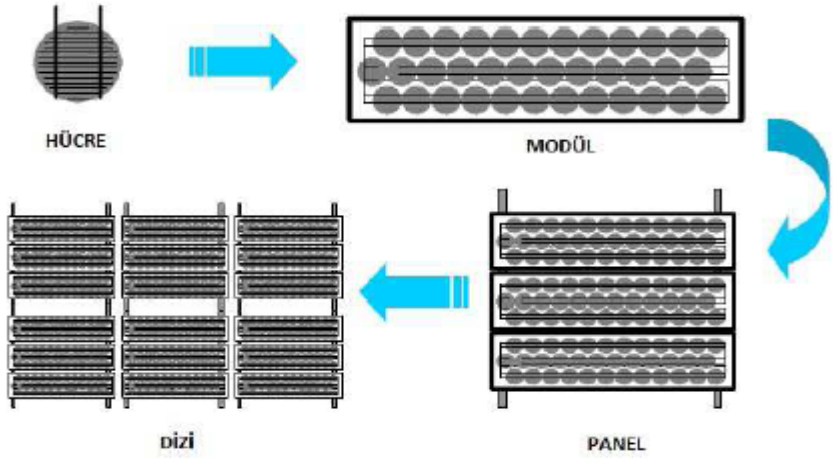
Güneş enerjisi uygulamalarında proje aşamasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biriside sistemi oluşturan bileşenlerdir. Sistemi oluşturan panellerin örgü yapısı (elektrik düzeni ve montaj özellikleri), eviriciler, kontrol üniteleri, depolama elemanları ve elektronik yük üniteleri sistem bileşenlerini oluşturmaktadır. Depolama elemanlarının kullanıldığı şebekeden bağımsız sistemlerde kullanılacak olan elektronik yükler sistem dizaynı ve gerekli enerji ihtiyacı için elektronik yük miktarı sistem dizayn ve sistem dengesi için önemlidir (Tozlu, 2004).

2.4.1. Fotovoltaik hücreler

Güneşten gelen ışınımları hücre yapısında bulunan yarı iletken malzemelerin yapısındaki özellikler ile elektrik enerjisine çeviren yapılara güneş hücreleri denmektedir. Güneş hücreleri optiksel ve elektriksel özellikleri sayesinde enerji çevrimine uygun olarak yarıiletken malzemeden yapılmış elektronik devre elemanlarıdır. Hücreler fotovoltaik ilkeye göre çalışırlar. Güneş ışınımı hücre yüzeyine ulaştığı anda hücre üzerinde yer alan uçlarda elektrik gerilimi oluştururlar. Günlük ışınım değerleri hesaplandığında deniz seviyesinde ve bulutsuz bir ortamda yeryüzüne ulaşan ışınım miktarı 1000 W/m² olarak ölçülmüştür.

Hücre üzerine ışınım düştüğünde uçlarda oluşan gerilim 0,7 V civarındadır ve uçlara elektronik bir yük bağlandığında bu değer azalmaktadır. Bu yüzden hücreler elde edilen enerji çıkışını arttırmak için hücreler birbirlerine seri veya paralel olarak bağlanır ve monte edilirler. Oluşan bu yeni yapıya güneş modülü adı verilir. Modüllerden elde edilen enerji verimini daha çok arttırmak için modüllerde kendi aralarında seri veya paralel olarak bağlanır ve fotovoltaik dizileri oluştururlar.

Hücreler güneş ışınımı aldığı andan itibaren iki elektrot arasındaki potansiyel farkın ortaya çıkması olarak tanımlanabilirler. Yarıiletken malzemeden üretilen bir p-n yapı gibi davranış gösterirler. Yarıiletken malzeme güneş ışınımının büyük bir kısmını soğurabilecek özellikte olmalıdır. Şekil 2.12'de güneş hücresi, modül, panel ve dizi yapıları gözükmektedir.

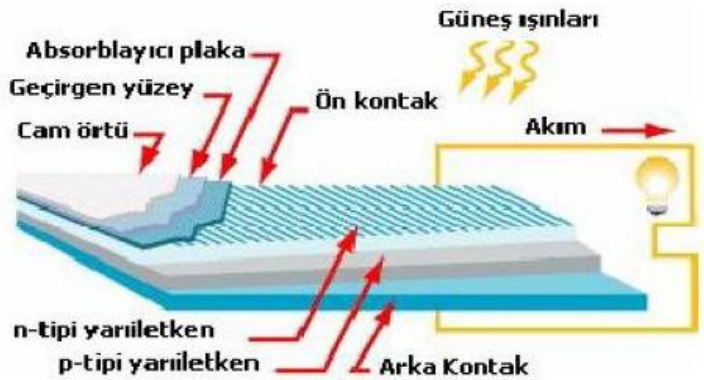


Şekil 2.12. Fotovoltaik hücre, modül, panel ve dizi oluşumu (Çelebi, 2002)

Güneş ışınları yarıiletken üzerine düştüğünde, güneş hücresini oluşturan yarıiletken maddenin yasak enerji aralığı (E_g) eşit ya da büyük enerjili fotonlar hücre tarafından soğrulur ve enerji çevrimine katılır. Fotonun hücre tarafından soğurulması ile birlikte meydana gelen elekton-boşluk taşıyıcılarının yoğunluğundan azdır. P-n eklem diyodun eklem bölgesindeki elektrik alan nedeniyle, p tipi yarıiletkende üzerine ışınım düşmesi sonucu iletkenlik bandına çıkarılmış ve boşaltılmış bölge sınırına ulaşmış azınlık taşıyıcıları elektronlar, hızla n- tipi bölgeye çekilirler. Aynı yaklaşımla, n tipi bölgede elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile değerlik bandında kalan azınlık taşıyıcıları boşluklar boşaltılmış bölgenin kıyısına ulaştıklarında p tipi bölgeye geçerler. Bu biçimde birbirlerinden ayrılmış elektron ve boşluklar, bir dış devre üzerinden

birleştirildiğinde, dış devre elemanlarından akan elektriksel yükler, doğrudan güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin kaynağıdır (Oktik, 1999).

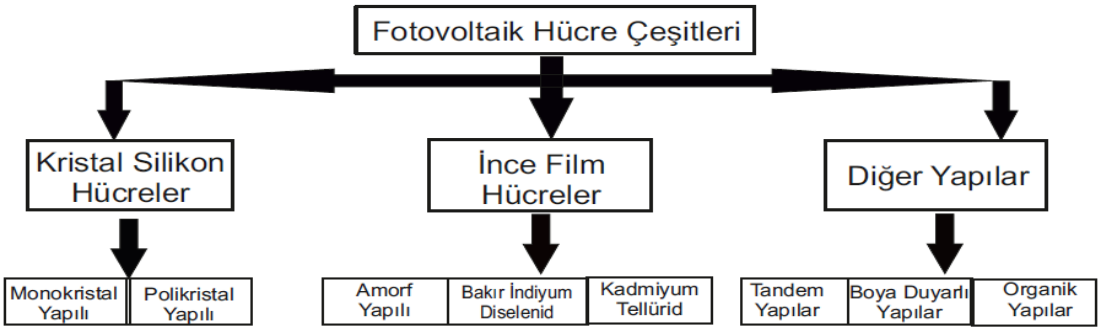
Güneş hücresi üzerinde yapılan arge çalışmaları ile birlikte birçok farklı malzemeden farklı hücre çeşidi elde edilse de günümüzde hala en çok yarıiletken yapısı silisyum olan güneş hücreleri kullanılmaktadır. Silisyum doğada en çok bulunan elementlerden biri olmakla birlikte maliyetin ucuzlamasına da etkisi de çoktur. Silisyum güneş hücresi üzerine güneş ışınımı yansıdığı an atomun son yörüngesinde bulunan valans elektronu negatif yüklenir ve silisyum üzerinde oluşan yansıma foton enerjisi olarak bilinen partiküllerden oluşur. Bu partiküller atom parçacığına çarptığında güneş pilini oluşturan tüm atomlar enerjilenir ve en kolay kopabilecek olan son yörüngede bulunan valans elektronunu koparır. Serbest hale gelen elektron, elektriksel olarak incelendiğinde meydana potansiyel bir enerji meydana getirmiş olur. Bu enerji elektriksel olarak bir aküyü şarj edebilir veya herhangi bir yük çalıştırmak için kullanılabilir. Elde edilen enerji yani elektronu hücre dışına aktarabilmek için yapılan bu elektriksel olay bize güneş pilinin yapısını açıklar. Güneş pili üretiminde pilin ön yüzeyine elektrostatik bir alan oluşturarak, elektronun serbest hale gelmesi sağlanır. Hücreler elektromanyetik ışınımı aldığı an atomlar arasındaki yapının kimyasal hali bozulur ve serbest elektronlar başka bir yörüngeye doğru hareket ederler. Işınım içinde bulunan milyonlarca foton hücrenin içine doğru hareket ederken, enerji kazanıp bir üst seviyeye geçerler ve elektronlar elektrostatik alanlara doğru akmaya devam eder ve hücre dışına ulaşırlar. Oluşan enerji akışı elektrik akımıdır. Şekil 2.13'de fotovoltaik hücre yapısı görülmektedir.



Şekil 2.13. Fotovoltaik Hücre Yapısı

2.4.1.1. Fotovoltaik hücre çeşitleri

Fotovoltaik endüstrisinin gelişimi ile birlikte yapılan arge çalışmaları, hücrelerin verimliliklerini ve üretim maliyetlerini düşürme açısından farklı güneş hücresi yapılarını ortaya çıkarmıştır. Fotovoltaik hücreler, üretildikleri yapılara göre Tablo 2.1'de ki gibi gruplandırılabilir.



Çizelge 2.1. Fotovoltaik hücre çeşitleri

2.4.1.1.1. Kristal silikon hücreler

Güneş hücreleri yapımında dikkat edilen unsurlardan en önemlisi maliyetin ne kadar az olabilmesi ve verimliliği dikkate alınarak üretilirler. Maliyet azalması demek hücre yapısında kullanılan malzemenin doğada kolay ve çok bulunması demektir. Silikon dünyada oksijenden sonra en çok bulunan elementlerden biridir. Çoğunlukla kuvars halde veya kum halde silikon dioksit bileşiği olarak bulunabilir. Kullanım ömürlerinin uzun olması ile birlikte sanayi de fotovoltaik endüstrisinde en çok kullanılan yapılardır.

2.4.1.1.1.1. Tekli kristal yapılı hücreler

Fotovoltaik endüstrisinin ilk ürünlerinden olan tekli kristal yapılı hücreler silisyum kullanılarak üretilmişlerdir. Üretim tekniği, Chrozalski tarafından çekme tekniği ile büyütülerek uygulanmış ve bu teknik ile ismi özdeşleşerek Chrozalski tekniği ile tekli kristal yapının üretimi olarak bilinmektedir. Chrozalski yöntemi ile tekli kristal yapılar uzun yıllar kullanılmış ve yeni yapılar ile kıyaslandığında verimlilik açısından biraz daha kaliteli olduğu öne çıkmıştır. Örneğin çoklu kristal yani çoklu kristal

tekniğine göre %1-%2 daha iyi verimlilik ile çalıştıkları gözlemlenmiştir. Chrozalski tekniğinin üretim aşaması uzun sürmekte olduğu için maliyet olarak biraz daha pahalı üretim sağlanmaktadır. Verimlilik esas alındığında uzun yıllar kullanılabilir olma özelliği dikkate alınarak tekli kristal yapılar uzun vadede yatırımcılar için tercih edilen hücre çeşitidir.



Şekil 2.14. Tekli kristal güneş hücre yapılı modül

2.4.1.1.1.2. Çoklu kristal yapılı hücreler

Doğada bulunan tüm kristalin bileşimler çoklu kristal yapıdadır ve bu yüzden çoklu kristal yapı maliyet bakımından daha uygun maliyetlidir. Saf eritilmiş silikon silindir ya da blok şeklinde kaba dökülerek silindir külçeler halinde üretilirler. Ve elmas kesiciler ile birkaç mikron seviyesinde kesilerek elde edilirler.

Tekli kristal yapılı hücreler çoklu kristal yapılı hücrelerden biraz daha kaliteli verim ile üretilmiş olsalar da üretim maliyeti açısından çoklu kristal yapılı hücreler daha çok tercih edilmektedir. Tekli kristal yapı hücrelerine göre ısıya daha az duyarlıdırlar ve buda daha düşük ısı toleransına sahip olduklarını bize gösterir.



Şekil 2.15. Çoklu kristal güneş hücre yapılı modül

2.4.1.1.2. İnce film hücreler

Bir alt tabaka üzerine bir ya da birkaç fotovoltaik malzeme ile üretilen yapılar ile ince filmler üretilmektedir. Yapıları ışığı absorve etmeye daha çok müsait olan bu hücreler, maliyeti düşük olsa dahi verimliliğinin az olması nedeniyle endüstri sektöründe pek tercih edilmezler. Birden fazla fotovoltaik malzeme ile üretildiklerinden çok kristalli yapılara benzetilseler de verimlilikleri azdır. Verimlilikleri %7-%15 arasında değişir.



Şekil 2.16. İnce film hücreler

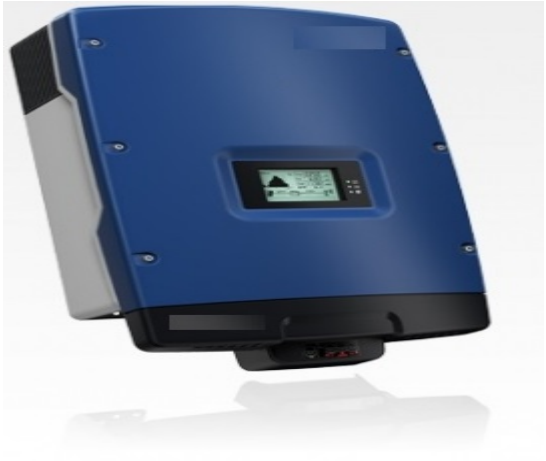
2.4.1.1.2.1. Amorf yapılı hücreler

Doğada bulunan yapılar kristal ya da amorf yapıda bulunurlar. Kristal yapı hücrelerin düzenli halde bulunduğu yapılardır. Amorf yapılar hücre yapısının düzensiz olduğu yapılardır. Bu yüzden amorf yapılı güneş hücreleri verimleri düşüktür ve daha

çok günlük hayatta küçük elektronik yapılarda kullanılırlar. Uygulama sahası olarak binalara entegre yarı saydam cam yüzeyler olarak kullanılırlar.

2.4.2. Eviriciler

Güneş hücreleri tarafından üretilen enerji DC gerilim olarak elde edilmektedir. Evlerimizde ve işyerlerimizde kullandığımız enerji ise AC gerilime ihtiyaç duyan cihazlardır. Elde edilen DC gerilimi AC gerilime çeviren fotovoltaik sistemin en önemli bileşenlerinden biri eviricilerdir. Çıkış sinyal değerleri sinüs dalga olan eviriciler en çok kullanılan evirici bileşeni olmakla birlikte kare dalga, sinüs benzeşimli ve tam sinüs dalga olmak üzere evirici çeşitleri de vardır. Şekil 2.17'de fotovoltaik sistemlerde kullanılan standart bir evirici görülmektedir.



Şekil 2.17. Evirici

Evlerimizde ve işyerlerimizde kullanmış olduğumuz cihazlar ve şebeke hatları tam/saf sinüs dalga gerilimler ile çalışmaktadır. Kare dalga ve 12, 24, 48 Volt gibi DC gerilime sahip olan eviriciler ise şebeke elektriğinin olmadığı elektrik kesintisinin sıkıntılara yol açtığı yerlerde kullanımları tercih edilmektedir.

Büyük kapasiteli enerji sistemlerinde tek bir evirici tüm sistemi karşılamaz. Güneş santralleri gibi megawatt, gigawatt kapasitesindeki santrallerde birden çok evirici gereklidir. Eviricilerde kendi içlerinde paralel bağlanarak gerekli olan güç çözümü sağlanır. Birden fazla kullanılan eviricilerde genellikle üç fazlı (tri-faze) olarak bilinen eviriciler kullanılır. Tasarıma göre kullanılmak için belirli güç aralıklarında 1Kw-10Kw

için tasarlanmış merkezi eviriciler, dizi evirici seriler ve modül eviriciler olmak üzere çeşitli türde eviriciler bulunmaktadır.

2.4.3. Aküler

Şebeke bağlantısız sistemlerde ihtiyaç duyulan enerjiden fazla enerji elde edildiği durumlarda arta kalan enerji akü ismi verilmiş depolama elemanlarına yüklenir. Aküler elektrik enerjisini depolamak için kullanılan ünitelerdir. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan akülerin yüksek şarj/deşarj verimi sağlaması, hızlı şarj özelliği bulunması, maliyet ve yüksek devir özelliklerine göre sisteme en uygun akü seçimi seçilir. Kuru tip akü, AGM (Absorbed Glass Mat Sealed Lead Acid) ve GEL (Gelled Electrolyte Sealed Lead Acid) olmak üzere çeşitli akü seçenekleri bulunmaktadır. Fotovoltaik sistemlerde kuru tip aküler tercih edilmektedir. Günlük hayatta kullandığımız kurşun-asit aküler ise düşük devir özelliği ve verimliliğinin azlığı tercihiyle güneş enerjisi sistemlerinde tercih edilmezler. Sistemin büyüklüğüne göre aküler de seri ve paralel olarak birbirlerine bağlanırlar. Akü kapasitesi Amper-Saat (Ah) olarak ölçülür. Akü maliyeti sistem açısından pahalı bir sistemdir ve üretilecek olan enerjinin büyüklüğü kadar akü ihtiyacı sistem için yüksek maliyete neden olacaktır. Akülerin verimli ve uzun ömürlü kullanılabilmesi için şarj kontrol üniteleri kurulmalı ve doluluk oranı %50 altında iken şarj halde bulunmaları önerilmektedir.

Aküler hakkında bilinen yanlış bilgi; kapasitesi 50 Ah olan bir aküden 1 saatte 50 A akım kullanılamaz ama 10 saat boyunca 5 amperlik güç çekilebilir. Bunun sebebi de akü ömürlerinin uzun olması ve sistem performansını etkilememesi içindir. Aküler batarya gerilimleri mutlaka şarj regülatörü, evirici ve modüller ile uyumlu olmalıdır.

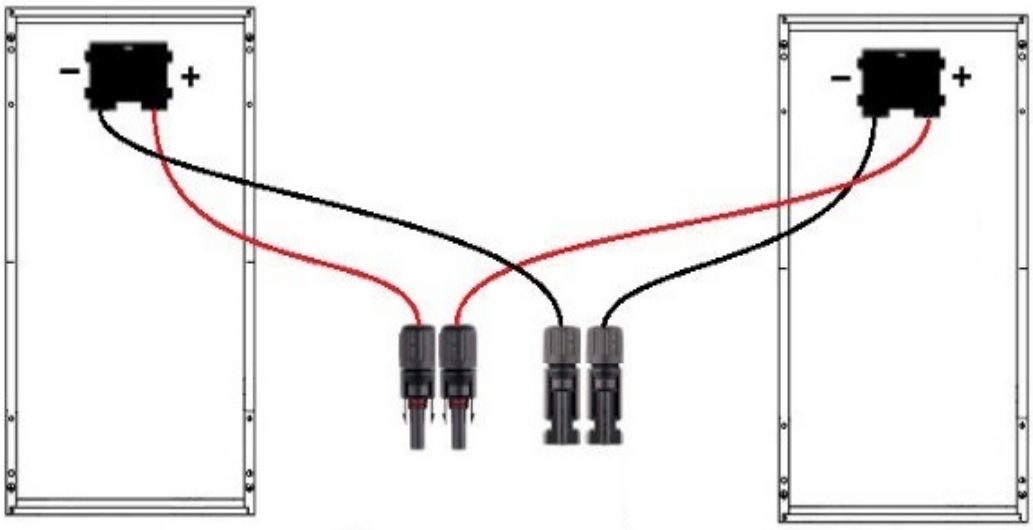


Şekil 2.18. Aküler

2.4.4. Kablolama özellikleri

Fotovoltaik sistemlerde önemli parametrelerden biride sistemde kullanılan kablolardır. Çalışan sistemin uzun yıllar kullanılabilmesi için uygun sağlamlıkta kablolar seçilmelidir. Modüllerin seri veya paralel bağlanmalarından kullanılan kablolar, Modüllerden eviriciye giden DC akımı taşıyan DC uyumlu kablolar ve eviricilerde AC gerilime çeviren enerjiyi şebekeye aktaran AC uyumlu kablolar olmak üzere sistemde 3 farklı şekilde kablo kullanılır.

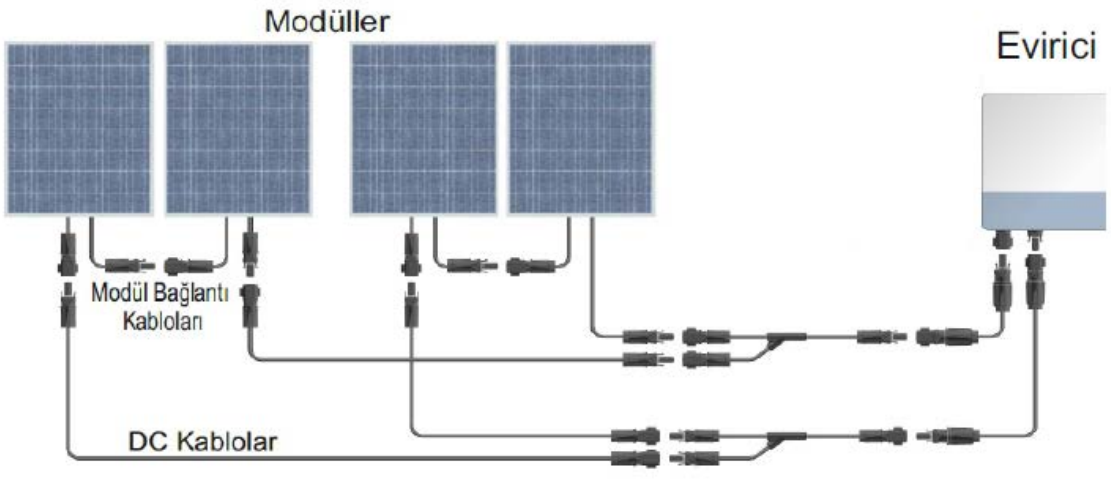
Modül kabloları üreteçler arasında kullanılan kablolar olarak bilinir ve kısa devre oluşumuna engel olmak için pozitif ve negatif kablolar ayrı şekilde bağlanırlar. Pozitif ve negatif kabloların karışmaması ve kablo düzeninin bilinmesi için siyah ve kırmızı renklerde üretilmektedirler. Kullanılan kabloların uzun yıllar sağlam kullanılabilmesi için ultraviyole ışınlardan, iklim şartlarından ve sıcaklıktan etkilenmemeleri gereklidir.



Şekil 2.19. Modül kabloları

Modül kabloları üreten firma tarafından farklı özelliklerde üretilebilirler. Sıcaklık, kablo kesitleri ve taşıyabileceği akım değerleri üretici firmalar tarafından farklı özelliklerde üretilebilirler.

Sistemde kullanılan bir başka kablo ise modülden elde edilen enerjiyi eviricilere taşıyan DC kablolardır. DC kablolardaki en önemli özellik kısa devre oluşumuna engel olmalı ve topraklama yapısına sahip olmalıdır.



Şekil 2.20. Modül bağlantıları ve DC kablolar

Eviriciler koruyucu donanım üzerinden elektrik şebekesine bağlayan kablolara da AC ana kablosu ismi verilir. Üç fazlı eviricileri kullanıldığı durumlarda düşük

voltajlı şebekeye bağlantı beş yollu kablolara, tek fazlı eviricilerin kullanıldığı durumlarda ise üç çekirdekli kablolar ile bağlantı sağlanır (German SES,2005).

2.4.5. Uzaktan izleme ve kontrol

Fotovoltaik sistemler ekran ya da internet üzerinden gerçekleştirilebilecek yazılımlar ile uzaktan bağlantı ile izlenebilir ve yönetilebilirler. Sistemi uzaktan izlemek verimliliği kontrol edebilmek ve oluşabilecek sistem arızalarına en kısa sürede müdahale edebilmek için gereklidir. Evirici kontrolleri eviricilerin üzerinde bulunan Lcd ekran ile okunarak izlenebileceği gibi internet ortamından uzaktan izleme ile de yönetilebilmektedir. Modül sıcaklığı, ortam sıcaklığı, anlık güneş ışınım değeri, rüzgar hızı vb. sistem için gerekli olan parametreler hem kaydedilebilmekte hem de izlenebilmektedir.

Uzaktan izleme sistemleri kurulmasındaki asıl amaç; sistemde oluşabilecek arızaların erken fark edilmesini sağlamak, günlük enerji üretimini izleme ve yüksek verim güvenliğini sağlayabilmek, gerekli bakımların zamanından yapılabilmesini sağlamak ve sistem verilerini kaydederek analiz yapabilmek için gerekli bir uygulamadır.

Sistemi uzaktan izleme ve yönetebilme uygulamaları birden fazla yol ile yapılabilmektedir.

Lokal İzleme: Evirici üzerinde bulunan ekrandaki değerleri uzaktan izleme yolu ile RS232 bağlantısı sağlanarak bilgisayarımızdan veya ekranlı bir ünite aracılığıyla izleyebilme olanağı sağlayan sistemdir.



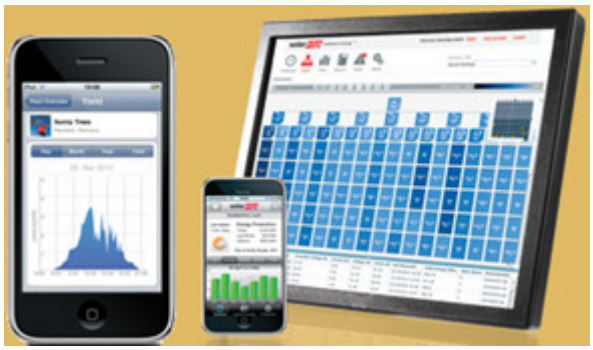
Şekil 2.21. Lokal izleme ünitesi

Genel İzleme Ekranları: Sistemin kurulduğu alanda büyük geniş ekranlı ünitelerde kullanılan izleme ekranlarıdır. RS 232 ile bilgisayar bağlantısı sağlanabilir ve büyük Lcd ekran veya projeksiyon cihazları ile büyük ekranlarda izleme sağlanabilir. Şekil 2.22'de sistemimizde kullanmış olduğumuz genel izleme ekranımız gözükmektedir.



Şekil 2.22. Genel izleme ekranı

Uzaktan İzleme & İletişim: Uzaktan kontrol ve eviriciler arası iletişim RS483 bağlantısı veya şebeke aracılığı ile izlenebilmektedir. 1000 metre ve daha uzun mesafelerde izlenebilme sağlanabilir. Birden fazla eviricinin birbirine bağlanması ile tüm eviriciler arası izleme yapılabilir. Ethernet, Internet, telefon üzerinde bağlantı, Gsm vb. sistem kontrol merkezine veya kullanıcıya uyarı ve durum mesajları gönderebilir. Uyarılar ve sistem mesajları SMS ile de gönderilebilir, cep telefonundan ya da faks makinesinden izlenebilmektedir [www.atsco.co.uk.].



Şekil 2.23. Uzaktan iletişim ve izleme yöntemi

2.5. Fotovoltaik Sistemlerde Elektriksel Parametreler

Fotovoltaik sistemler tasarım ve projelendirme aşamalarında yapılan hesaplamalarda dikkat edilmesi gereken önemli parametreler vardır. Bunlar sistem bileşenlerinin elektriksel özellikleri ve yapılarıdır. Örneğin eviricilerin çalışma gerilimleri, modüllerin en yüksek ve en düşük çalışma gerilimleri gibi parametreler sistemde kullanılacak modüllerin seçilmesinde tasarımcı için önemli parametrelerdendir.

Güneş hücrelerinin projelendirilme ve hesaplama kısımlarında kullanılan parametrelerin bazıları şunlardır;

Çalışma Voltajı (MPP Voltajı): Sistem için standart test koşulları altında maksimum enerji verimi sağlayan voltaj seviyesini belirtir. Bir modülün maksimum performans noktası MPP (maksimum güç noktası) olarak bilinir.

Çalışma Akımı (MPP Akımı): Standart test koşulları altında modülün maksimum güç noktasındaki en iyi enerji çıkışını sağladığı akım değeri olarak bilinir.

NOCT (Nominal Çalışma Koşullarında Hücre Isısı) : Nominal çalışma sıcaklığı ; 800W/m² , 20°C Ortam Sıcaklığı, 1m/sn. rüzgar hızı olarak hesaplanmıştır.

Hücre Verimliliği: Hücrenin verimliliği emilen güç ile hücre üzerine düşen ışınımın gücü arasındaki oranı ifade eder. Burada sadece hücre yüzeyi hesabı katılır.

Modül Verimliliği: Emilen güç ile modül üzerine düşen ışınımın gücü arasındaki oranı ifade eder. Toplam modül yüzeyi dikkate alınır.

Nominal ve Optimal Çıkış (W Optimal): Standart test koşullarında güneş modülünden alınan güç (STC) Wp (Watt peak) olarak gösterilir.

Performans Toleransı: Performans toleransı nominal çıkıştaki maksimum sapmayı ifade eder. Bazı üreticiler bunu %0, %2,5, %5, ve %10 olarak belirlemişlerdir.

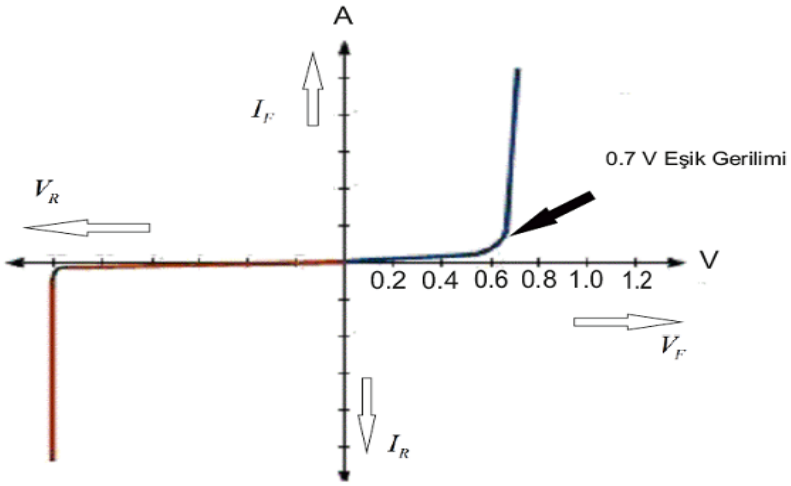
Açık Devre Gerilimi: Standart test koşulları altında açık devre gerilimi

Kısa Devre Akımı: Standart test koşulları altında kısa devre akımı

2.5.1. Güneş hücresinin eşdeğer devresi

Güneş hücrelerinin üretim aşamasında günümüzde en çok kullanılan element olan silisyum doğada en çok saf halde bulunabilen malzemedir. Silisyum hücrelerin amorf ve kristal yapıda elde edilişi ile birlikte bu yapıdaki güneş hücreleri fotovoltaik endüstrisindeki kullanım alanı %99'u bulmaktadır. Silisyum elementinin yasak enerji

bant aralığının fotovoltaik yapıya uygun olması ve güneş spektrumuna karşı olan yapısı güneş hücresi yapımında silisyumun kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. P ve N katkılı bir silisyum yapıdan oluşan güneş hücresi büyük alanlı bir silisyum diyot gibi davranış gösterir. P katkılı uca pozitif, N katkılı uca negatif gerilim verildiğinde diyot iletime geçer. Silisyum diyotlar belirli bir eşik geriliminden sonra (0,7 V) elektrik akımını iletirler.



Şekil 2.24. Silisyum diyot akım ve gerilim eğrileri

Silisyum diyodu ters polarmada çalıştırılmasında elektrik akımının yönü engellenir ve şekil 2.24'te grafiğin 3.kısmındaki eğri yönünde çalışma gösterir. Ters polarma altında belli bir gerilimden sonra diyot özelliğini tamamen kaybeder ve iletken hale gelebilir.

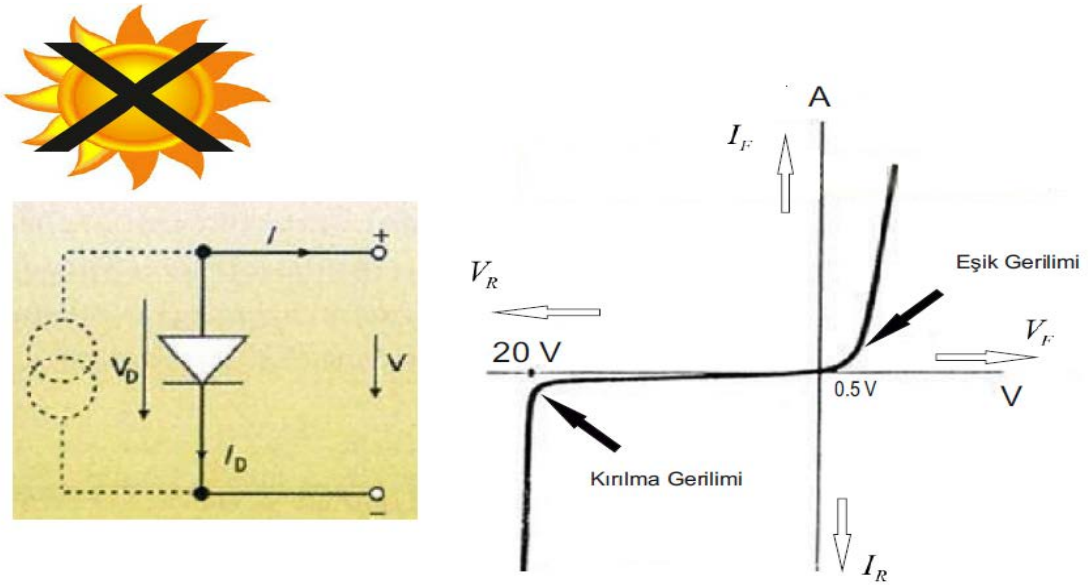
Çizelge 2.2. : Akım ve Gerilim Birimleri

	Parametreler	Formül İşareti	Birimi
Gerilim	FV Hücre Bağlantı Gerilimi	U	V
	Diyot Gerilimi	U_D	V
	Isıl Gerilimi	U_T	V
Akım	FV Hücre Bağlantı Akımı		A
	Diyot Akımı	I_D	A
	Diyot bloke yönünde doygunluk akımı		A
	Foto Akımı	$'Ph$	A
	Paralel direnç geçen akım	$'p$	A
Diğer	Diyot faktörü	m	
	Foto akım katsayısı	$c.o$	m^2/V
	Hücreye düşen ışınım gücü	E	W/m^2
	Paralel direnç	R_p	a
	Seri Direnç	R_s	Ω

Güneş olmadığı anlarda güneş hücreleri eşdeğer devre şeması olarak bir diyot gibi davranır. Tekli kristal yapılı bir güneş hücresi gerilim eşiği 0.5 V ve çöküm geriliminin malzeme yapısına bağlı olarak 12-50 V arasında olacağı söylenebilir.

$$U = U_D$$

$$I = -I_D = -I_0 * (e^{\frac{U}{m*U_t}} - 1) \qquad (2.6)$$



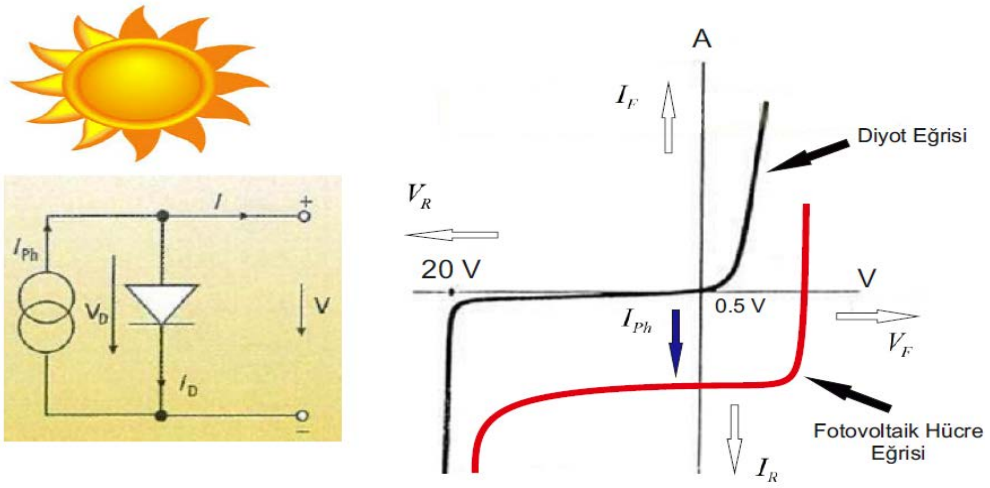
Şekil 2.25. Karanlık ortamda eşdeğer devre şeması ve grafiği

Güneş hücresi üzerine ışınım düştüğü andan itibaren , foton enerjisi hücre yapısındaki atomlardan serbest elektronlar meydana getirir. Işınım alan güneş hücresi, bir güç kaynağı ile bir diyotun paralel devresi ile gösterilebilir. Foton enerjisi, foto akımına (I_{ph}) üretir. Bu akımın değeri, ışınım miktarına bağlı olarak değişir. Diyot eğrisi, foto akımı boyunca bloke yönünde (diyagramın 4.çeyreği) kaydırılır.

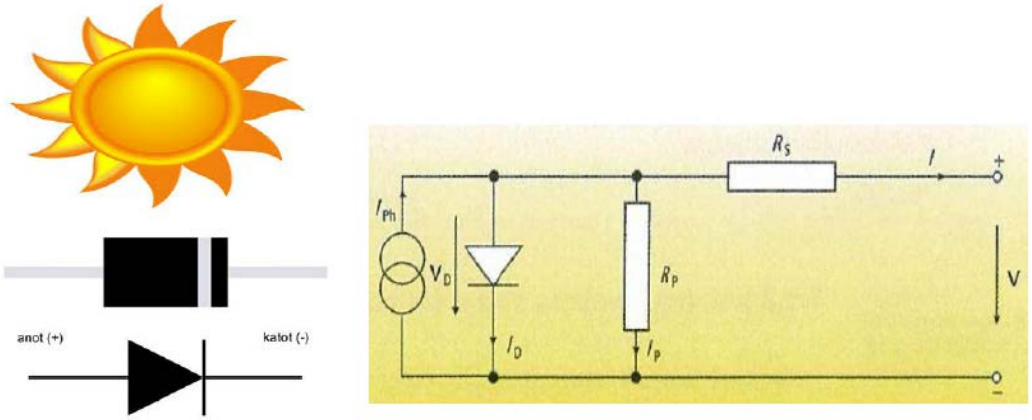
$$U=U_D$$

$$I_{ph} = c * E \qquad (2.7)$$

$$I = I_{ph} - I_D \qquad (2.8)$$



Şekil 2.26. Güneş ışığı altında eşdeğer devre şeması ve grafiği



Şekil 2.27. Genişletilmiş eşdeğer devre şeması

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \tag{2.9}$$

$$I_P = \frac{U_D}{R_P} = \frac{U + R_S * I}{R_P} \tag{2.10}$$

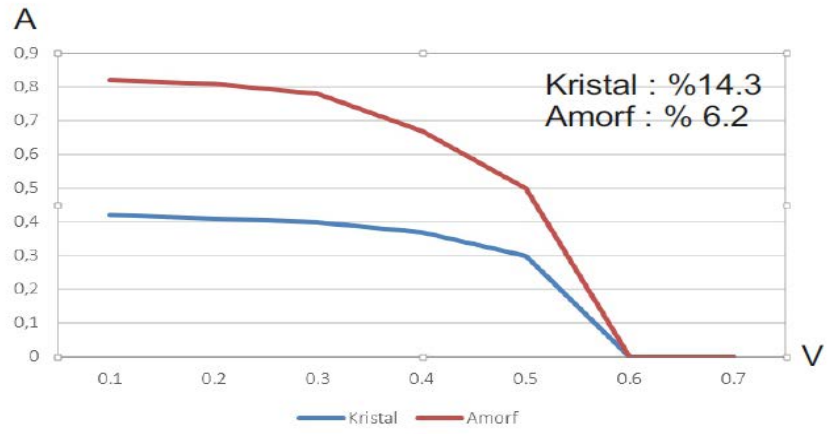
Fotovoltaik hücre yapısında kullanılan genel diyot modeli tek diyotlu modeldir. Hücre içindeki elektronlar yarıiletken malzemeden elektrik kontaklarına hareket ederken bir gerilim düşüşü meydana gelir. Bu gerilim düşüşü seri direnç R_S ile temsil edilir. Bu direncin değeri birkaç mili ohm düzeyindedir. Ayrıca, paralel direnç

R_p (R_p >>10 Ω) ile temsil edilen kaçak akımlar meydana gelir. Her iki direnç, fotovoltaik hücrenin performans eğrisinin düzleşmesine neden olur. Seri direnç ile TS EN 60891 ya da IEC 60891'de tarif edilen yöntemlerle fotovoltaik hücrelerin farklı ışık şiddeti ve sıcaklık koşulları altında geçerli akım-gerilim karakteristikleri tespit edilebilir (Sonnenenergie, 2012).

2.5.2. Güneş hücresi parametreleri ve karakteristikleri

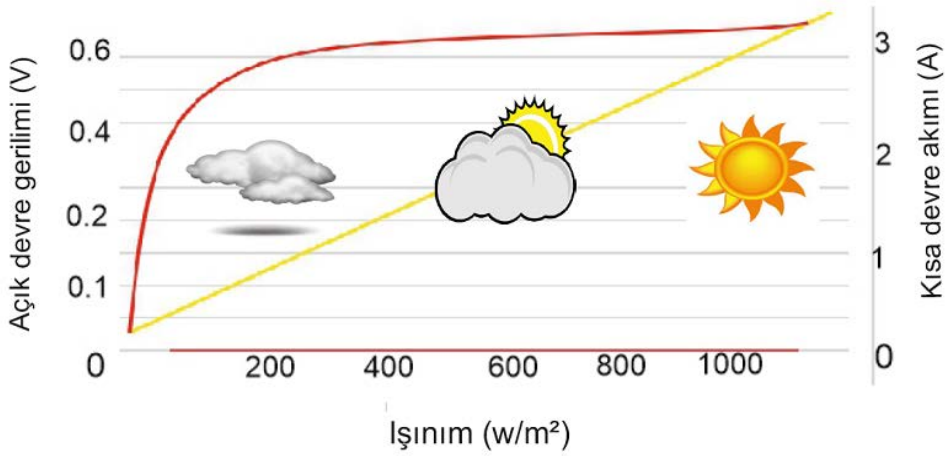
Fotovoltaik sistemlerde modül performansları ve verimlilik hesap edilirken güneş modüllerinin I-V karakteristikleri modülü oluşturn hücrelerin I-V karakteristiklerine benzer. Üzerinde herhangi bir yük bulunmayan güneş hücresi, ışınım aldığı anda yaklaşık 0,7 V'luk bir gerilim ortaya çıkarır. Açık devre gerilimi olarak iki bağlantı kontağında ölçüldüğünde 0,7 V değeri ölçülür. İki uç arasına bir ampermetre bağlanarak kısa devre yapıldığında ise bu değer değişir ve kısa devre gerilimi ölçülebilir. Fotovoltaik hücre karakteristiğini ölçmek için, değişken bir direnç, bir akım ve bir gerilim ölçüm cihazı yeterlidir.

Amorf yapılı hücrelerin karakteristik özellikleri kristal silisyum yapılı hücre karakteristiklerine göre farklılık göstermektedir. Kristal yapılı hücrelerde MPP noktası 0,7 V iken amorf yapılı hücrelerde bu değer 0,3-0,4 V civarındadır. Amorf yapılı hücrelerde bu yüzden diğer güneş hücreli yapılara göre verim daha düşüktür. Kristal ve amorf yapı arasındaki farkın azaltılabilmesi için amorf modüllerin daha fazla kullanılması ve daha fazla modül alanı gerekmektedir.



Şekil 2.28. STC altında kristal hücre ve amorf hücre gerilim karakteristikleri karşılaştırılması

Kısa devre akımı miktarı ışınıma bağlı olarak değişmektedir, yani ışınım iki katı artarsa,akımda iki katı kadar artacaktır. Açık devre gerilimi ise ışınım şiddeti miktarına karşın çok az değişimle sabit kalır. Matematiksel olarak kristal yapılı hücrelerde gerilim ve ışınım arasında işlemsel bir bağlılık vardır.

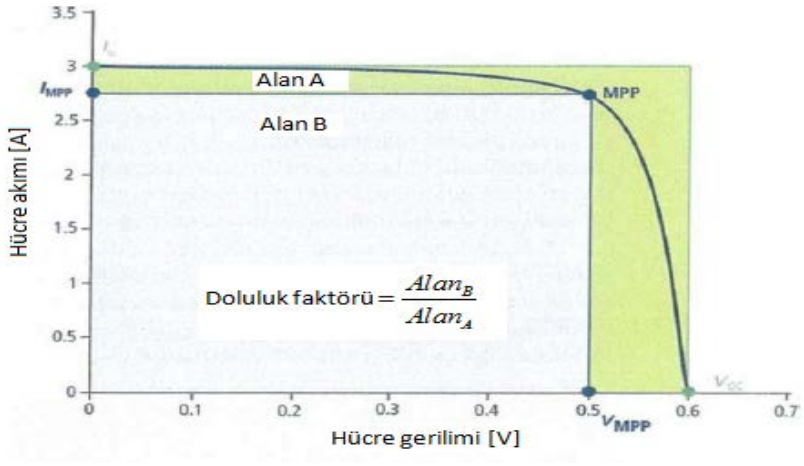


Şekil 2.29. Işınıma bağlı açık devre gerilimi ve kısa devre akımı

Güneş hücrelerinin en önemli noktalarından biride doluluk faktörü parametreleridir. Hücrelerin kalitesinin değerini bize gösterir. Doluluk faktörü, MPP gücünün kısa devre akımı ile açık devre akımının çarpımı sonucu elde edilen sonucun maksimum güce oranı olarak hesaplanır.

$$FF = \frac{U_{MPP} * I_{MPP}}{U_L * I_K} = \frac{P_{MPP}}{U_L * I_K} \qquad (2.11)$$

Doluluk faktörü, amorf yapılı hücrelerde 0,47-0,72 V , kristal yapılı fotovoltaik hücrelerde ise yaklaşık 0,76-0,87 V arasındadır. Doluluk faktörü şekil 2.30'da ki grafik açısında B alanının A alanına oranı olarak ölçülebilir.



Şekil 2.30. Güneş hücrelerinin doluluk faktörü

2.5.3. Güneş hücrelerinin ve modüllerin verimlilikleri

Fotovoltaik sistemler tasarlanırken sistem için kullanılacak olan modüllerin performans verimlilikleri önemlidir. Güneş hücrelerinin verimi (η) , hücrenin sağladığı enerjinin güneş ışınımının enerjisine oranı olarak hesaplanır. Verim, en yüksek güç , güneş ışınımı (E) ve sistemi oluşturan hücrenin alanı (A) ile hesaplanır ;

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{A * E} = \frac{FF * U_L * I_K}{A * E} \tag{2.12}$$

Güneş hücreleri sistemlerinde A için modül alanı kullanılır. Sistem tarafından elde edilen veriler ile birlikte verim bilgisi daima standart test koşulları için belirtilir:

$$\eta_n = \eta_{STC} \tag{2.13}$$

Güneş hücrelerin ya da modüllerin anma verimi ;

$$\eta_n = \frac{P_{mpp(STC)}}{A * 1.000 W / m^2} \tag{2.14}$$

Güneş hücrelerinin verimi, güneş ışınımına ve sıcaklığa bağlıdır. Işınım miktarı ve sıcaklığa bağlı olarak verim, anma veriminden verim farkı çıkarılarak bulunur:

$$\eta = \eta_{\eta} - \Delta\eta \tag{2.15}$$

Işınım katsayısı (s) ile gösterilir ve standart test koşullarından ayrılan ışınım koşulları altındaki verim değişiklikleri hesaplanabilir.

$$s = \frac{E}{1.000 W / m^2} \tag{2.16}$$

2.6. Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Faktörler

Fotovoltaik sistemlerin tasarlanma ve projelendirme aşamalarında modüllerin kullanım ömürlerinin 20 yıl civarında tahmin edilerek hesaplanmakta ve finansal projelendirme aşaması bu hesaplamalar ile yapılmaktadır. Sistemde enerji üretecek yapıların verimliliğine etki eden en küçük kayıp yirmi yıl üzerinden değerlendirildiğinde elde edilen kayıp miktarı önemli seviyelere ulaşmaktadır. Sistem verimliliğini üretilen enerji üzerinde yaşanan bu kayıplar belirler. Sistem içindeki kayıplar, tasarım, kullanılan malzeme, işçilik, çevresel etkenler gibi birçok faktöre bağlı olmakla birlikte bu kayıpların önlenmesi için sistemi hazırlayan proje uzmanları tarafından en ince ayrıntısına kadar incelenmesi gerekmektedir.

Sistemlerde verimliliği ölçmek için kullanılan en önemli parametre Performans Oran (Performance Oran/PO)'dır. Performans oranı, fotovoltaik sistemlerde elde edilen enerji üretiminin sistem tasarımı yapılmadan önce hesaplanan en yüksek enerji üretimine oranıyla elde edilir. Performans oranı fotovoltaik sistemin güneşe yönelimi ve anlık güneş ışınımından bağımsızdır ve bu sebeple farklı fotovoltaik sistemlerin karşılaştırılmasında da kullanılabilir.

Fotovoltaik sistemlerin performanslarını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler sistemlerin enerji elde edilmesinde kayıplara sebep olmaktadır. Sistemlere etkileyen faktörler sıcaklık, tozlanma, karlanma gibi çevresel, gölgelenme , AC ve DC kablo kayıpları gibi tasarım ve kullanılan malzemelerin kalitesi, modül uyumsuzluğu, evirici kayıpları gibi faktörler söz konusudur.

2.6.1. Fotovoltaik sistemlerde kayıplar

Fotovoltaik sistemlerde üretilen enerjinin verimliliği bir çok faktöre bağlıdır. Sistem bileşenlerinin nominal karakteristik değerleri, sistem konfigürasyonu, sistemin bulunduğu coğrafi alan koşulları, sistem çevresinde bulunun gölgelenmeye neden olabilecek yapılar ve sistemin çalışma esnasında oluşabilecek elektronik arızalar gibi sorunlar sistemin enerji üretiminde kayıplara sebep olup , sistemin verimliliğine etki etmektedirler.

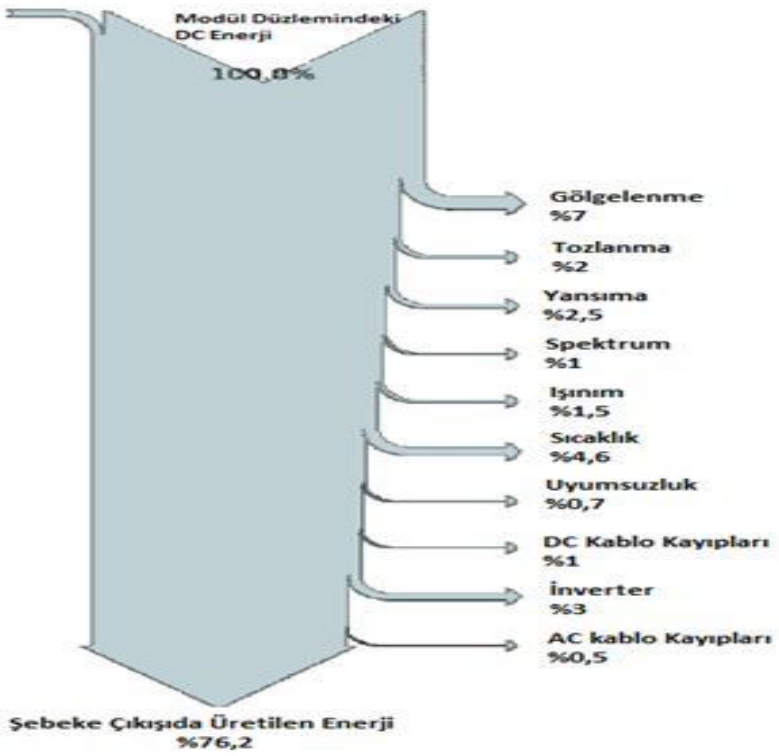
Fotovoltaik sistemlerin Performans Oranı –PO;

$$PO = \frac{Üretilen\ Enerji\ \left(\ Şebeke\ Çıkışı\ \right)}{Referans\ Enerji} \tag{2.17}$$

$$PO = \frac{Üretilen\ Enerji\ \left(\ Şebeke\ Çıkışı\ \right)}{Işınım * Sistem\ Alanı * STK'daki\ Modül\ Verimi} \tag{2.18}$$

Şebeke bağlantılı bir Fotovoltaik sistemin Performans Oranı (PO), sistemin AC çıkışında elde edilen enerjinin Standart Test Koşulları (STK ($1000W/m^2, 25^0C$,Air Mass AM 1,5)) altında sistemdeki modüller tarafından üretilen enerjiye oranıdır.

Şebeke çıkışında elde edilen fotovoltaik sistem enerjisi, standart test koşulları altında modüller tarafından elde edilebilecek enerjiden sistem kayıpları çıkarılarak bulunabilir. Fotovoltaik sistemin kayıpları ne kadar az ise sistem o kadar yüksek bir Performans oranına (PO) sahip olacaktır. Sisteme etki eden kayıpları şekil 2.31'de ki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.31. Fotovoltaik sistemlerde kayıplar (Anonymous,1989)

2.6.1.1. Işınım kayıpları

Sistem tasarımında elde edilen hesaplamalar ile günlük hayatta güneş hücresi üzerine gelen ışınım miktarı aynı değerde süreklilik göstermez. Hesaplamalar ile elde edilen modül güç çıkışında görülen farklılıklar bize ışınım kayıplarını verir.

Sistem tasarımında kullanılacak olan modüllerin özellikleri ve hücre tipini seçilirken ürünlerin genel özelliklerini öğrenmek için ürün katalogları incelenir. Kataloglarda seçilecek olan modüllerin standart test koşullarında çıkış gücü (Watt Peak, Wp), güç sıcaklık katsayısı (γp_{mpp}) , STC'de ki verimi (η_{STC}) ve standart test koşulları altındakinden daha az ışınım değerlerindeki güç değerleri verilmektedir. Normal hayatta güneş ışınım değerleri standart test koşullarından farklılık gösterebildiği için düşük ışınım karakteristik değerleri sistem performansı için önemli bir parametredir.

Normalize edilmiş, izafi ışınıma bağlı verim, hücre sıcaklığının ($T_{modul e} = 25^0 C$) ve spektrumun (AM 1,5) STK'da sabit tutulduğu durumlarda ışınımın değiştirilmesi ile elde edilir.

$$\eta_{rel(G)} = \frac{\eta_G}{\eta_{(GSTC)}} \tag{2.20}$$

$$\eta_{(G)} = \frac{P_{(G)}}{G * A_{PV}} \tag{2.21}$$

A_{PV} =Modül Alanı,

G= Işınım,

$P_{(G)}$ =G ışınım değerindeki güç çıkışı

Işınım (G) yerine Standart test koşullarındaki ışınım miktarı G_{STC} konulursa STK'da ki değer elde edilir. Modül alanı bütün modüller için aynı değerde olacağından dolayı birbirini götürür.

$$\eta_{rel(G)} = \frac{P_{(G)} / G}{P_{(GSTC)} / G_{STC}} = \frac{P_{(G)}}{G_{(\eta STC)}} \tag{2.22}$$

2.6.1.1.1. Gölgelenme kayıpları

Fotovoltaik modüller üzerine düşen ışınım ile orantılı olarak verimlilikleri değişebilir. Sistem üzerine etki eden kayıplardan biride gölgelenme kayıplarıdır. Gölgelenmeyen ve gölgelenen kısımlar arasındaki ışınım farkları gölgelenme kayıplarını meydana çıkarır.

Sistemin kurulmuş olduğu alan etrafında bulunan dağ ve tepe gibi dizilerin oluşturduğu gölgelenme ufuk gölgelenmesi olarak adlandırılır ve sistemin tamamına etki eder.

Aynı hizadaki dizi modüllerin birbiri önündeki başka bir modülü tarafından gölgelenmesi modül sırası gölgelenmesi olarak bilinir. Bu tip gölgelenmeyle ilgili hesaplarda sadece direkt ışınımın engellenmesi değil, aynı zamanda difüz ışınımında azalması hesaba katılmalıdır.

Gölgelenme fotovoltaik sistemlerin hemen hemen tüm çeşitlerinde verimliliği etkileyen önemli bir faktördür. Işınım miktarı gün ve yıl içinde güneşin hareketi nedeni ile birlikte değiştikçe gölgelenme etkisini hesap etmek net hesaplanamamaktadır.

Fotovoltaik sistemler literatüründe gölgelenme analizine geniş bir yer ayrılır. Bunun sebebi bir solar modül üzerine ya da dize üzerinde küçük bir alanın bile

gölgelenmeye uğraması sistemin toplam çıkışını önemli ölçüde etkilemesidir (Deline, 2009).



Şekil 2.32. Gölgelenme örneği

Sistemde yer alan her bir modülün ürettiği en yüksek enerji miktarı yani maksimum güç noktası (MPP) modül üzerine düşen ışınım miktarına bağlıdır. Şekil 2.32'te görüldüğü gibi herhangi bir modülün gölgelenmesi ile birlikte modülün MPP noktası etkilenecek ve diğer modüllere etki edecektir. Modüllerin birbirinden farklı çalışma koşullarına sahip farklı ve farklı MPP noktaları olacağından sistem tam verimli olarak çalışamayacaktır.

2.6.1.1.2. Yansıma kayıpları

Fotovoltaik hücreler üzerine düşen güneş ışınımlarının tamamını absorbe edemezler. Modül yüzeyine düşen ışınımın bir kısmı emilmeden modül yüzeyinden geri yansırlar. Bu geri yansımalardan oluşan kayıplara yansıma kaybı olarak bilinir.

Fotovoltaik malzemede, ışınımın bir kısmı emilir ve elektrik enerjisine çevrilir. Kullanılan malzemenin kalitesi optik yansıma, emilen ışınımın yoğunluğuna ve iletimdeki kayıpların azlığına bağlı olarak nitelendirilir. Amorf yapıya göre kristal yapı ışınımı daha az emer. Malzeme kalitesi olarak kristal yapı amorf yapıya göre daha çok verimlidir. Amaç; ışığı hapsedip oluşacak olan yansımayı en aza indirmektir. Yansımaların azalması ve emilimin daha fazla olabilmesi için modüller farklı katmanlarda üretilirler.

Fotovoltaik modüller güneş ışınımından daha fazla yararlanmak, emilimi arttırmak ve yansımayı azaltmak için temperli bir yapıya sahiptirler. Hücrelerde aynı

şekilde yansımayı önleyecek yansıma önleyici kaplama (Anti-Reflective Coating) malzeme ile üretilirler.

Yansıyan ışınımın şiddeti güneş ve modül arasındaki açıya ve modülün kırılma indeksine bağlıdır (Delplanque, 2004)

2.6.1.1.3. Spektrum kayıpları

Fotovoltaik hücrelerin üretim aşamasında ve test aşamalarında anlık ışınım yani standart test koşulları altında (AM 1,5) özellikleri hesaplanır. Hesaplamalarda ve üretici firma tarafından verilen hücre özelliklerinde (AM 1,5) ışınım olarak hesap edilir. Fakat güneş ve gökyüzü ışınımları yıl içinde gözlemlenen spektrum, açık gökyüzünün ideal spektrumundan farklılık gösterebilir. AM 1,5 'taki standart güneş spektrumundan farklılık olması durumunda, sistemdeki fotovoltaik modüllerin spektral seçiciliklerinden kaynaklanan kayıplar oluşur. Bu kayıplar spektrum kayıpları olarak bilinir.

2.6.1.1.4. Tozlanma ve karlanma kayıpları

Fotovoltaik modüller yıl içinde yağışlar, rüzgar ve kar gibi etkenlerden dolayı üzerinde biriken kirlilik neticesinde ışınım miktarında azalması dolayısıyla etkilenirler. Bu etkilerden yaşanan kayıplar neticesinde zaman zaman %15'e varan kayıplara ulaşmaktadırlar. Küçük sistemlerde modüllerin temizleme işlemi kolay olsa da büyük güneş enerjisi santrallerinde ve su olmayan alanlarda temizleme işlemi pahalı ve zor olmaktadır.

Kar yağışının sık olarak görüldüğü bölgelerde, fotovoltaik modül çıkışlarında karlanmadan dolayı kayıplar görülür. Almanya ve birçok avrupa ülkesinde fotovoltaik sistemler için kar haritaları hazırlanmıştır ve kardan dolayı kayıpların hesaplanmasında belirleyici rol almışlardır. Kar haritalarından ve kardan dolayı yapılacak olan kayıp hesabı yatayla sıfır derece açı yapan modüller için olası hesaplamalar ile bulunabilmektedir. Eğimli diğer yüzeyler için sadece varsayımlar yapılabilmektedir. Kar yağışının sıklıkla görüldüğü bölgelerde yatayla 0 derece açı bulunan sistemlerde %1, çatı sistemlerinde ise %2 karlanma kaybı olarak hesaplanmaktadır (Weizenbeck, 2009).

2.6.1.2. Sistem kayıpları

2.6.1.2.1. Sıcaklık kayıpları

Fotovoltaik güç sistemlerinde modülden elde edilen güç çıkışı ile anlık modül sıcaklığı arasında ters orantı vardır. Modül sıcaklığı arttıkça modülden alınan güç azalır. Sıcaklık arttıkça modülden elde edilen gücün azalmasında yaşanan kayıplar, modülü oluşturan hücrelerin sıcaklığı ile doğru orantılıdır. Ortam sıcaklığı yükseldikçe hücre sıcaklığı da yükselir ve üretilen enerjide kayıplara neden olur.

Güneş hücrelerinin, $800W/m^2$ ışınım, 1m/s rüzgar ve 20^0C ortam sıcaklığı koşullarındaki sıcaklığına Hücre nominal çalışma sıcaklığı (Nominal Operating Call Temperature- N_{OCT}) adı verilir. Ürün kataloglarında ürün ile ilgili özellikler belirtilirken bu sıcaklık değeri altındaki özellikleri verilir. STK'da hücrenin sıcaklığını bulmak için ;

$$\frac{T_\alpha}{U_L} = \frac{T_c, Noct - T_a}{G_\tau, Noct} \qquad (2.23)$$

T_α = Modül Soğurma Katsayısı

T_a = Noct koşulları için ortam sıcaklığı

U_L = Kayıp Katsayısı

$G_\tau, Noct$ = Noct koşulları için ışınım değeri (800W/m^2)

$T_c, Noct$ = Modül Katalogunda belirtilen Noct değeri

Soğurma katsayısı, modül tarafından emilen ışınımın modülün üzerine düşen ışınıma oranı olarak ifade edilir. Yukarıdaki formül kullanılarak sıcaklığı bilinen bir ortam için hücre sıcaklığı hesaplanabilir.

$$T_c = T_a + (G_t * \frac{T_\alpha}{U_L}) * (1 - \frac{u}{T_\alpha}) \qquad (2.24)$$

T_c = Modül Sıcaklığı

G_t = Işınım değeri (1000W/m^2)

T_α = Ortam Sıcaklığı

u = Hücre verimi

Hesaplanan hücre sıcaklığı ile modül üzerinde sıcaklıktan kaynaklanan kayıplar hesaplanabilir.

$$\% \text{ Kayıp} = (T_c - T_{Ref}) * \text{Sıcaklık Katsayısı} \quad (2.25)$$

T_c =Modül Sıcaklığı Sıcaklık Katsayısı = Modülün Sıcaklık Katsayısı

T_{Ref} = Hücre Referans

2.6.1.2.2. Kablo kayıpları

Fotovoltaik sistemlerde kablo kayıpları, sistemde kullanılan DC ve AC kablolardaki omik kayıplardan kaynaklanmaktadır. Kabloların boyut farklılıkları ve kesit farklılıkları ile tasarım aşaması kablolamanın önemli bir aşamasıdır. Diziler oluşturulması aşamasında seri veya paralel bağlantılar ve modüllerin DC kablolar ile eviriciye bağlanması tasarım sürecinin önemli noktalarındandır. İletkenlerin akım taşıma kapasiteleri, iletim boyunca meydana gelebilecek gerilim düşümleri sistemde oluşabilecek kayıpların nedenlerindendir. Ve bu yüzden iletken seçiminde belirleyici etkenlerdir. DC ve AC kısımlarda kablo kesitleri, gerilim düşümleri ile birlikte kayıplar %1-%3 arası olarak kabul edilebilir kayıplar olarak hesaplanırlar.

2.6.1.2.3. Modül özelliklerinde yaşanan teknik kayıplar

Fotovoltaik sistem tasarımı aşamasında kullanılacak olan modül belirlenme aşamasında ürün kataloglarındaki değerler ile çalışma aşamasında elde edilen gerçek değerler arasındaki farklılıklar elde edilen enerji hesaplamalarında ortaya çıkan farklılıklar kayıpları meydana getirmektedir. Hücrelerin performans verilerindeki farklılıklar ve üretim proseslerinde standart parametrelerin net hesaplanamaması, gerçek saha koşullarındaki güç değerlerinde dalgalanmaya sebep olur. Öngörülen enerji üretim rakamlarının saha koşullarında daha az çıkmasına neden olur.

2.6.1.2.4. Uyumsuzluk kayıpları

Sistem için gerekli olan eviriciler girişlerinde gerekli olan DC gerilimi ve akımı tutturabilmek için kullanılan modüller birbirlerine seri veya paralel olarak bağlanırlar.

Modüllerden elde edilen toplam DC güç, modüllerin her birinden elde edilen güçlerin toplamından daha azdır. Statik uyumsuzluk, çevresel gerilim ve modüllerin gölgelenme farklılıkları gibi olumsuzluklar kayıplara sebep olmaktadır.

Çevresel gerilim, modüllerin dört mevsim farklı iklim koşullarından dolayı zarar görmesiyle meydana gelen kayıpları oluşturur. Statik uyumsuzluk ise modüllerin üretim esnasındaki tolerans farklılıkları ve dize içerisinde modüllerin kullanım ömürlerinin farklı olmasından kaynaklanır. Uyumsuzluk kayıpları sadece modül farklılıklarından oluşmamaktadır. Kullanılan modül DC kabloları arasındaki uzaklık farklılıkları ve kesit farkları kayıplara neden olur. Modüllerin farklı çalışma sıcaklıklarında bulunması ve gölgelenme ile birlikte farklı ışınım değer ve açılarıyla çalışması modüller arası uyumsuzluğa yol açar.

Dinamik olarak modüllerin Mpp noktasında çalıştırılamamaları da uyumsuzluk kaynağıdır. Modüllerin paralel bağlanmasında gerilim, seri bağlanmasında akımın kullanılacak tüm modüllerde eşit olarak çalıştırılması bazı modüllerin Mpp noktasında çalışmamasına sebep olabilmektedir.

2.6.1.3. Evirici kayıpları

Eviriciler stand-by konumunda çalışırlarken enerji tüketimi göz önünde bulundurularak verim eğrisi ile DC-AC çevrim kayıpları meydana gelir ve hesaplanır.

DC-AC güç çevrimi verimliliği için Avrupa Verimliliği ve Ağırlıklı Verim gibi metrikler kullanılır. Eviricilerdeki DC-AC çevrim kayıpları, eviricide kullanılan yarı iletken malzemeler, manyetik elementler ve kapasitör gibi devre elemanlarının iletim ve anahtarlama gibi özelliklerinden dolayı kaynaklanan kayıplarıdır (E. Koutroulis ve Blaabjerk,2011) .

Günümüzde üretilmekte olan trafosuz şebeke bağlantılı eviriciler nominal DC giriş gerilimlerinde maksimum verimleri %98 civarındadır. Sistemde kullanmış olduğumuz Sunstring 5000 evirici de %96 verimle çalışmaktadır. Eviriciler her 150 V DC giriş gerilim genliğinde % 0,3-% 1 oranlarında kayıp yaşarlar.

Eviricilerde ki kayıpların bir diğer kısmı güç kısıtlamalarından kaynaklanan kayıplardır. Standart test koşullarında modül gücünün, eviricideki AC çıkış gücü oranı kullanılan eviricinin verimini etkiler ve üretilen gücün tamamının şebekeye aktarılmamasına sebep olabilir.

Kullanılan eviricilerin maksimum verimlilikleri %98 seviyelerine ulaşmışlardır ve bu verimlere %30-%50 arasındaki kısmi yükler ile ulaşmaktadırlar. DC giriş gücüne göre daha düşük AC çıkış gücüne sahip eviricilerin bu sebepten dolayı tam kapasiteyle çalışma ihtimalleri yüksektir. Normalden daha düşük güçlü seçilen eviriciler daha sıklıkla tam güçte çalışmalarından dolayı güç kısıtlaması algoritmalarını tetikleyen ve çıkış gücünü kısan yüksek çalışma sıcaklıklarına daha çabuk ulaşırlar.

2.7. Türkiye'de Güneş Enerjisi Mevzuatı ve Projelendirme Aşamaları

Ülkemizde güneş enerjisi ile elektrik üretim endüstrisinde yaşanan gelişmeler ve teknoloji ile birlikte yaşanan yatırımlar Fotovoltaik endüstrisini daha çok ön plana çıkarmaya başlamıştır. Türkiye'de Fotovoltaik yol ile üretilen elektrik enerjisi "serbest piyasa" elektrik fiyatları ile rekabet edebilecek seviyeye yaklaşmakta ve Güneş Enerji Santralleri (GES) maliyetlerinin düşüş eğiliminin devam etmesi ile birlikte büyük ölçekli "Güneş Santrali" kurmak ticari anlamda yatırımcılar tarafından çekici hale gelmiştir. Lisanslı ve Lisanssız uygulamalarda ki şirket sayısı artış göstermiş ve finansman çözümü konusunda önemli adımlar atılmıştır.

Türkiye elektrik dağıtım anonim şirketi (TEDAŞ) verilerine göre 2014 yılında lisanssız güneş enerjisi projeleri için 664 MW'lık başvuru yapılmış, bu projelerin yaklaşık 117 MW'lık kısmı onay alabilmiş ve 50 MW'lık kısmı için geçici onay alınabilmiştir. Gayrı resmi veriler doğrultusunda montaj aşamasında bulunan projeler ile birlikte Türkiye sınırları içerisinde toplam GES kapasitesi 100 MW sınırına yaklaşmaktadır (www.eie.gov.tr).

Türkiye'de Güneş enerji santralleri ile ilgili kanun ve yönetmelikler şunlardır;

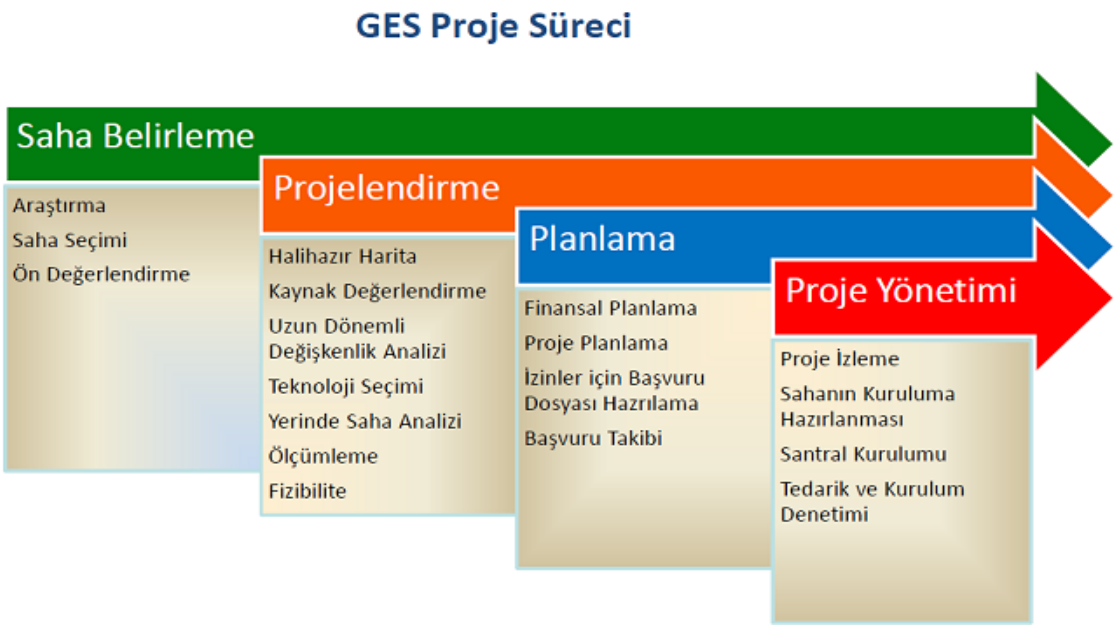
- 6446 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu
- Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği
- 5346 Sayılı YEK (Yenilenebilir Enerji Kanunu) Kanunu
- RES/GES (Rüzgar Enerji Santrali/Güneş Enerji Santrali) başvurularına ilişkin yarışma yönetmeliği
- Lisanssız Elektrik Üretimi Yönetmeliği
- İlgili EPDK Kurul Kararları ve Tebliğleri



Şekil 2.33. Türkiye'de güneş enerjisi pazarı

Türkiye'de lisans gerektirmeyen Yenilenebilir Enerji Uygulamaları ;

- Kurulu gücü 1 MW'dan küçük olan yenilenebilir enerji santralleri,
- Belediyelerin katı atık tesisleri ile arıtma tesisi çamurlarının etrafına kurulacak olan santraller
- Ürettiği enerjinin tamamını iletime veya dağıtım sistemine vermeyen yenilenebilir enerji santralleri



Şekil 2.34. Güneş enerji santrali proje uygulama süreci

Türkiye'de GES projesi için saha belirleme sürecinde kurulacak olan alan orman arazisi olmaması, kuru, sulu veya dikili nitelikte tarım arazisi olmayan alanlar seçilmelidir. Mw başına 20 dönüm arazi ve yatay yüzeye gelen yıllık toplam güneş radyasyonu 1620 kWh/m² -yıl'dan büyük olmalıdır. Proje sahasının konstrüksiyon montajına uygun ve sahanın proje sahibinde ait olması yada kiralanması gereklidir. Projelendirme aşamasında ölçüm istasyonlarının kurulması ve Meteroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından ölçümlerin onaylanması gereklidir. En az 6 ay yerinde ölçüm ve 1 senelik ölçüm sonuçları MGM tarafından onaylanmalıdır. Harita çalışmaları ve finansal ön fizibilite çalışmaları teknik fizibilite ile birlikte yaptırılmalıdır.

Proje çalışmalarından sonra önlisans başvurusu ve önlisans alınması, imar ve kamulaştırma işlemlerinin tamamlanması, proje onayı ve lisans alınması, panel temin edilecek firmanın belirlenmesi ve kredi anlaşmaları gibi süreç tamamlandıktan sonra proje sahası montaj için uygun hale getirilir.

2.8. Fovotoltaik Sistemlerde Performans Değerleri

Şebekeye bağlı fotovoltaik güç sistemlerinin enerji performanslarını değerlendirmek için, ölçülen veriler doğrultusunda hesaplamalar yapılarak fotovoltaik sistemlerin enerji üretimi ve kayıplar STC koşulları altındaki değerlere normalize edilir. Bu değerler; normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi (referanceyield) , *YR,* normalize edilmiş PV sistem enerji üretimi (final yield), Y_f , ve PV sistem performans oranı (performancerating), PR, olarak sıralanmaktadır. Bu veriler doğrultusunda saatlik değerler ile günlük , günlük değerler ile aylık ve aylık bulunan değerler doğrultusunda yıllık analizler yapılmaktadır.

Şebeke bağlantılı sistemler için Y_R , normalize edilmiş örgü yüzeyinin birim alanına düşen ışınım miktarının ($kW - saat / m^2$) , STC koşulları altında tanımlı olan birim alandaki ışınım miktarına normalize edilmesiyle bulunur.

$$Y_R = \frac{H_\beta}{G_{STC}} \tag{2.26}$$

Buradaki H_β ifadesi eğilimli yüzey üzerinde birim alana gelen ışınım enerjisini ifade etmektedir. G_{STC} değeri ise 1000 W/m^2 dir. Bu ifadenin birimi güneş ışınlarının mevcut olduğu zamanı gösteren saat veya "$kW-saat/kW_p$"dir.

Normalize edilmiş sistem enerji üretimi Y_f, fotovoltaik sistemden elde edilmiş enerjinin evirici tarafından AC enerjiye dönüştürülmesinden sonra ortaya çıkan enerji değerini, STC koşulları altında verilen PV örgülerin kurulu güç değerine normalize edilmesiyle hesaplanmaktadır.

$$Y_f = \frac{E_{şebeke}}{W_{p,e}} \tag{2.27}$$

Bu ifade yer alan $E_{şebeke}$ fotovoltaik örgü tarafından üretilen ve şebekeye aktarılan AC enerjiyi (eviricinin çıkış enerjisi) ,$W_{p,e}$ ise fotovoltaik örgülerin STC altındaki kurulu güç değerini göstermektedir. Normalize edilmiş sistem enerji üretiminin birimi saat veya kW-saat/ kWp'dır.

Normalize edilmiş fotovoltaik sistem enerji üretiminin, normalize edilmiş fotovoltaik örgü yüzeyi üzerine düşen ışınım enerjisine oranı olarak tanımlanan sistem performans oranı, PR, farklı bölgelerde ve farklı zamanlar üzerinden fotovoltaik sistemlerin performanslarını kıyaslamak ve değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır.

$$\boldsymbol{PR} = \frac{\boldsymbol{Y_f}}{\boldsymbol{Y_R}} \tag{2.28}$$

olarak tanımlanır. Bu ifade, gerçek sistem enerji üretimi ile standart test koşulları altında tanımlı PV örgülerin verimlilik değerleri ile çalışan ideal sistemin enerji üretimi arasındaki oran olarak yorumlanabilinir.

Düşük performans oranı PV örgünün gölgelenmesi ve sistem dizaynındaki hatalardan kaynaklanmaktadır. Sistem dizaynından kaynaklanan hatalar genel olarak, evirici hataları, düşük evirici verimliliği, PV örgülerin arka yüzeylerinde yeterli düzeyde hava akımının olmamasından kaynaklanan modül sıcaklık artışları ve modüllerin kendi aralarındaki uyuşmazlık kayıplarıdır.

Sistemin performansını incelerken anlık, günlük, aylık ve yıllık olmak üzere dört farklı zaman dilimi içerisinde değerlendirilmektedir. Anlık sistem verimliliği sistem tarafından üretilen gücün, toplam PV örgü üzerine gelen ışınıma oranıdır ;

$$\eta_{sys} = \frac{P_{sys}}{G_{\beta} x A_{PVörgü}} \tag{2.29}$$

Burada P_{sys} sistem tarafından şebekeye verilen güç (W), G_B eğimli yüzeyde birim alana gelen ışınım (W/m^2) ve $A_{PVörgü}$ PV örgünün toplam alanıdır (m^2). Günlük, aylık veya yıllık sistem verimliliği belirtilen zaman dilimi içerisinde şebekeye aktarılan enerjinin, toplam fotovoltaik örgü üzerine düşen ışınım enerjisine oranı olarak tanımlanır ve günlük sistem verimliliği;

$$\eta_{sys} = \frac{E_{sys,g}}{H_{\beta,g} x A_{PVörgü}} \tag{2.30}$$

formülü ile temsil edilir. Burada $E_{sys,g}$ sistem tarafından şebekeye aktarılan günlük AC enerji miktarı (kW-saat) , $H_{\beta,g}$ ise PV örgü yüzeyi üzerinde bulunan birim alana düşen günlük ışınım enerjisidir ($kW-saat/m^2$). Her bir ay için ortalama günlük sistem verimliliği ise;

$$\eta_{sys,a} = \sum_{d=1}^{D} \eta_{sys,g} / D \tag{2.31}$$

Burada D değerlendirmenin yapıldığı ay için verilerin alındığı toplam gün sayısını belirtmektedir (Cardonavd, 1999).

Her bir ay için sistem tarafından şebekeye aktarılan günlük enerji miktarı ise;

$$E_{sys,a} = \sum_{d=1}^{D} E_{sys,g} / D \tag{2.32}$$

ifadesi ile verilir. Burada $E_{sys,g}$ sistem tarafından üretilen günlük enerji miktarını göstermektedir. Günlük performans oranı, normalize edilmiş sistem enerji üretimi ve normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi sırası ile;

$$PR_g = \frac{Y_{f,g}}{Y_{R,g}} \tag{2.33}$$

$$Y_{f,g} = \frac{E_{sys,g}}{W_{p,e}} \tag{2.34}$$

$$Y_{R,g} = \frac{H_{\beta,g}}{G_{STC}} \tag{2.35}$$

(2.33), (2.34) ve (2.35) eşitliklerinde belirtilen parametrelerin her bir ay için ortalama günlük değerleri ise;

$$PR_a = \sum_{d=1}^{D} \frac{PR_g}{D} \tag{2.36}$$

$$Y_{f,a} = \sum_{d=1}^{D} \frac{Y_{f,g}}{D} \tag{2.37}$$

$$Y_{R,a} = \sum_{d=1}^{D} \frac{Y_{R,g}}{D} \tag{2.38}$$

Dünya üzerindeki şebekeye bağlı fotovoltaik güç sistemlerinin kıyaslanmasında kullanılan en yaygın parametre ise normalize edilmiş yıllık sistem enerji üretimidir. Sistemin bir yıl boyunca şebekeye aktardığı enerjinin, standart test koşulları altındaki kurulu güce oranı olan normalize edilmiş yıllık sistem enerji üretimi;

$$Y_{f,y} = \sum_{d=1}^{D} Y_{f,g} \tag{2.39}$$

formülü ile verilebilir. Burada *T* verilerin alındığı bir yıla ait günlerin sayısıdır.

3. YÖNTEM

3.1. Kurulum Yeri

Sistem kurulumu Batman'da bulunan Özel Çözüm İlkokulu (enlem: 37.921; boylam: 41.144) çatısına yapılmıştır. Düz zemine sahip çatıda gerçekleştirilen kurulum öncesi montaj resmi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Batman Özel Çözüm Kolejine kurulan sistemin montajlama süreci

3.2. Sistem Bileşenleri

3.2.1. Fotovoltaik modüller

Sistemde toplam 46 adet üç farklı fotovoltaik modül kullanılmıştır. Bunlardan 11 adeti tekli kristal silisyum, 11 adeti çoklu kristal silisyum ve 24 adeti de ince film amorf silisyum fotovoltaik modülleridir. Çizelge 3.1'de sistemde kullanılan fotovoltaik modüllerin STC altındaki teknik verileri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Sistemde kullanılan fotovoltaik modüllerin STC altındaki teknik verileri

Üretici Firma	Sunset	Sunset	Sunset
Kod	AS 195-50	PX 195-50	SunOne AS 90
Teknoloji	Tekli (mono) silisyum	Çoklu (poly) silisyum	İnce film amorf silisyum
Maksimum güç noktası P_{max}(W)	195	195	90
Maksimum güç noktasındaki gerilim V_{mpp}(V)	36	25.2	102
Maksimum güç noktasındaki akım V_{mpp}(V)	5.5	7.7	0.91
Açık devre gerilim V_{oc}(V)	44.4	31	137
Kısa devre akımı I_{sc}(A)	6.1	8.5	1.15
Alan (m^2)	1.32	1.32	1.43
NOCT (°C)	51	51	50
β (%/°C)	-0.33	-0.35	-0.34
α (%/°C)	+0.039	+0.055	+0.04
γ (%/°C)	-0.35	-0.36	-0.22

3.2.2. Eviriciler

Sistemde her bir teknoloji grubuna ait örgü için Sunset firmasına ait SunString 5000 eviriciden 3 adet kullanılmıştır. Şekil 3.2'de eviriciler ait görünüm ve Çizelge 3.2 ve 3.3'de AC ve DC altındaki eviricilere ait teknik veriler verilmiştir. Sistem için seçtiğimiz model eviricinin bünyesinde;

- AC ve DC tarafında aşırı gerilim yakalayıcı
- 1 fazlı şebeke kontrolü
- Sıcaklık kontrolü
- Şebeke arızalarından korumak için EMW filtresi bulunmaktadır.



Şekil 3.2. SunString 5000 eviriciler

Çizelge 3.2. DC gerilim altında SunString 5000 eviriciye ait teknik veriler

Nominal Güç	5000W
Minimum Çalışma Gerilimi	125 V
Maximum Çalışma Gerilimi	400 V
Tahrip Sınırı	500 V
Maksimum Akım	43 A
Minimum önerilen kablo kesiti	4 mm
Gündüz Enerji Sarfiyatı	5 W
Gece Enerji Sarfiyatı	0 W

Çizelge 3.3. AC gerilim altında SunString 5000 eviriciye ait teknik veriler

Nominal Güç	4600 W
Minimum Performans	5060 W
Çıkış Gerilimi	190-264 V
Şebeke Frekansı	50 Hz
Maksimum Şebeke Akımı	22 A
Nominal Performansta Klirr Faktörü	% 3
Maksimum Verimlilik	% 94.5
Euro Verimlilik	% 93.3

3.2.3. Sensörler, veri toplama ve uzaktan izleme

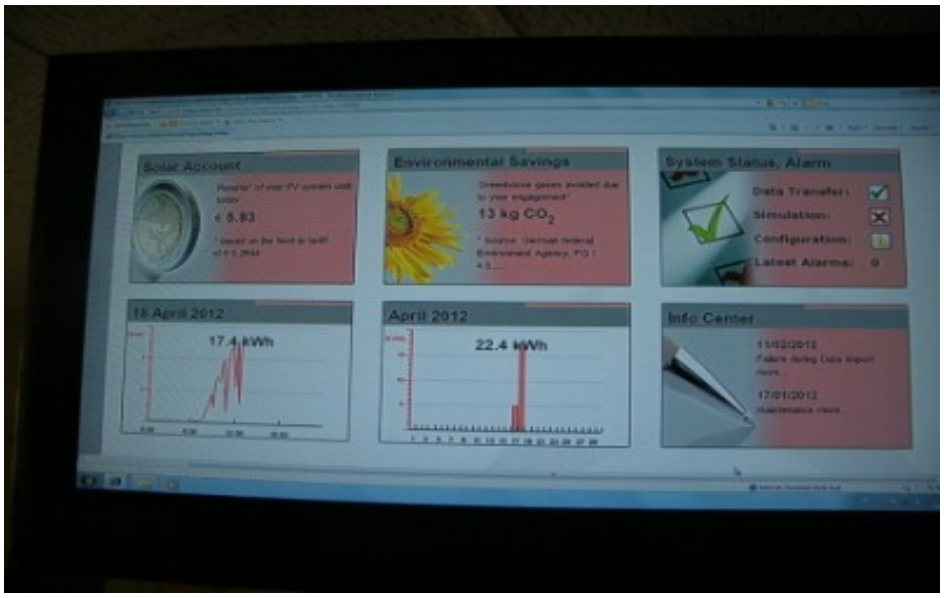
Sistemde gelen güneş ışınımı şiddeti silisyum sensör, rüzgar sensörü, ortam ve modül sıcaklıklarını ölçmek için ise K tipi platinyum sensörler kullanılmıştır. Sistemdeki veriler her on beş dakikada bir SUNlog XL veri kaydedici ile sağlanmıştır. SUNlog XL veri kaydedici aşağıdaki özelliklere sahiptir ;

- İşletme programı için 8 bit mikro kontrolör
- 128 Kbyte EEPROM (tamponlanmış)
- Veriler için 128 kbyte Ram (temel donanım)
- Çip üzerinde 8*10 – bit A/D dönüştürücü
- Tam zamanlı saat
- 2 seri kesit yeri RS232 portu
- 8 Analog giriş
- DIN 43 864’e göre SO kesit yeri olan 2 impuls girişi
- 0(4) – 20 mA aktif veya pasif bağlantı girişi

Sistemde ayrıca alınan verileri anlık ve geçmişe dönük olarak alınmasını sağlayan WEBlog cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Sistemde kullanılan SUNlog XL veri kaydedici ve uzaktan izleme için WEBlog cihazı



Şekil 3.4. Web ortamında sistemden alınan anlık veri görüntüsü

Sistem aktif olduğu sürece şu değerler ölçülerek kaydedilmiştir:

- Sistem üzerinden şebekeye aktarılan güç (W)
- Sistemin aktif olduğu andan itibaren ürettiği toplam enerji miktarı (Wh)
- Fotovoltaik örgü üzerine birim alana gelen güneş ışınım miktarı (W/m^2)
- Yatay düzlem üzerinde birim alana gelen ışınım miktarı (W/m^2)
- Ortam ve modül sıcaklığı (C°)
- Aylık üretilen toplam güç (kWh)
- Anlık üretilen toplam güç (kWh)
- Rüzgar hızı (m/s)

3.3. Sistem Kurulum Tasarımı

Batman ili Özel Çözüm İlkokulu çatısına kurulan fotovoltaik sisteminde:

- 11 adet Sunset AS 195-50 tekli kristal silisyum modülleri birbiri ile seri bağlanarak 2.145 kWp gücünde örgü elde edilmiştir.
- 11 adet Sunset PX 195-50 çoklu kristal silisyum modülleri birbiri ile seri bağlanarak 2.145 kWp gücünde örgü elde edilmiştir.
- 24 adet Sunset SuonOne AS 90 ince film amorf silisyum modüllerinden, üçerli seri halinde 8 adet dizi oluşturularak 2.160 kWp gücünde örgü elde edilmiştir.

Sistemin toplam gücü 6.45 kWp olup çatı düzleminde kullanılan alan ise 69 m^2'dir.



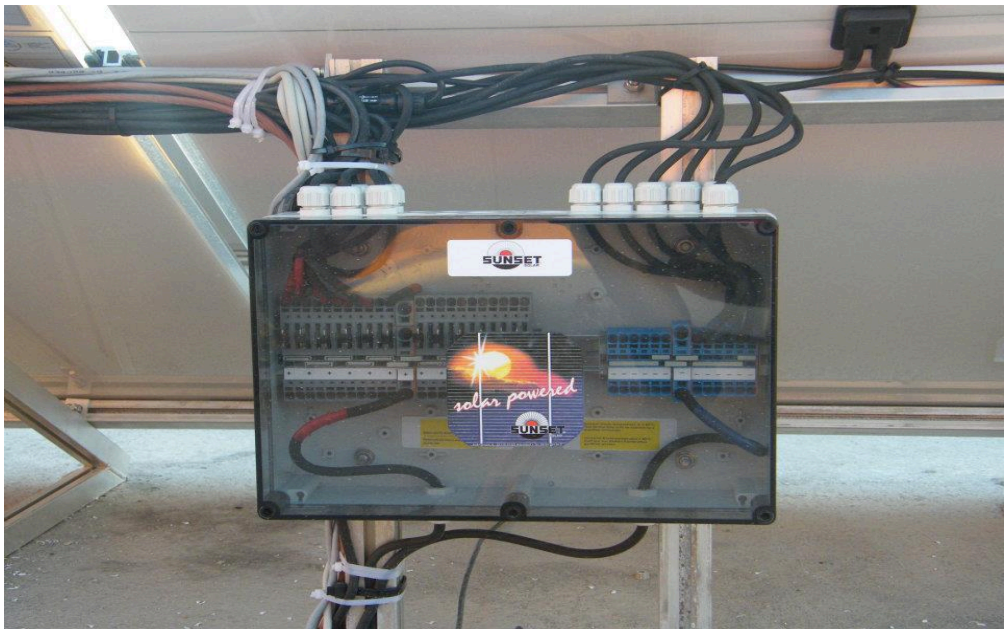
Şekil 3.5. Batman ili Özel Çözüm İlkokulunda kurulmuş 3 farklı modül teknolojisinden oluşan toplam 6.45 kWp gücünde fotovoltaik sistem

Sistemde her bir ayrı örgü teknolojisi için 5000 W'lık şebeke bağlantılı evirici kullanılmıştır. Evirici seçimi özellikle nem, ısı, suyun görmemesi için sistemin kurulduğu okulun bodrum katında AC panoların yanına montajları yapılmıştır. AC kablolar 3×4 mm^2 antgiron kablo ile ana panoda baralara montaj yapılmıştır. Eviricileri ve kabloları korumak için AC beslemesine 1 er adet 25 A sigorta takılmıştır. Her bir evirici %96 verimle çalışan alüminyum soğutmalı kasaya sahip olması özellikle seçilmiştir. Eviriciler arası mesafe 30 cm geçmeyecek şekilde tasarlanmış ve monte

edilmiştir. Aralarında mesafe olmasına özen gösterilmesinin sebebi eviricilerde ısınma sebebiyle verim kaybının yaşanmaması içindir.

Modül ayakları tekli ve çoklu silisyuma sahip modüller için 25 derece ve ince film amorf silisyum modüller de 30 derece açı ile montaj edilmiş olup alüminyum profiller saf alüminyum olup kaynak yapılmadan cıvatalı şekilde tasarlanmıştır. Cıvatalar metrik8 A2 kromdur. Sebebi ise tüm ürünün 25 yıl boyunca erozyona dayanıklı olması için seçilmiştir.

İnce film amorf silisyum modüllerin DC gerilimleri yüksek olduğu için 3'erli seri bağlanıp Justenbox kutusuna bağlanmıştır. Justenbox kutusundan da 6 mm kara solar kablo ile modüllerin evirici bağlantısı sağlanmıştır. Kullanılan DC kablolar RNF-07F Solar 6 m^2 çift izoleli 200 C^o ısıya dayanıklı alüminyum kablolardır. Uzun mesafelerde akım ve gerilim taşımada ısınma ve kaybı önler. Sistemde 80 metre de bir hat için kablo çekilmiştir.



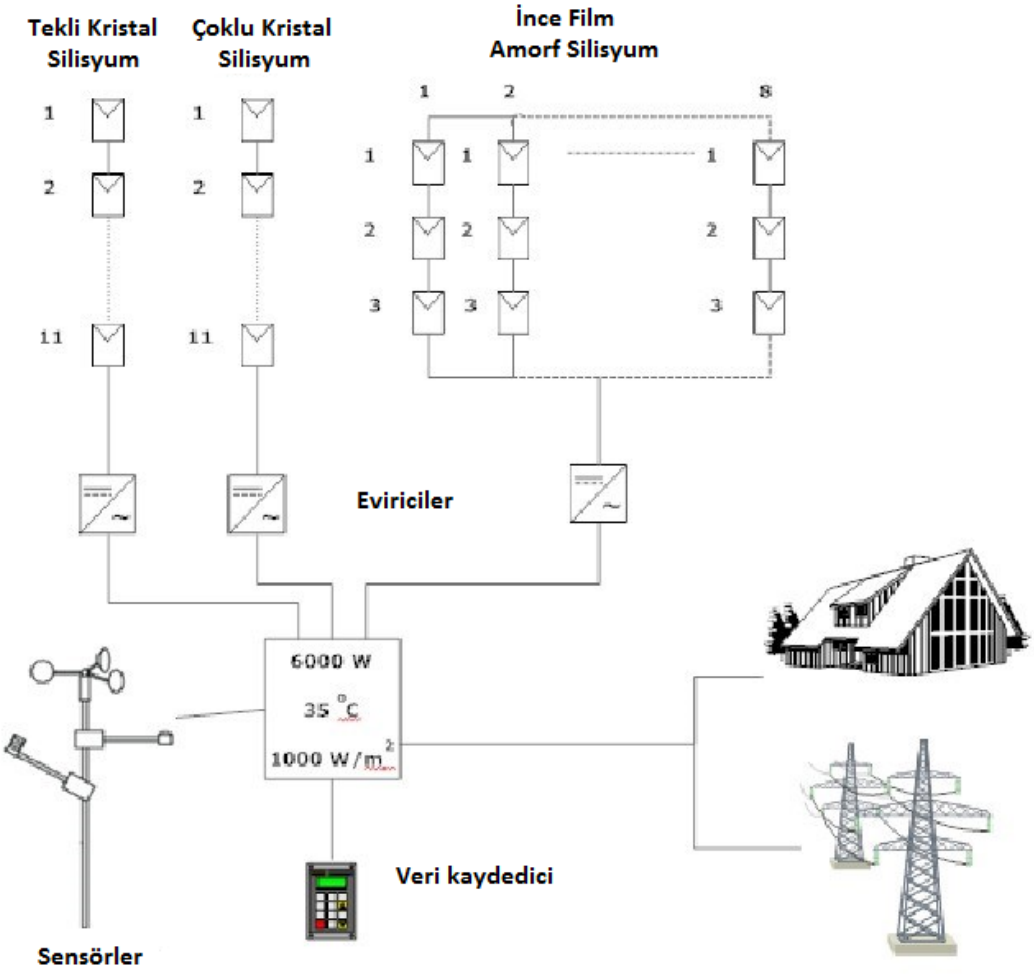
Şekil 3.6. Kablo bağlantıları (JustenBox Kutusu)

Sistemin yıldırım, yüksek gerilim, elektrik arızaları gibi sorun yaşamaması için topraklaması yıldız topraklama olarak bina topraklamasından ayrı olarak yapılmış olup sistem tam korumaya alınmıştır.

Seçmiş olduğumuz eviriciler ile yıllık verimliliği ortalama %96 olarak değerlendirilmiştir. SunString 5000 model eviricilerin geceleri kapatılmasıyla (0 Watt) ikinci bir sayaç kapatıcı kurmaya ve masrafına gerek yoktur. Kısmi yük alanındaki

etkinlik derecesinde bile şebeke performansına iyileştirme sağlar. Çalışmayla ilgili belirlenen kontrol ve koruma fonksiyonlarını bünyesinde barındırarak ek montaj ve maliyet masrafı asgariye indirilmiştir.

Sistem 2012 yılı Nisan ayında aktif edilerek test ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmamızda kullandığımız veriler Haziran 2013-Mayıs 2014 tarihleri arasında bir yılı kapsamaktadır.



Şekil 3.7. Kurulu fotovoltaik sistemin kabaca dizaynı

4. SONUÇLAR

4.1. Yıllık Güneş Işınımı ve Sıcaklık Ölçüm Sonuçları

Batman ilinde Özel Çözüm İlkokulu (enlem: 37.921; boylam: 41.144) çatısına kurulmuş sistemde yer alan ışınım ve sıcaklık sensörü yardımıyla Haziran 2013-Mayıs 2014 tarihleri arasında aylık ortalama ölçüm değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

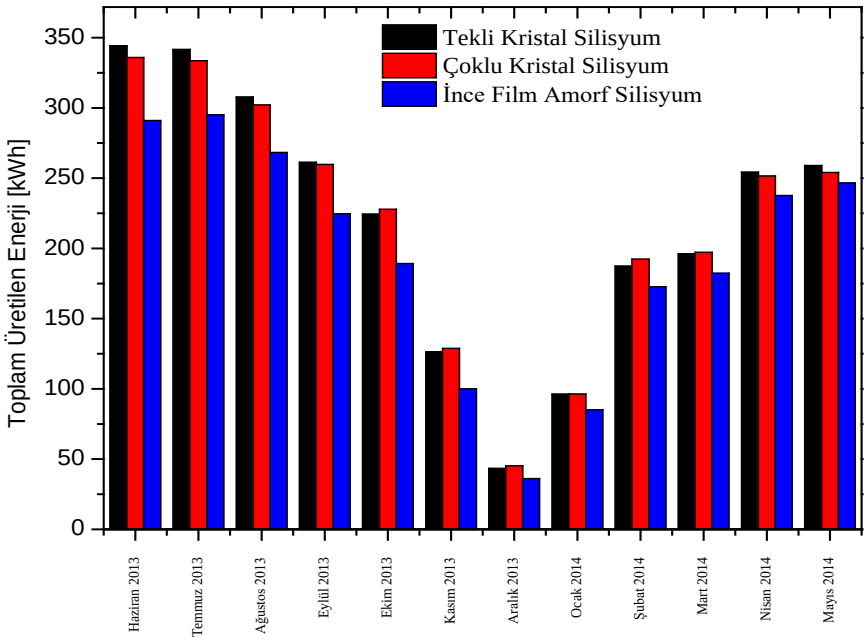
Çizelge 4.1. Yıllık güneş ışınımı ve sıcaklık ölçüm sonuçları

AYLAR	Yatay Yüzeye Gelen Ortalama Günlük Güneş Işınım Şiddeti (kWh/m^2.gün)	Eğimli Yüzeye (25^o) Gelen Ortalama Günlük Güneş Işınım Şiddeti (kWh/m^2.gün)	Eğimli Yüzeye (30^o) Gelen Ortalama Günlük Güneş Işınım Şiddeti (kWh/m^2.gün)	Aylık Ortalama Günlük Sıcaklık Değerleri (^{o}C)
HAZİRAN 2013	8,09	7,56	7,32	30,13
TEMMUZ 2013	7,83	7,43	7,23	34,12
AĞUSTOS 2013	7,05	7,23	7,13	32,79
EYLÜL 2013	5,77	6,67	6,72	26,95
EKİM 2013	3,68	4,70	4,82	18,95
KASIM 2013	2,38	3,35	3,49	12,96
ARALIK 2013	1,40	1,93	2,01	-0,74
OCAK 2014	1,71	2,34	2,42	5,15
ŞUBAT 2014	2,49	3,14	3,22	8,71
MART 2014	4,30	5,11	5,19	14,14
NİSAN 2014	5,78	6,15	6,12	18,56
MAYIS 2014	6,37	6,20	6,07	24,01

4.2. Sistem Ölçüm Sonuçları

Batman ili Özel Çözüm İlkokulu çatısına kurulan 2,145 kWp gücünde tekli kristal silisyum, 2,145 kWp gücünde çoklu kristal silisyum ve 2,160 kWp gücünde ince film amorf silisyum örgü sistemlerinde üretilen Haziran 2013-Mayıs 2014 tarihleri arasındaki enerji miktarları Şekil 4.1'de verilmiştir. Yıllık dönem içerisinde tekli kristal silisyum örgü sisteminden toplam 2,641 MWh, çoklu kristal silisyum örgü sisteminden

2,624 MWh ve ince film amorf silisyum örgü sisteminden 2,328 MWh enerji üretilmiştir.



Şekil 4.1. Örgü sistemlerinin Haziran 2013-Mayıs 2014 tarihleri arasında üretmiş olduğu aylık enerji miktarları

4.3. Performans Değerlendirmeleri

Şebekeye bağlı 2,145 kWp gücünde tekli kristal silisyum, 2,145 kWp gücünde çoklu kristal silisyum ve 2,160 kWp gücünde ince film amorf silisyum örgü sistemlerinin enerji performanslarını değerlendirmek için, ölçülen veriler doğrultusunda hesaplamalar yapılmış, örgü sistemlerinin enerji üretimi ve kayıplar STC koşulları altındaki değerlere normalize edilmiştir. Bu değerler; normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi (Y_R), normalize edilmiş örgü sisteminin enerji üretimi (Y_f) ve sistem performans oranı (PR) olarak sıralanmıştır.

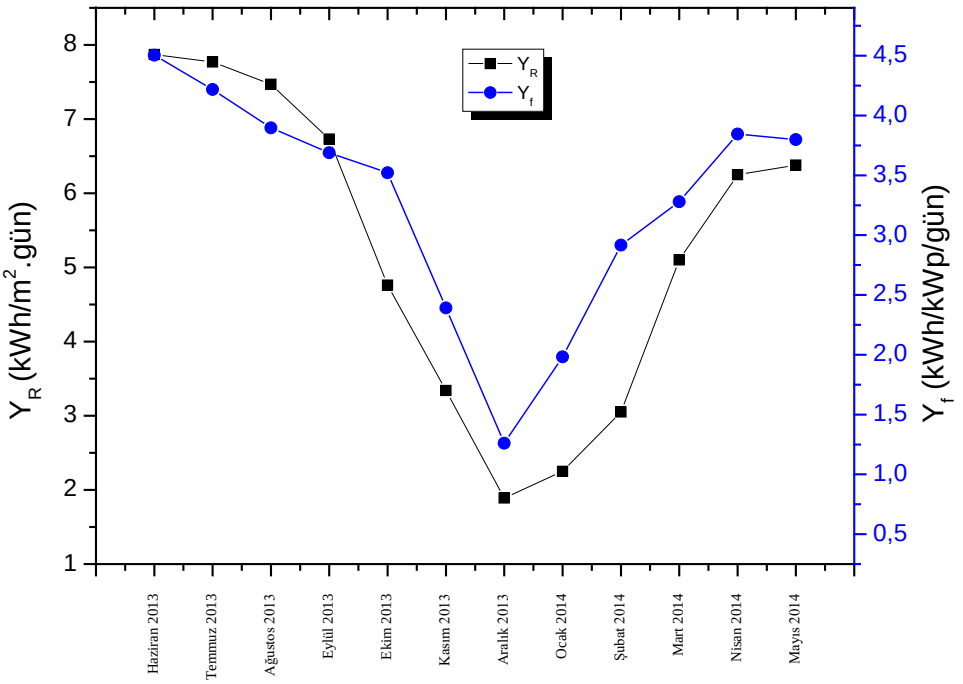
4.3.1. Tekli kristal silisyum örgü sistemi

11 adet tekli kristal silisyum örgü sistemi birbiri ile seri bağlanarak 2,145 kWp gücündeki örgü sisteminden elde edilen aylık enerji değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

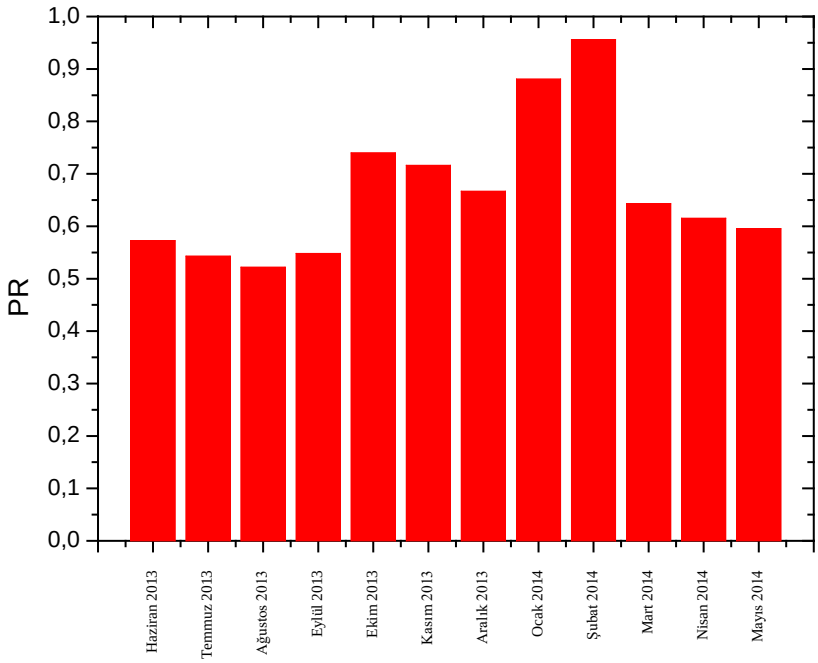
Çizelge 4.2. Tekli kristal silisyum örgü sisteminin her ay için günlük ve toplam ortalama enerji üretim değerleri

AYLAR	**Eğimli Yüzeye (25^o) Gelen Ortalama Günlük Güneş Işınım Şiddeti (kWh/m^2.gün)**	**Sistem çıkışı (kWh/gün)**	**Sistem çıkışı (kWh)**
HAZİRAN 2013	7,86	11,47	344,26
TEMMUZ 2013	7,71	11,02	341,62
AĞUSTOS 2013	7,43	9,92	307,73
EYLÜL 2013	6,76	8,70	261,2
EKİM 2013	4,74	7,23	224,39
KASIM 2013	3,41	4,21	126,45
ARALIK 2013	1,99	1,39	43,34
OCAK 2014	2,38	3,10	96,2
ŞUBAT 2014	3,24	6,69	187,32
MART 2014	5,20	6,54	196,24
NİSAN 2014	6,32	8,20	254,24
MAYIS 2014	6,43	8,63	258,95

Ölçülmüş olan güneş ışınım şiddeti değerleri ve şebekeye bağlı 2,145 kWp gücünde tekli kristal silisyum örgü sisteminin üretmiş olduğu günlük ortalama enerji değerleri kullanılarak sistemin performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Ölçülmüş ışınım şiddeti değerlerinden faydalanarak normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi (Y_R) aylara göre hesaplanmıştır. Ayrıca AS 195-50 kodlu tekli kristal silisyum modülünün STC değerlerinden ve sistemin elde ettiği enerji değerlerinden de faydalanarak normalize edilmiş sistem enerji üretimi (Y_f) aylara göre hesaplanmıştır. Bu değerlerden faydalanarak da sistem performans oranı tayin edilmiştir. Şekil 4.2'de normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi ve tekli kristal silisyum örgü sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretimi değerleri aylara göre çizilmiştir. Şekil 4.3'te ise tekli kristal silisyum örgü sisteminin performans oranı aylara göre gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi ve tekli kristal silisyum örgü sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretimi değerleri



Şekil 4.3. Tekli kristal silisyum örgü sisteminin aylara göre performans oranları

4.3.2. Çoklu kristal silisyum örgü sistemi

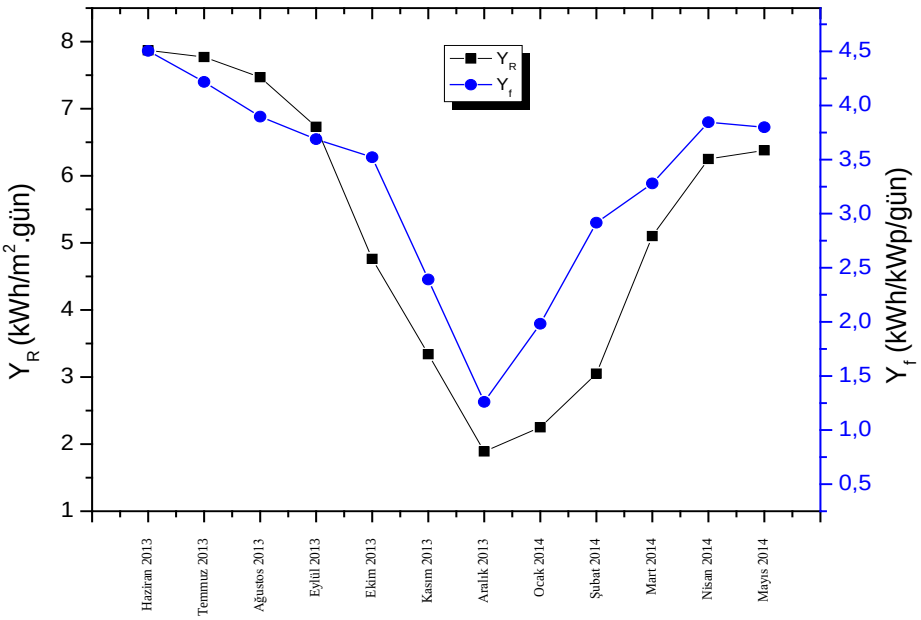
11 adet çoklu kristal silisyum örgü sistemi birbiri ile seri bağlanarak 2,145 kWp gücündeki örgü sisteminden elde edilen aylık enerji değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Çoklu kristal silisyum örgü sisteminin her ay için günlük ve toplam ortalama enerji üretim değerleri

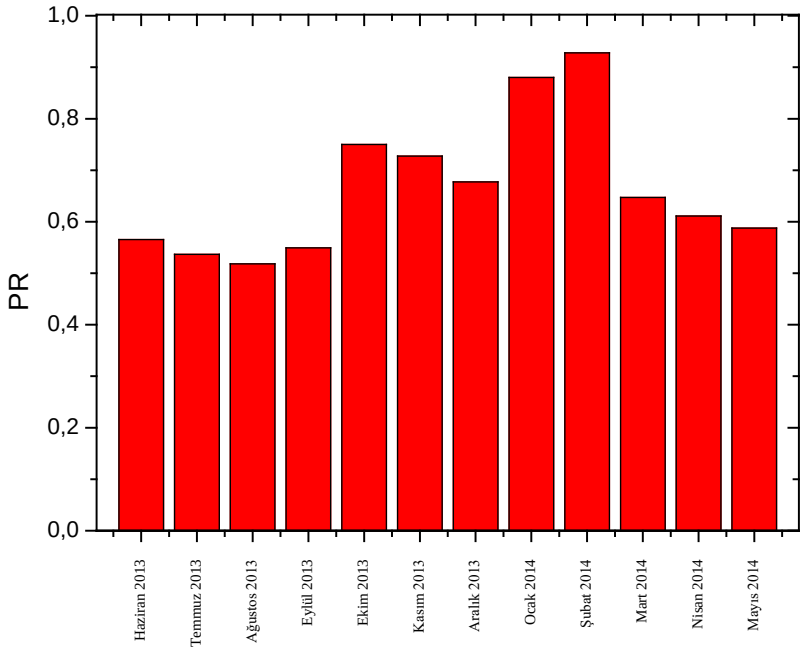
AYLAR	Eğimli Yüzeye (25^o) Gelen Ortalama Günlük Güneş Işınım Şiddeti (kWh/m^2.gün)	Sistem çıkışı (kWh/gün)	Sistem çıkışı (kWh)
HAZİRAN 2013	7,86	11,19	335,92
TEMMUZ 2013	7,71	10,76	333,62
AĞUSTOS 2013	7,43	9,74	302,13
EYLÜL 2013	6,76	8,65	259,71
EKİM 2013	4,74	7,34	227,8
KASIM 2013	3,41	4,29	128,8
ARALIK 2013	1,99	1,45	45,21
OCAK 2014	2,38	3,10	96,34
ŞUBAT 2014	3,24	6,86	192,3
MART 2014	5,20	6,57	197,14
NİSAN 2014	6,32	8,11	251,49
MAYIS 2014	6,43	8,46	253,97

Ölçülmüş olan güneş ışınım şiddeti değerleri ve şebekeye bağlı 2,145 kWp gücünde çoklu kristal silisyum örgü sisteminin üretmiş olduğu günlük ortalama enerji değerleri kullanılarak sistemin performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Ölçülmüş ışınım şiddeti değerlerinden faydalanarak normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi (Y_R) aylara göre hesaplanmıştır. Ayrıca PX 195-50 kodlu çoklu kristal silisyum modülünün STC değerlerinden ve sistemin elde ettiği enerji değerlerinden de faydalanarak normalize edilmiş sistem enerji üretimi (Y_f) aylara göre hesaplanmıştır. Bu değerlerden faydalanarak da sistem performans oranı tayin edilmiştir. Şekil 4.4'de normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi ve çoklu kristal silisyum örgü

sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretimi değerleri aylara göre çizilmiştir. Şekil 4.5'de ise çoklu kristal silisyum örgü sisteminin performans oranı aylara göre gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi ve çoklu kristal silisyum örgü sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretimi değerleri



Şekil 4.5. Çoklu kristal silisyum örgü sisteminin aylara göre performans oranları

4.3.3. İnce film amorf silisyum örgü sistemi

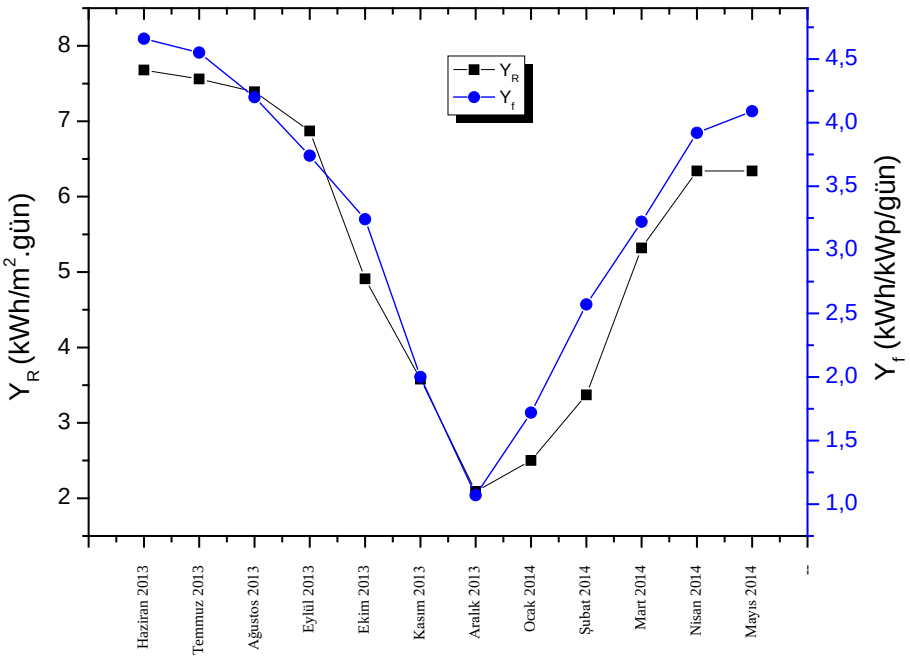
2,160 kWp gücündeki üçerli seri halinde 8 diziden oluşan 24 adet ince film amorf silisyum örgü sisteminden elde edilen aylık enerji değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. İnce film amorf silisyum örgü sisteminin her ay için günlük ve toplam ortalama enerji üretim değerleri

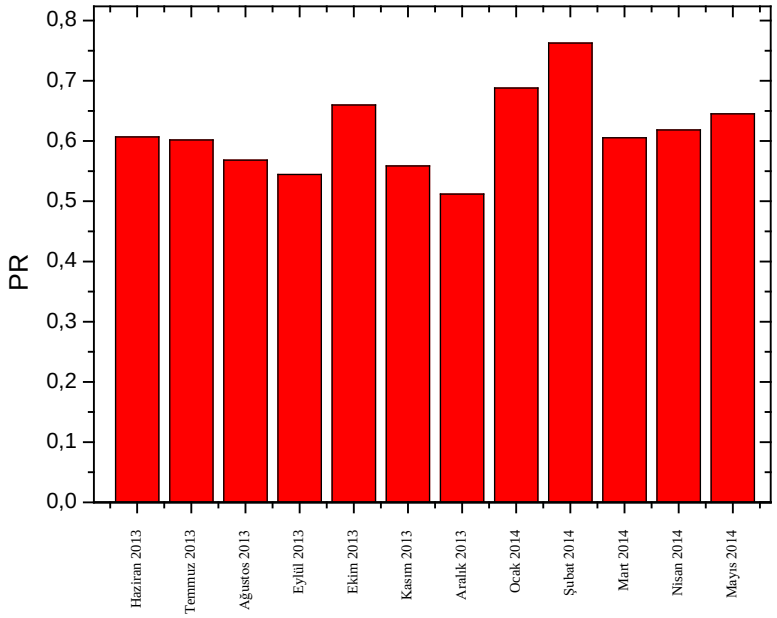
AYLAR	Eğimli Yüzeye (30^o) Gelen Ortalama Günlük Güneş Işınım Şiddeti (kWh/m^2.gün)	Sistem çıkışı (kWh/gün)	Sistem çıkışı (kWh)
HAZİRAN 2013	7,68	9,71	291,03
TEMMUZ 2013	7,56	9,52	295,12
AĞUSTOS 2013	7,39	8,65	268,25
EYLÜL 2013	6,87	7,49	224,7
EKİM 2013	4,91	6,10	189,15
KASIM 2013	3,58	3,33	100,07
ARALIK 2013	2,09	1,16	36,12
OCAK 2014	2,50	2,74	85,12
ŞUBAT 2014	3,37	6,16	172,68
MART 2014	5,32	6,07	182,26
NİSAN 2014	6,34	7,66	237,61
MAYIS 2014	6,34	8,21	246,52

Ölçülmüş olan güneş ışınım şiddeti değerleri ve şebekeye bağlı 2,160 kWp gücünde ince film amorf silisyum örgü sisteminin üretmiş olduğu günlük ortalama enerji değerleri kullanılarak sistemin performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Ölçülmüş ışınım şiddeti değerlerinden faydalanarak normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi (Y_R) aylara göre hesaplanmıştır. Ayrıca SunOne AS 90 kodlu ince film amorf silisyum modülünün STC değerlerinden ve sistemin elde ettiği enerji değerlerinden de faydalanarak normalize edilmiş sistem enerji üretimi (Y_f) aylara göre hesaplanmıştır. Bu değerlerden faydalanarak da sistem performans oranı tayin

edilmiştir. Şekil 4.6'da normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi ve ince film amorf silisyum örgü sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretimi değerleri aylara göre çizilmiştir. Şekil 4.7'de ise ince film amorf silisyum örgü sisteminin performans oranı aylara göre gösterilmiştir.



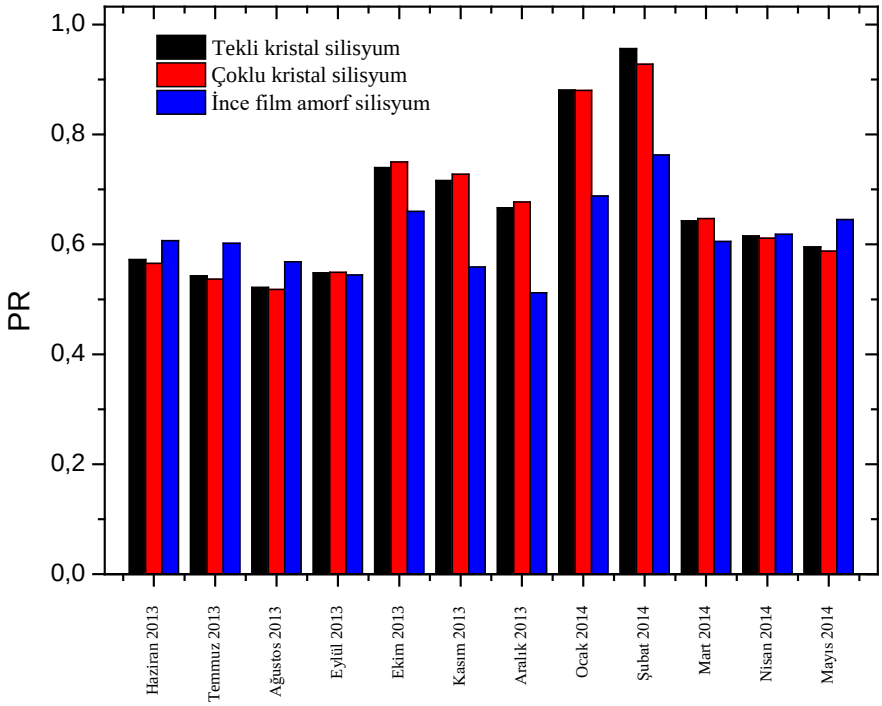
Şekil 4.6. Normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi ve ince film amorf silisyum örgü sisteminden elde edilmiş normalize edilmiş sistem enerji üretimi değerleri



Şekil 4.7. İnce film amorf silisyum örgü sisteminin aylara göre performans oranları

4.3.4. Karşılaştırmalı performans değerlendirmesi

Şekil 4.8'de tekli kristal silisyum, çoklu kristal silisyum ve ince film amorf silisyum sistemlerinin performans oranlarının aylara göre karşılaştırması görülmektedir. Sıcaklığın arttığı aylarda ince film amorf silisyum fotovoltaik sisteminden elde edilen performans oranı iyi olmasına rağmen kış aylarında bu performans önemli derecede düşmüştür. Tekli kristal silisyum ve çoklu kristal silisyum fotovoltaik sistemlerinin performans oranları birbirine yaklaşık derecede takip etmiştir.



Şekil 4.8. Karşılaştırmalı performans değerlendirmesi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Batman ilinde Özel Çözüm İlkokulu (enlem: 37.921; boylam: 41.144) çatısına 2012 yılında kurulmuş farklı teknolojileri sahip fotovoltaik modül sistemlerinin performans analizlerinin karşılaştırması amaçlanmıştır. Ölçüm analizleri Haziran 2013- Mayıs 2014 tarihleri arasını kapsamıştır. Sistem ölçümlerinden ayrıca anlık olarak yüzeye gelen güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı da ölçülmüştür.

Yapılan ölçümlerde en yüksek ışınım değerlerinin Haziran 2013 ile Ağustos 2013 ayları arasını, en düşük ışınım değerlerinin de Kasım 2013 ile Şubat 2014 tarihleri arasını kapsadığı görülmüştür. Ölçülen sıcaklık değerlerinin de buna paralel olduğu görülmektedir. Yıllık elde edilen çıkış güçleri ise sırasıyla tekli kristal silisyum için 2,641 MWh, çoklu kristal silisyum için 2,624 MWh ve ince film amorf silisyum sistemi için 2,328 MWh olarak ölçülmüştür. Ölçülen veriler doğrultusunda hesaplamalar yapılmış, örgü sistemlerinin enerji üretimi ve kayıplar STC koşulları altındaki değerlere normalize edilmiştir. Bu değerler; normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi (Y_R), normalize edilmiş örgü sisteminin enerji üretimi (Y_f) ve sistem performans oranı (PR) olarak sıralanmıştır. Haziran 2013- Mayıs 2014 tarihleri arasındaki tekli kristal silisyum, çoklu kristal silisyum ve ince film amorf silisyum sistemlerinin performans oranlarının aylara göre karşılaştırıldığında; sıcaklığın arttığı aylarda ince film amorf silisyum fotovoltaik sisteminden elde edilen performans oranı iyi olmasına rağmen kış aylarında bu performans önemli derecede düşmüştür. Tekli kristal silisyum ve çoklu kristal silisyum fotovoltaik sistemlerinin performans oranları birbirine yaklaşık derecede takip etmiştir.

Sonuç olarak çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde şu öneriler yapılabilir:

- Batman ili için tekli veya çoklu kristal silisyum modüllerinin hem güç eldesi hem de performans oranlarının ince film amorf silisyum fotovoltaik sisteme göre daha kazançlıdır. Bu nedenle Batman ilinde kurulacak sistemlerde tekli veya çoklu kristal silisyum modülü tercih edilmelidir.
- Alan bazında düşünecek olursak, her bir sistemin vermiş olduğu güçler karşılaşacak olursa yer tasarrufu için tekli veya çoklu kristal silisyum modülleri tercih edilmelidir.

- Bundan sonraki çalışmalarda daha etkin performans elde edilecek ise, modüllerin Batman ili için eğim açılarının optimize edilmesi yerinde olacaktır. Bu şekilde çıkış gücü ve sistem performansında önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir.
- Bir diğer öneri ise bir sonraki çalışmada modüllerin çalışma sıcaklıklarının da doğru bir şekilde ölçülerek sistemlerdeki performansın daha sağlıklı biçimde ele alınabileceği öngörülebilir.

KAYNAKLAR

Alnaser W E, Eliagoubi B, Al Kalak A, Trabelsi H, Al Maalej M, El Sayed HM, Alloush M (2004). First solar radiation atlas for the Arab world. Renewable Energy, at Science Direct Renewable Energy Journal availableat

Anonymous, 1989, Farm accountancy data network, an A-Z of methodology" Commission Report of the EC, Brussels, 16-19.

Anonymous, 2002. http://www.epia.org.

Anonymous, 2004. http://www.eere.energy.gov/solar/sh_basics.html.

Çelebi, G., 2002. *Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri*, Gazi Üniv.Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 17, No 3, s.17-33.

Deline,C.,*Partially Shaded Operation Of a Grid-Tied PV System*, NREL, 2009

Delplanque, E. *Case Study: impact of photovoltaic modules*, www.a-sunenergy.com

Duffie J. A. , Beckman W., A.,1991. *"Solar Engineering of Thermal Process"*, John Wiley & Sons, 919 p.

Foukal P. V., 1990. *Solar Astrophysics, Wiley*, Newyork etc., 496p.

Goldemberg J., 2004. "Renewable energy-traditional biomass vs. modern biomass", Energy Policy, 32, 711-714

Green A.M., 1982. "*Solar Cells.In The United States of America*", 274 p.

Hegedus S. S., Luque A.,2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Status, Trends,Challenges and Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics, John Wiley & Sons, Ltd., 1-43

Iqbal M., 1983. "*An introduction to Solar Radiation*, Academic Press" , 390 p.

Koutroulis E., Blaabjerg F., "Methods for Optimal Design of Grid-Connected Pv İnverts" ,2011

Maycock P., July-August 2004. Renewable Energy World, Volume 7

Messenger A., 2003. *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC Pres

Oktik S., 1999. Güneş-Elektrik Dönüşümleri, Temiz Enerji Vakfı Yayınları, Ankara Türkiye, s 40-42.

Rüther R., Klesis G., 1996. Advantages of thin Film Solar Modules in Façade, Sound Barrier and Roof-Mounted PV sytems, Eurosun'96

Sonnenenergie,2008 . Planning and installing photovoltiac systems : a guide for installers, architects, and engineers / Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie (DGS). - 2nd ed. , 85-116

Suda ,C, 2007. "25,6 kWp Gücündeki Şebekeye Bağlı Entegre Fotovoltaik Güç Sisteminin Üç Yıllık Performansının Parametrelere Göre Değerlendirilmesi", Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. Fizik A.BD. , Yüksek Lisans Tezi, s 23-28

Tozlu, C, 2004. "*Muğla Üniversitesinde Kurulu Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Performans Analizi"*, Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. Fizik A.BD. , Yüksek Lisans Tezi, s.62-78

Wirth,G.,T.Weigl,J.Weizenbeck, M. Zehner, M.Schroedter-Homscheidt, und G. Becker , "*Mapping of snow cover periods for yield assessment and dimensioning of PV system*" , 2009

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Hakkı Öztürker
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Muğla , 29.07.1987
Telefon	**:**	0507 3082574
E-mail	**:**	hakki_ozturker@ hotmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Anadolu Teknik Lisesi, Merkez ,MUĞLA	**2006**
Üniversite	:	Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi , Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Merkez,KOCAELİ	**2012**
Yüksek Lisans	:	Batman Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D , Merkez,BATMAN	**2016**