

T.C
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

MUĞLA ÜNİVERSİTESİNDE KURULU
ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN

PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEM TOZLU

HAZİRAN 2004

MUĞLA

T.C
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

MUĞLA ÜNİVERSİTESİNDE KURULU
ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN
PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEM TOZLU

MUĞLA 2004

Prof. Dr. Şener OKTİK danışmanlığında Cem TOZLU tarafından hazırlanan bu çalışma,/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Şener OKTİK	İmza:
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Tayfun BÜKE	İmza:
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Habibe BAYHAN	İmza:
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Metin Kantar	İmza:

ÖNSÖZ

Bu çalışmada Muğla Üniversitesinde kurulu Türkiye deki ilk bina entegreli 25.6 kWp kurulu güce sahip şebekeye bağlı fotovoltaik güç sisteminin genel performansı incelenmiştir.

Bu değerli çalışma konusunu bana layık gören ve çalışmalarım esnasında bana olan güvenini eksik etmeyen, karşılıklı fikir alışverişlerinde engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, bilimsel düşüncelerimin oluşmasında ve gelişmesinde katkıları büyük olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şener OKTİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle tez çalışmaları esnasında bana yardımcı olan Yard. Doç. Dr. Tayfun Büke, Yard. Doç. Dr. Murat Bayhan, Yard. Doç. Dr. Habibe Bayhan, Yard. Doç. Dr. Ergün Taşarkuyu hocalarıma, Yüksek lisans öğrenimi boyunca verdikleri emeklerinden dolayı bölüm hocalarıma, dostluklarını benden esirgemeyen Araştırma görevlisi arkadaşlarıma özellikle Şadan Özden'e şükranlarımı sunarım.

Cem TOZLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	IV
ABSTRACT.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1.GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ÖZETLERİ.....	10
2.1 GÜNEŞ ENERJİSİ.....	10
2.2 TEMEL GÜNEŞ AÇILARI	12
2.3 TÜRETİLMİŞ GÜNEŞ AÇILARI	13
2.4 GÜNEŞ PİLİN TEMEL YAPISI.....	17
2.5 IŞIMA ALTINDA GÜNEŞ PİLİ.....	23
2.6 FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ.....	30
2.6.1 FOTOVOLTAİK MODÜL.....	31
2.6.2 MODÜL ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİĞİ.....	33
2.6.3 FOTOVOLTAİK ÖRGÜ (ARRAY).....	36
2.6.4 EĞİM AÇISI VE YÖNLENDİRME.....	40
2.7 FOTOVOLTAİK SİSTEM.....	41
2.7.1 SİSTEM BİLEŞENLERİ.....	43
2.7.1-a GÜÇ DENGELİYİCİLERİ (Power Conditioning).....	43
2.7.1-b İNVERTÖR.....	44
3. MATERYAL YÖNTEM.....	47
3.1 SİSTEMDE KULLANILAN PV MODÜLLER.....	49
3.2 SITOP SOLAR 1500 İNVERTÖRLER.....	51
3.3 ŞEBEKE İZLEME VE KORUMA ÜNİTESİ.....	54

3.4 ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	55
3.4.1 NEG DIS GÖSTERGE PANOSU.....	55
3.4.2 NEG LOG DATA LOGGER.....	56
3.4.3 SOZ - 03 IŞINIM SENSÖRÜ (SOLAR IRRADIATION SENSOR).....	58
3.4.4 DZ 4000 W TİPİ ÜÇ FAZLI ENERJİ SAYACI (THREE-PHASE ENERGY METER).....	59
3.5 VERİ KAYDETME VE DEĞERLENDİRME SİSTEMİ.....	60
4. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	66
4.1 SİSTEM PERFORMANS ANALİZİ.....	65
4.2 VERİLERİN ANALİZİ.....	70
4.3 SİSTEM VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ MODÜL SICAKLIĞININ ETKİSİ.....	76
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	89
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	98

**MUĞLA ÜNİVERSİTESİNDE KURULU
ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN
PERFORMANS ANALİZİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Cem TOZLU

**MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

2004

ÖZET

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemler, fotovoltaik güç sistemleri tarafından üretilen elektrik enerjisinin kentsel alanlar içerisinde kullanılmasını sağlayan sistemlerdir. Türkiye’de ilk bina entegreli fotovoltaik sistem Muğla Üniversitesinde Mayıs 2003 tarihinden itibaren çalışmaktadır. Bu çalışmada Muğla Üniversitesin de kurulu “Türk Evi” öğrenci kafeteryası çatısında bulunan STC altında 25.6 kWp kurulu güce sahip fotovoltaik güç sisteminin çalışma karakteristiğini göstermektedir. PV örgü STC altında 120 Wp güce sahip çoklu kristal teknolojisinin kullanıldığı 214 adet PV-MF120 EA2 tipi modüllerden oluşmaktadır. Çatının eğim açısı modüllerin eğim açısı ile aynı olup 18^0 dir ve yönü güney batıya doğrudur. Sistemin ürettiği yıllık enerji miktarı 35 640 kW-saat/yıl olup, PV sistem tarafından şehir şebekesine aktarılan günlük ortalama enerji miktarı 97.64 kW-saat/gün dür. Yapılan simülasyon ile sistemin yıllık enerji üretiminin 36 393 kW-saat/yıl olduğu ortaya çıkmaktadır. Sistemin yıllık performans oranı %78.9 olup, yıllık normalize edilmiş sistem enerji üretimi 1392.2 kW-saat/kW_p dir. Yıllık PV sistemin verimliliği %9.5 olup, aylara göre günlük ortalama sistem verimliliği %8 ile %11 aralığında değişmektedir. Maksimum sistem verimliliği Şubat ayında, minimum sistem verimliliği ise Temmuz ayında gerçekleşmiştir. Bu çalışmada sistemin performansı IEA ülkelerinde bulunan şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerle karşılaştırıldı. Sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağımlılığı ayrıca bu çalışmada incelendi. Sistemin verimliliği artan

modül sıcaklığı ile azalmaktadır. 25 °C üzerindeki modül sıcaklık değerleri için 1 °C modül sıcaklık artışı, sistem verimliliğinde %0.3 ile %0.5 arasında azalmalara yol açmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Güneş pili, Şebekeye bağlı PV sistemler, Sistem performans oranı, Modül sıcaklığı

Sayfa adedi: 98

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Şener OKTİK

**THE PERFORMANCE ANALYSIS OF GRID-CONNECTED
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS INSTALLED AT MUGLA
UNIVERSITY**

(Ph. M. Thesis)

Cem TOZLU

**MUGLA UNIVERSITY
INSTITUTE of SCIENCE and TECHNOLOGY**

2004

ABSTRACT

Grid-connected photovoltaic systems are required to introduce photovoltaic solar energy into urban areas. The first building-integrated photovoltaic system (BIPV) in Turkey has been working since May 2003 at Muğla University. This study presents the operating characteristics of 25,6 kWp photovoltaic power system on the roof of “Türk Evi” student cafeteria installed at Muğla University . PV array consist of 214 PV-MF120 EA2 modules which are polycrystalline modules with 120 Wp under STC. The roof faces sout-west at an 18 degree which is the same tilt angle of modules. The annual system energy yield is about 35 640 kWh/year and the mean daily output energy which is supplied to utility grid by PV system is 97.64 kWh/daily. The simulation result of energy output is 36 393 kWh/year. The nominal annual performance ratio is %73.4 and annual final yield which is normalized energy production of system is 1392.2 kWh/kW_p-year. Annual system efficiency is %9.5 and mean daily system efficiency for each month change between %8 and %11. The maximum system efficiency was occured in February and the minumum system efficiency was in June. In this study we compared performance of this system with Grid-connected systems in IEA countries with respect to annual performance ratio and also we investigated in this study the system efficiency depend on module

temperature. The system efficiency is decreased with increase in module temperature. System efficiency decrease between %0.3 and %0.5 per module temperature for module temperature values which are above 25 °C.

Key Words: Solar Energy, Solar Cell, Grid-Connected PV System, System Performance Ratio, Module Temperature

Page Number: 98

Adviser: Prof. Dr. Şener OKTİK

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 1.1 Dünya üzerindeki şebeke bağlantılı yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu kapasiteleri	2
Şekil 1.2 Yıllara göre üretilen modül ve güneş pilinin oluşturduğu toplam kurulu güç değerleri	3
Şekil 1.3 Dünya üzerinde kullanılan güneş pillerini yüzdeler payları	4
Şekil 1.4 1988 – 2003 yılları arasında ülkelere göre PV pil ve modüllerin toplam üretimi	5
Şekil 1.5 Türkiye deki güneşlenme zamanı ve güneş ışınımı dağılımı	6
Şekil 1.6 Türk Evi çatısı üzerindeki fotovoltaik sistem.....	9
Şekil 2.1 Güneş Işınım Spektrumu	10
Şekil 2.2 Global ışınım bileşenleri	12
Şekil 2.3 Enlem ϕ , saat açısı ω ve deklinasyon açısı δ	12
Şekil 2.4 Zenit, güneş yükseklik ve azimut açıları.....	14
Şekil 2.5 Eğimli bir yüzey için yüzey azimut, eğim açısı ve yüzey-güneş azimut açıları	15
Şekil 2.6 Hava kütlelerinin güneşin konumuna bağlı olarak değişimi.....	17
Şekil 2.7 a- Bor (B) katkılanmış b- Fosfor (P) katkılanmış Silisyum kristali....	19
Şekil 2.8 a) homoeklemi oluşturan yarı-iletken malzemelerin band yapısı b) heteroeklemi oluşturan yarı-iletken malzemelerin band yapısı.....	20
Şekil 2.9 a) p-n eklemde boşaltılmış bölge, elektrik alan oluşumu b) p-n homoeklem band yapısındaki değişim.....	21
Şekil 2.10 a) düz besleme altında b) ters besleme altında p-n eklem enerji band diagramı değişimi	22
Şekil 2.11 Bir p-n eklem diyotun ideal I-V karakteristiği.....	23
Şekil 2.12 Güneş pilinde elektron-boşluk çifti oluşumu ve iletim mekanizmaları.....	24
Şekil 2.13 Doğrudan band aralığına sahip bazı yarı-iletkenler ve silikon için foton enerjisinin fonksiyonu olarak soğurma katsayısı	25

Şekil 2.14 Güneş pilinin ışığa altında ve karanlık altındaki akım – voltaj karakteristiği	26
Şekil 2.15 Güneş pilinin iki diyot modelini içeren eşdeğer devresi.....	28
Şekil 2.16 Tek eklem güneş pilleri için bant aralığına karşı güneş pilleri materyallerinin çevirim verimliliği	29
Şekil 2.17 Fotovoltaik güç sistemlerinin basitten karmaşığa doğru şekillenimi	30
Şekil 2.18 Güneş pillerin a) paralel bağlantı şeması b) seri bağlantı şeması.....	31
Şekil 2.19 Modül ara kesiti	32
Şekil 2.20 Bir modülün elektriksel karakteristiğinde önemli olan parametreler.....	33
Şekil 2.21 Farklı sıcaklıklarda bir PV modülün maksimum güç noktaları ve I-V karakteristiği	34
Şekil 2.22 Güneş pili ve modül verimlilikleri	36
Şekil 2.23 Özdeş olmayan iki modülün seri bağlanması.....	38
Şekil 2.24 Özdeş olmayan iki modülün paralel bağlanması	38
Şekil 2.25 Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin şematik diyagramı.....	41
Şekil 2.26 Hibrit sistemin şematik diyagramı	42
Şekil 2.27 Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin basit şematik diyagramı.....	43
Şekil 3.1 Sistemin temel şeması.....	48
Şekil 3.2 Çoklu kristal modül şekli.....	50
Şekil 3.3 PV örgü bağlantı şeması.....	50
Şekil 3.4 Master – Slave invertör verimlilik eğrisi η_{sis}	51
Şekil 3.5 Slave-Master-Slave invertörleri arasındaki bağlantı şeması.....	52
Şekil 3.6 Sitop solar 1500 Slave-Master-Slave üçlü invertör gurubu.....	53
Şekil 3.7 İnvörtör grupları ile şebeke ve modül grupları arasında yapılan bağlantı	54
Şekil 3.8 Şebeke izleme ünitesi.....	55
Şekil 3.9 NEG DIS gösterge panosu.....	56
Şekil 3.10 NEG LOG data logger.....	57
Şekil 3.11 SOZ – 03 ışınım sensörü.....	59

Şekil 3.12 DZ 4000 W tipi üç fazlı enerji sayacı.....	60
Şekil 3.13 Log-Term programının aktif penceresi.....	61
Şekil 3.14 Data logger ile bilgisayar arasında bağlantı menüsü.....	62
Şekil 3.15 Data logger daki verilerin kaydedilme menüsü.....	63
Şekil 3.16 Gün içerisinde alınan verilerin grafiksel gösterimi.....	64
Şekil 3.17 Data logger içerisindeki parametrelerin değiştirildiği menü penceresi.....	65
Şekil 4.1 Her bir ay için günlük ortalama PV örgü ($\beta = 18^0$) ve yatay düzlem ($\beta = 0^0$) üzerinde birim alana düşen ışınım enerjisi.....	70
Şekil 4.2 Sistem tarafından şebekeye aktarılan her bir aya ait günlük ortalama ac enerji miktarı.....	71
Şekil 4.3 Sistem tarafından şebekeye aktarılan her bir aya ait günlük ortalama ac enerji miktarının simülasyon sonuçları	72
Şekil 4.4 Bir yıl boyunca ışınım enerjisine bağlı olarak sistem tarafından şebekeye aktarılan ortalama günlük enerjinin aylara göre değişimi	72
Şekil 4.5 Her bir ay için günlük ortalama nominal PV örgü alanı üzerinden hesaplanan sistem verimliliği.....	73
Şekil 4.6 Her bir ay için PV örgü yüzeyine düşen normalize edilmiş ortalama günlük ışınım enerjisi değişimi.....	74
Şekil 4.7 Her bir ay için normalize edilmiş ortalama günlük PV sistem enerji üretimi.....	75
Şekil 4.8 Her bir ay için günlük ortalama sistem performans oranı değişimi.....	76
Şekil 4.9 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Mart ayında bir gün için tipik değişimi.....	77
Şekil 4.10 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Temmuz ayında bir gün için tipik değişimi.....	78
Şekil 4.11 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Mayıs ayında bir gün için tipik değişimi.....	79
Şekil 4.12 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Haziran ayında bir gün için tipik değişimi.....	80
Şekil 4.13 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Ağustos ayında bir gün için tipik değişimi.....	81

Şekil 4.14 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Eylül ayında bir gün için tipik değişimi	82
Şekil 4.15 Nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlı olarak Ağustos ayında bir gün için tipik değişimi.....	83
Şekil 4.16 Nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlı olarak Mart ayında bir gün için tipik değişimi	83
Şekil 4.17 Nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlı olarak Mayıs ayında bir gün için tipik değişimi.....	84
Şekil 4.18 Nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlı olarak Temmuz ayında bir gün için tipik değişimi	84
Şekil 4.19 Ağustos ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı	85
Şekil 4.20 Eylül ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı	86
Şekil 4.21 Mayıs ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı.....	86
Şekil 4.22 Haziran ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı	87
Şekil 4.23 Temmuz ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı.....	87

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No</u>	<u>Sayfa No.</u>
Tablo 1.1 Türkiye deki bölgelere göre güneş potansiyeli.....	6
Tablo 3.1 Sistemde kullanılan çoklu kristal modülün elektriksel özellikleri.....	48
Tablo 3.2 Sistemde kullanılan invertörlerin teknik özellikleri.....	52
Tablo 3.3 Seçilen periyotlara karşılık Data Logger içerisinde verilerin depolanma süreleri.....	57

SEMBOLLER DİZİNİ

$^{\circ}C$	Santigrad
Toe	Ton eşdeğer petrol
W	Güç
<i>MW</i>	Mega watt
<i>TW</i>	Tera watt
W_p	Maksimum güç
kWh	Kilo watt saat
K	Kelvin
J	Enerji
G_{sc}	Güneş sabiti
D	Yayılmış ışınım
B	Doğrudan ışınım
ρ	Albedo katsayısı
G	Global ışınım
ϕ	Enlem açısı
ω	Saat açısı
δ	Deklinasyon açısı
ψ	Güneş azimut açısı
θ_z	Zenit açısı
α	Güneş yükseklik açısı
β	Yüzey eğim açısı
γ	Yüzey azimut açısı
μm	Mikro metre
B_0	Atmosfer dışında yatay düzlem üzerine doğrudan gelen güneş ışınımı
$B_{0\beta}$	Eğimli bir yüzey üzerine doğrudan gelen atmosfer dışı güneş ışınımı
τ_{atm}	Atmosferin geçirgenliği

$m(z,\alpha)$	Hava kütlesi
E_v	Değerlik bandının en üst enerji seviyesi
E_c	iletkenlik bandının en alt enerji seviyesi
E_g	Yasak band aralığı
E_F	Fermi enerji seviyesi
V_{bi}	Termal dengedeki iç potansiyel engeli
V_R	Ters besleme voltajı
\vec{E}	İç elektrik alan
W	Boşaltılmış alan genişliği
V_a	Düz besleme voltajı
I_s	diyot ters doyum akımı
k	Boltzmann sabiti
T	Sıcaklık
E	elektron yükü
μ	Mobilite
ARC	Anti reflection coating
$\alpha(\nu)$	Soğurma katsayısı
I_L	Foto akım
L	Güneş pili kalınlığı
W_j	p-n eklemnin yüzeyden olan derinliği
n	Diyot idealite faktörü
I_{sc}	Güneş pili kısa devre akımı
V	Devre üzerine düşen voltaj
I	Devreden geçen akım
V_{oc}	Güneş pili açık devre voltajı
P_m	Güneş pili maksimum gücü
I_m	Güneş pili maksimum akımı
V_m	Güneş pili maksimum voltajı
R_s	Güneş pili seri direnci
R_{sh}	Güneş pili paralel direnci
I_{sr}	Rekombinasyon akımı
FF	Doldurma faktörü (Fill factor)

η	Verimlilik
P_{in}	Güneş pili üzerine düşen ışınım gücü
TS	Texturing surface
N	Seri bağlı güneş pili sayısı
L_D	Difüzyon uzunluğu
$a-Si$	Amorf silisyum
$CdTe$	Kadmiyum Tellür
CIS	Bakır İndiyum Diselenid
V_T	Termal voltaj
V	Modül terminal voltajı
η_{ref}	STC koşulları altında maksimum güneş pili verimliliği
STC	Standart test koşulu (Standart test condition)
$\mu_{P,mp}$	Verimlilik sıcaklık katsayısı
$T_{c,ref}$	Referans güneş pili sıcaklığı
T_c	Güneş pili sıcaklığı
A_m	Modül etkin alanı
MPP	Maksimum güç noktası (Maximum power point)
I_0	Modül doyum akımı
M	Paralel bağlı modül sayısını
N	Seri bağlı modül sayısı
PV	Fotovoltaik (Photovoltaic)
BOS	Sistem dengesi (Balance of system)
$MPPT$	Maksimum güç nokta izleyicisi AC Alternatif akım
DC	Doğru akım
$IGBT$	yalıtılmış geçitli çift kutuplu transistör
$MOSFET$	Metal oksit alan etkili transistör
AM	Hava kütlesi
Y_f	Normalize edilmiş sistem enerji üretimi
PF	Performans oranı
Y_R	Normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi
H_β	Eğimli yüzey üzerinde birim alana gelen ışınım enerjisi

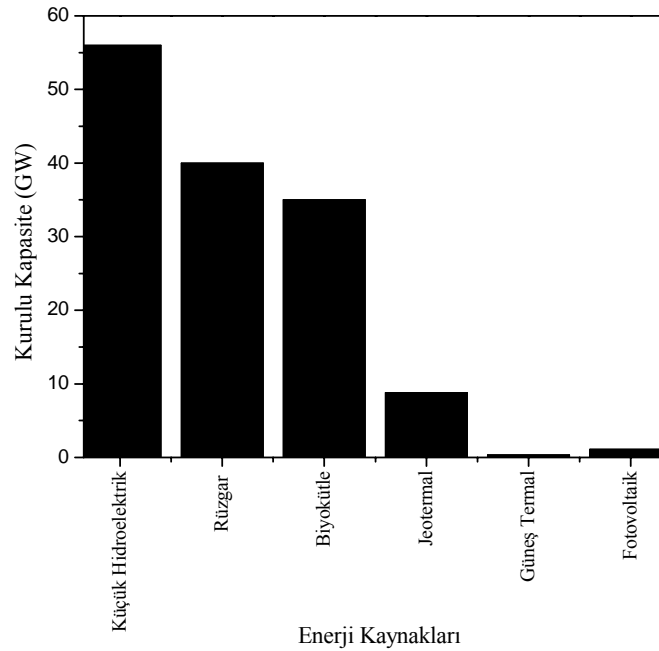
G_{STC}	STC altında tanımlana ışınım gücü ($1000 W/m^2$)
$W_{p,e}$	Fotovoltaik örgünün STC altındaki kurulu güç değeri
$E_{\text{şebeke}}$	PV örgü tarafından şebekeye aktarılan AC enerji
P_{sys}	Sistem çıkış gücü
G_{β}	Eğimli yüzeyde birim alana gelen ışınım
$A_{PV \text{ örgü}}$	PV örgünün toplam alanı
$\eta_{sys,g}$	Günlük sistem verimliliği
$H_{\beta,g}$	PV örgü yüzeyi üzerinde birim alana düşen günlük ışınım enerjisi
$\eta_{sys,a}$	Aylık ortalama günlük sistem verimliliği
$E_{sys,a}$	PV sistem tarafından şebekeye aktarılan aylık ortalama günlük enerji miktarı
β	Modüllerin eğim açısı
WRC	Dünya ışınım merkezi
$NASA$	Ulusal havacılık ve uzay yönetimi

1. GİRİŞ

21. yüzyıl modern çağı; Ekonomik gelişimin hayata geçirilmesi (E:Ekonomi), Enerji harcamalarındaki artış (E: Enerji) ve Enerjideki artışın çevreye verdiği zarar (E: Environment, Çevre) olarak 3E olarak bilinen üç faktör üzerine odaklanmıştır. Burada önemli olan bu üç şartın hepsinin bir arada sağlanabilmesidir. Eğer petrol ve türevi enerji kaynakları kullanılarak üretilen enerjinin ortaya çıkardığı zehirli gaz yayılımını çok az miktarlara çekilmek istenirse bu ekonomik olarak gelişimi engellemektedir. Ayrıca dünya nüfusunun 2000 yılının sonlarında 6 milyar değerine ulaşması ve bu artış ile doğru orantılı olarak büyüyen enerji talebindeki artış yukarıda sözü geçen 3E faktörünü engellemektedir. Bu nedenlerden dolayı sınırlı miktarda bulunan petrol kaynaklı enerji kaynaklarının seri üretimi ve global çevre konuları şu anda dünya üzerinde enerji politikasını belirleyen başlıca iki faktördür. Bu iki önemli faktör ele alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarının tükenmez enerji kaynakları olması ve çevre üzerindeki etkilerinin oldukça az olması gelecek yıllarda dünya'nın başlıca enerji kaynakları olacakları açıktır. Fotovoltaik enerjinin kaynağının sonsuz olması ve dünya üzerinde bulunan herhangi bir yerde bu kaynağa ulaşılabilmesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemini ortaya çıkartmaktadır. Dünya üzerine düşen toplam güneş enerjisinin miktarı, modern hayatın sürekliliğini koruyabilmesi için gerekli olan toplam dünya enerji tüketiminden 5 kattan daha fazla büyüklüğe sahiptir (Hamakawa,2002).

Yenilenebilir enerji kaynakları elektrik, ısı gibi Dünyanın temel enerji ihtiyacının %19'unu karşılamaktadır. Bunun büyük bölümü hidroelektrik santraller ve gelişmiş ülkelerde ki tarımsal artıkları içeren biyokütle enerjisinin kullanılmasıyla karşılanmaktadır. Güneş ve rüzgar enerjisi gibi yeni yenilenebilir enerji kaynakları şu andaki dünya elektrik enerjisi talebinin çok küçük bir kısmını karşılamalarına rağmen ortalama yıllık %30'luk oran ile hızla büyümektedirler. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık ortalama büyüme oranları %3 ile %6 arasında değişmektedir. (Goldemberg J., 2004).

Dünya üzerinde 2003 yılı için şebekeye bağlı güç santrallerinin toplam kapasitesi 3700 (GW) dır ve büyük hidroelektrik santralleri 730 GW güç kapasitesine sahiptir. Şekil 1.1'de 2003 yılı için şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu kapasitelerini göstermektedir (<http://www.martinot.info/markets.htm>).

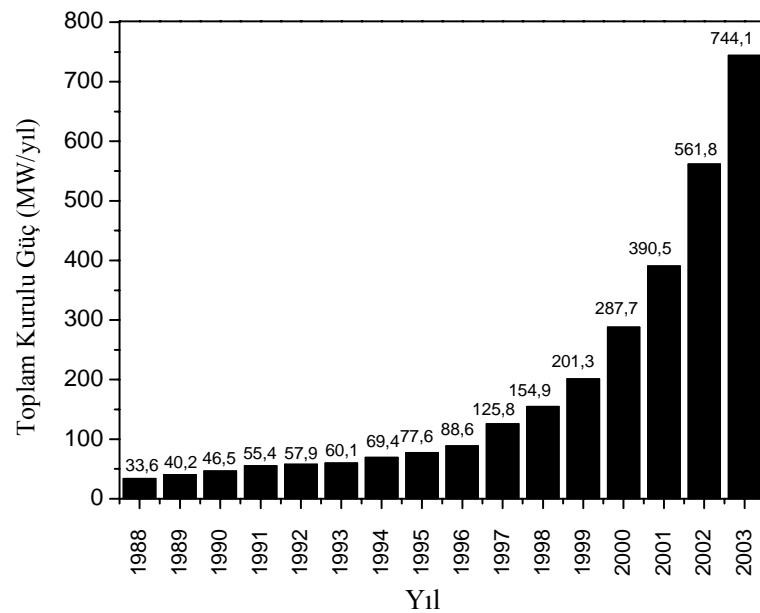


Şekil 1.1 Dünya üzerindeki şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu kapasiteleri

Dünya yüzeyine her yıl ulaşan güneş ışınlarının enerjisi 80 milyar ton petrole eşdeğerdir (toe). Bu değer her yıl dünyada tüketilen enerjinin yaklaşık 10.000 katına eşittir ve kömür, petrol, doğal gaz ve uranyum kaynaklarının tüm rezervlerinden elde edilen enerjiden daha fazladır. 80 Milyar toe enerjinin yaklaşık 25 Milyar toe'si kıtalara, geriye kalan 55 Milyar toe enerji değeri ise okyanuslara çarpmaktadır (Nebbia, 2001). Güneş enerjisinin, fotovoltaik , termal enerji ve sıcak su kaynağı olarak doğrudan kullanılması sonucu üretilen yıllık enerji miktarı olarak 12 000 – 40 000 TW-saat/yıl aralığındadır (Gross vd, 2002).

Fotovoltaik enerjinin temeli 1960 yıllarındaki Amerika'nın uzay programlarına dayanmaktadır. Dünya üzerindeki ilk uygulamaları ise çok az güç gerektiren hesap makineleri, yerleşim alanından uzak küçük ölçekli uygulamalar, telekomünikasyon uygulamalarıdır. 20 yüzyılın sonlarında birkaç ülkenin politik destekleri, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız uygulamaları kapsayan fotovoltaik pazarın büyümesinde önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi son 5 yıl içerisinde bu oran % 30 değeri civarına ulaşmış ve bu oran her yıl için büyük bir

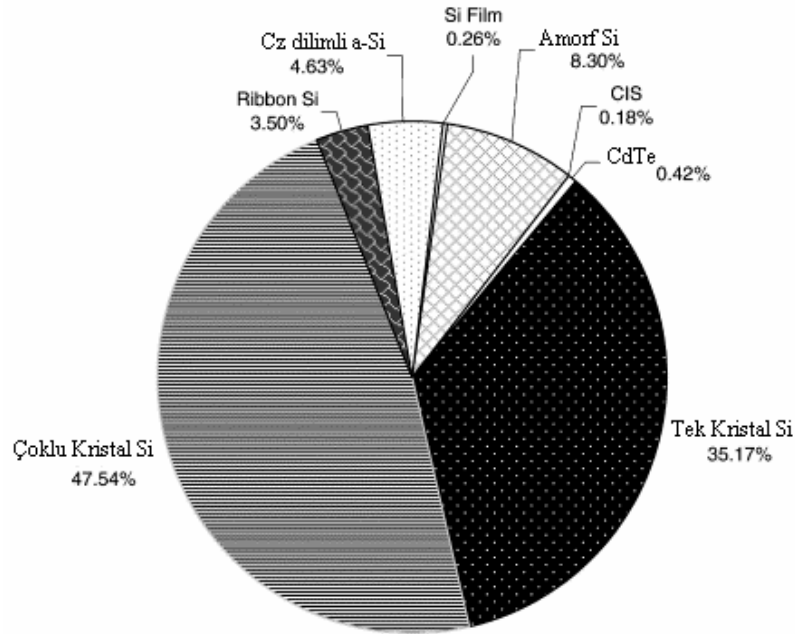
hızla artmaktadır. En son 2 yıl içindeki büyüme oranı yaklaşık % 40 değerine yaklaşmıştır. 2003 yılında fotovoltaik endüstrisi 744 MW_p kurulu güce ulaşmış ve yaklaşık 3 milyar dolarlık bir sektör haline gelmiştir. Fotovoltaik modüllerin peak Watt (W_p) başına maliyetleri 1970 li yılların başlarındaki 100 dolarlardan bugün 4 dolardan daha az seviyelere ulaşmıştır. Maliyetteki bu azalma oranı ile ters orantılı olarak en yaygın olarak kullanılan mevcut ticari modüllerin verimlilikleri 1980 yılındaki % 10'nun altındaki değerlerden % 14 değerine ulaşmıştır. Yakın gelecekte fotovoltaik materyallerin üçüncü jenerasyonu olarak yarıiletken polimerler (polymers) gibi maliyette çok büyük azalmalara yol açabilecek malzemelerin kullanılması öngörülmektedir. Fotovoltaik pazardaki büyüme ve maliyet eğrisindeki bilgilere dayanarak 20 yıl ömürlü bir fotovoltaik sistemde sonucunda 2020 yılına kadar kilowatt saat (kWh) başına maliyetin 15 cent civarında olacağı, 2025 yılına kadar bu değerın 10,5 cent değerine düşeceği belirtilmektedir (Gross vd, 2002).



Şekil 1.2 Yıllara göre üretilen modül ve güneş pilinin oluşturduğu toplam kurulu güç değerleri (Maycock 2004, <http://www.solarbuzz.com>)

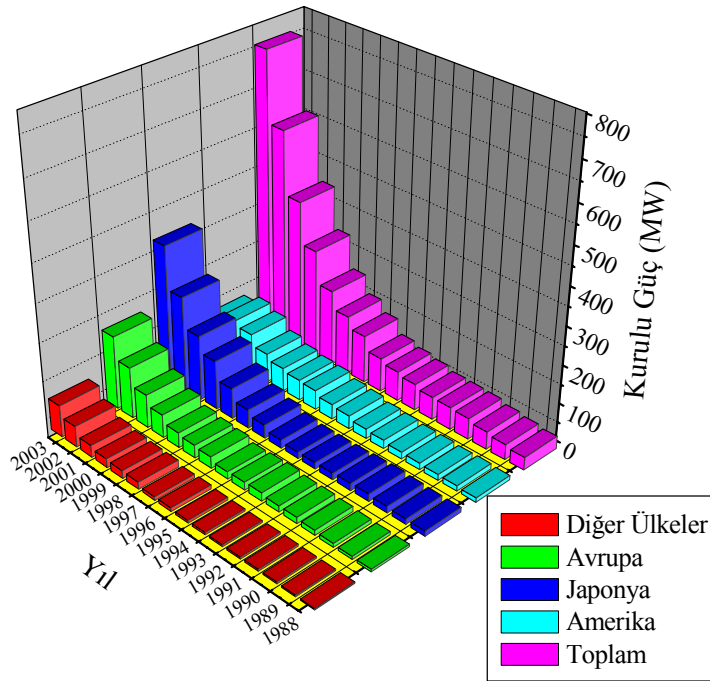
Kristal ve ince film yapısındaki silisyum güneş pillerinin fotovoltaik pazardaki payı Şekil 1.3'de gösterildiği gibi %99'dur. Silisyumun Dünya üzerinde oksijenden

sonra en çok bulunan element olması ve ham materyal olarak elde edilebilmesi bu oranın çıkmasına en büyük etkidir.



Şekil 1.3 Dünya üzerinde kullanılan güneş pillerini yüzdelik payları
(Goetzberger vd, 2003)

Fotovoltaik güç sistemleri için oluşturulan Dünya genelindeki araştırma ve geliştirme programları ile 2030 yılına kadar Amerika toplam enerji üretim kapasitesinin %10'luk kısmını fotovoltaik güç sistemleri ile karşılamayı hedeflemektedir. 2030 yılına kadar hedeflenen fotovoltaik sistemlerinin toplam kurulu güç kapasitesi değerleri Japonya da 72 GW, Amerika da 25 GW ve Avrupa ülkelerinde toplam 30 GW olarak öngörülmektedir (Waldau- Jäger A., 2002). Şekil 1.4'de ülkelere göre PV pil ve modüllerin toplam üretimi dağılımdan görüldüğü gibi Japonya Dünya üzerinde fotovoltaik enerji kaynağının aktif olarak uygulanması açısından lider ülkedir ve son iki yılda özellikle Almanya, Hollanda, İsviçre önderliğinde yürütülen hükümet destekli fotovoltaik programlar ile Avrupa'nın Dünya üzerindeki fotovoltaik market payı yükselmiştir.



Şekil 1.4 1988 – 2003 yılları arasında ülkelere göre PV pil ve modüllerin toplam üretimi (Maycock P., 2004)

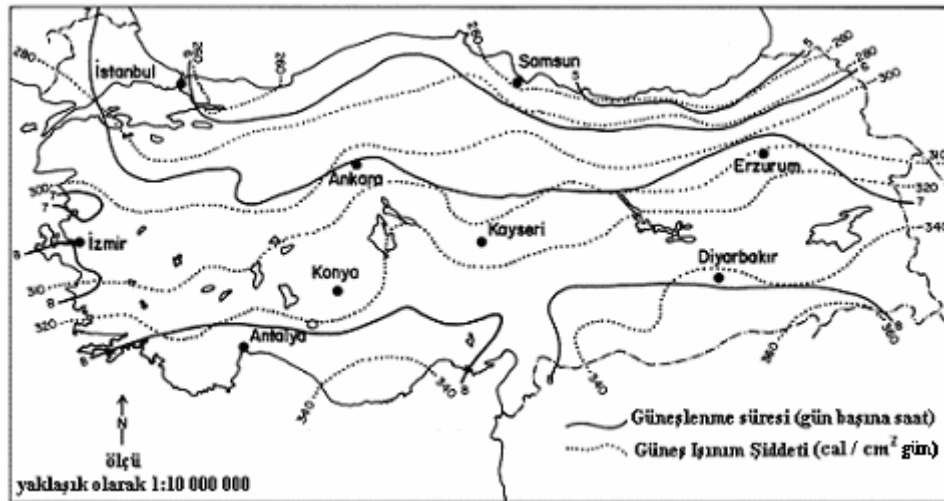
Fotovoltaik güç sistemlerin ilk uygulamalarında birinci jenerasyon olan kristal silikon teknolojisi kullanılmaktaydı. Yıllar süren araştırma ve teknolojik gelişmelerin sonucunda ikinci jenerasyon ince film güneş pilleri son yıllarda fotovoltaik market pazarında hızlı bir büyüme sergilemektedir. Geniş alanlı fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan ikinci jenerasyon ince film güneş pillerinin önde gelenleri amorf silikon (a-Si), CdTe ve CuIn(Ga)Se₂ teknolojileridir. İnce film üretim kapasitesindeki büyüme oranı son on yıl içinde % 40 seviyelerine ulaşmış ve 2010 yılı için fotovoltaik güneş pilleri üretiminde % 50 market payına sahip olması beklenmektedir (Hegedus vd, 2003).

Güneş enerjisi Türkiye'nin ihtiyaç duyduğu enerjinin önemli bir kısmını sağlamakta çok büyük potansiyele sahiptir. Türkiye de ortalama yıllık güneş ışınım enerjisi değeri 1303 kW-saat m⁻² yıl⁻¹ ve toplam ışınım zamanı olarak 2623 saat dir. Bölgelere göre güneş ışınım enerjisi değerleri ve güneşlenme süreleri Tablo 1.1'de

ve Şekil 1.5’de gösterilmektedir. Oturmaya ayrılmış ve ticari sektörler, özellikle güneye ve batıya ait bölgelerde güneş ısı sistemleri için 2001 yılında 750 ha (1 ha:10 000 m²) kurulu düz (*flat plate*) kolektörlere sahip idi. Güneş enerjisinin kullanımı 1999 yılındaki 0.11 Mtoe (1 Mtoe: 4.1868x 10⁴ TJ) değerinden, 2020 yılına kadar 7 kat artması beklenmektedir.

Tablo 1.1 Türkiye deki bölgelere göre güneş potansiyeli (Ocak vd, 2004)

Bölgeler	Yıllık Ortalama Güneş Işınım Enerjisi (kW-saat m ⁻² yıl ⁻¹)	Güneşlenme Zamanı (saat yıl ⁻¹)
Marmara	1168	2409
Güneydoğu Anadolu	1460	2993
Ege	1304	2738
Akdeniz	1390	2956
Karadeniz	1120	1971
İç Anadolu	1314	2628
Doğu Anadolu	1365	2664
Türkiye Ortalaması	1303	2623



Şekil 1.5 Türkiye deki güneşlenme zamanı ve güneş ışınımı dağılımı (Ediger vd, 1999)

Türkiye de TUBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu) ışınım ölçümleri, su ısıtma sistemleri, aktif - pasif alan ısıtma sistemleri, sera gazları alanlarında araştırmalar yapmakta ve güneş enerjisi projeleri için fon sağlamaktadır. E.İ.E.İ (Elektrik İşleri Etüt İdaresi) 1982 yılından itibaren özellikle güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi için çalışmaktadır. Türkiye de mevcut güneş enerjisi uygulaması olarak sıcak su sistemleri oldukça yaygın olup 8.2 milyon m² kolektör alanı ile dünya da lider ülkelerden biridir.

Fotovoltaik uygulama projeleri olarak Türkiye deki başlıca projeler telekomünikasyon istasyonları, yangın gözetleme istasyonları, fener kuleleri ve otoban ikaz sistemleri olarak gösterilebilir. E.İ.E.İ tarafından Türkiye de başlatılan fotovoltaik güç sistemleri uygulama alanlarından başlıcaları 160 W_p'lık aydınlatma sistemi ve 1kW_p'lık sokak aydınlatma sistemi, 1988 yılında didim eğitim merkezine kurulan PV su pompalama sistemi, 756 W_p'lık yenilenebilir enerji parkında su pompalama sistemi, 570 W_p'lık taşınabilir PV sistem ve PV trafik ikaz sistemleri, 1998 yılında kurulan 4,8 kW_p kurulu güç değerine sahip şebekeye bağlı PV sistemi E.İ.E.İ.'nin Didim bölgesindeki güneş ve rüzgar eğitim merkezinde kurulmuştur. Ayrıca 1,2 kW_p lik kurulu güç değerine sahip şebekeye bağlı diğer bir PV sistem Ankara da kurulmuştur (Ocak vd, 2004). Afyonkarahisar, Göcek, Uşak ve Kahramanmaraş da telekomünikasyon için toplam 50 kW_p güce sahip PV sistemler kuruludur. Berke barajında bazı birimlerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için 14 kW_p PV güç sistemi 2001 yılında kurulmuştur (Hepbaşlı A., 2004). Türkiye de bir çoğu iletişim istasyonlarında olmak üzere, yangın gözetleme istasyonlarında, deniz fenerleri ve otoyol sistemlerinde 2002 yılı verilerine göre toplam 300 kW_p güce sahip fotovoltaik güç sistemleri bulunmaktadır (Evrendilek vd, 2003) . Muğla Üniversitesi Temiz Enerji Kaynakları Araştırma ve Geliştirme Merkezi tarafından yürütülen Fotovoltaik Güç sistemleri projesi kapsamında şu ana kadar 53 kW_p kurula güce sahip şebeke bağlı ve şebekeden bağımsız (otonom) sistemler kampus içerisinde yerleştirilmiştir. 2003 verilerine dayanarak Muğla Üniversitesin deki fotovoltaik güç sistemlerinin Türkiye deki payı yaklaşık olarak %16.7 dir.

Fotovoltaik güç sistemlerinde performans analizi, bu tür güç sistemlerinin uygulanabilirliği açısından önem taşımaktadır. Dünya üzerinde şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin yıllık performansı belirlenerek diğer uygulamalarla

kıyaslanmaktadır. İspanya'nın Málaga üniversitesinde 2.0 kW_p güce sahip fotovoltaik sistemin ortalama günlük enerji üretimi 7.4 kW-saat/gün ve yıllık performans oranı %64.5 dır (Sidrach-de-Cardona vd, 1999). Polonya'da çatı uygulamalı 1 kW_p şebekeye bağı fotovoltaik sistemde yapılan değerlendirmeler sonucunda, yıllık performans oranı %60 - %80 ve sistem verimliliği %4 - %5 arasında değişmektedir (Pietruszko vd, 2003). Hong Kong'da bina entegreli şebekeye bağı 8 kW_p güce sahip fotovoltaik sistem uygulamasında üç farklı yönelime sahip çatı için güneş ışınlarının geliş açısına bağı olarak üretilen enerji değerleri karşılaştırılmaktadır (Yang vd, 2004). Brezilya da 750 kW_p güce sahip tek kristal modüllerden oluşan şebekeye bağı küçük fotovoltaik sistem üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda yıllık performans oranı %74.7 dır. Bu çalışmada aylara göre üretilen enerji miktarları incelenerek fotovoltaik sistemin performansındaki mevsimsel değişimler incelenmiştir (Ferreira de Oliveria vd, 2001). Japonya'nın Wakayama şehrinde bulunan Ulusal teknoloji kolejinde (National College of Technology) %12.5 verimliliğe sahip çoklu kristal (*polycrystal*) modüllerden oluşan 40 kW_p kurula güce sahip fotovoltaik güç sisteminin modül sıcaklığına bağı verimliliği incelenmiştir. Bu sistemin yıllık enerji üretimi 53 .4315 MW-saat/yıl dır (Yamaguchi vd, 2003). Muğla Üniversitesinde kurulu olan 25.6 kW_p kurulu güce sahip şebekeye bağı fotovoltaik güç sisteminin şebekeye bir yıl boyunca aktardığı enerji değeri 35.640 MW-saat /yıl ve ortalama günlük enerji değeri 97.64 kW-saat/gün dır. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda sistemin şebekeye aktardığı yıllık enerji değeri olarak 35.3 MW-saat/yıl ortaya çıkmaktadır.

Yukarıda açıklanan çalışmalar ışığında bu çalışmanın amacı; ülkemizde aktif olarak kullanılmakta olan hidro, jeotermal ve rüzgar temiz enerji kaynaklarının yanında güneş enerjisi açısından zengin bir coğrafik konumda olan ülkemizde özellikle şebekeye bağı fotovoltaik sistemlerin uygulanabilir olduğunu göstermek ve fotovoltaik güç sistemleri konusundaki "know how"un ülkemize taşınması amaçlamaktır. Bu amaçla Şekil 1.6'da gösterilen şebekeye bağı 25.6 kW_p kurulu güce sahip Türk Evi çatı uygulamalı fotovoltaik sistemin bir yıllık performansı değerlendirilmiş ve dünya üzerinde örneklerle karşılaştırılarak Türkiye de fotovoltaik sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bir yıllık periyot üzerinden aylara göre sistem verimliliği, yapılan kolerasyon çalışmasıyla değişik

aylar üzerinde değerlendirilmesi yapılmış ve aylara göre sistemin ürettiği enerjinin analizi yapılmıştır.



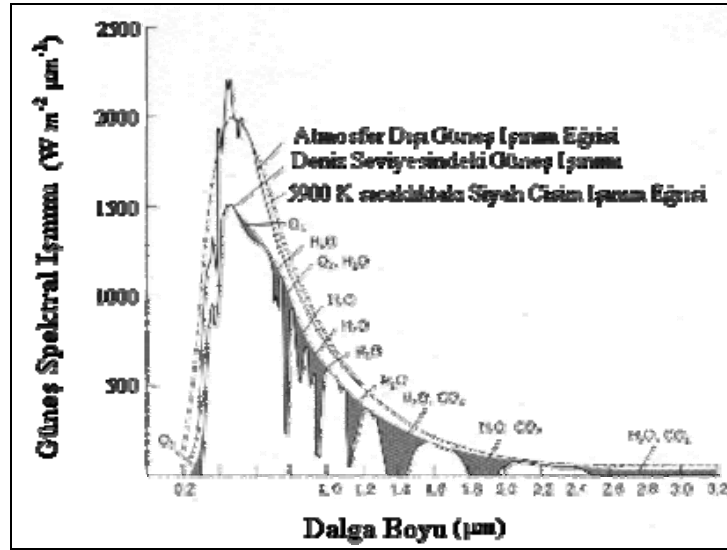
şekil 1.6 Türk Evi çatısı üzerindeki fotovoltatik sistem

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 GÜNEŞ ENERJİSİ

Fotovoltaik enerji mühendisliğinde, fotovoltaik güç sisteminin bulunduğu bölgenin güneş ışınımı ve güneşlenme süresi değerleri, sistemin kurulumunda önemli parametreleri oluşturmaktadır.

Güneş, 4 protonun 1 helyum çekirdeğine dönüşmesi (füzyon) sonucunda $3,826 \times 10^{26} \text{ J.s}^{-1}$ değerinde elektromanyetik enerji yayımlar. Güneş içerisindeki bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan enerji elektro manyetik dalgalar şeklinde uzayda yayılmaktadır. Güneş Şekil 2.1 de görüldüğü gibi 5770 K sıcaklıktaki siyah cisim ışınım spektrumuna sahiptir (Foukal 1990).

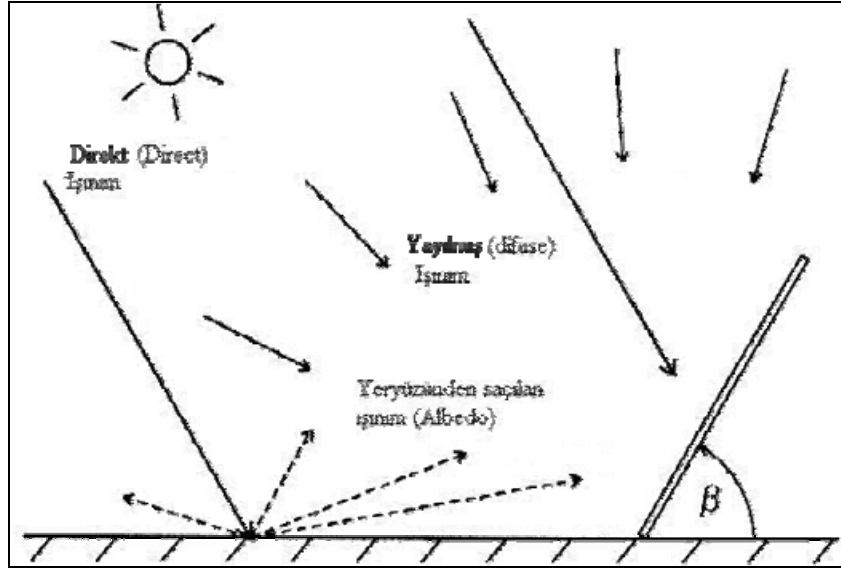


Şekil 2.1 Güneş Işınım Spektrumu (<http://ceos.cnes.fr:8100>)

Dünya'nın atmosferi dışına ulaşan ışınımın spektral dağılımı fotovoltaik güç dönüşümünü gerçekleştiren güneş pillerini seçmek için önemlidir. Dünya üzerindeki bir yüzeye ulaşan ışınımın spektral dağılımı, atmosfer dışı dağılımın ve atmosferik bileşenlerin bir fonksiyonudur. Yeryüzüne ait bu spektral dağılım (terrestrial distribution) fotovoltaik sistemler için önem teşkil eder.

Astronomik birimde *güneş sabiti*, G_{sc} , atmosfer dışında birim alana dikey olarak gelen güneş ışınlarının tüm dalga boylarını içeren birim zamandaki toplam güneş ışınım enerjisidir. *NASA* güneş sabiti değerini yaptıkları bir çok ölçümden sonra $G_{sc} = 1353 \text{ W m}^{-2}$ almıştır. Bu değer *NASA* tarafından 1971 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Dünya ışınım merkezi (*WRC*) güneş sabiti değerini $G_{sc} = 1367 \text{ W m}^{-2}$ olarak kabul etmektedir ve ışınım hesaplamalarında güneş sabiti değeri olarak bu değer kullanılmaktadır (Iqbal, 1983).

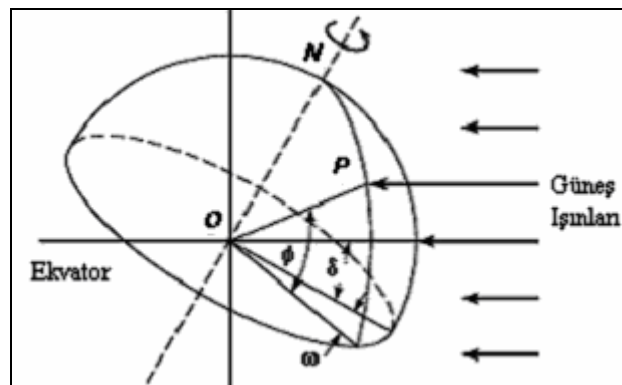
Güneş ışınları yeryüzüne ulaşmadan önce atmosferde bulunan moleküller nedeniyle bir kısmının saçılarak yön değiştirmesi ve bir kısmının da soğurulması ile enerjilerini belli oranda kaybederler. Saçılan ışınım yayılmış (diffuse) ışınım, D , adı verilir. Bu ışınımın bir kısmı uzaya doğru geri yansıtılır bir kısmı da yeryüzüne ulaşır. Yeryüzüne güneşten çizilen bir doğru boyunca yön değiştirmeden gelen ışınım doğrudan (direct) ışınım, B , adı verilir. Bir yüzey üzerine gelen güneş ışınlarının bir kısmı yüzey tarafından soğurulur, bir kısmı yansıtılır ve bir kısmı da geçirilir. Gelen ışınım kaynağı güneş olduğu zaman yeryüzünden yansıyan ışınlar genel adıyla albedo ismi verilir ve ρ ile tanımlanır. ρ belirli bir yüzey üzerinden yansıyan ışınımın, yüzey üzerine düşen toplam ışınım oranı olarak tanımlanır. Fotovoltaik uygulamalar için albedo önemli bir rol oynamakta ve yüzeyin cinsine bağlı olarak 0.2 ile 0.8 arasında farklı değerler almaktadır. Eğimli bir yüzey üzerindeki toplam (global), G , güneş ışınımı Şekil 2.2 de gösterildiği gibi doğrudan, yayılmış ve yansıyan ışınların toplamıdır (Rüther vd, 1996).



Şekil 2.2 Global ışınım bileşenleri (Woyte, 2003)

2.2 TEMEL GÜNEŞ AÇILARI

Dünya'nın yüzeyi üzerinde yer alan bir noktanın konumu güneş ışınlarına bağlı olarak herhangi bir anda bulunabilir. Güneş ışınlarının belirlenmesinde enlem ϕ , saat açısı ω , güneş deklinasyon açısı δ temel açılarının bilinmesi gerekmektedir. Şekil 2.3'de dünya yüzeyinde yer alan P noktasına göre temel açılar gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Enlem ϕ , saat açısı ω ve deklinasyon açısı δ (Ramsey, 2003)

Enlem ϕ ; P noktasının ekvator dan olan açısal uzaklığıdır. Bu terim OP doğrusu ile OP doğrusunun ekvator düzlemindeki izdüşümü arasındaki açıdır. Kuzey enlemleri pozitif ve güney enlemleri negatiftir.

Saat açısı ω ; ekvator düzleminde oluşan OP doğrusunun iz düşümü ve güneşin merkezinden dünya'nın merkezine çizilen doğrunun izdüşümü arasındaki açı ile ölçülür. Güneş öğlesinde yani güneş yüksekliğinin maksimum olduğu anda saat açısı sıfırdır. Saat açısı güneş öğlesine bağlı olarak günün zamanlarını belirtmektedir.

Güneş deklinasyon açısı δ ; güneş ışınlarının kuzey veya güney yarımküredeki konumları ile ekvator düzlemi arasındaki açısal mesafesidir. Bu açı; güneşin merkezinden dünya'nın merkezine çizilen bir doğru ile bu doğrunun ekvator düzlemi üzerindeki iz düşümü arasında oluşan açı ile bulunur. Deklinasyon açısı bir yıl boyunca $23,5^0$ ile $23,5^0$ arasında değerler almaktadır (Ramsey, 2003). Deklinasyon açısının değişimi 24 saat boyunca $0,5^0$ daha düşük bir derecedir. Bu nedenle 1 gün boyunca deklinasyon açısı sabit kabul edilir (Uyarel vd, 1987).

Deklinasyon açısının yıl boyunca değişimi ;

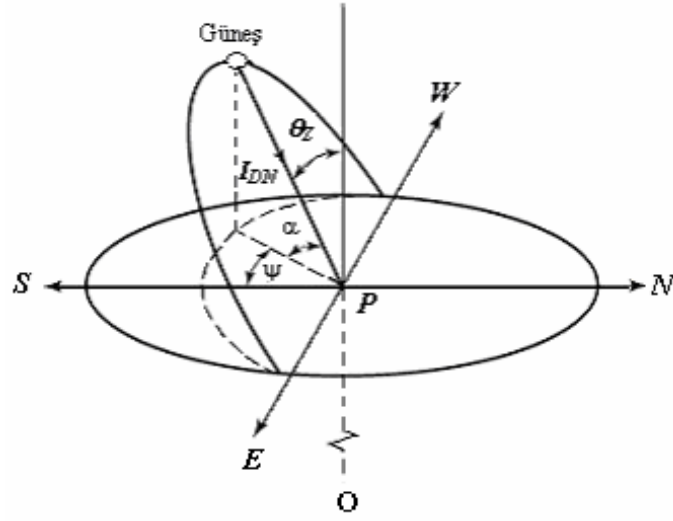
$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (2.1)$$

deklinasyon açısının birimi derece olup formülde kullanılan n; 1 Ocak tarihinden itibaren 1 yıl boyunca geçen gün sayısını vermektedir. (Iqbal, 1983)

2.3 TÜRETİLMİŞ GÜNEŞ AÇILARI

Üç temel açının yanında güneş ışınımı hesaplamaları için birkaç açı bağıntısı tanımlanmıştır. Bu açılar güneş zenit açısı θ_z , güneş yükseklik açısı α ve güneş azimut açısı ψ . Fotovoltaik modüllerin güneş ışınımından maksimum faydalanması için güneş ışınlarının geliş açısı ve yüzey azimut açısı γ_s ayrıca ifade edilmelidir.

Yerkürede ki bir gözlemci için güneş gökyüzünde doğudan batıya doğru dairesel bir yol taramaktadır. Şekil 2.4'de güneşin hareketi ve güneşe bağlı türetilmiş açılar gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Zenit, güneş yükseklik ve azimut açıları (Ramsey, 2003)

Bu şekilde P noktası gözlemcinin yerini belirtmektedir. O noktası dünya'nın merkezi ve I_{DN} güneş ışınlarının yönünü belirten doğrudur

Zenit açısı θ_z ; P noktasına doğrudan gelen güneş ışınlarının P noktasındaki yatay düzlemin normali ile yaptığı açıdır.

Yükseklik açısı α ; güneş ışınları ve güneş ışınlarının yatay düzlemdeki izdüşümü arasındaki açıdır. $\theta_z + \alpha = 90^\circ$

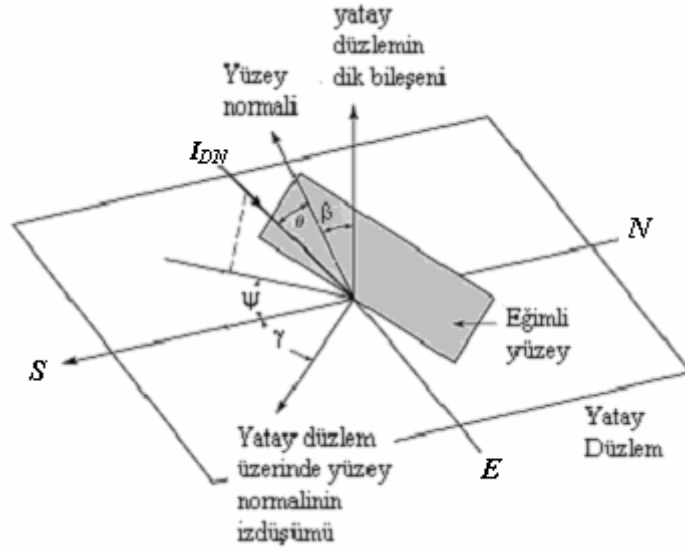
Solar azimut açısı ψ ; yatay düzlemde tam güney doğrultusu ile güneş ışınlarının yatay düzlemdeki izdüşümü arasında ölçülen açıdır.

Zenit açısı;

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \omega \cos \delta + \sin \phi \sin \delta \quad (2.2)$$

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

Yatay yüzeyler için ifade edilen bu açılara ek olarak eğimli yüzeylerde güneş ışınımı hesaplamalarında kullanılan güneş ışınlarının yüzeye gelme açısı, θ , önemli bir yer teşkil eder. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi güneş ışınlarının geliş açısı, güneş ışınları ile yüzeyin normali arasındaki açıdır. Geliş açısını değerlendirmek için yüzey normalinin yönelimi bu değerlendirmede önemli bir yer tutar. Yüzey normalinin yönelimini yüzey eğim açısı, β , ve yüzey azimut açısı, γ , olmak üzere iki açı belirlemektedir. Yüzey eğim açısı yüzey normali ile yerin dikey bileşeni arasındaki açıdır. Yüzey azimut açısı, tam güney ile yüzey normalinin yatay düzlemdeki izdüşümü arasındaki açıdır.



Şekil 2.5 Eğimli bir yüzey için yüzey azimut, eğim açısı ve yüzey-güneş azimut açıları (Ramsey, 2003).

Yüzey azimut açısının sıfır olduğu yani yüzeyin yönü tam güneye doğru ise güneş ışınlarının gelme açısı, θ , aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır (Ramsey, 2003).

$$\cos \theta = \sin \delta \sin (\phi - \beta) + \cos \delta \cos \omega \cos (\phi - \beta) \quad (2.3)$$

Atmosfer dışındaki güneş ışınımı yukarıda tanımlanan güneş açılarına bağlı olarak bulunabilmektedir. Güneş ile dünya arasındaki mesafe dünyanın eliptik yapıda olmasından dolayı yıl boyunca değişmektedir. Güneş ışınlarına dik atmosfer dışındaki bir alana birim zamanda düşen ışınım enerjisi oranı bu mesafeye bağlı olarak;

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left[\left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right] \right) \quad (2.4)$$

ifadesiyle verildiği gibi günlere göre değişmektedir. Bu ifade de yer alan d_n gün sayısını belirtmektedir. Atmosfer dışında yatay düzlem üzerine doğrudan gelen güneş ışınımı, B_0 , güneş zenit açısına bağlı olarak;

$$B_0 = G_{on} \cos \theta_z \quad (2.5)$$

ifadesi ile verilir. Güneye doğru konumlanmış eğimli bir yüzey üzerine doğrudan gelen atmosfer dışı güneş ışınımı, $B_{0\beta}$, güneş ışınlarının gelme açısına, θ , bağlı olarak;

$$B_{0\beta} = G_{on} \cos \theta \quad (2.6)$$

ile ifade edilir. (2.4), (2.5) ve (2.6) eşitliklerinde verilen güneş ışınımları W/m^2 birimindedir.

Fotovoltaik sistemlerin temel bileşeni olan modüller, güneş ışınımdan maksimum yararlanmak amacıyla eğim açısı verilerek yerleştirilirler. Bu sebepten dolayı eğimli yüzey üzerindeki güneş ışınımı, fotovoltaik sistemlerin tasarımında önemlidir. Dünya üzerinde eğimli bir yüzey üzerine gelen doğrudan ışınım;

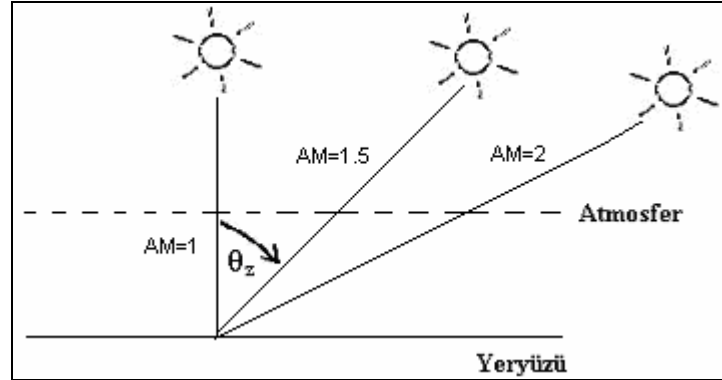
$$B_{\beta} = \tau_{atm} B_{0\beta} \quad (2.7)$$

$$B_{\beta} = B \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.8)$$

burada τ_{atm} , yatay yüzeye doğrudan gelen güneş ışınımının, atmosfer dışında yatay yüzeye gelen güneş ışınımına oranı olan, güneş ışınlarının atmosfer tarafından etkilenme derecesini ifade eden atmosfer geçirgenliği olarak tanımlanır.

$$\tau_{atm} = \frac{B}{B_0} = 0,5 \left(e^{-0,365 m(z, \alpha)} + e^{-0,095 m(z, \alpha)} \right) \quad (\text{Kreith vd, 1978}) \quad (2.9)$$

Burada $m(z, \alpha)$, güneş yükseklik açısına, α , ve deniz seviyesinden yüksekliğe, z , bağlı hava kütlesidir (*air mass*). Hava kütlesi güneşin tam tepede olduğu ($\theta_z = 0$) anda güneş ışınlarının atmosfer boyunca aldığı minimum yolla ilişkili olan atmosferik yol uzunluğunu ölçer ve zenit açısının sekantı hava kütlesi, AM , olarak tanımlanır ($1/\text{Cos}\theta_z$). Bir başka ifade ile hava kütlesi, ışığın dünyaya gelirken geçmek zorunda olduğu atmosfer kalınlığını açıklar. Atmosfer dışında hava kütlesi sıfırdır. Dünya yüzeyinde ise hava kütlesi atmosfere bağlı olarak değişen zenit açısı ile farklı değerler almaktadır. Güneş pillerinin ışığa altında akım-voltaj karakteristiği yapılırken kullanılan standart hava kütlesi değeri 1,5 dir (AM 1,5) (Sze, 1981). Şekil 2.6 da güneşin konumuna göre hava kütlesinin aldığı değerler gösterilmektedir.



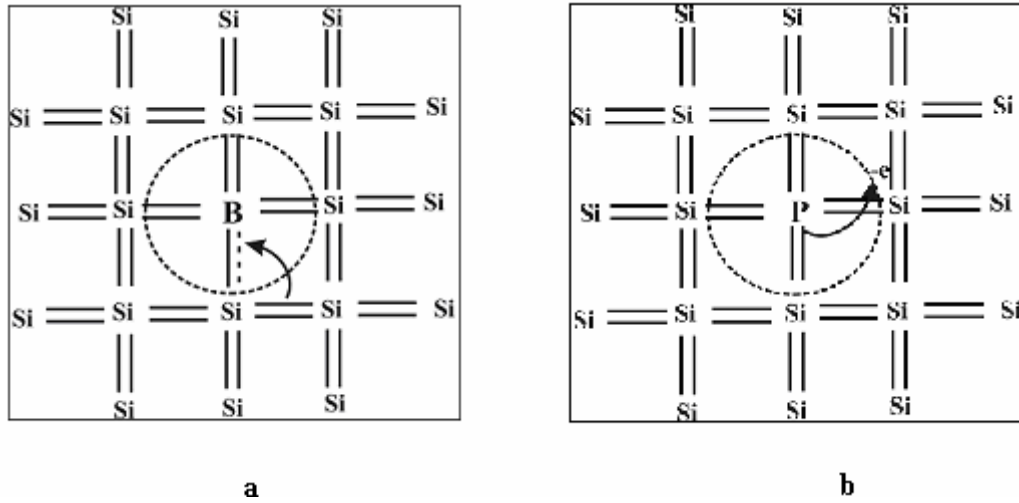
Şekil 2.6 Hava kütlesinin güneşin konumuna bağlı olarak değişimi

2.4 GÜNEŞ PİLİNİN TEMEL YAPISI

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine çevirimi için kullanılan güneş pilleri optiksel ve elektriksel özellikleri ile enerji çevirimi için uygun olarak seçilen yarıiletken malzemeden yapılmış elektronik devre elemanlarıdır.

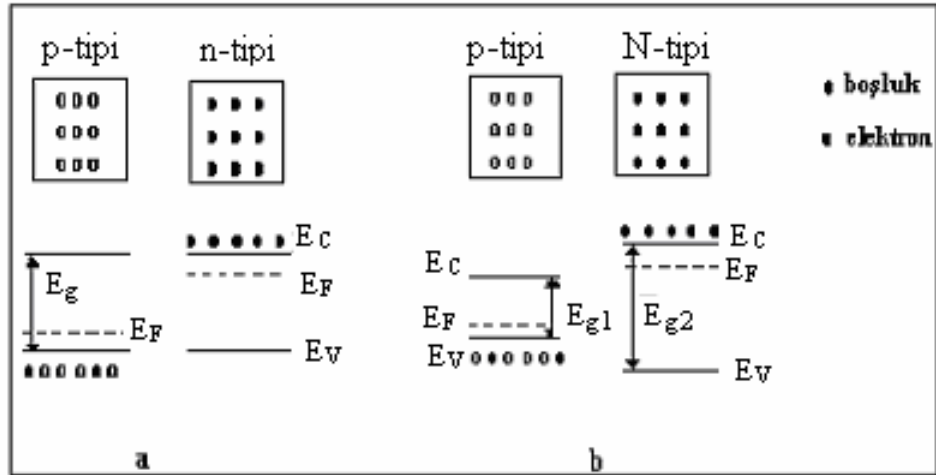
Yarıiletken malzemelere en iyi örneklerden biri yaygın olarak entegre devrelerinde kullanılan IV. Grup elementi silisyum atomlarının oluşturduğu kristal yapıdır. Bu yapı, atomların son yörüngelerinde bulunan dört valans (değerlik) elektronun birbirleriyle yaptıkları *kovalent bağlar* neticesinde ortaya çıkar. Değerlik elektronlarının bulunduğu enerji düzeyleri değerlik bandını oluşturur ve değerlik bandının üst enerji seviyesi, E_v , olarak gösterilir. Değerlik elektronlarının bulunabileceği bir üst enerji bandına iletkenlik bandı adı verilir ve iletkenlik bandının en alt enerji seviyesi, E_c , olarak gösterilir. Bu iki band arasında serbest taşıyıcılarının bulunmasının yasak olduğu yasak enerji aralığı, E_g , bulunmakta ve değerlik ile iletkenlik bandı bu yasak band aralığı tarafından birbirlerinden ayrılmaktadırlar.

Yarıiletkenlerin en önemli özelliği elektriksel özelliklerinin değiştirilebilmesidir ve bu işleme *katkılama (doping)* adı verilir. Yarıiletken kristale katkılanan atomlar ya elektron verici (*donör*) ya da elektron kabul edici (*akseptör*) olarak işlev yaparlar. Saf yarıiletkenin 5. grup elementi olan fosfor, arsenik gibi atomlar ile katkılanması sonucu son yörüngedeki beş elektron Şekil 2.7-a'da gösterildiği gibi yarıiletkeni oluşturan diğer atomun dört valans elektronu ile bağ oluşturacaktır. Katkı atomunun son yörüngesindeki beşinci elektronun zayıf bağ yapmasından dolayı düşük miktardaki ısı enerjisi ile bir üst izinli band olan iletim bandına geçebilecektir. Böylece saf yarıiletken özelliğini kaybederek, fazlalık yük taşıyıcısı olarak elektron içerecektir. Bu tür özellik kazandırılmış yarıiletkenlere *n-tipi yarıiletkenler* adı verilir. Benzer biçimde silisyum kristali içerisine 3. grup elementi olan bor, indiyum gibi atomlar katkılındığında, katkı atomunun son yörüngesindeki üç valans elektronu Şekil 2.7-b'de gösterildiği gibi silisyum atomunun üç elektronu bağ yapabilecektir. Katkı atomu dördüncü bağı yapabilmek için en yakın komşu atomdan bir elektron alarak, geride bir boşluk bırakır. Böylece saf yarıiletken özelliğini yitirerek fazlalık olarak pozitif yük taşıyıcıları yapısında bulunduracaktır. Bu tür elektriksel özellik kazandırılan yarıiletkenlere *p-tipi yarıiletken* adı verilir (Decher, 1997).



Şekil 2.7 a- Bor (B) katkılanmış b- Fosfor (P) katkılanmış Silisyum kristali

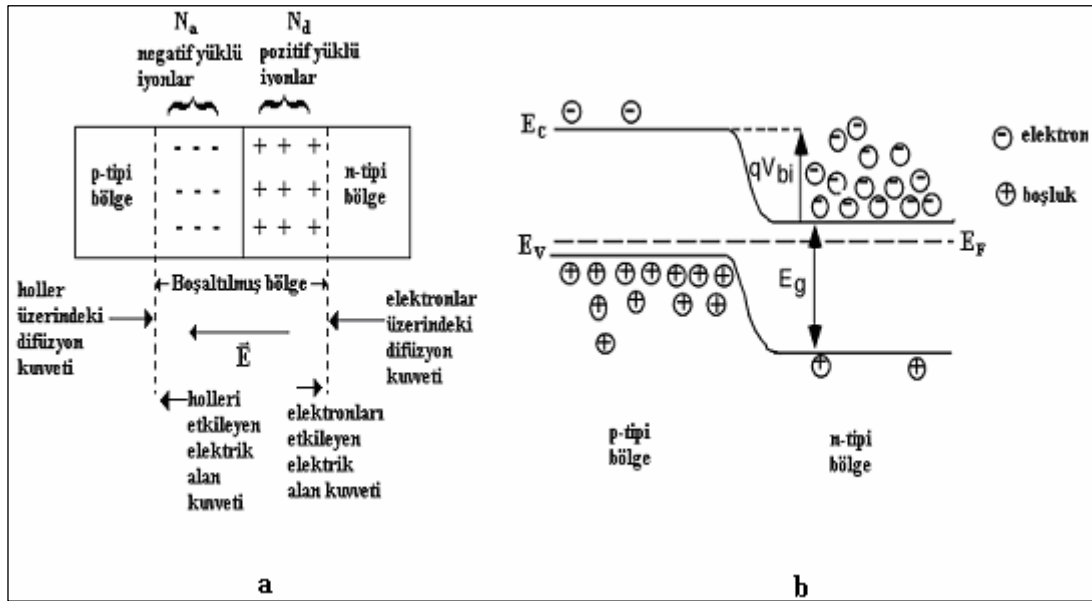
Güneş pili difüzyon veya epitaksi ile biçimlendirilen yüzeysel p-n ekleminden oluşur. Çoğunluk yük taşıyıcısı elektron olan n-tipi yarıiletken ile çoğunluk yük taşıyıcısı boşluk olan p-tipi yarı-iletkenin fiziksel olarak bir araya getirilmesi sonucu oluşan p-n eklem, homoeklem (homojunction) ve heteroeklem (heterojunction) olmak üzere iki gruba ayrılır. Aynı tür yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya heteroeklem, farklı türdeki yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya homoeklem adı verilir. Şekil 2.8-b’de gösterildiği gibi Heteroeklem yapılarda kullanılan yarı-iletken malzemeler farklı enerji aralıklarına sahip olmasından dolayı eklem ara yüzeyinde süreksizlikler meydana gelir. Homoeklem yapılarda ise bu süreksizlikler, aynı tür yarı-iletken malzemelerin kullanılmasından dolayı meydana gelmez (Neamen D., 1992).



Şekil 2.8 a) homoeklemlenmiş yarıiletken malzemelerin band yapısı

b) heteroeklemlenmiş yarıiletken malzemelerin band yapısı

Farklı elektriksel özellik taşıyan yarıiletken malzemelerin fiziksel olarak bir araya getirilmesi sonucunda p-tipi yarıiletkendeki serbest holler (boşluklar) n-tipi bölgeye doğru, n-tipi yarı-iletkendeki serbest elektronlar p-tipi bölgeye doğru geçiş (difüzyon) yaparlar. Bu geçişler yerel elektrik yük dengesinin bozulmasına neden olur ve elektron ile boşlukların geçişleri sonucunda p tipi bölgede (-) yüklü *alıcı (akseptör)*, n tipi bölgede de (+) yüklü *verici (donör)* iyonları kalır. Donör ve akseptör iyonlarından oluşan çift yük tabakası nedeniyle n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru oluşan iç elektrik alan serbest taşıyıcıların geçişini engeller. Bu elektrik alan, denge durumunda difüzyon akımına eş değer olan elektronların ve hollerin oluşturduğu sürüklenme akımına neden olur. Denge konumunda yani p-n ekleme uygulanan gerilimin sıfır olduğu ve sıcaklığın sabit olduğu durumda net akım sıfırdır. Karşıt taraflarda yer alan negatif ve pozitif yüklü iyonlardan oluşan bölgeye *boşaltılmış bölge (depletion region)*, *uzay yük bölgesi (space charge region)* veya *geçiş bölgesi (transition region)* adı verilir.



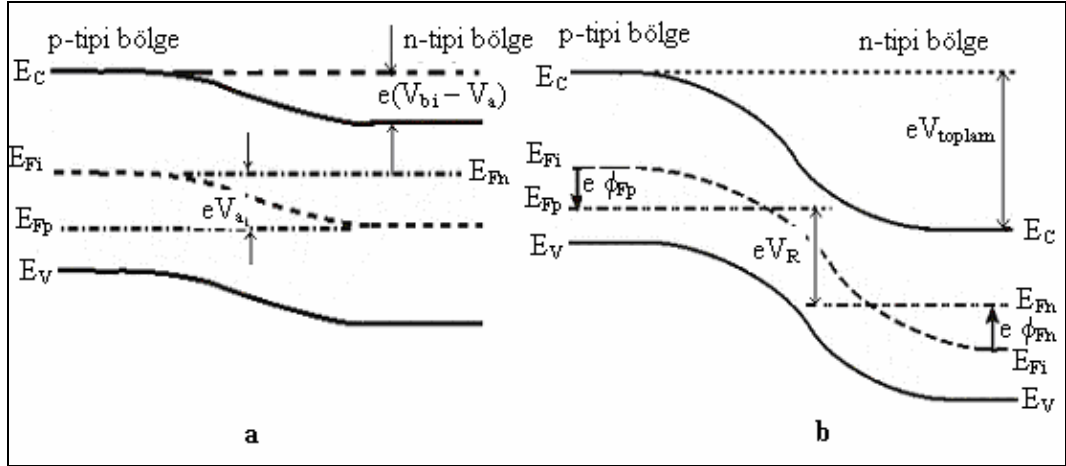
Şekil 2.9 a) p-n eklemde boşaltılmış bölge, elektrik alan oluşumu

b) p-n homoeklem band yapısındaki değişim

n ve p-tipi yarıiletken malzemelerin fermi enerji seviyeleri arasındaki farktan dolayı boşaltılmış yük bölgesinde bandlar, Şekil 2.9-b'de gösterildiği gibi qV_{bi} enerji miktarı kadar bükülürler ve oluşan potansiyele iç potansiyel (built-in potential) adı verilir (Bhattacharya , 1994). p ve n bölgelerine gerilim uygulanması durumunda sistem boyunca fermi enerji seviyesi sabit kalmaz. Pozitif gerilimin p-tipi bölgeye, negatif gerilimin n-tipi bölgeye uygulanması durumunda potansiyel engel uygulanan gerilim (V_a) kadar azaltılır . Şekil 2.10-a düz besleme olarak bilinen bu gerilim altındaki bir p-n eklemine göstermektedir. Uygulanan gerilim ile boşaltılmış bölgedeki net elektrik alan denge durumundaki değerinin altında bir değere ulaşır ve çoğunluk taşıyıcıların boşaltılmış bölge üzerinden karşı bölgeye geçmesini engelleyen elektrik alan kuvveti azalır. Bu durumda n tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar p-tipi bölgeye ve p-tipi bölgedeki çoğunluk taşıyıcı olan boşluklar n tipi bölgeye sızarak.

n-tipi bölgeye pozitif, p-tipi bölgeye negatif gerilimin, ters besleme, uygulanması durumunda Şekil 2.10-b'de gösterildiği gibi n bölgedeki fermi seviyesi p bölgedeki fermi seviyesinin altında olacaktır. Bu iki fermi seviyesi arasındaki fark enerji

biriminde uygulanan gerilime eşit olacak ve V_{toplam} olarak gösterilen toplam potansiyel engel uygulanan ters gerilim, V_R , değeri kadar artar. Bu tür beslemeye ters besleme durumu adı verilir.

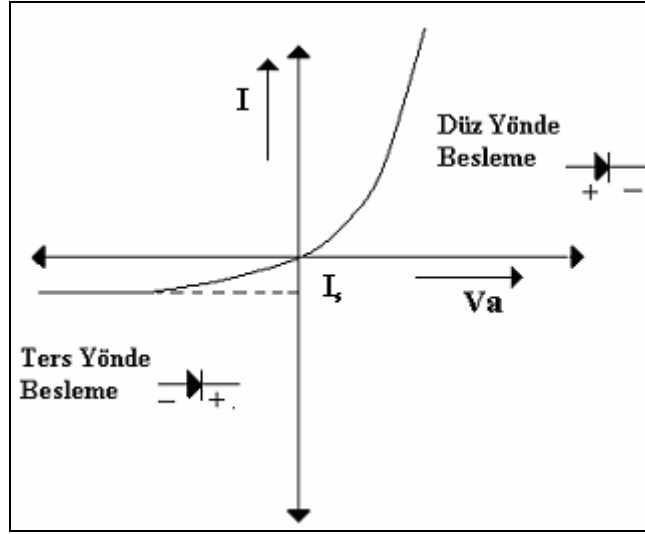


Şekil 2.10 a) düz besleme altında b) ters besleme altında p-n eklem enerji band diagramı değişimi

İdeal bir p-n eklemde toplam akım boşaltılmış bölge boyunca sabit olan elektron ve hol akımlarının toplamıdır. p-n eklemde toplam akım;

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

ifadesi ile verilir. Burada V_a uygulanan ters veya ileri besleme durumundaki voltaj değeridir. I_s ise ters doyum akımı (reverse-saturation current), e elektron yükü (1.6×10^{-19} C), k Boltzmann sabiti (1.38×10^{-23} J/K), T sıcaklık dır. (Neamen, 1992)

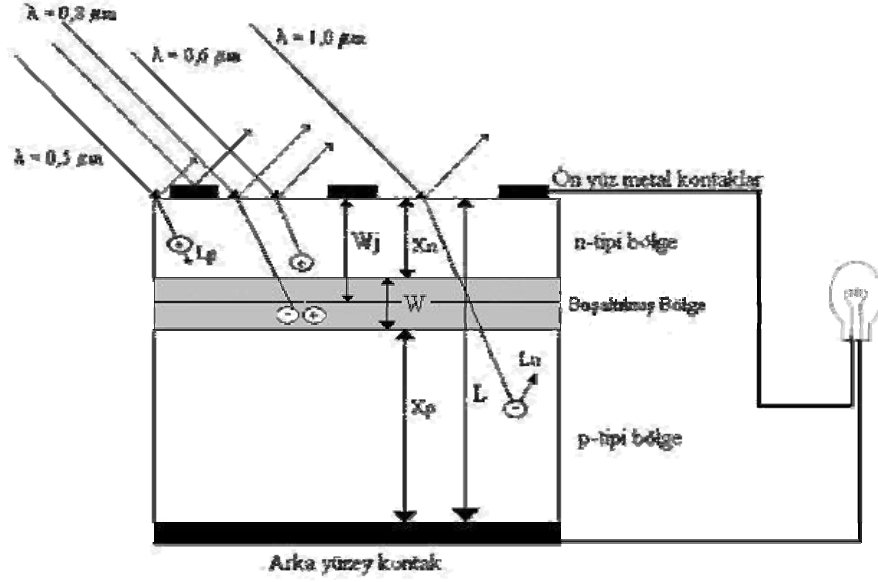


Şekil 2.11 Bir p-n eklem diyotun ideal I-V karakteristiği

2.5 IŞIMA ALTINDA GÜNEŞ PİLİ

Yaygın olarak kullanılan güneş pilleri tek bir bant aralığına sahip p-n eklemlerden oluşmaktadır. Bir güneş pili güneş ışınlarına maruz kaldığından yasak enerji aralığından, E_g , daha düşük enerjili fotonlar, enerji çevirime katkıda bulunmazlar. E_g enerjisine eşit enerjili fotonlar serbest taşıyıcı meydana getirirler ve bir elektrik akımı oluştururlar. Güneş ışınları altında p-n eklem güneş pilinin enerji bant diyagramını düşündüğümüzde, fotonlar yapı içerisinde soğurularak, değerlik bandında bulunan elektronlar izinli bant olan iletkenlik bandına çıkarılır. Böylece p ve n tipi bölgelerde elektron-boşluk çifti oluşur. Burada azınlık yük taşıyıcıların konsantrasyonlarındaki değişim, çoğunluk yük taşıyıcılarına göre daha fazla olduğundan foto akımı, baskın olan azınlık yük taşıyıcıları oluşturur. p tipi bölgede foton soğurulması sonucu oluşan fazlalık azınlık yük taşıyıcısı elektron boşaltılmış bölgede bulunan yüksek elektrik alan nedeniyle, çoğunluk yük taşıyıcısı olduğu n-tipi bölgeye doğru sürüklenir. Aynı şekilde n-tipi bölgede soğurulan foton sayesinde oluşan azınlık yük taşıyıcısı boşluk elektrik alan nedeniyle, çoğunluk yük taşıyıcısı olduğu p-tipi bölgeye doğru sürüklenirler. Dolayısı ile boşaltılmış bölge civarında bir azınlık yük taşıyıcısı geçişi söz konusudur. Güneş pilinin n ve p tipi tabakalarına dış

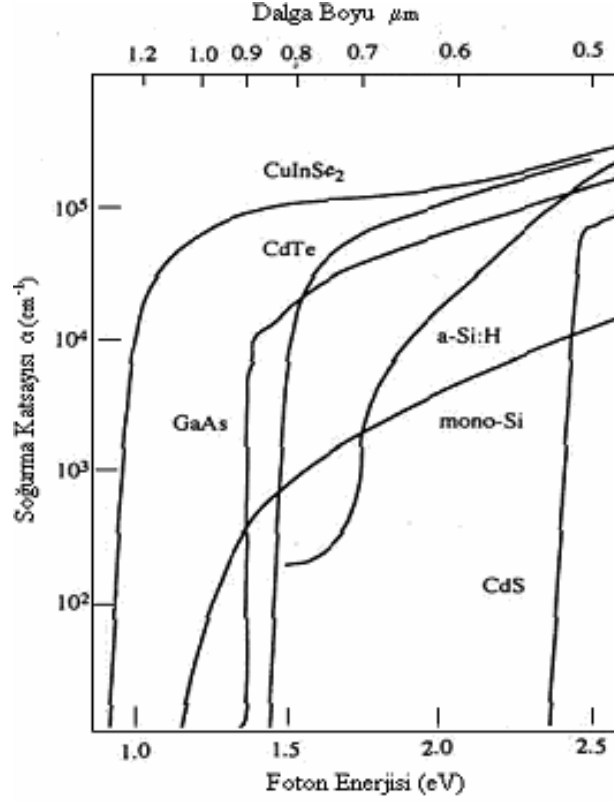
kontakt yapılması ile foton soğurulması sonucu oluşan azınlık yük taşıyıcıları bu kontaktlar sayesinde yapı içerisinde devredeki bir elektriksel yüke taşınırlar (Sze, 1981).



Şekil 2.12 Güneş pilinde elektron-boşluk çifti oluşumu ve iletim mekanizmaları

Elektron-boşluk çifti oluşumu kullanılan yarı-iletken malzemenin optiksel özelliklerine bağlıdır. Yarı-iletken malzeme içerisine nüfuz eden fotonların birim uzunluk başına soğurulma miktarı olarak tanımlı olan soğurulma katsayısının (*absorption coefficient*), $\alpha(\nu)$, büyük olması güneş ışınlarının malzeme içerisinde küçük bir uzaklıkta soğurulmasına neden olur. Soğurulma katsayısı yarıiletkenin band yapısına göre değişir. Doğrudan band aralığına (direct band gap) sahip GaAs gibi yarı-iletkenlerde bir fotonun soğurulması iletim bandının minimum enerji seviyesi ile valans bandının maksimum enerji seviyesinin aynı dalga vektörüne (\vec{k}) karşılık gelmesi ile gerçekleşir. Silikon (Si) ve Germanyum (Ge) gibi doğrudan band aralığına sahip olmayan (indirect band gap) yarı-iletkenlerde iletim bandının minimum enerji seviyesi ile valans bandının maksimum enerji seviyesi farklı dalga

vektörlerine karşılık gelir. Şekil 2.13’de çeşitli yarı-iletken malzemelerin soğurma katsayılarını foton enerjisinin fonksiyonu olarak göstermektedir.

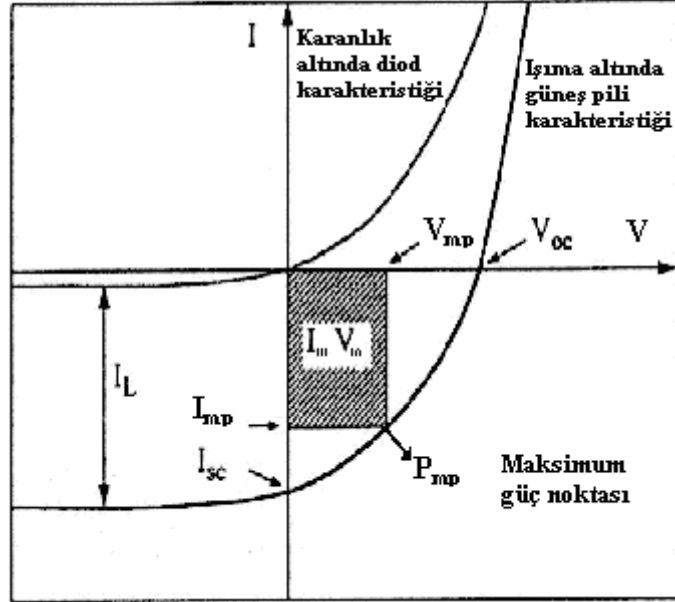


Şekil 2.13 Doğrudan band aralığına sahip bazı yarı-iletkenler ve silikon için foton enerjisinin fonksiyonu olarak soğurma katsayısı (Möller, 1993)

Bir güneş pilinin eşdeğer devresi elektroniksel olarak p-n eklemi temsil eden bir diod ile fotoakımın ışık tarafından oluşturulmasını temsil eden bir akım kaynağının paralel bağlanmasından oluşmaktadır. Devrenin net akımı diod akımı ile foto akımı arasındaki farka eşittir.

$$I = I_s \left(\exp \frac{eV}{nkT} - 1 \right) - I_L \quad (2.11)$$

Burada n idealite faktörü, I_L güneş ışınımı sonucunda fazlalık taşıyıcıların yarattığı foto akımdır (*light generated*).



Şekil 2.14 Güneş pilinin ışıkta ve karanlıkta akım – voltaj karakteristiği (Möller, 1993)

Güneş pili için önemli parametreler kısa devre akımı, I_{sc} , ve açık devre voltajı, V_{oc} , dir. Kısa devre akımı devre üzerinde hiçbir direncin olmadığı durumda oluşan akımdır yani devre üzerindeki voltaj sıfır değerine eşittir ($V=0$) ve foto akıma eşit olur $I_{sc} = I_L$. Açık devre voltajı ise devre üzerinden akım geçmediği ($I=0$) durumda oluşur. Açık devre voltajı;

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_s}\right) \quad (2.12)$$

Bir güneş pilinden elde edilebilecek maksimum güç, ışıkta güneş pilinin maksimum akım, I_m , ve maksimum voltaj, V_m , değerlerinin çarpımıdır. Şekil 2.14’de gösterildiği gibi taralı alan maksimum güç, P_m , değerini vermektedir.

Güneş pili için önemli parametrelerinden biri dolun faktörü , FF, (*fill factor*)

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.13)$$

ifadesi ile tanımlanır. Güneş pilinin enerji çevirim verimliliği (*energy conversion efficiency*), η , güneş enerjisinin hangi oranda elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü tanımlar. Güneş pilinin verimliliği;

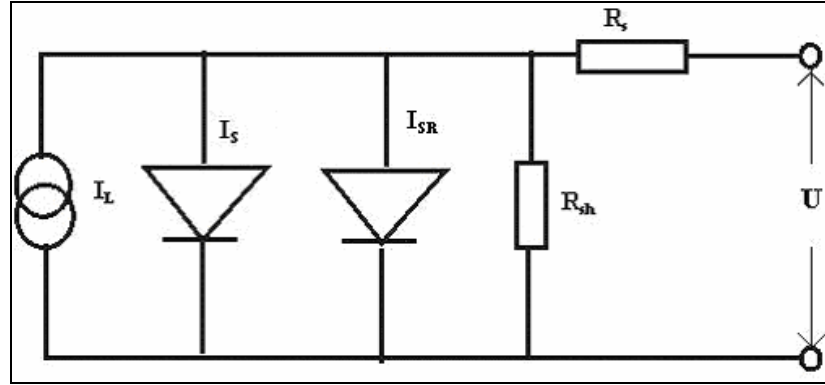
$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{in}} = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (2.14)$$

ile tanımlanır. Burada P_{in} ; güneş pili üzerine düşen toplam ışınım gücünü verir.

Pratik güneş pilleri için ideal eş devre Şekil 2.15 deki gibidir. Bu eş devre için güneş pilinin I-V karakteristiği;

$$I = C_1 I_s \left\{ \exp \frac{e(V - IR_s)}{kT} - 1 \right\} + C_2 I_{sr} \left\{ \exp \frac{e - (V - IR_s)}{2kT} - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_L \quad (2.15)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada R_s seri direnci, R_{sh} paralel direnci, I_{sr} rekombinasyon akımını ve I_s difüzyon akımını temsil etmektedir. Yarıiletkenin bulk direnci ve kontakların direnç etkisi seri direncin oluşmasındaki temel nedenlerdir. Paralel direnç boşaltılmış bölgedeki örgü kusurları tarafından ortaya çıkartılmaktadır. Güneş pilinden maksimum verim elde edebilmek için paralel direncin $R_{sh} = \infty$, seri direncin $R_s = 0$ olması gerekir (Möller, 1993).

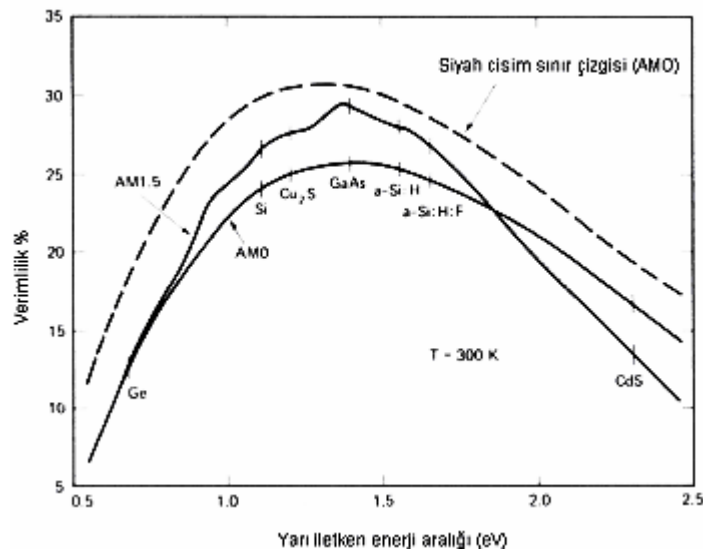


Şekil 2.15 Güneş pilinin iki diyot modelini içeren eşdeğer devresi

Güneş pilinin verimliliği üzerine düşen ışınım ile orantılıdır. Güneş pili üzerine düşen ışınım değerindeki azalmayı önlemek amacıyla materyalin üst yüzeyine kaplanan yansıtıcı olmayan tabaka (*antireflection coating ARC*) ve eğimli kristaliografik yapıya sahip dokuma desenli yüzeyler (*texturing surface TS*) kullanılır.

Verimli bir güneş pili için; boşaltılmış bölge alanı elektron hol çiftinin oluşumu ve birbirinden ayrılabilmesi için heteroeklemler haricinde ön yüzeye mümkün olduğu kadar yakın olmalı ve üst yüzeyin altındaki yarı-iletken yüksek enerji aralığına sahip olmalıdır. Işıma altında oluşan yük taşıyıcılarının güneş pilinin alt ve üst kontaklarına ulaşabilmesi için difüzyon uzunlukları soğurma katsayısının tersi ile karşılaştırıldığında büyük olmalıdır ($L_D \gg 1 / \alpha(\nu)$)

Seçilen yarı-iletken malzemelerin yasak enerji aralıkları güneş spektrumu ile uyumlu olmalıdır. Güneş spektrumuna bağlı olarak güneş enerjisinin çevirimi için Şekil 2.16'da verildiği gibi 1,4-1,5 eV değerlikli bir yarıiletken güneş pili için uygun olmaktadır (Bucher, 1986).



Şekil 2.16 Tek eklem güneş pilleri için bant aralığına karşı güneş pilleri materyallerinin çevirim verimliliği (Goetzberger vd, 2000)

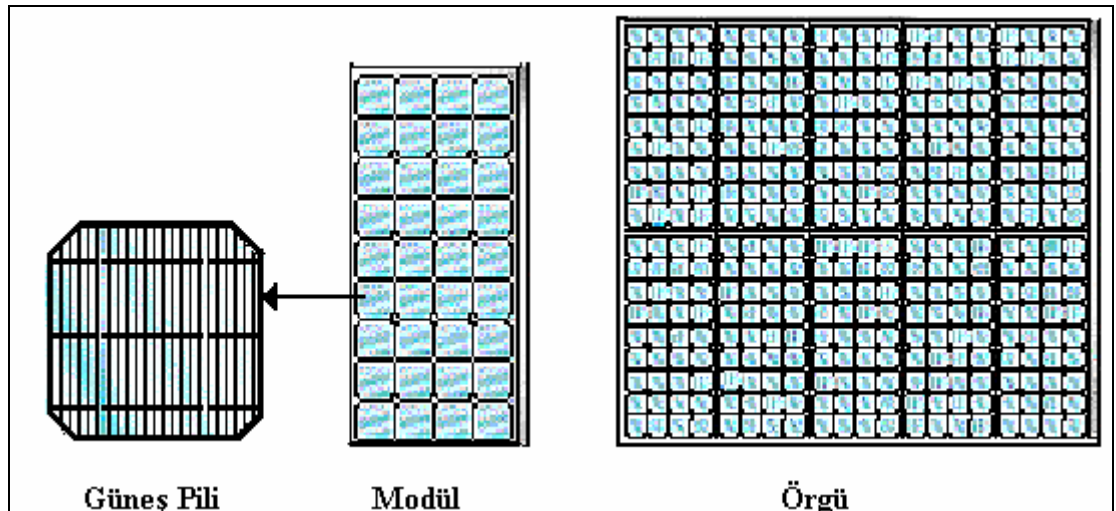
Fotovoltaik pazarda silisyum elementinin kristal ve amorf ince film yapıdaki güneş pilleri pazar payının %99'unu oluşturmaktadır. Silisyum tabanlı güneş pili teknolojisinin oldukça gelişmiş olması ve band aralığının (1,1 eV) güneş spektrumuna uygun olması bu oranın ortaya çıkmasında önemli bir faktördür. Fotovoltaik enerji çeviriminde dünya üzerindeki araştırma ve geliştirme laboratuvarlarında yapılan çalışmalar bu yolla üretilen enerjinin maliyetini azaltmak yönündedir. Bu amaçla geliştirilen İnce film teknolojisi ile güneş pili üretiminde 1-2 μm kalınlığında yarı-iletken malzemeler kullanılmakta ve üretim maliyetleri kristal silisyum güneş pillerine göre düşük olmaktadır. Bu teknoloji kullanılarak üretilen Amorf Si, CdTe ve CuIn(Ga)Se₂ yapılu güneş pilleri ticari alanlarda günümüzde kullanılmaktadır (Goetzberger vd, 2003). İnce film güneş pillerinin özellikle amorf silisyumun başlangıç verimliliğinin zamanla azalması ve iç yapıda meydana gelen ışın etkili kusurlardan dolayı ticari uygulama alanlarında kullanımını etkilemektedir. (C.R. Wronski, 1996). Amorf silisyum ince film güneş pilinin verimliliğinin artırılması amacıyla çok eklemli (multijunction) yapılar kullanılmaktadır. Son yıllarda dünya üzerindeki bir çok laboratuvarında devam eden araştırma çabaları laboratuvar ortamında % 13.0 kadar yüksek değerli stabilize çevirim verimliliğine

sahip çok eklemlı a-Si güneş pillerinin gelişimin olanak sağlamıştır. (D.E.Carlson vd, 2003)

2.6 FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ

Fotovoltaik güç sistemlerinden elde edilen elektrik enerjisi geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu uygulama alanları hesap makinesi, saat gibi küçük çaplı tüketici ürünlerinin güç kaynaklarından, şebekeyi besleyen büyük çaplı güç istasyonlara kadar mevcuttur.

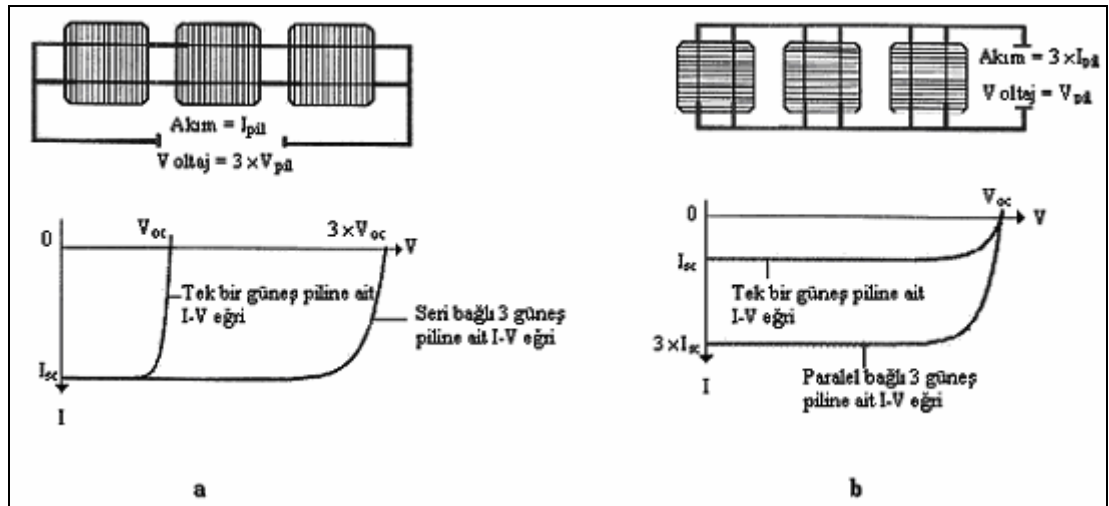
Herhangi bir uygulama alanında kullanılabilir enerji sağlamak için, her bir güneş pili istenilen akım ve voltaj değerlerini vermesi amacıyla birbirlerine elektriksel olarak bağlanabilirler ve bunlar çalıştıkları ortamda çevresel etkiler sonucu ortaya çıkan zararlardan korunmak zorundadırlar. Bu elektriksel bağlantıyı ve çevresel zararlardan korumayı sağlayan birime *fotovoltaik modül* adı verilir. Modül tek başına yada diğer aynı modül çeşitleriyle elektriksel olarak bağlanmış şekilde kullanılır. Benzer modüllerin birbirleriyle elektriksel olarak bağlanması sonucu ortaya çıkan yapıya fotovoltaik örgü (*Photovoltaic array*) adı verilir. Şekil 2.17’de bunlar şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Fotovoltaik güç sistemlerinin basitten karmaşığa doğru şekillenimi (<http://www.eere.energy.gov>)

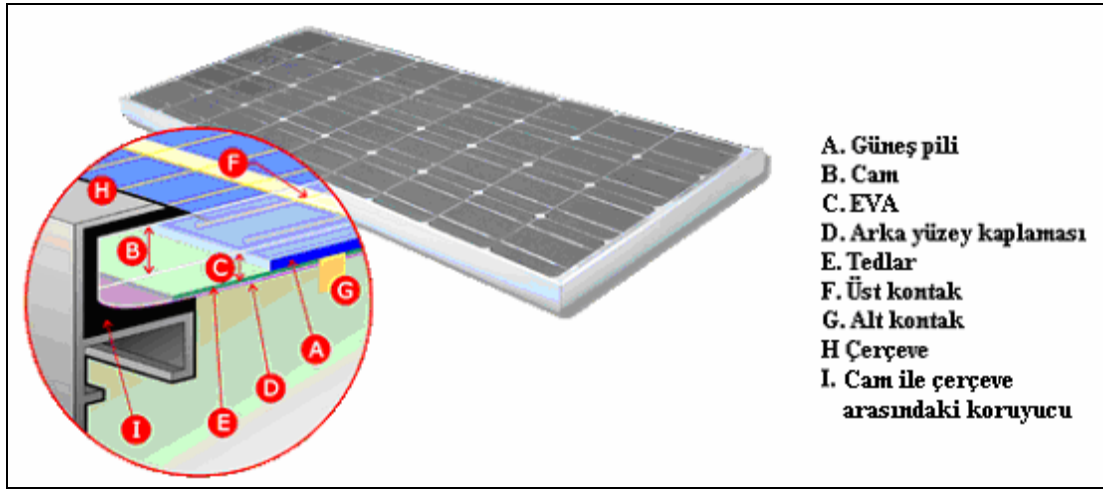
2.6.1 FOTOVOLTAİK MODÜL

Fotovoltaik modüller gereksinim duyulan akım ve voltaj değerlerine göre güneş pillerinin birbirlerine elektriksel olarak bağlanması ile oluşturulur. Standart test koşulları altında bir güneş pilinden verimliliğe bağlı olarak 1 ile 1.5 W arasında güç ve 0.5-0.6 V gerilim elde edilmektedir. Fakat bir çok elektronik uygulamalarda bu gerilim değeri kullanılmamaktadır. Yüksek değerlerde gerilim elde edilmesi amacıyla güneş pilleri elektriksel olarak birbirleriyle seri olarak bağlanırlar. Şekil 2.18-a'da örnek olarak üç tek pilin seri bağlantısını göstermektedir. Bağlantının akım değeri tek bir güneş pilinden elde edilen akıma eşit olup, gerilim değeri $3 \times V_{pil}$ 'dir. Elektronik uygulamalar için yüksek akım değerlerine gereksinim olması durumunda güneş pilleri birbirleriyle Şekil 2.18-b'deki gibi elektriksel olarak paralel bağlanır. Bu durumda, güneş pili grubundan elde edilen akım her bir pilin akım değerlerinin toplanması sonucu $3 \times I_{pil}$ değerine eşit olup, gerilim değeri V_{pil} olacaktır (Pearsall vd, 2001).



Şekil 2.18 Güneş pillerinin a) seri bağlantı şeması b) paralel bağlantı şeması

Seri bağılı güneş pillerinin çevresel faktörlerden korunması amacıyla oluşturulan birime PV modülü adı verilir. PV modüller Şekil 2.19’da gösterildiği gibi; ön yüzlerinde yüksek optiksel geçirgenliğe sahip cam (low-iron tempered glass), güneş pillerinin ön ve arka yüzeyini kaplayan güneş ışınlarından etkilenmeyen ETA (ethylene vinyl acetate), seri bağılı güneş pilleri , alt yüzeyin yalıtımı sağlayan plastik tedlar kaplamadan oluşur. Bu tabakalar bir araya getirilerek vakum altında basınç ve ısı uygulanmasıyla laminasyonu gerçekleştirilir. Ayrıca, camı korumak ve sistemi daha kolay kullanılabilir sağlam bir yapıya kavuşturmak için modül, metal (çoğunlukla alüminyum) çerçeve ile çerçevesenir (Roberts S., 1991).



Şekil 2.19 Modül ara kesiti <http://www.spireolar.com/Solar/process.html>

Standart fotovoltaik modüller 20 W – 300 W arasında güce sahiptirler. Kullanım amacına göre fotovoltaik modüllerin voltajları değişiklik göstermektedir. Modüller tarafından üretilen enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulursa, modül voltajının depolama birimi ile uyumlu olması gerekmektedir. Depolama ünitesi olarak kullanılan akülerin voltaj değerleri genellikle 12V olmasından dolayı, modüllerin çıkış voltaj değerleri 12-20V arasında olmalıdır. Şehir şebekesi ile bağlantılı sistemlerde kullanılan modüllerin voltaj değerleri doğru akım/alternatif akım dönüşümünü sağlayan çeviricilere bağlı olarak geniş aralıkta değişmektedir.

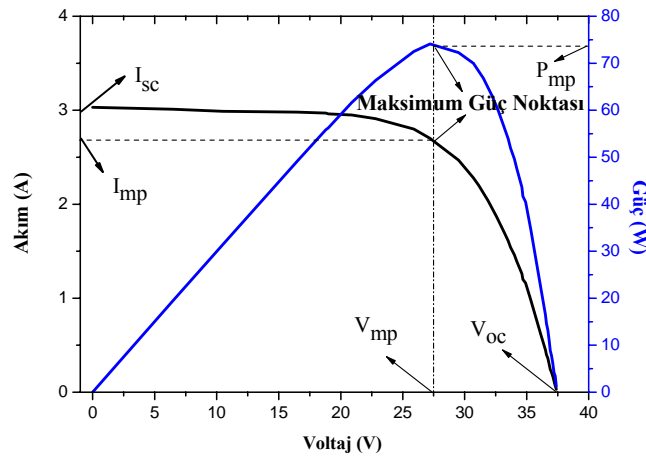
2.6.2 MODÜL ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİĞİ

Bir modülün I-V karakteristiği kendisini oluşturan güneş pillerinden birine ait I-V karakteristiği ile benzerdir ve aynı denklemler ile açıklanabilir. Buradaki farklılık ters doyum akımı, diyot faktörü, seri ve paralel dirençler tüm modülü temsil etmektedir ve bunlar tip, sayıya ve pillerin elektriksel bağlantısına bağlıdır. N tane seri bağlı güneş pillerin oluşturduğu PV modülün çıkış akımı

$$I = I_L - I_s \left\{ \exp \left[\frac{V + IR_s}{nNV_T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.16)$$

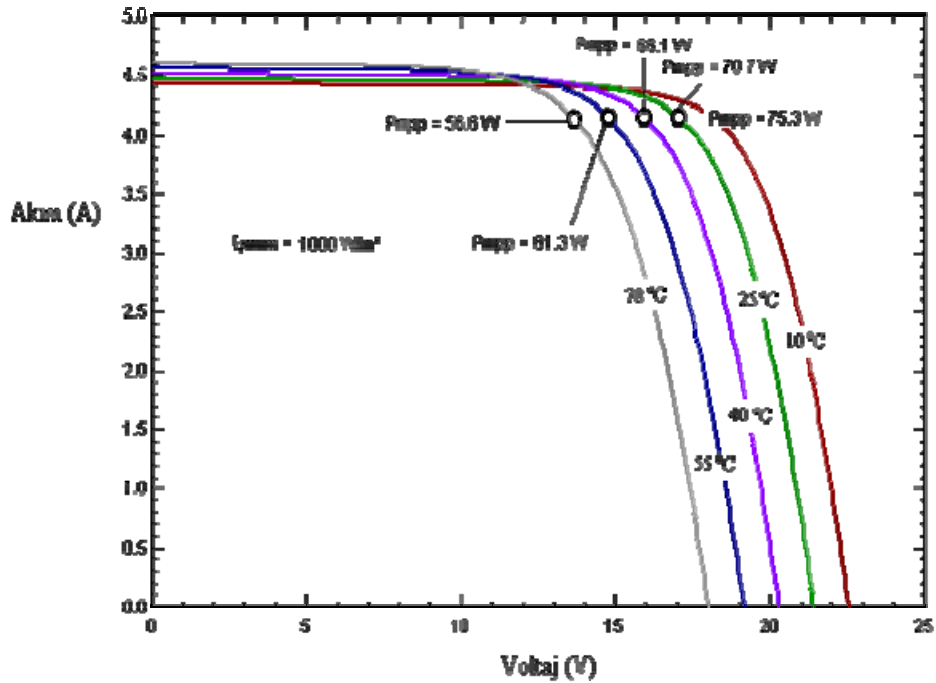
formülü ile verilmektedir. Burada I ; modül çıkış akımı, I_L foto akımı, N seri bağlı güneş pilleri sayısını, n diyot idealite faktörünü, R_s seri direnci, R_{sh} paralel direnci, $V_T = kT/q$ termal voltaj, T güneş pili sıcaklığı, k Boltzmann sabitini (1.38×10^{-23} J/K), q elektrik yükünü (1.6×10^{-19} C) V modülün terminal voltajını temsil etmektedir (Duffie vd, 1991).

Bir modülün karakteristiği açık devre voltajı, kısa devre akımı, dolun faktörü ve maksimum güç noktası parametreleri ile açıklanır. Buradaki maksimum güç noktası tek bir güneş pilinden ziyade modülü temsil etmektedir. Şekil 2.20 bir modülün güç-voltaj ve akım-voltaj ilişkisini vermektedir.



Şekil 2.20 Bir modülün elektriksel karakteristiğinde önemli olan parametreler

Modül yüzeyi üzerine gelen ışınımın %80 – 90 lık kısmı ısı olarak transfer edilir ve bundan dolayı modülün çalışma sıcaklığı geniş bir aralıkta değişebilir. Modül sıcaklığındaki artış foto akımı dolayısıyla kısa devre akımını I_{sc} arttırmasına rağmen açık devre voltajı V_{oc} değeri termal örgü titreşimlerinin artmasından kaynaklanan elektron-fonon saçılmaları, taşıyıcı mobilitelerindeki azalmadan dolayı düşmektedir. Açık devre voltajındaki hızlı düşüş doldurma faktörü değerinin düşmesine ve dolayısıyla modül verimliliğinin azalmasına yol açacaktır (Radziemska, 2003). Bir PV modülün I-V karakteristiği üzerindeki sıcaklığın etkisi Şekil 2.21’de gösterilmektedir. Modül çalışma sıcaklığı mevsime bağlı çevre sıcaklığının ve nüfuz eden güneş ışınımının fonksiyonu olarak değişir ve ayrıca modül dizaynına ve modülün yerleştirilmesine bağlıdır. Modül dizaynında bu etkilerin ölçümü modülün *Nominal Çalışma Pil Sıcaklığı (Nominal Operating Cell Temperature NOCT)* ile verilir.



Şekil 2.21 Farklı sıcaklıklarda bir PV modülün maksimum güç noktaları ve I-V karakteristiği (PVSYST 3.02 paket programı)

Bir modülün verimliliği, modülden elde edilen gücün, modül üzerine düşen güneş ışınım gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{A_m G} \quad (2.17)$$

V_{mp} , maksimum modül çıkış voltajı, I_{mp} , maksimum modül akımı, A_m , modül nominal alanı, G , modül yüzeyi üzerine gelen güneş ışınımı değerlerini vermektedir. Modül verimliliğinin sıcaklığa bağımlılığı fotovoltaik sistemlerin çalışmasında önemli bir parametreyi oluşturmaktadır. Anlık modül verimliliğinin sıcaklığa bağımlı olarak değişimi,

$$\eta = \eta_{ref} + \mu_{P,mp} (T_c - T_{c,ref}) \quad (2.18)$$

η_{ref} standart test koşulları altında tanımlanan referans modül verimliliği, T_c pil sıcaklığı, $T_{c,ref}$ referans sıcaklığıdır (298 K). $\mu_{P,mp}$ değeri bir çok model için sıcaklığa bağlı olarak lineer bir şekilde azalan modül verimliliğinin değişme biçimini ifade etmektedir ve negatif bir sayıdır. Maksimum güç noktası verimlilik sıcaklık katsayısı;

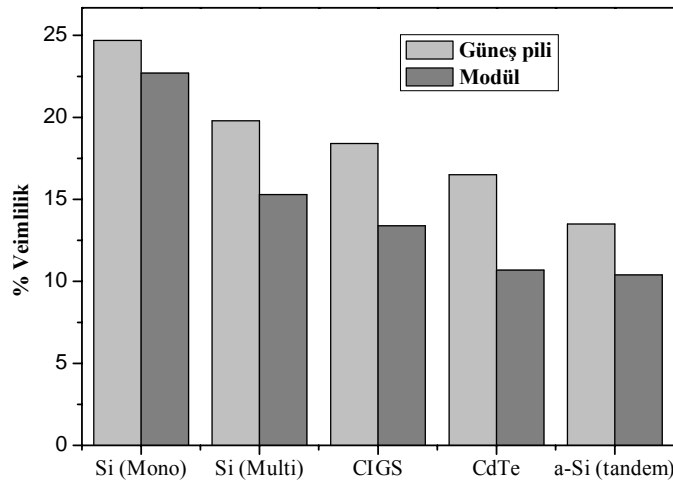
$$\mu_{P,mp} = \frac{d\eta}{dT} = \left(I_{mp} \frac{dV_{mp}}{dT} + V_{mp} \frac{dI_{mp}}{dT} \right) \frac{1}{A_m G_T} \quad (2.19)$$

Bir çok model için kısa devre akımının sıcaklık ile değişimi, açık devre voltajı değişimine kıyasla oldukça küçük olmasından dolayı ihmal edilmektedir ve bu nedenle modül verimliliğinin sıcaklık katsayısı açık devre voltajının sıcaklıkla değişmesine bağlıdır. Bu nedenlerden dolayı $\frac{dV_{mp}}{dT}$ değeri yaklaşık olarak $\frac{dV_{oc}}{dT}$ değerine eşit olmaktadır. maksimum güç noktası verimliliğinin sıcaklık katsayısı daha sade bir ifade ile aşağıdaki şekli almaktadır (Duffie vd, 1991).

$$\mu_{P,mp} = \frac{d\eta_{mp}}{dT} = \left(I_{mp} \frac{dV_{oc}}{dT} \right) \frac{1}{A_m G_T} \quad (2.20)$$

Modüllerin maksimum akım, voltaj ve çıkış gücü değerleri standart test koşulları altında (1kW m^{-2} güneş ışınımı, AM 1,5 global spektrumda ve çalışma sıcaklığı 25°C) tanımlanmaktadır. Test koşulları tam olarak Uluslararası Elektroteknik Komisyon da tanımlanmıştır (standart numarası 60904 IEC, 1987) (Pearsall vd, 2001).

Modül verimliliği, ön yüzeyi oluşturan cam tarafından güneş ışınlarının bir kısmının yansıtılması, modül çerçevesi tarafından yüzeyde oluşan kısmi gölgelenmeler, yüksek modül sıcaklıkları ve modül alanının daima pillerin toplam alanından büyük olmasından dolayı güneş pili verimliliğinden %1-3 arasında daha düşüktür.



Şekil 2.22 Güneş pili ve modül verimlilikleri (Green vd, 2003)

2.6.3 FOTOVOLTAİK ÖRGÜ (ARRAY)

Fotovoltaik örgü (PV örgü), PV modüllerin birbirleri arasında elektriksel olarak seri/paralel bağlanması ile oluşturulur. Fotovoltaik örgüler ile 100 Wp değerinden

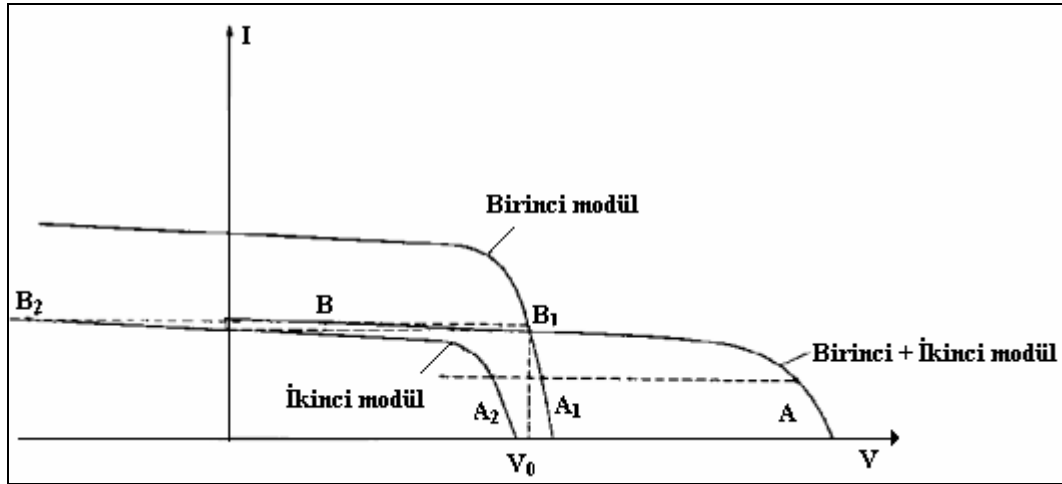
MWp mertebesindeki yüksek güç değerlerine ulaşan güç istasyonları oluşturulabilir. Modüllerin seri/paralel olarak bağlanması sonucu elde edilen PV örgünün akım değeri;

$$I = MI_L - MI_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(NV + \frac{IR_s N}{M} \right)}{NnkT} \right) - 1 \right] - \left[\frac{NV + \frac{IR_s N}{M}}{\frac{NR_{sh}}{M}} \right] \quad (2.21)$$

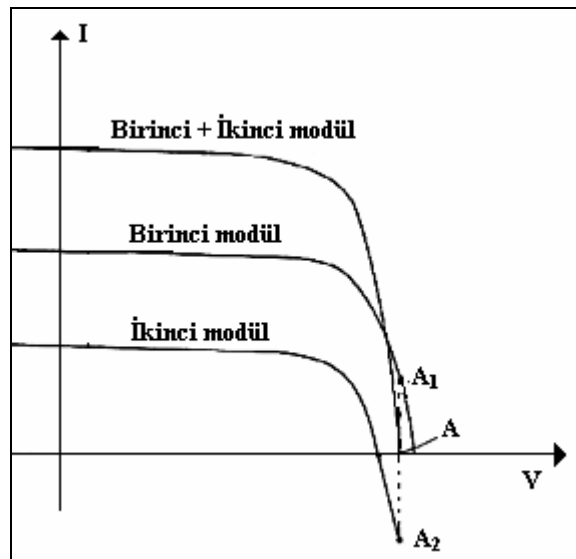
ile ifade edilir. Bu formülde yer alan I_L modül foto akımını, I_0 modül doyum akımı, M paralel bağlı modül sayısını, N seri bağlı modül sayısını, V modül gerilimini, R_s modül seri direncini, R_{sh} modül paralel direncini, n modül idealite faktörünü, T güneş pili sıcaklığını vermektedir (Rajapakse A. vd, 1994)

Bir PV örgüyü oluşturan modüllerin özdeş olmamaları yani farklı kısa devre akımlarına sahip modüllerin birbirleriyle elektriksel bağlanmaları durumunda PV örgünün elektriksel durumu biraz karmaşık hale gelmektedir. Farklı kısa devre akım değeri modüllerden birinin gölgelenmesi durumunda da meydana gelebilir. Şekil 2.23 ve 2.24’de eş olmayan iki modülün seri ve paralel bağlanması sonucunda ortaya çıkan I-V karakteristiği gösterilmektedir. Şekil 2.23’ de birbirine eş olmayan iki güneş pilinin toplam eğrisi üzerinde A ve B gibi iki çalışma noktası ve her bir pilin çalışma noktaları ile gösterilmektedir. Eğri üzerinde gösterilmekte olan $V_o > V$ değeri için zayıf güneş pili en küçük kısa devre akımını üretmektedir ve güçlü pil için yük olarak davranmaktadır. Bu durumda güçlü bir uyumsuzluk kaybı ve bu pil üzerinde negatif voltaj değeri oluşmaktadır. Toplam akım zayıf pil tarafından belirlenmektedir ve toplam açık devre voltajı bu uyumsuzluk tarafından etkilenmemekte olup seri bağlı güneş pillerin her birinden elde edilen açık devre voltaj değerlerin toplamına hemen hemen eşit olmaktadır. Açık bir şekilde görülmektedir ki iki uyumsuz güneş pili tarafından üretilen toplam güç değeri, her bir güneş pilinin ürettiği güç değerlerinin toplamından küçük olmaktadır. Bu nedenle kısa devre akımları birbirlerine eşit olan güneş pilleri birbirleri aralarında seri bağlanmalıdır. Bununla birlikte eş olmayan iki güneş pilinin paralel bağlanması toplam güç değeri üzerinde herhangi bir probleme

neden olmamakta ve toplam güç her bir güneş pilinden elde edilen güçlerin toplamına kabaca eşit olmaktadır.



Şekil 2.23 Özdeş olmayan iki modülün seri bağlanması (Overstraeten,1986)



Şekil 2.24 Özdeş olmayan iki modülün paralel bağlanması (Overstraeten,1986)

Modüller arasında oluşan uyumsuzlukların ana nedeni birbirlerine bağlı modüllerden birinin çalışması esnasında kısmi olarak gölgelenmesidir. Pratik uygulama alanlarında kullanılan güneş pilleri ve modülleri Şekil 2.23 ve 2.24'de gösterilen değerlerden daha büyük sızıntı (*leakage*) akımlarına sahiptir. Bir güneş pilinin eşdeğer devresinde sızıntı akımı paralel direnç ile gösterilmektedir ve bu akım pilin verimliliğini azaltmasına rağmen gölgelenme etkisi altında kalan bir modülün performansının uyumsuzluk ve gölgelenme etkilerine karşı daha az duyarlı olmasını sağlamaktadır (Overstraeten, 1986).

Seri bağlı modüller içerisinde herhangi bir modülün gölgelenmesi durumunda, gölgelenmiş olan pil bir yük gibi davranır ve diğer modüllerin ürettikleri akım ve voltaj değerleri bu gölgelenmiş modül üzerinde yok olur. Karanlık altında bir modül diyot gibi davranmasından dolayı, ışığa altındaki geriye kalan modüller karanlık altındaki bu modülü ters olarak besleyeceklerdir ve seri devre boyunca üretilen akımı engelleyecektir. Dolayısıyla bu devre üzerinden güç alınması mümkün olmaz. Besleme altındaki bu modül üzerinde sıcaklık artışı meydana gelecek ve sınır değeri olan ($80^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$) üzerine çıktığı zaman kullanılan yar-iletken malzeme üzerinde sıcaklık artışı nedeniyle hasarlar oluşacaktır. Dolayısıyla bu durum karşısında örgü boyunca performans düşecektir. Oluşan bu etkiye sıcak nokta oluşumu (*hot spot formation*) adı verilir (Markvart, 1994).

Sıcak nokta oluşumu engellenmenin etkin bir yolu by-pass diyotlarının kullanılmasıdır. By-pass diyotları modüllere paralel olarak bağlanmaktadır ve modülün ürettiği akım için düşük dirençli akım yolu sağlamaktadır. By-pass diyotların kullanılması ile gölgelenme durumunda modül üzerinde oluşan güç kaybını engellenmektedir. Bypass diyotun kullanılmasıyla bazı giderleri ve küçük bir miktarda bağlantının çıkış gücünde azalmaya yol açar. Bazı büyük modüller için bypass diyotlar imalat aşamasında modül yapısının içerisinde yer alır. Bypass diyotun kullanılmasına kısmi gölgelenmeye ve bağlantıdaki güç seviyesine bağlı olarak sistem - sistem karar verilmelidir.

Gölgelenme etkisiyle PV modüller üzerinde oluşan güç kaybı engellemek amacıyla her bir bağlantı grubuna seri olarak bağlı *blocking* diyotlar kullanılmaktadır. Bu diyotun kullanılmasıyla gölgelenen bağlantı içerisinde oluşan ters beslenmeye karşı geri kalan dizilerden bu akımı ve meydana gelebilecek

zararları önler ve ayrıca şebekeden bağımsız sistemlerde güneşin olmadığı saatlerde yük durumunda olan modüllerin aküler tarafından beslenmesini engellemektedir.

Blocking veya bypass diyot'ların kullanımı sistemin çıkış gücünü azaltır fakat etkili zararlardan korur. Blocking veya bypass diyotların kullanılıp kullanılmayacağına seçimi sistem dizaynına ve gölgelenmeden veya diğer etkilerden korunma için gerekli olan ihtiyaca bağlıdır.

2.6.4 EĞİM AÇISI VE YÖNLENDİRME

Modülün güneşin yönüne bağı olarak yönelimi modül yüzeyinin birim alanına gelen güneş ışınımını belirler. PV modüllerin yöneliminde en önemli nokta, güneş ışınlarının modül yüzeyine dik olarak gelmesidir. PV modüllerin güneş ışınlarına göre yönelimini açıklamak için modülün düzlemi ile yatay düzlem arasındaki açı olan eğim açısı, β , ve modülün düzlemi ile tam güney arasındaki açı olan azimut açısı, γ , ana parametreleri tanımlanır. Modül eğim açısı, bölgenin enlem açısı, ϕ , ve güneş deklinasyon açısı, δ , arasındaki farka eşittir.

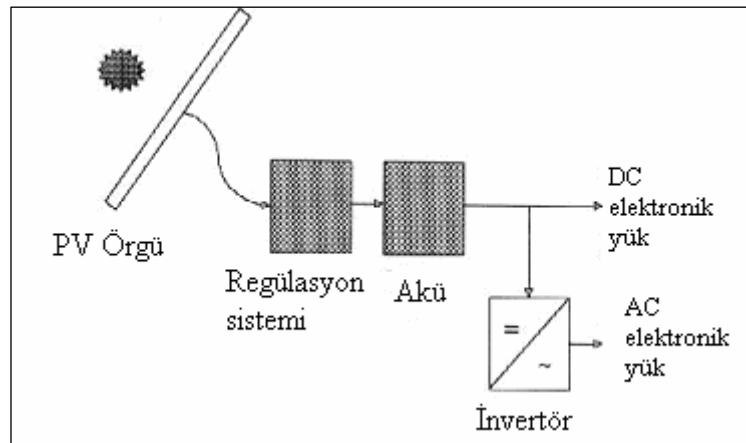
PV modül yöneliminin değişken olan güneş ışınlarına göre ayarlanması ile yönelimi sabit olan modüle göre bir yıl boyunca %10 ile %40 arasında daha fazla enerji elde edilir. Bu amaçla güneşi izleyen (*tracking*) sistemler PV güç uygulamalarında kullanılmaktadır(Perez vd, 1993).

Düşük enlemlerde yönelimi sabit PV güç sistemleri için bir yıl boyunca üretilen maksimum enerji değeri PV örgünün yatay düzlemle yaptığı açının enlem açısına eşit olduğu ve PV örgü düzleminin tam güneye (kuzey yarımküre için) veya tam kuzeye (güney yarımküre için) baktığı zaman elde edilir. Kuzey Avrupa gibi yüksek enlemlerdeki bölgelerde PV güç sistemlerinden bir yıl boyunca elde edilen maksimum enerji, PV örgülerin eğim açılarının bölgenin enlem açısından 10-15 derece daha düşük açı değerlerinde elde edilir.

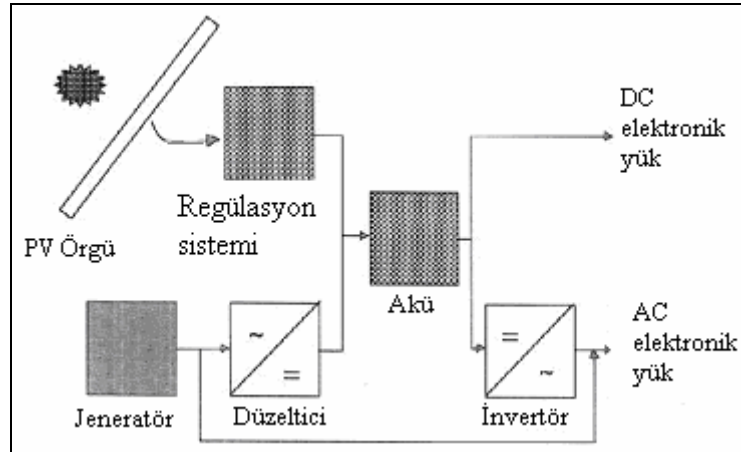
2.7 FOTOVOLTAİK SİSTEM

Fotovoltaik güç sistemleri kullanım alanlarına göre *şebekeden bağımsız (stand alone)* ve *şebekeye bağlı (grid-connected, utility-interactive)* olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Şekil 2.25’de basit bir dizaynı gösterilen şebekeden bağımsız (*Otonom*) sistemler güneş ışınının yeterli olduğu şehir şebekesinden uzak yerleşim alanlarında günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem temel olarak, PV örgü, pv örgüden gelen akım ve voltaj değerlerini düzenleyen regülasyon sistemi, depolama birimi akü ve invertör kısımlarından oluşmaktadır. PV güç sistemlerinin bakım ve yakıt gibi masraflarının olmamasından dolayı maliyet oranının yaşam ömrü ele alındığında oldukça düşük olması bu sistemlerinin kullanımını oldukça cazip hale getirmiş ve yangın gözetleme kuleleri, baz istasyonları, su pompaları, otoyollarda bulunan sinyalizasyon sistemleri gibi oldukça önemli olan uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu sistemler güneş enerjisinin yeterli olmadığı veya PV örgü tarafından akülerin yeteri kadar beslenemediği durumlarda Şekil 2.26’da gösterildiği gibi rüzgar tribünleri, dizel jeneratörler gibi yardımcı güç kaynakları ile birlikte kullanılabilir. Bu tür sistemlere Hibrit (hybrid) sistemler adı verilir.

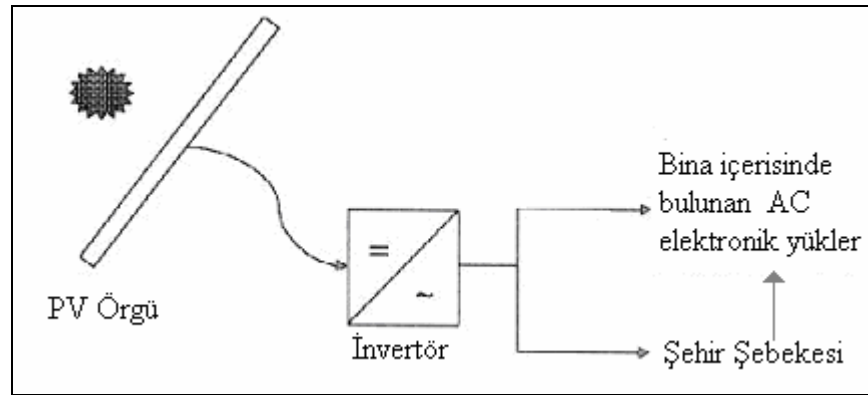


Şekil 2.25 Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin şematik diyagramı



Şekil 2.26 Hibrit sistemin şematik diyagramı

Şebekeye bağlı sistemler şebeke ile paralel olarak çalışan sistemler olup temel yapısı Şekil 2.27’de gösterildiği gibidir. PV uygulamalarının en önemli gelişimi 1990 yılların başlarında uygulanmaya başlayan binaya entegreli fotovoltaik (*BIPV, Building Integrated Photovoltaic*) uygulamalardan sonra ortaya çıkmıştır. Bu uygulama alanında fotovoltaik modüller, pencere, çatı veya dış cephede kullanılmaktadır. Almanya, Japonya ve Amerika da hükümet destekli yenilenebilir enerji politikaları ile şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerde büyük bir atılım yapılmıştır. Almanya da ki uygulamada fotovoltaik güç sistemlerinin kurulduğu evlerde güneş ışınımı ile üretilen fotovoltaik elektrik enerjisi için yüksek oranda geri ödeme oranı kurmuştur. Almanya hükümeti üretilen her kWh enerji başına 0,5 \$ sübvansiyon sağlamaktadır. Benzer uygulamalar İspanya, Hollanda ve diğer Avrupa ülkelerinde gerçekleşmektedir. Fakat en büyük başarı Japonya da gerçekleşmektedir. Japonya daki hükümet PV sistemi kullanan evler için toplam PV sistemin maliyetinden %30 oranında indirim yapmaktadır ve ayrıca elektrik faturaları üretilen PV enerji ile şebekeden kullanılan enerji arasındaki fark üzerinden belirlenmektedir (Maycock, 2002). Ayrıca bu sistemler enerji gereksiniminin çok olduğu bölgelerde şehir şebekesine destek vermek amacıyla, büyük çapta güç istasyonlarını oluşturmaktadır. Özellikle Almanya, Amerika, Hollanda , İspanya ve Japonya da 560 kWp ile 5 MWp güç değerleri arasında kurulan PV güç istasyonları mevcuttur (<http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>.)



Şekil 2.27 Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin basit şematik diyagramı

2.7.1 SİSTEM BİLEŞENLERİ

Ana sistem bileşenleri fotovoltaik örgü (modüller, elektriksel tertibat ve montaj yapısı), güç dengeleyicileri invertörler (power conditioning) ve kontrol ekipmanları, depolama ekipmanları (eğer istenirse) ve elektronik yük ekipmanlarıdır. Şebekeden bağımsız sistemler için elektronik yük ekipmanlarının içerilmesi özellikle önemlidir. Çünkü sistem dizaynı ve ölçümlendirilmesi elektronik yükler ele alınarak yapılmaktadır. Geleneksel olarak örgü bileşenleri fotovoltaik kısım ve sistem dengesi (balance of system *BOS*) olarak ikiye ayrılır.

2.7.1-a GÜÇ DENGELEYİCİLERİ (POWER CONDITIONING)

Güç dengeleyici ünitenin avantajı optimum koşullar altında çalışan sistemi güvenli hale getirmek için bazı elektriksel dengeleyici ekipmanlarını içermesidir. PV güç sistemlerde yüksek çıkış değerleri modüllerin maksimum güç noktalarında elde edilir. Modül/örgünün maksimum güç noktasında voltaj ve akım değerlerinin ışınım seviyesi ve sıcaklıkla bağlı olarak değişmesinden dolayı, maksimum güç noktasını

izleyen kontrol ekipmanları sistemde kullanılmalıdır. Yaygın olarak kullanılan kontrol sistemi *Maksimum Güç Noktası İzleme (Maximum Power Point Tracker MPPT)* olarak bilinen elektriksel bir devredir. Bu kontrol birimi PV örgünün gördüğü etkin elektronik yük direncini ve PV sistemin çalışması esnasında I-V karakteristiği üzerindeki noktaları kontrol eder. Şebekeye bağlı sistemlerde MPPT invertörler içerisinde yer almaktadır (Pearsall vd, 2001).

2.7.1-b İNVERTÖR

PV örgü/modülden gelen DC akımı, alternatif akıma dönüştüren birime çevirici (invertör) adı verilir. PV sistemlerde olduğu gibi invertörlerde iki kısma ayrılabilirler. Bunlar şebekeye bağlı (grid-connected, line-tied, utility-connected) ve şebekeden bağımsız sistemlerde kullanılan invertörlerdir. Şebekeden bağımsız invertörler şehir şebekesinin elektriksel değerlerine bağlı olmaksızın çalışan, doğru çıkış frekans değerini (50-60 Hz) elde etmek için dahili frekans üreticisine sahip invertörlerdir. Şebekeye bağlı invertörler ise şehir şebekesinin voltaj ve frekans parametrelerine bağlı olarak çalışmaktadır.

İnvertör giriş voltajı PV sistemin dizaynına, istenilen çıkış karakteristiklerine ve invertör tipine bağlı olarak değişir. Şebekeden bağımsız sistemler genel olarak 12, 24 veya 48 V, şebekeye bağlı invertörler ise genellikle 110 V değerinden daha yüksek giriş voltaj değerlerine sahiptir. Ticari olarak kullanılan invertörler 220-230 V çıkış değerine sahip tek fazlı ve 415 V çıkış değerine sahip üç fazlı invertörlerdir.

İnvertörün çevirim verimliliği, invertörün çıkış gücünün (AC güç çıkışı) giriş gücüne (PV sistemin DC güç çıkışı) oranı olarak tanımlanır ve PV örgü/modülden elde edilen güç değerine bağlı olarak değişiklik gösterir. İnvertörün maksimum giriş güç değerinin %30 ile %50 oranları arasındaki değerlerde invertör verimli bir şekilde çalışırken, %10'nin altındaki güç seviyelerinde invertör verimliliği önemli ölçüde azalır. Düşük ışınım değerleri invertörün giriş gücü olan PV örgü/modül tarafından üretilen güç değerinin düşmesine ve invertör güç kapasitesinin altındaki değerlerde invertör verimliliğinde düşüslere neden olmaktadır. Düşük ışınım değerlerinin olduğu bölgelerde invertör verimliliğindeki azalmayı engellemek amacıyla PV sistem gücünün %75-80 arasındaki giriş değerlerine sahip invertör seçilir.

Şebekeye bağlı invertörlerde karşılaşılabilecek en büyük sorun, şebekenin kesilmesi durumunda, invertörün şebekeye enerji aktarımına devam etmesidir. *Islanding* olarak bilinen bu olayı önlemek amacıyla şebekenin voltaj ve elektriksel parametrelerinin normal değerlerinin üzerinde veya altında PV sistemi şebeke ile olan bağlantısını kesen yüksek ve düşük voltaj röleleri ile yüksek ve alçak frekans röleleri kullanılır (Ropp.M.E vd, 1999). Günümüzde kullanılan invertörler şebekeden gelen voltaj ve frekans değerlerinin +/- %2 civarındaki limit değerlerinin dışında olduğu zaman otomatik olarak şebekeye güç aktarımını durdurmaktadır.

Güneş ışınımının olmadığı durumlarda veya fotovoltaiik örgü/modül den gelen giriş gücünün limit değerleri dışında olması durumunda invertör otomatik olarak kendisini devre dışı bırakır ve güneş ışınımının yeterli olduğu durumda tekrar şebekeye güç aktarımına başlar (Ishikawa, 2002).

Temel olarak bir invertör, fotovoltaiik örgülerden elde edilen geniş dc voltaj ve akım değerleri üzerinden çalışmalı, kendi koruması ve kullanıcı güvenliğini sağlamalı, çıkış voltajı ve frekansını kontrol etmeli, şebeke ve elektronik yükler ile uyumlu çalışmalı, PV örgüler üzerinde maksimum güç noktası (maximum power point MPP) izleme fonksiyonunu yerine getirmeli, geniş aralıktaki çevre sıcaklığı ve nem değerinde çalışabilmeli, sistemde yer alan kontrol elemanları ile arabirimli olması veya sistemi kontrol etmeli, şebeke içerisinde meydana gelen dalgalanmalar ve tepkin gibi lineer olmayan özellikleri kontrol edebilmelidir. (Bower W., 2000).

İnvertör teknolojisinin gelişimi anahtarlama bileşenlerinin gelişimi ile paraleldir. Şebeke etkileşimli sinüs dalga invertörlerin gelişimi 1980 yılının başlarında başlamıştır. Bu invertörlerde anahtarlama sistemi olarak bipolar transistörler ve alan etkili transistörler (FET) kullanılmaktaydı. Daha sonra yalıtılmış geçitli çift kutuplu transistörlerin (insulated gate bipolar transistör *IGBT*) ortaya çıkması, *MOSFET* lerin (metal oxide field effect transistör) gelişimi, mikro işlemciler ve PWM (pulse width modulated) entegre devrelerin ortaya çıkması ile düşük maliyetli, yüksek güç değerine sahip yüksek verimlilikli invertörlerin dizaynına olanak sağlamıştır.

İnvertör verimliliği, fotovoltaiik sistemlerin performans oranı üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Japonya için 1 yıl boyunca 14 sistem üzerinde yapılan analizler sonucunda invertör verimliliği 0,73 ve İsviçre deki 2 yıl boyunca ve 20 sistem üzerinden yapılan değerlendirmeler sonucunda invertör verimliliği 0,90 olarak

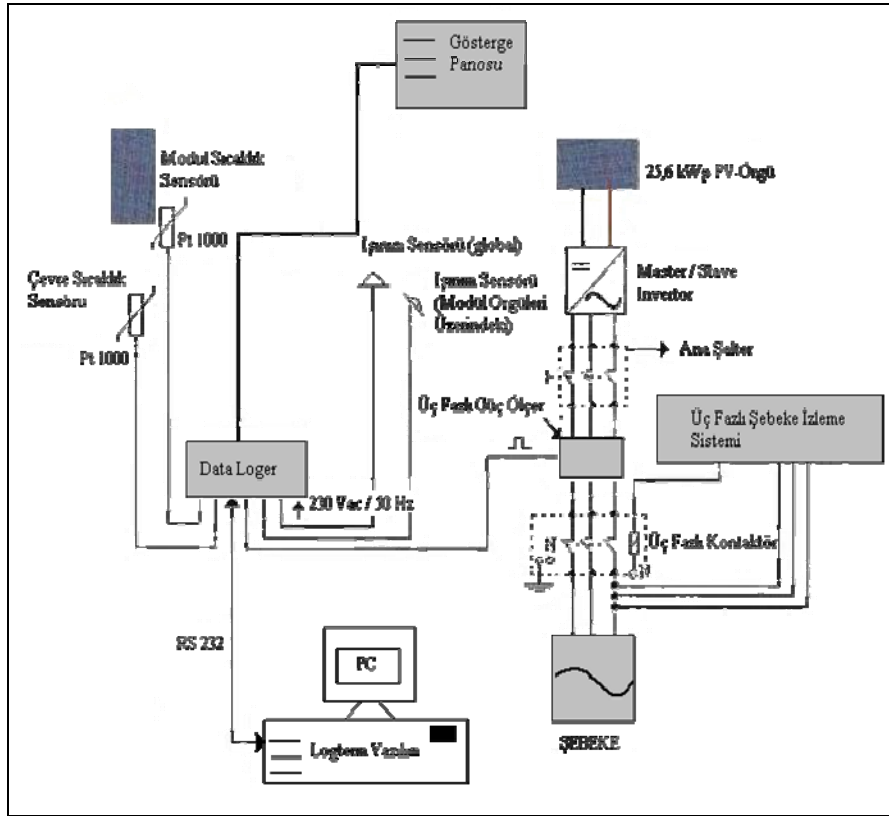
bulunmuştur. Bu ülkelerde bulunan sistemlerin performans oranları 0,64 ve 0,69 dur. Zamanla gelişen invertör verimlilikleri özellikle şebekeye bağlı sistemlerin verimliliklerinin 0,10 den daha büyük değerlerde gerçekleşmesine neden olmuştur. Son yıllarda özellikle 100 kWp ve daha büyük kurulu güce sahip geniş kapasiteli şebekeye bağlı PV sistemlerin invertör verimlilikleri 0,95 den daha büyük değerlerde bulunmuştur (Jahn vd, 1998)

3. MATERYAL YÖNTEM

Şebekeye bağlı standart test koşulları altında 25,6 kW_p kurulu güce sahip çatı uygulamalı Muğla Üniversitesi “Türk Evi”nde kurulu fotovoltaik güç sistemi dört temel aşamada değerlendirilebilir.

- I. Fotovoltaik sistemlerin temel bileşenleri olan PV modüller
- II. PV sistemlerden elde edilen DC gücün AC güce dönüştürülmesinde ve enerjinin şebekeye aktarılmasında kullanılan ve sistem dengeleme birimi olan invertörler
- III. PV sistemin şebekeye bağlantısında önemli rolü olan şebeke izleme üniteleri ve koruma üniteleri
- IV. PV sistemin performansının değerlendirmesinde kullanılan ölçüm sistemi olarak sınıflandırılabilir.

Sistem 37° 13' enlem ve 28° 22' boylam derecelerine sahip, deniz seviyesinden 646 metre yükseklikteki Muğla'da kurulu olan Muğla Üniversitesinde ki 18° eğim açısına sahip Türk Evi çatısının yaklaşık 290 m² alana sahip güney batıya bakan kısmına yerleştirilmiştir. Sistemi oluşturan tüm bileşenlerin temel şeması Şekil 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.1 Sistemin temel şeması

Genel hatlarıyla sistem şu şekilde çalışmaktadır. Birbirinden bağımsız 15 gruptan meydana gelen toplam 214 adet çoklu kristal silisyum yapısına sahip fotovoltaik modüllerin oluşturduğu 25,6 kW_p kurulu DC güç değeri, 15 adet invertöre iletilmektedir. Burada her bir grup 1 adet invertöre sahip olmaktadır. İnvörtörler içerisinde yönetici rolü oynayan 6 adet Master tipi invertörlere şebeke hattı bağlanarak, PV örgüden gelen DC güç AC güce çevrilmektedir. Elde edilen AC güç şebeke hattı üzerinden tekrar, şebekeye aktarılmaktadır. Şebeke ile invertörler arasında şebeke izleme ünitesi oluşturularak şebeke içerisinde meydana gelebilecek yüksek şebeke frekansı ve voltaj değerleri engellenmektedir. İnvörtörlerden elde edilen AC enerji üç fazlı enerji sayacına bağlanmakta ve bu enerji değeri bu sayaç içerisinde kare dalgaya dönüştürülerek Data Logger'a iletilmektedir. Ayrıca çevre sıcaklığını, modül sıcaklığını, yatay düzlemdeki ışıınımı ve modül üzerindeki ışıınımı ölçen sensörler bu data logger'a bağlanmaktadır. Data logger da depolanan bu değerler RS 232 arayüzey portu kullanılarak Log Term programı sayesinde sistem ile

ilgili veriler PC'ye kaydedilmektedir. Data Loger üzerinde bulunan RS 485 portu ile sistemin anlık ve çalışmaya başlamasından itibaren elde edilen değerler Türk Evi içerisinde bulunan gösterge panolarına iletilmektedir.

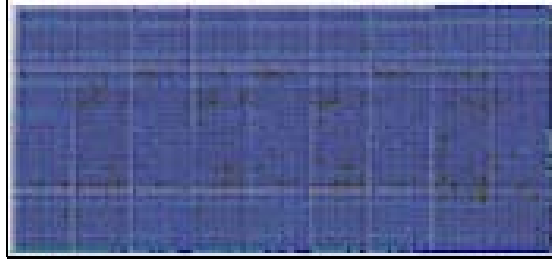
3.1 SİSTEMDE KULLANILAN PV MODÜLLER

Sistemde yer alan güneş enerjisi elektrik enerjisine çevirmede kullanılan ve sistemin kalbini oluşturan PV modüller çoklu kristal silisyum yapıya sahiptir. Standart test koşulları altında maksimum gücü 120 W_p olan çok kristalli Silisyum fotovoltaiik modülün üretici firma tarafından verilen elektriksel özellikleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 Sistemde kullanılan çoklu kristal modülün elektriksel özellikleri

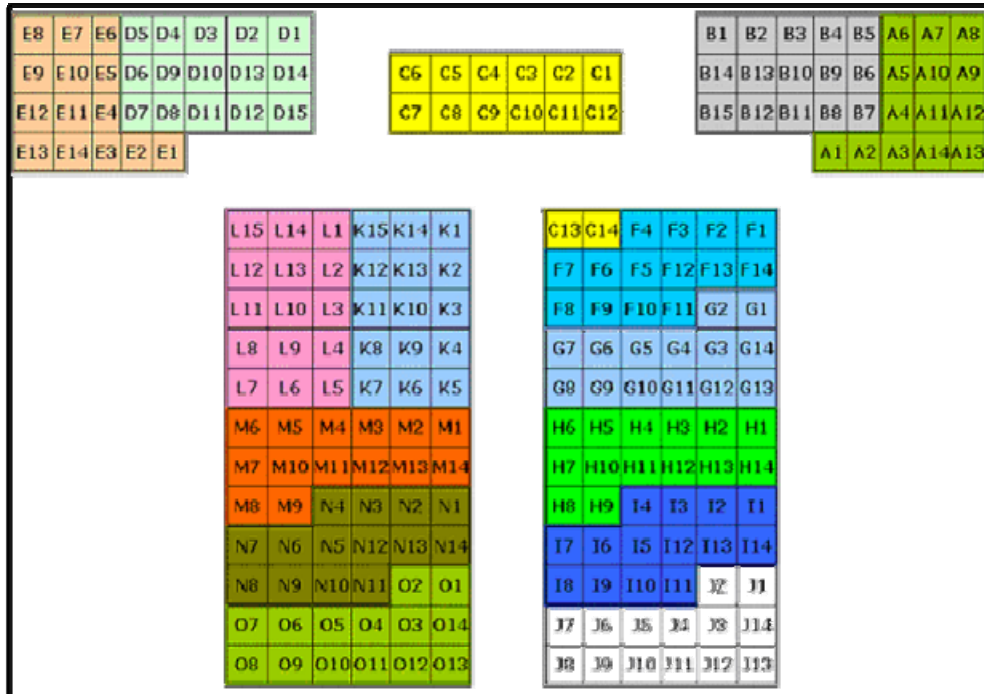
Parametreler	Nominal Değerler	Tolerans Değerleri
Maksimum Güç (P _{max})	120 W _p	+ %10/-%5
Açık evre Voltajı (V _{oc})	23,9 V	± %10
Kısa Devre Akımı (I _{sc})	6,89 A	± %10
Maksimum Voltaj (V _{mp})	19,0 V	-
Maksimum Akım (I _{mp})	15 A	-
Maksimum by-pass diyot oranı	12,5 A	-

Yukarıdaki tabloda yer alan değerler standart test koşulları altında (güneş pili sıcaklığı 25⁰C, 1000 W/m² güneş ışınımı ve hava kütlesi AM: 1,5) ölçülen değerlerdir. Kullanılan modüller -20 ⁰C ile 40 ⁰C çevre sıcaklığı, -20 ⁰C ile 83 ⁰C güneş pili sıcaklığı arasında çalışmaktadır. 2000 Pa altındaki değerlerde üstüne düşen kar basıncına ve 3000 Pa altındaki değerlerde rüzgar basıncına dayanıklıdır (Installation Instruction for Photovoltaic Module, Mitsubishi).



Şekil 3.2 Çoklu kristal modül şekli

25,6 kW_p kurulu güce sahip sistem 214 adet çoklu kristal modülden oluşmakta ve nominal PV örgü alanı 215 m² dir. Türk Evi çatısında yer alan PV örgü Şekil 3.3'de gösterildiği gibi birbirleriyle seri olarak bağlı olan modüllerin oluşturduğu toplam 15 gruptan oluşmaktadır. 11 adet grupta 14 seri bağlı modül bulunmaktadır ve geriye kalan 4 adet grubu ise 15 adet seri bağlı modüller oluşturmaktadır. Modüllerin elektriksel bağlantıları sonucunda invertörlerin giriş voltaj değerleri 340 V_{dc} ile 280 V_{dc} arasında değişmektedir.

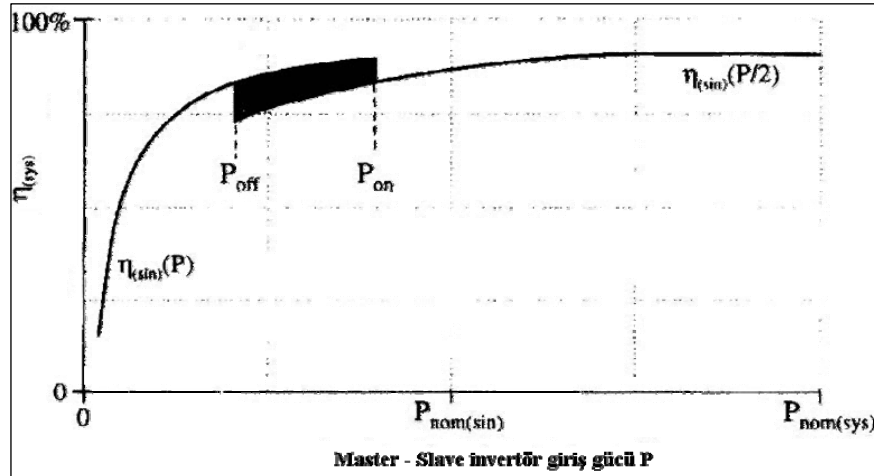


Şekil 3.3 PV örgü bağlantı şeması

3.2 SITOP SOLAR 1500 İNVERTÖRLER

Master-slave model invertörler, PV örgüden elde edilen gücün gün içerisinde tam kapasiteye ulaşmadığı zamanlarda sergilediği yüksek verimlilikten dolayı güç kapasitesi yüksek olan fotovoltaik sistemlerde kullanılmaktadır. Temel olarak *master-slave* sistemi iki birimden oluşur ve *slave* invertörün fonksiyonları iki güç seviyesi, P_{on} ve P_{off} , tarafından kontrol edilmektedir. *Master* ve *slave* invertörlerin temel çalışma prensibi *master* invertöre gelen güç değerine dayanmaktadır. *Master* invertörün giriş gücü değeri kapasitesinin üzerinde olursa (P_{on}) *slave* invertör devreye girer. Eğer *master* invertöre gelen giriş gücü değeri, bu invertörün tanımlı olan limit değerleri arasında ise *slave* tipi invertör devreye giremez.

Şekil 3.4’de gösterildiği gibi sıfır ile P_{off} arasındaki güç değerlerinde *master* tipi invertör aktif olarak çalışır ve tüm gücü yönetir. Bu durumda invertör verimliliği tek bir invertörün verimliliğine eşit olur. P_{on} ile $P_{nom(sys)}$ (nominal sistem gücü) arasındaki giriş gücü değerlerinde ise toplam gücün yarısı *master* diğer yarısı ise *slave* invertör tarafından şebekeye aktarılır (Maranda vd, 1998).

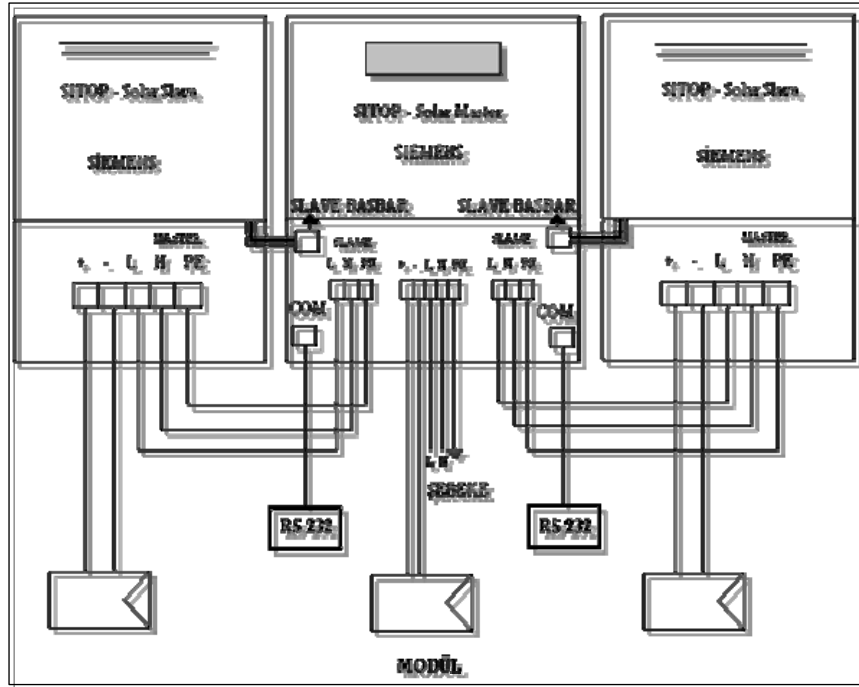


Şekil 3.4 Master – Slave invertör verimlilik eğrisi η_{sis} (Maranda vd, 1998)

Muğla Üniversitesinde kurulu olan 25,6 kW_p gücündeki sistemde kullanılan master-slave invertörlerin gruplandırılması iki şekilde olmaktadır.

- 3 adet 1 Master 2 Slave invertörden oluşan üçlü grup
- 3 adet 1 Master 1 Slave invertörden oluşan ikili grup

bu şekilde gruplandırmadaki amaç her bir şebeke fazına eşit miktarda güç aktarmaktır. Bu amaçla üçlü ile ikili grupların her biri aynı şebeke fazına bağlıdır. Şekil 3.5'de üçlü grup olarak çalışan master-slave invertörleri arasındaki bağlantı şeması verilmektedir.



Şekil 3.5 Slave-Master-Slave invertörleri arasındaki bağlantı şeması

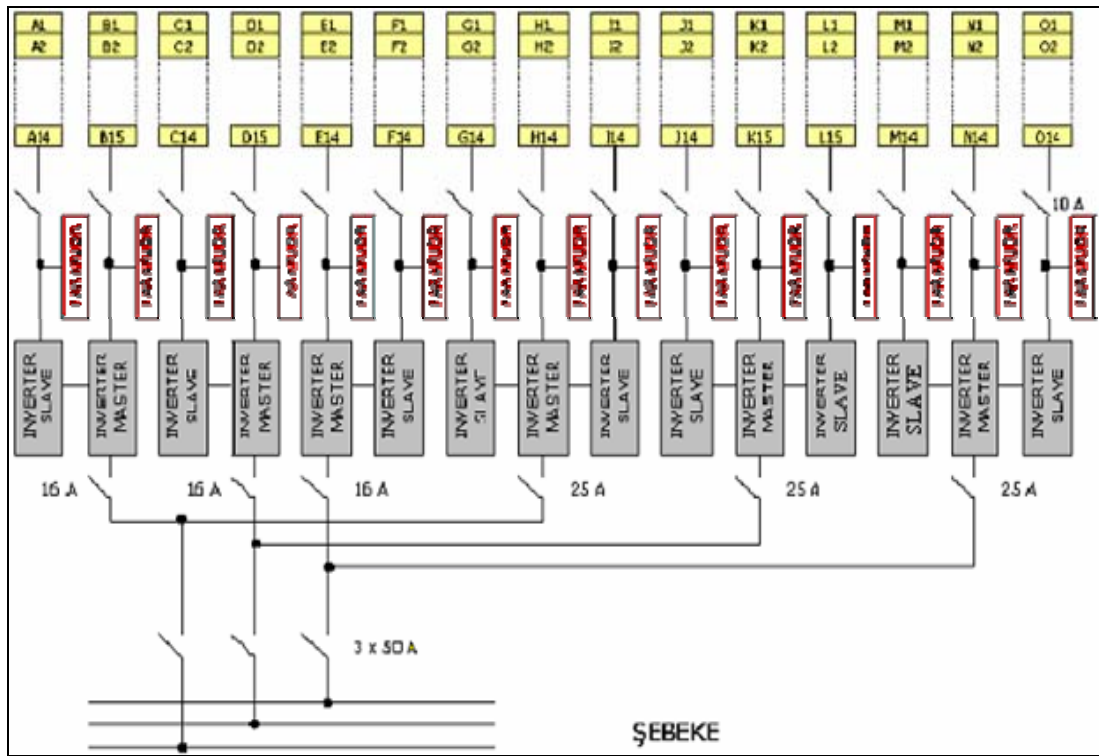


Şekil 3.6 Sitop solar 1500 Slave-Master-Slave üçlü invertör gurubu

Tablo 3.2 de üretici firma Siemens tarafından verilen Master ve Slave invertörlerin elektriksel parametreleri verilmektedir.

Tablo 3.2 Sistemde kullanılan invertörlerin teknik özellikleri (Sitop solar innvertör el kitapçığı)

Teknik Özellikler	Master	Slave
Nominal ac çıkış gücü	1500 W	1500 W
Maksimum ac çıkış gücü	1650 W	1650 W
Önerilen maksimum giriş gücü (STC)	1800 W _p	1800 W _p
Giriş gerilim aralığı (dc)	200-520 V	200-520 V
Maksimum giriş voltajı (dc)	550 V	550 V
Maksimum besleme akımı (dc)	6,5 A	6,5 A
Harcadığı Güç	9 W	4 W
İzin verilebilir çevre sıcaklığı	-10...50 °C	-10...50 °C
Maksimum Verimlilik	%94	%94,5

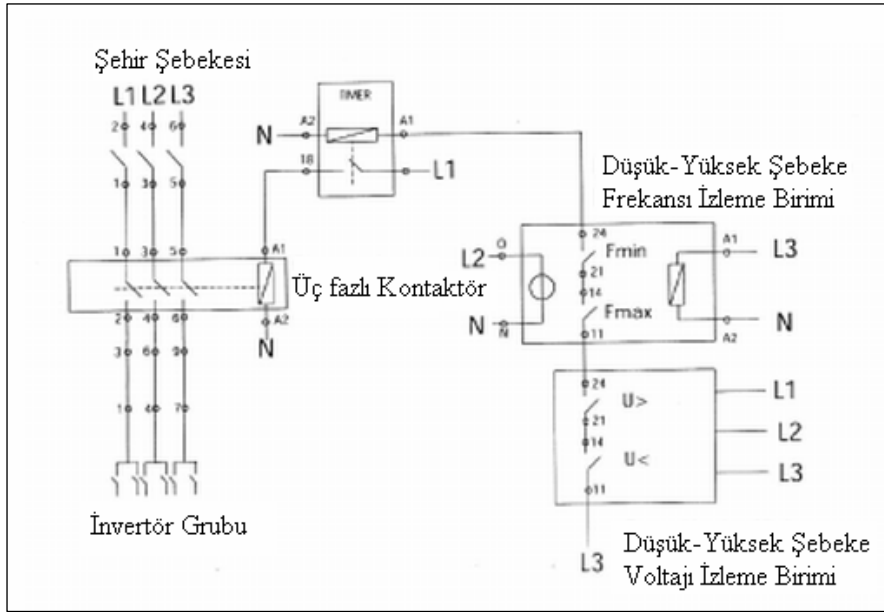


Şekil 3.7 İnvörtör grupları ile şebeke ve modül grupları arasında yapılan bağlantı

3.3 ŞEBEKE İZLEME VE KORUMA ÜNİTESİ

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerde karşılaşılan en önemli sorun şebeke hatları içerisinde meydana gelen dalgalanmalardır. Bu durum yıldırım düşmesi sonucunda şebeke içerisinde meydana gelen voltaj ve frekans değerlerinin anlık değişmesi, ana şebeke besleme hattında meydana gelebilecek dengesizlikler ve PV sistemin bağlı olduğu şebeke hattından büyük değerlerde güç çekilmesi gibi durumlar meydana gelebilir. Bu durumda invertörler bu dalgalanmalara karşı verimsiz çalışacaktır ve invertör içerisindeki elektriksel bileşenlerin zarar görmesine neden olacaktır. Bu durumu engellemek amacıyla sistemde şebekedeki voltaj ve frekans değerlerini izleyen bir ünite yer almaktadır. Bu sistemde invertörlerin çıkış değer aralığına eşdeğer olan şebeke gerilim ve frekans parametrelerinin değerleri ayarlanarak sistem koruma altına alınmaktadır. Şebekenin gerilim ve frekans değerleri, ayarlanan limit değerlerinin altında veya üzerinde olması durumunda

koruma ünitesi devreye girerek PV sistem ile şebeke arasındaki güç aktarımını durdurur devre dışı kalacak ve şebekeden sisteme gelen enerji kesilecektir. Şekil 3.8'de sistemin bağlantı şeması gösterilmektedir. Şebeke gerilim değeri + %105 ve - %95 oranları arasında ayarlanmış olup, izinli frekans değerleri 49-51 Hz değerleri arasındadır.



Şekil 3.8 Şebeke izleme ünitesi

3.4 ÖLÇÜM SİSTEMİ

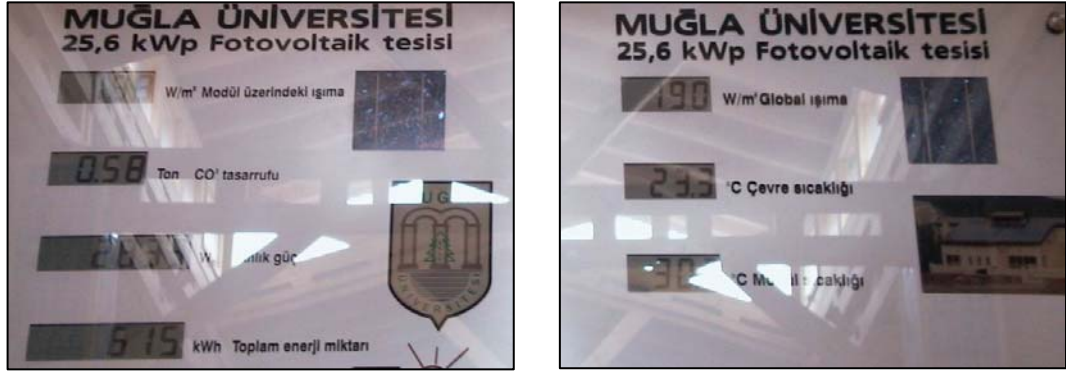
25,6 kWp kurulu güce sahip Türk Evi fotovoltaik çatı projesinde sistem verilerinin elde edilebilmesi ve değerlendirilmesi amacıyla NEG ölçüm sistem bileşenleri kullanılmaktadır. Sistem bileşenleri geniş alanlı NEG DIS gösterge panosu, NEG LOG data logger, SOZ-03 ışınım sensörü, ABB DZ 4000 W dalga çıkışlı üç fazlı enerji sayacı ve LOG TERM yazılımından oluşmaktadır.

3.4.1 NEG DIS GÖSTERGE PANOSU

Türk Evi içerisinde duvara yerleştirilen gösterge panosu vasıtasıyla;

- PV örgü üzerinde birim alana gelen güneş ışınımı (W/m^2)
- Yatay düzlem üzerinde birim alana gelen güneş ışınımı (W/m^2)
- Sistemin şebekeye aktardığı güç (W)
- Sistemin çalışmaya başlamasından itibaren ürettiği toplam enerji miktarı (Wh)
- CO₂ tasarruf miktarı (kg)
- Modül sıcaklığı ($^{\circ}C$)
- Çevre sıcaklığı ($^{\circ}C$)

Parametrelerinin değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.9 NEG DIS gösterge panosu

3.4.2 NEG LOG DATA LOGGER

NEG LOG data logger fotovoltaik güç sisteminden elde edilen verilerin depolanmasında kullanılmaktadır. Data logger'a yatay yüzey ile modül yüzeyinin birim alanına gelen güneş ışınımını ve modül ile çevre sıcaklık değerlerini ölçen sensörler bağlıdır. NEG LOG, NEG DIS gösterge panosu üzerindeki değerlerin transferini ve çevirimini yapabilmektedir. Çevresel faktörlerden etkilenmemesi amacıyla IP65 plastik koruyucu ile dış yüzeyi kaplıdır. NEG LOG data logger aşağıda özelliklere sahiptir.

- PV sistemin ürettiği güç değerlerinin ölçümü için 1 sinyal girişi
- Sıcaklık probu bağlantısı için 1 giriş

- Işınım sensörü için 1 giriş
- Ölçülen değişkenlerin her biri için 16 kbyte hafıza kapasitesi
- Güç kaynağı olarak yedek batarya
- PC'ye doğrudan bağlantı için RS 232 arayüzey portu
- Uzun erişimli data transferi için RS 485 arayüzey portu
- Gösterge panosuna data transferi için RS 485 arayüzey portu



Şekil 3.10 NEG LOG data logger

NEG LOG Data Logger'in konfigürasyonu Log Term bilgisayar yazılımı ile değiştirilmektedir. NEG LOG uygun zaman periyotları içinde veri değerlerinin aritmetik ortalamasını alarak ve ölçülen her bir veri setinin zaman ve tarihlerini kaydetmektedir. Kaydedilen her ortalama değer arasındaki zaman periyodu fabrika ayarı olarak 60 dakikadır ve değerler 341 gün boyunca Data Logger içerisinde depolanmaktadır. Log Term yazılımı kullanılarak bu 60 dakikalık periyot süresi 3 dakika, 10 dakika veya 30 dakikalık periyotlar olarak da ayarlanılabilmektedir. Her periyoda karşılık gelen verilerin Data Logger'da depolanma süreleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3 Seçilen periyotlara karşılık Data Logger içerisinde verilerin depolanma süreleri

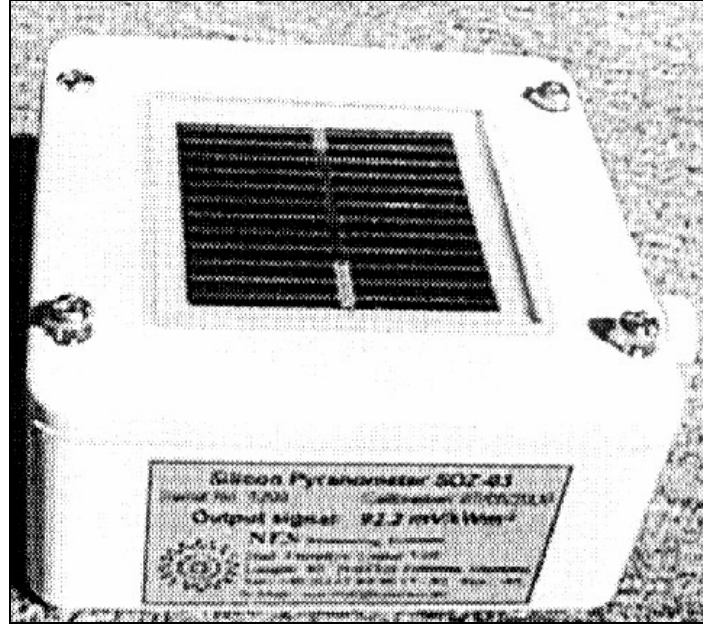
Seçilen periyot	Veri depolama süresi
1 dakika	5 gün
10 dakika	56 gün
30 dakika	170 gün
60 dakika	341 gün
1 gün	22 yıl

Data logger içerisindeki veriler yukarıdaki tabloda belirtilen periyot değerlerine karşılık gelen süreler içerisinde bilgisayara kaydedilmez ise veriler ilk günden başlamak üzere silinir. Örnek olarak; Tablo 3.3 de birinci satırı seçersek, birer dakika arayla ışıınım verileri data logger içerisinde kaydedilecek ve verilerin data logger içerisinde maksimum depolanma süreleri 5 gün olacaktır. Eğer veriler bilgisayara 6. gün kaydedilir ise 1. günde kaydedilen verilerin hepsi data logger dan silinecektir. Data Logger'ın ölçülen her bir veri için hafıza değeri 16 kbyte dır.

NEG LOG ayrıca küçük bir gösterge panosu yardımıyla her kaydedilen değeri ekrana yansıtmaktadır. Böylece anlık ışıınım, anlık sistem performansı, sistemin çalışmaya başladığı zamandan itibaren üretilen toplam enerjiyi, yıllık üretilen enerjiyi, tarih ve zamanı göstermektedir. RS 232 portu kullanılarak NEG LOG içerisindeki verileri bilgisayara doğrudan kaydedilmektedir.

3.4.3 SOZ - 03 IŞINIM SENSÖRÜ (SOLAR IRRADIATION SENSOR)

PV örgü üzerindeki düzleme ve yatay düzleme düşen birim alandaki ışıınım şiddetini ölçmek için SOZ – 03 tipi ışıınım sensörü kullanılmaktadır. SOZ – 03 tipi ışıınım sensörünün yapısı fotovoltaik modül ile benzerdir. SOZ – 03 ışıınım sensörü Şekil 3.11'de gösterildiği gibi cam, güneş pili, alt tabaka ve plastik koruyucudan meydana gelmektedir.



Şekil 3.11 SOZ – 03 ışınım sensörü

Üzerine düşen güneş ışınlarının etkisiyle potansiyel fark oluşturan güneş pilinin çıkış voltajına göre ışınım değeri değişmektedir. Güneş pilinin 100 mV (± 10 mV) çıkış voltajı 1000 W/m^2 ışınım değerine eşdeğer olmaktadır. Bir *pyranometre* (*pyranometer*) ışınım sensörüne karşılık SOZ – 03 tipi ışınım sensörünün doğruluğu 1 aylık ölçümler sonucunda $\pm \%5$ hata payları içerisindedir. Kalibrasyonu Fraunhofer Enstitüsü tarafından geliştirilen referans bir pil ile SOZ – 03 ışınım sensörünün kalibrasyonu yapılmakta ve 100mV değeri kalibrasyon için kullanılmaktadır.

3.4.4 DZ 4000 W TİPİ ÜÇ FAZLI ENERJİ SAYACI (THREE-PHASE ENERGY METER)

DZ 4000 W tipi enerji sayacı PV örgü tarafından üretilen enerjiyi sinyale çevirmede kullanılmakta ve her bir sinyal çıkışı 1 kWh enerji değerine eşit olmaktadır. Cihaz üzerindeki sinyal çıkışı doğrudan NEG LOG'a iletilerek burada üretilen enerji değeri sayısal bir ifadeye çevrilmekte ve data logger tarafından

kaydedilmektedir. Kurulu gücü 5kWp den fazla olan PV sistemlerde üç fazlı enerji sayacı kullanılmaktadır. (Skytron-Regenerative Energietechnik).



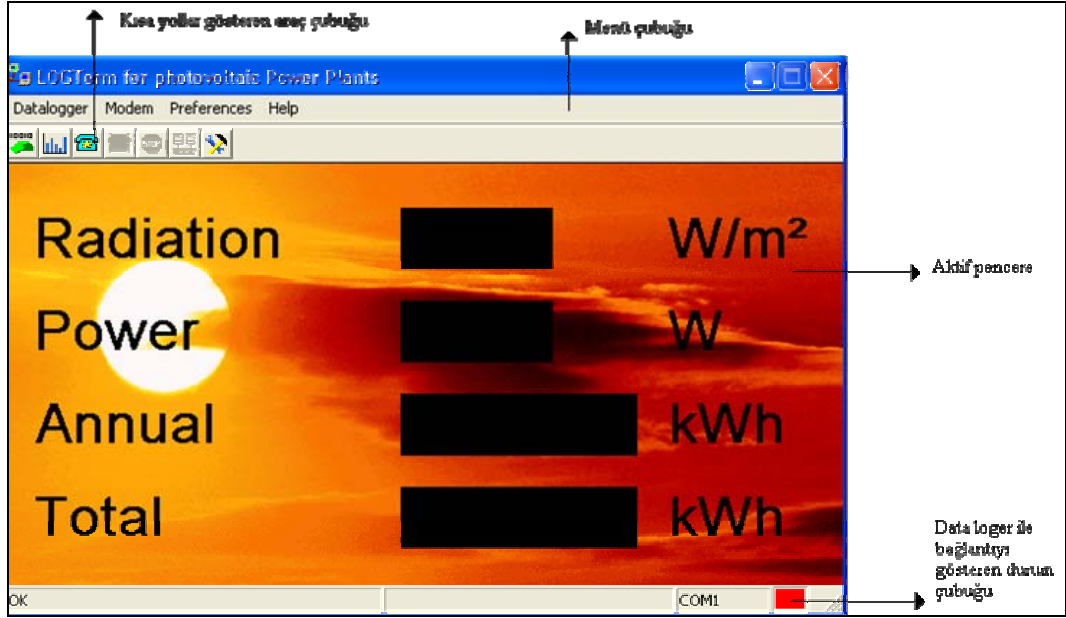
Şekil 3.12 DZ 4000 W tipi üç fazlı enerji sayacı

3.5 VERİ KAYDETME VE DEĞERLENDİRME SİSTEMİ

NEG LOG data logger tarafından depolanan sistem verilerinin bilgisayar ortamına taşınması için, data logger ile uyumlu LOG TERM bilgisayar yazılımı kullanılmaktadır. LOG TERM bilgisayar yazılımı ana hatlarıyla verilerin data logger'dan dan yüklenilmesi (*Log Term*) ve bu verilerin grafiksel olarak gösterilimi (*Log Dia*) olarak iki kısma ayrılmaktadır.

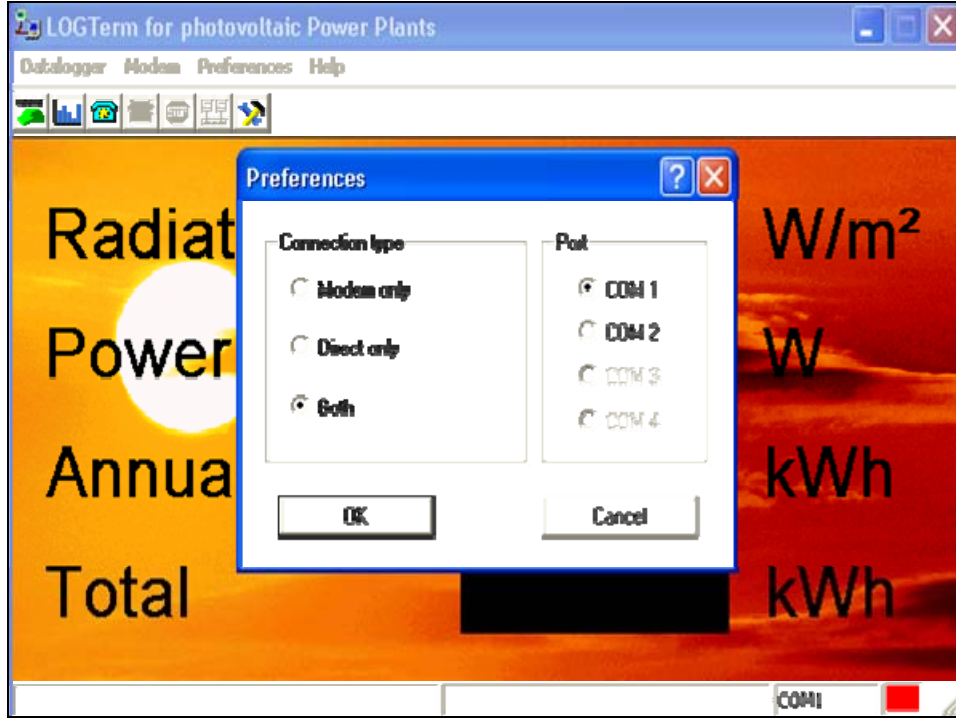
Log Term programı; data logger ile bilgisayar arasında RS 232 seri portu yardımıyla iletişim kuran yazılımdır. Log Term yazılımı data logger'ın kullanılması için gereken tüm alt programlarının yer aldığı *Data logger* menüsü, program ile bağlantı tercihlerinin yer aldığı tercihler (*Preferences*) menüsü, internet veya yerel ağ üzerinden bağlantı kurulabilmesi için kullanılan *Modem* menüsü ve program ile ilgili yardım (*Help*) menüsünden oluşmaktadır. Log Term programı çalıştırıldığında ve data logger ile bağlantı kurulduğu zaman bilgisayar ekranında Şekil 3.13 deki

görüldüğü gibi aktif bir pencere çıkar. Bu aktif pencereden data logger'ın gösterge panosunda gösterilen anlık ışınım (*Radiation*), anlık güç (*Power*), üretilen toplam enerji (*Total*) ve yıllık enerji (*Annual*) değerleri online olarak okunabilmektedir.




Şekil 3.13 Log-Term programının aktif penceresi

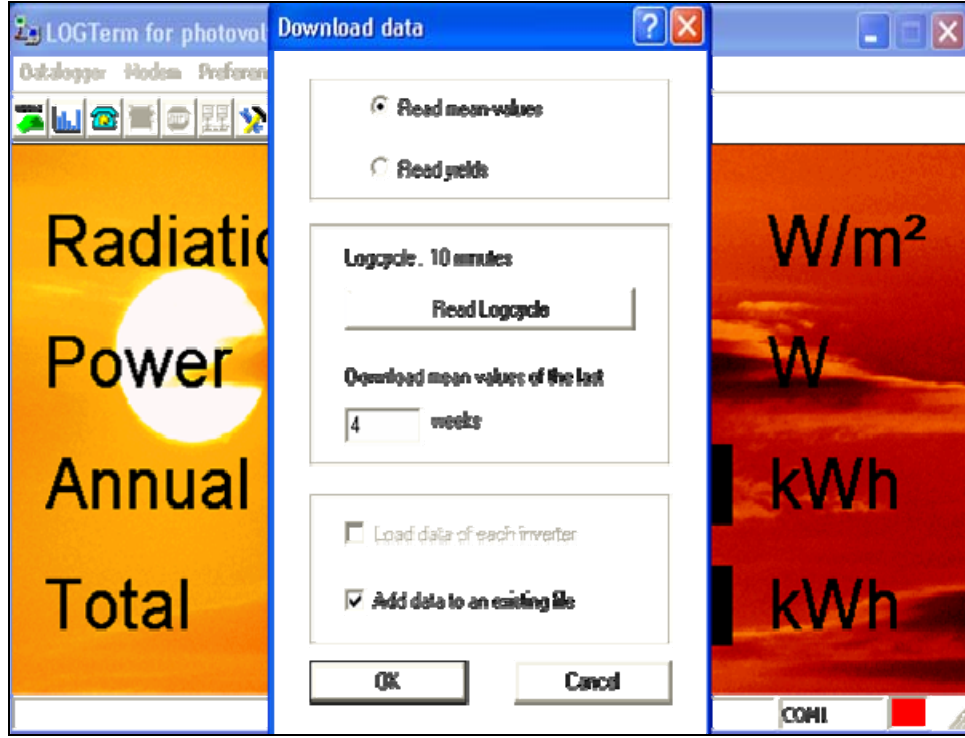
Aktif penceredeki değerler sürekli ve durum çubuğundaki kırmızı alan yeşil konumda ise bilgisayar ile data logger arasındaki iletişim doğru olarak çalışmaktadır. Data logger'ın hafızasında yer alan verilerin bilgisayara aktarımını yapabilmek için data logger ile bilgisayar arasındaki bağlantının doğru şekilde yapılabilmesi gereklidir. Bunun için Şekil 3.14 deki gösterilen tercihler (*Preferences*) menüsünden ara yüzey (*interface*) seçilerek karşımıza çıkan pencereden doğrudan (*direct only*) ve doğru seri portun seçilmesi gereklidir. Doğru seri portun seçilememesi durumunda data logger'ın hafızasındaki değerler online olarak ana pencere üzerinde görülmez.




Şekil 3.14 Data logger ile bilgisayar arasında bağlantı menüsü

Verilerin bilgisayara aktarımı için data logger menüsünden download veya araç çubuğunda yer alan menülerden  kısa yolu seçilir. Karşımıza gün içerisinde elde edilen anlık verilerin (*read-mean values*) ve günlük verilerin (*read-yields*) seçenek şeklinde sunulduğu bir pencere çıkmakta ve kaydedilecek verilerin zaman dilimini belirten bir seçenek bulunmaktadır. Buraya kaç haftalık veya yıllık verilerin yükleneceği rakam ile belirtilir. Gün içerisinde oluşan anlık verilerin bilgisayara kaydedilmesi için, Şekil 3.15’de gösterildiği ilk önce *read-mean values* seçeneğini seçmemiz gerekmektedir. Altta oluşan *downloads mean values of last* seçeneğinin içerisine yazdığımız 4 rakamı, programın geçmiş 4 hafta içerisinde data logger hafızasında depolanan verilerin bilgisayara kaydetmesine olanak sağlamaktadır. Pencerenin altında bulunan *add the data to an existing file* seçeneği işaretlendiği zaman kaydedilecek olan veriler, önceden kaydedilmiş olan dosyanın üzerine eklenir. Günlük verilerin kaydedilmesi için *read-yields* seçeneği işaretlenerek *downloads yields of last* seçeneğinin içerisine 1 yazılması gereklidir. Data logger’da yer alan verilerin bilgisayara gönderilmesinden sonra karşımıza bir pencere çıkar ve bu

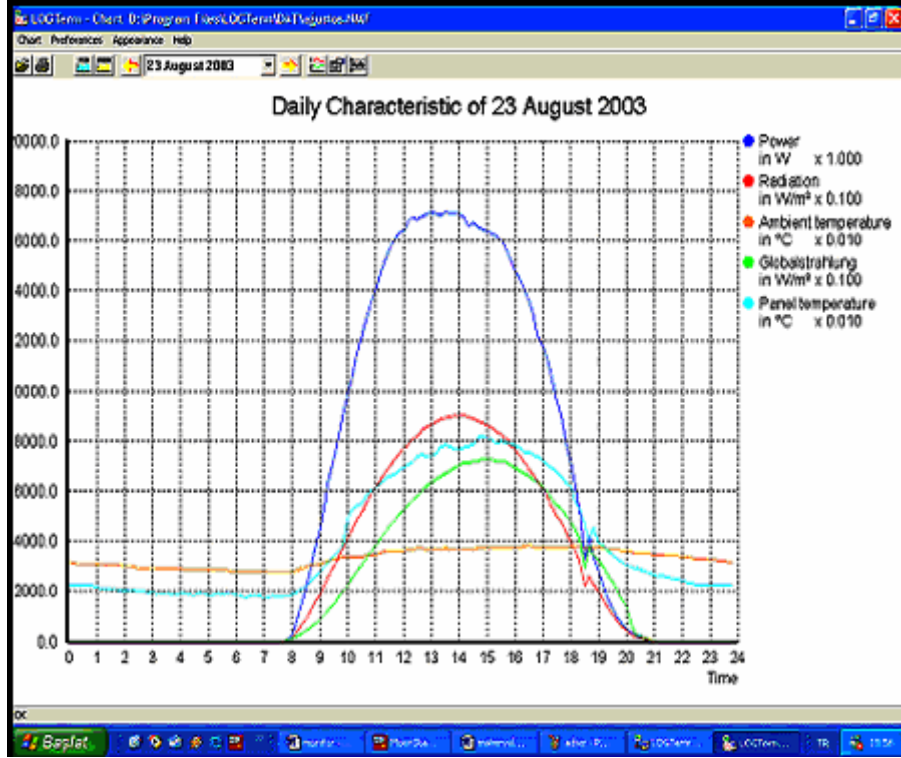
pencere yardımıyla veriler bilgisayar içerisindeki sabit diske dosya ve klasör ismi belirtilerek kaydedilir. Yıllık datalar *.NEF uzantılı dosyalar şeklinde, gün boyunca alınan anlık veriler de *.NMF uzantılı dosyalar şeklinde bilgisayara kaydedilmektedir.




Şekil 3.15 Data logger daki verilerin kaydedilme menüsü

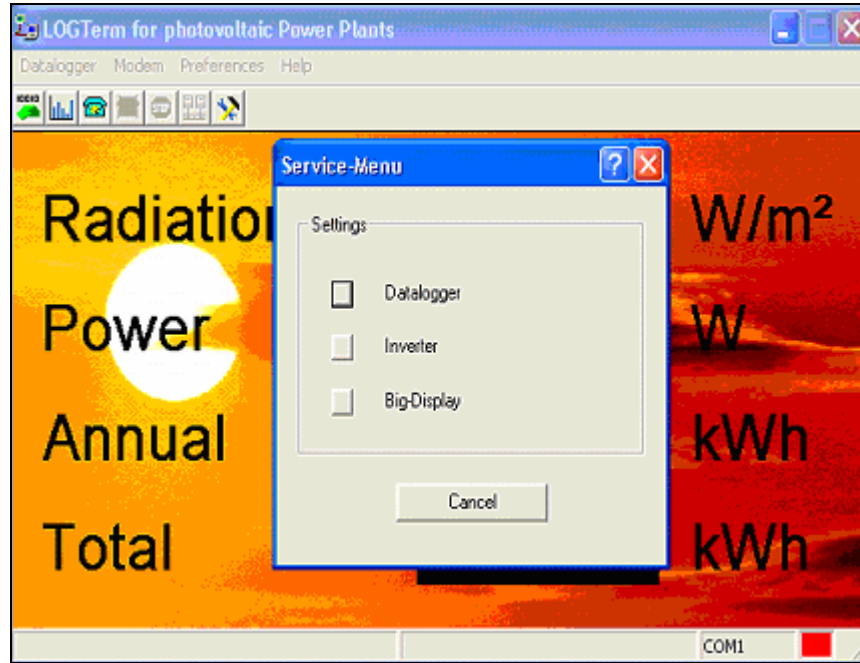
Log Term programının ikinci kısmını bilgisayara yüklenen verilerin grafiksel gösterimini oluşturan Log Dia alt programıdır. Log Term programının data logger menüsünde yer alan grafik gösterme (*show graphic*) veya araç çubuğundaki menülerden  kısa yolu seçilerek, karşımıza çıkan pencerede anlık verilerin oluşturduğu *.NMF veya günlük değerlerin oluşturduğu *.NEF uzantılı önceden kaydedilen veriler otomatik olarak yüklenir ve ölçülen her bir parametreye karşılık bir eğri oluşur. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi her bir parametreye karşılık gelen eğri farklı renkler ile gösterilmektedir. Şekil 3.16'da gösterilen grafik bir gün boyunca sistemden elde edilen anlık verileri ve dağılımını göstermektedir. x ekseninde zamanı, y eksenine ise verilerin sayısal değerlerini göstermektedir. Log dia

programında yer alan chart menüsünden yer alan load file seçeneği ile manuel olarak istenilen dosyanın grafiksel gösterimi sağlanır.



Şekil 3.16 Gün içerisinde alınan verilerin grafiksel gösterimi

Data logger içerisinde yer alan standart parametrelerin değiştirilmesi Log Term programının ana penceresinin çubuğundaki  imgesinin seçilmesi ile mümkündür. Şekil 3.17’de gösterilen karşımıza çıkan pencereden data logger içerisinde yer alan zaman ve tarih değerleri (set clock), data logger’a verilerin kaçır dakika aryla kaydedileceği (log cycle), yıllık üretilen enerji miktarı (set annual yields), toplam üretilen enerji değeri (set total yields) ve opsiyonel ölçümler ayarlanabilmektedir (optional measurements).



Şekil 3.17 Data logger içerisindeki parametrelerin değiştirildiği menü penceresi

4. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Dünya üzerinde uygulanmakta olan şebekeye bağlı fotovoltaik güç sistemlerinin karşılaştırılmaları yapılarak dünya üzerinde en verimli bölgeler bulunmaktadır. Bu kıyaslama için yıllık, aylık veya günlük olmak üzere normalize edilmiş sistem enerji üretimi, Y_f , ve performans oranı, PF , değerleri kullanılmaktadır. Bu bölümde 25.6 kWp kurulu güce sahip çatı uygulamalı “Türk Evi” fotovoltaik güç sisteminden 2003 Ağustos ile 2004 Temmuz tarihleri arasında elde edilen verilerden yola çıkarak bu parametreler bulunacaktır. Ayrıca sistem performansını etkileyen sıcaklığın sistem verimliliği üzerindeki etkisi incelenecektir.

4.1 SİSTEM PERFORMANS ANALİZİ

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin enerji performanslarını değerlendirmek için, farklı çevirim adımları kullanılarak fotovoltaik sistemlerin enerji üretimi ve kayıpları STC koşulları altındaki kurulu güç değerlerine normalize edilir. Bu parametreler sırasıyla; normalize edilmiş örgü yüzeyine düşen ışınım enerjisi (*reference yield*), Y_R , normalize edilmiş PV sistem enerji üretimi (*final yield*), Y_f , ve PV sistem performans oranı (*performance rating*), PR , olarak sıralanmaktadır. PV enerji mühendisliğinde bu parametreler için aylık verilerin kullanılması ile yıllık, günlük verilerin kullanılması ile aylık ve saatlik verilerin kullanılması ile günlük istatistikler yapılmaktadır.

Şebekeye bağlı PV sistem için Y_R , normalize edilmiş örgü yüzeyinin birim alanına düşen ışınım enerjisinin (kW-saat/m^2), STC koşulları altında tanımlı olan birim alandaki ışınımına (W/m^2) normalize edilmesi olarak tanımlanır.

$$Y_R = \frac{H_\beta}{G_{STC}} \quad (4.1)$$

buradaki H_p ifadesi eğimli 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 PV örgülerden elde edilen enerjinin invertör tarafından AC enerjiye dönüştürülmesinden sonra ortaya çıkan enerji değerini, STC koşulları altında verilen PV örgülerin kurulu güç değerine normalize edilmesi ile hesaplanmaktadır.

$$Y_f = \frac{E_{\text{şebeke}}}{W_{p,e}} \quad (4.2)$$

Bu ifadede yer alan $E_{\text{şebeke}}$ fotovoltaik örgü tarafından üretilen ve şebekeye aktarılan AC enerjiyi (invertörün çıkış enerjisi), $W_{p,e}$ ise fotovoltaik örgülerin STC altındaki kurulu güç değerinin göstermektedir. Normalize edilmiş sistem enerji üretiminin birimi *saat* veya "*kW-saat/kW_p*" dir.

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

$$PR = \frac{Y_f}{Y_R} \quad (4.3)$$

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 yorumlanabilir.

Düşük performans oranı PV örgünün gölgelenmesi ve sistem dizaynındaki hatalardan kaynaklanmaktadır. Sistemden dizaynından kaynaklanan hatalar genel olarak, invertör hataları, düşük invertör verimliliği, PV örgülerin arka yüzeylerinde yeterli düzeyde hava akımının olmamasından kaynaklanan modül sıcaklık artışları ve modüllerin kendi aralarındaki uyumsuzluk 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 ışınımına oranıdır;

$$\eta_{sys} = \frac{P_{sys}}{G_{\beta} \times A_{PV \text{ örgü}}} \quad (4.4)$$

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

$$\eta_{sys} = \frac{E_{sys,g}}{H_{\beta,g} \times A_{PV \text{ örgü}}} \quad (4.5)$$

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 birim alana düşen günlük ışınım enerjisidir ($kW\text{-saat}/m^2$). Her bir ay için ortalama günlük sistem verimliliği ise;

$$\eta_{sys,a} = \sum_{d=1}^D \eta_{sys,g} / D \quad (4.6)$$

Burada D değerlendirmenin yapıldığı ay için verilerin alındığı toplam gün sayısını belirtmektedir (Sidrach-de-Cardona vd, 1999).

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

$$E_{sys,a} = \sum_{d=1}^D \frac{E_{sys,g}}{D} \quad (4.7)$$

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 ışınlam enerjiyi sırası ile;

$$PR_g = \frac{Y_{f,g}}{Y_{R,g}} \quad (4.8)$$

$$Y_{f,g} = \frac{E_{sys,g}}{W_{p,e}} \quad (4.9)$$

$$Y_{R,g} = \frac{H_{\beta,g}}{G_{STC}} \quad (4.10)$$

(4.8), (4.9) ve (4.10) eşitliklerinde belirtilen parametrelerin her bir ay için ortalama günlük değerleri ise;

$$PR_a = \sum_{d=1}^D PR_g / D \quad (4.11)$$

$$Y_{f,a} = \sum_{d=1}^D Y_{f,g} / D \quad (4.12)$$

$$Y_{R,a} = \sum_{d=1}^D Y_{R,g} / D \quad (4.13)$$

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;

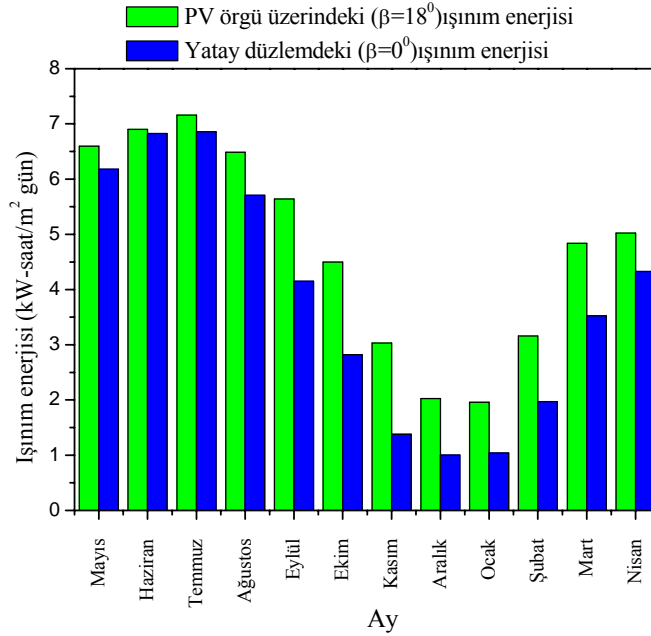
$$Y_{f,y} = \sum_{d=1}^T Y_{f,g} \quad (4.14)$$

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

4.2 VERİLERİN ANALİZİ

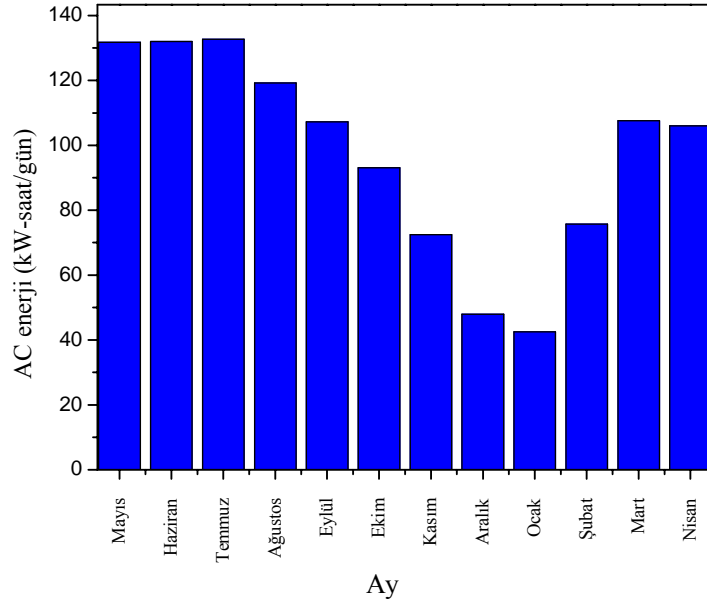
25,6 kWp kurulu güce sahip “Türk evi öğrenci kafeteryası” çatı uygulamalı fotovoltaik sistemden elde edilen veriler kullanılarak her ay için sistem tarafından üretilen günlük ortalama enerji değerleri , bir yıllık periyot üzerinden aylık performansı, sistem verimliliği, örgü yüzeyi ve yatay yüzeye gelen günlük ortalama güneş ışınım enerjileri incelendi.

Yatay ve eğimli ($\beta=18^\circ$) yüzeylerde bulunan SOZ-03 tipi ışınım sensörlerden elde edilen veriler kullanılarak, PV örgü (18°) ve yatay düzlem (0°) üzerinde birim alana düşen ışınım enerjisi miktarlarının değişimleri bir yıllık periyot üzerinden değerlendirildiğinde, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi Mart ile Temmuz ayları arasında yatay düzlemde birim alana gelen ışınım enerjisi artmaktadır. Güneş yükseklik açısına bağlı olarak Ekim, Kasım aylarında eğimli yüzey üzerindeki ışınım enerjisi ile yatay düzlemdeki ışınım enerjisi değerleri arasındaki fark maksimum olmaktadır. 18° eğim açısına sahip PV örgü üzerine gelen yıllık ışınım enerjisi 1750.0 kW-saat/m², yatay düzleme gelen yıllık ışınım enerjisi ise 1398.54 kW-saat/m² dir.



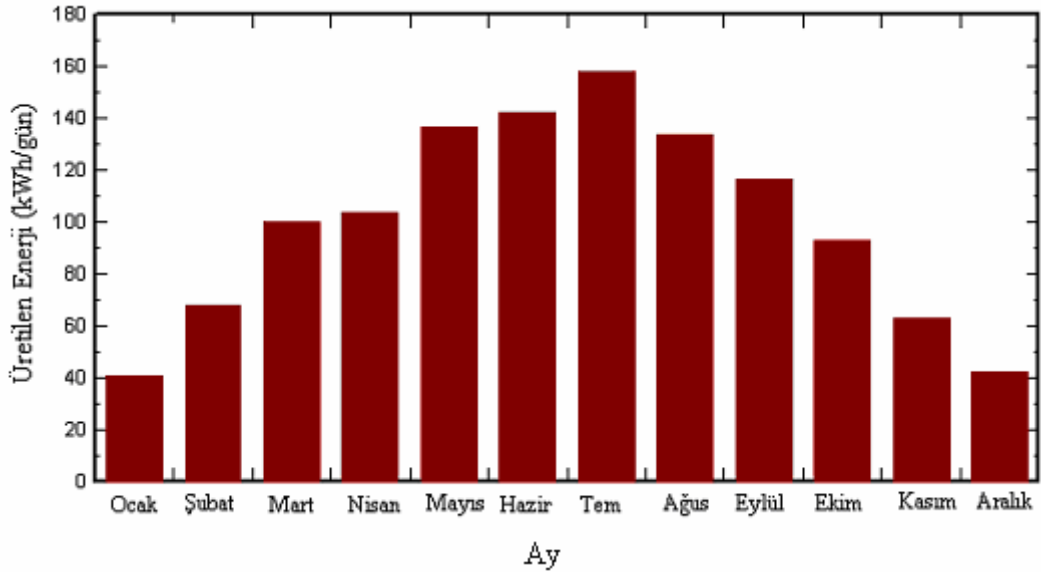
Şekil 4.1 Her bir ay için günlük ortalama PV örgü ($\beta = 18^\circ$) ve yatay düzlem ($\beta = 0^\circ$) üzerinde birim alana düşen ışınım enerjisi

Sistemden elde edilen veriler neticesinde sistem tarafından şebekeye aktarılan enerjinin aylara göre değişimi Şekil 4.2’de görülmektedir. Sistemin maksimum enerji üretimi ortalama günlük 132.7 kW-saat/gün değeri ile Temmuz ayındadır. Mayıs ve Haziran aylarında üretilen ortalama günlük enerji değeri 131 kW-saat/gün dür. Sistemin yıllık enerji üretimi 35 640 kW-saat/yıl dır.



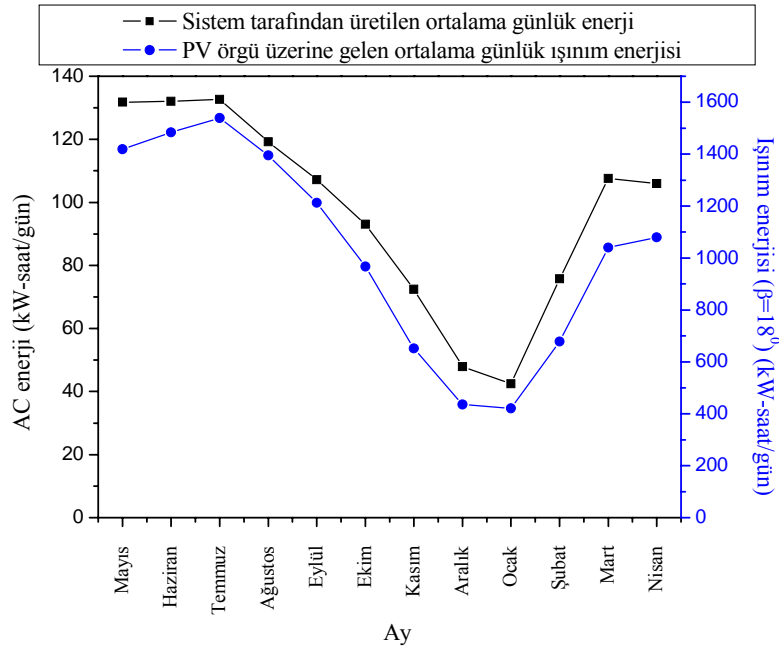
Şekil 4.2 Sistem tarafından şebekeye aktarılan her bir aya ait günlük ortalama ac enerji miktarı

Sistem tarafından üretilen ortalama günlük enerji değerinin aylara göre değişimini veren simülasyon sonucu Şekil 4.3 de verilmektedir. Şekil 4.2 deki sistemden elde edilen sonuçlarla, simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında Mayıs ayı ile Eylül ayları arasındaki üretilen enerji değerleri farklılık göstermektedir. Bu aylar arasında simülasyon sonucu elde edilen değerler, sistemden elde edilen değerlerden yüksek olmaktadır. Simülasyon sonucunda sistemin yıllık enerji üretimi 36.4 MW-saat/yıl dır.



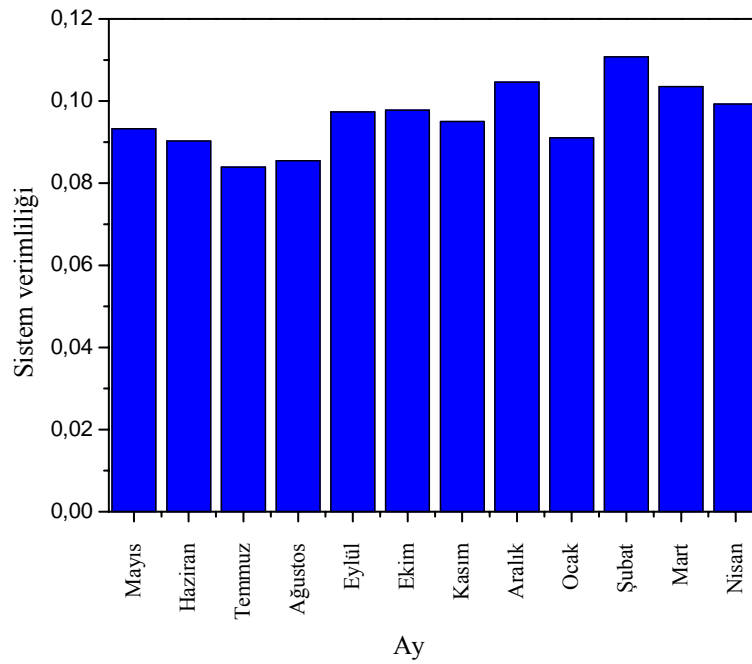
Şekil 4.3 Sistem tarafından şebekeye aktarılan her bir aya ait günlük ortalama ac enerji miktarının simülasyon sonuçları

Şekil 4.4’de sistemin ışınım enerjisine bağlı olarak sergilediği performans görülmektedir. Mayıs ile Temmuz ayları dışında sistemin enerji üretimi, artan ışınım enerjisi ile artmaktadır.



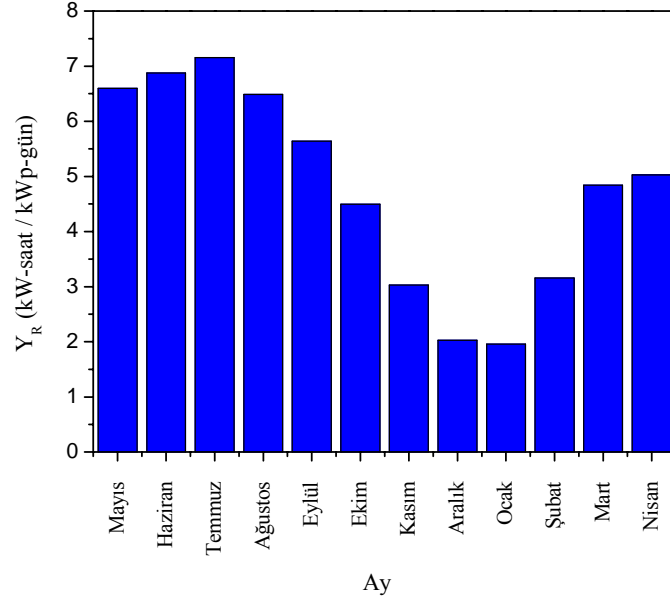
Şekil 4.4 Bir yıl boyunca ışınım enerjisine bağlı olarak sistem tarafından şebekeye aktarılan ortalama günlük enerjinin aylara göre değişimi

Sistemden elde edilen verilerle (4.6) eşitliği kullanılarak, her bir ay için PV örgünün nominal alanı üzerinden yapılan değerlendirmeler sonucunda ortalama günlük sistem verimliliğinin aylara göre dağılımı Şekil 4.5’de verilmektedir. Ortalama günlük sistem verimliliği %8 ile %11 arasında değişmektedir. Maksimum verimlilik % 11 değeri ile şubat ayında, minimum sistem verimliliği % 8.4 ile Temmuz ayında görülmektedir.



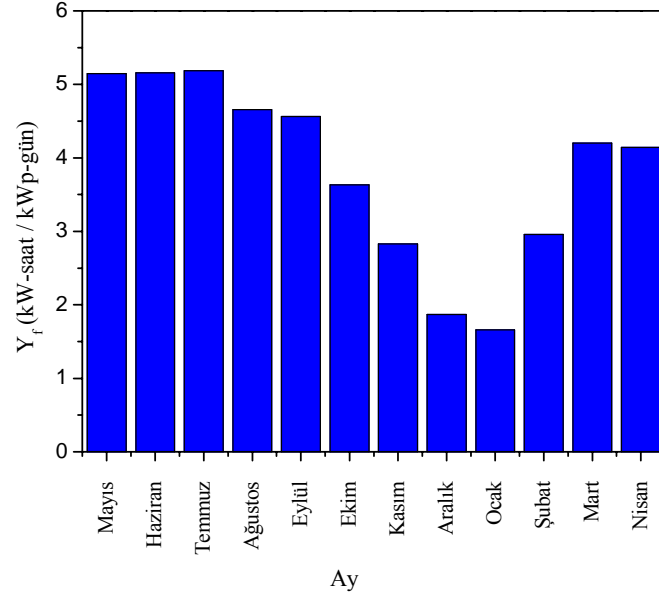
Şekil 4.5 Her bir ay için günlük ortalama nominal PV örgü alanı üzerinden hesaplanan sistem verimliliği

Sistemden elde edilen verilerle (4.13) eşitliği kullanılarak bulunan örgü yüzeyine düşen normalize edilmiş ortalama günlük ışınım enerjisinin aylara göre dağılımı Şekil 4.6’da görüldüğü gibidir. Temmuz ayında maksimum değere ulaşılmış ve bu değer 7.15 saat dir.



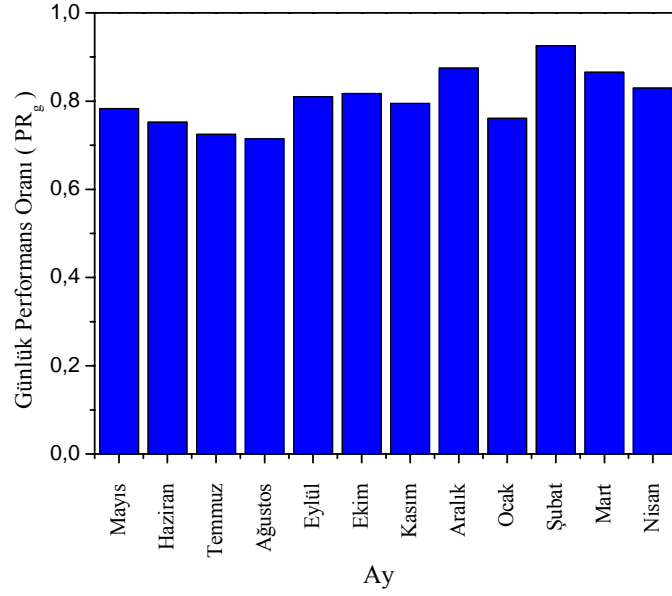
Şekil 4.6 Her bir ay için PV örgü yüzeyine düşen normalize edilmiş ortalama günlük ışınım enerjisi değişimi

Sistemden elde edilen verilerle (4.12) eşitliği kullanılarak bulunan normalize edilmiş ortalama günlük PV sistem enerji üretiminin aylara göre değişimi Şekil 4.7’de verildiği gibi değişmektedir. Watt başına üretilen enerjinin değerini gösteren bu şekilde, en yüksek sistem enerji üretimi temmuz ayındadır ve watt başına 5,18 W-saat enerji üretimi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.7 Her bir ay için normalize edilmiş ortalama günlük PV sistem enerji üretimi

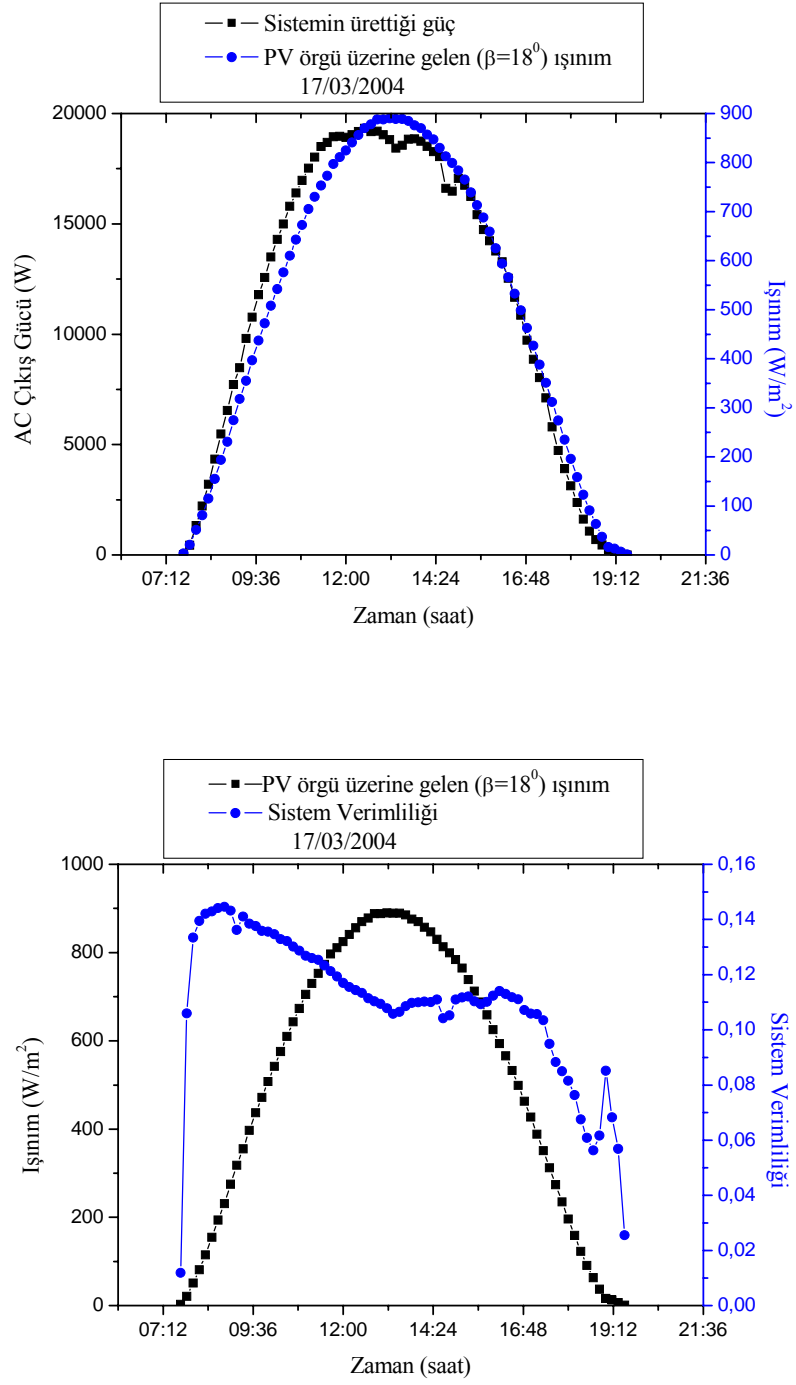
(4.11) eşitliği kullanılarak her aya ait günlük ortalama sistem performans oranının aylara göre dağılımı Şekil 4.8’de verildiği gibidir. Şubat ayında %92 lik değer ile performans oranı en yüksek değer ulaşmaktadır. Ağustos ayında bu değer %71 olarak gerçekleşmekte ve en düşük değeri almaktadır.



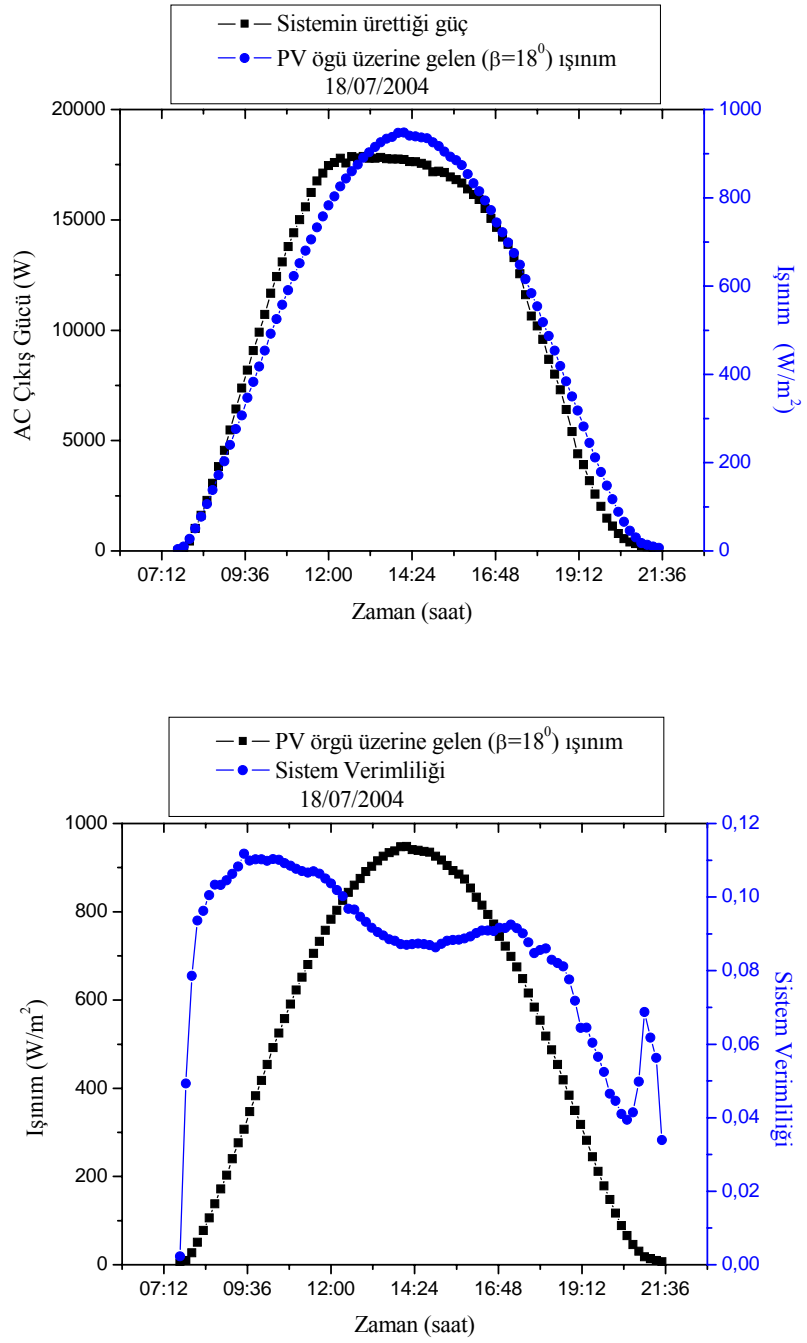
Şekil 4.8 Her bir ay için günlük ortalama sistem performans oranı değişimi

4.3 SİSTEM VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ MODÜL SICAKLIĞININ ETKİSİ

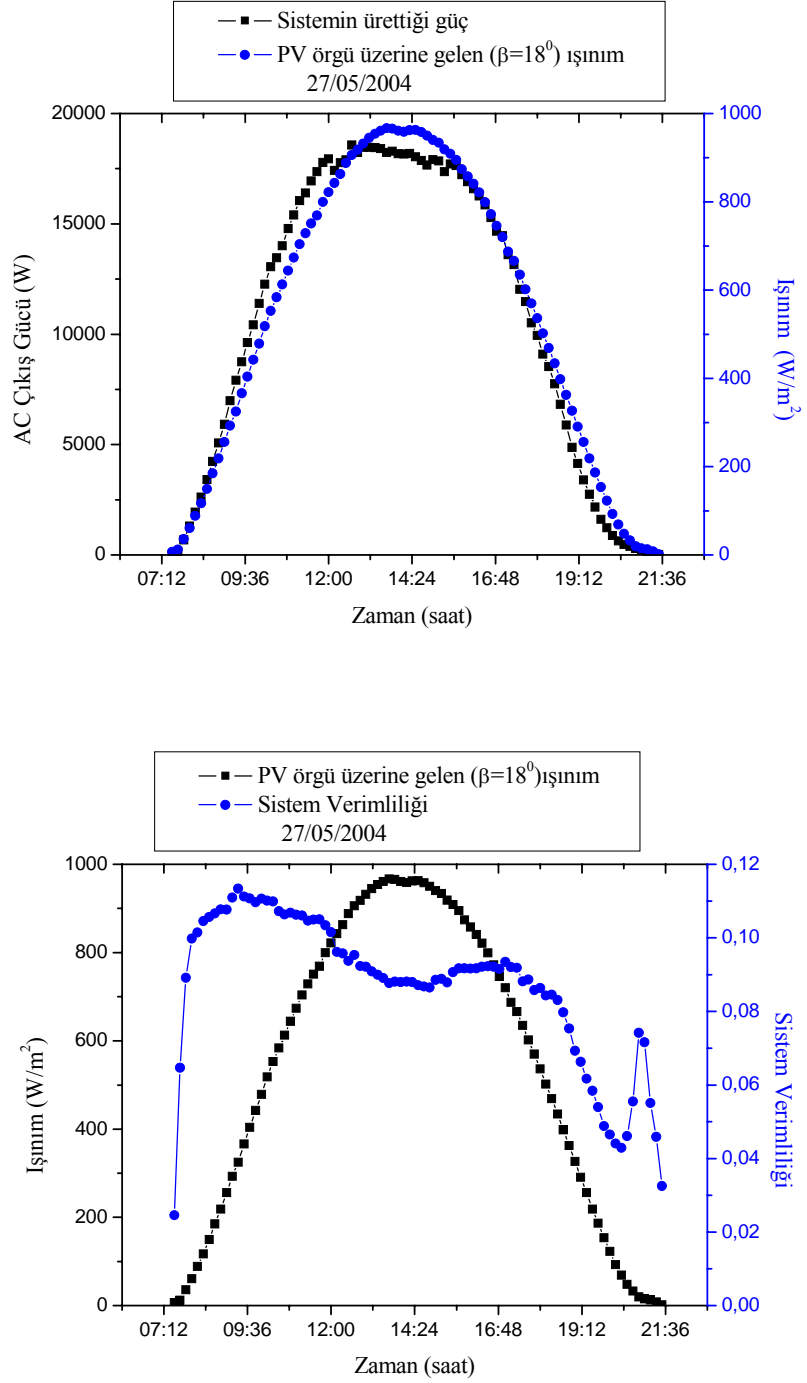
Modül sıcaklığı mayıs ve eylül ayları arasında güneş ışınımının maksimum olduğu zamanlarda 70 °C'nin üzerine yükselmektedir. Özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında bu sıcaklık değeri 80 °C'nin üzerine çıkmaktadır. Elde edilen veriler ile 24 saat lik periyot üzerinden yapılan sıcaklık değerlendirmeleri sonucunda PV örgü sıcaklığının en düşük günlük ortalama değeri 5.5 °C ile Ocak ayında olup, en yüksek günlük ortalama sıcaklık değeri 38.9 °C ile Temmuz ayındadır. Modül sıcaklığı Mart ayından başlamak üzere Temmuz ayına kadar artış göstermektedir. Bu bölümde yapılan analizler ile modül sıcaklığının sistem verimliliği üzerindeki etkisi ve aralarındaki ilişki incelenmiştir. Burada sistem verimliliği PV sistemin güneş enerjisini AC enerjiye dönüştürme oranını vermekte ve eşitlik (4.4) ile ifade edilmektedir.



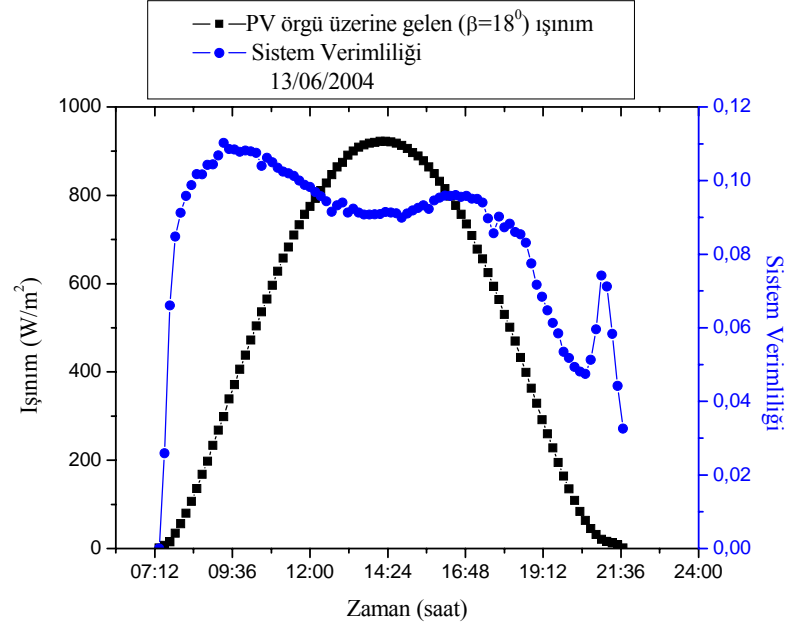
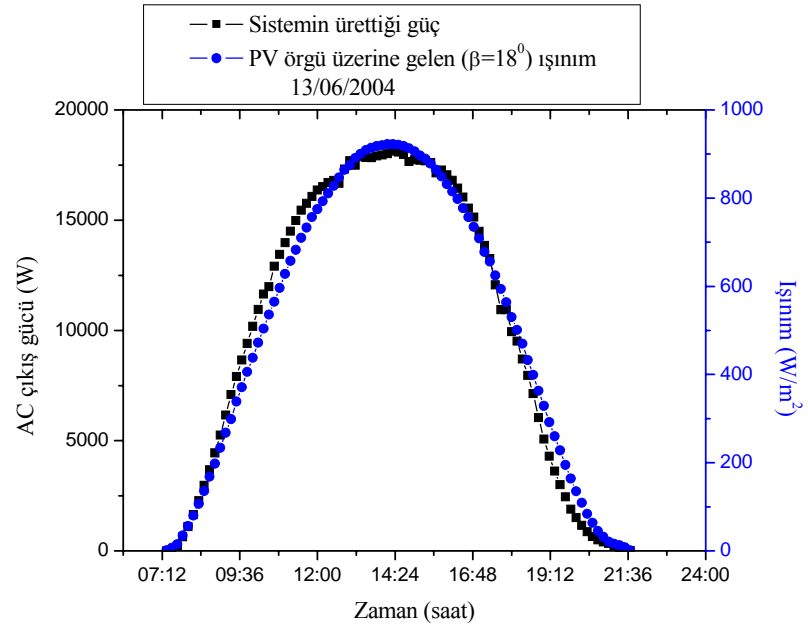
Şekil 4.9 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Mart ayında bir gün için tipik değişimi



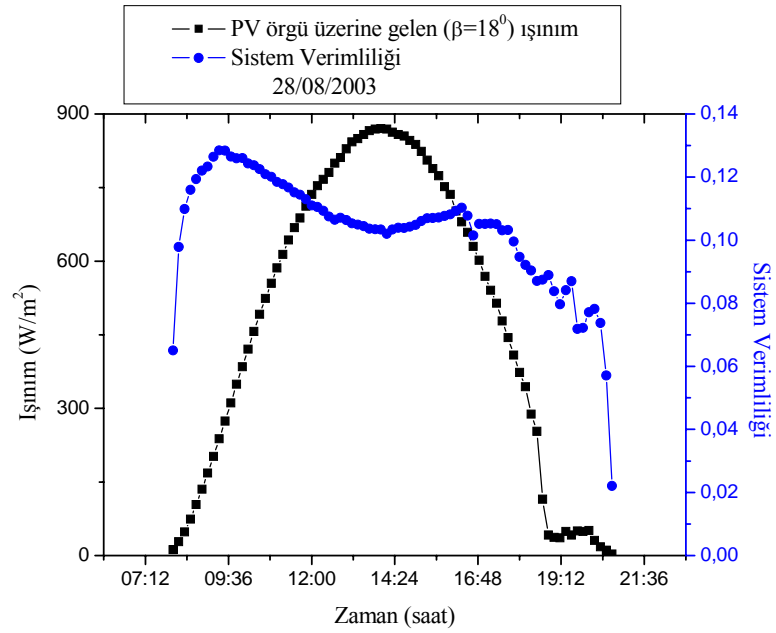
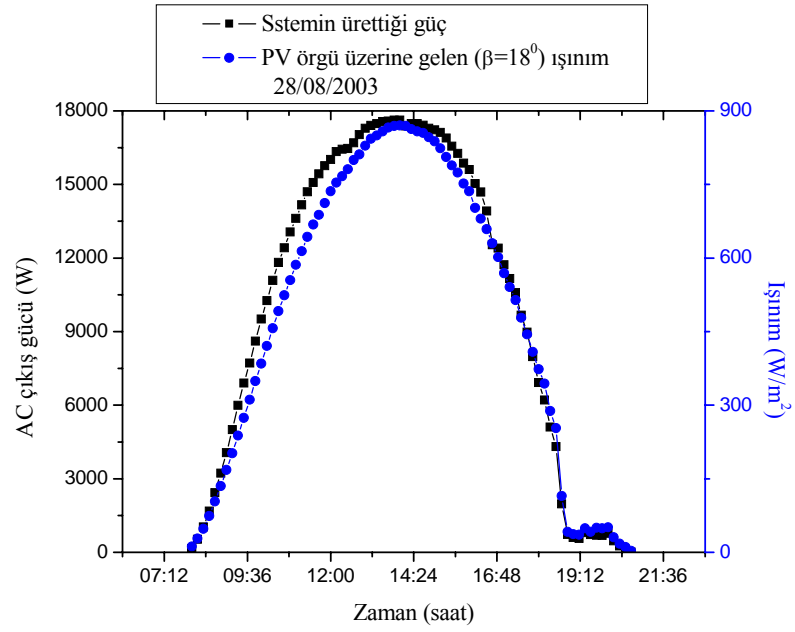
Şekil 4.10 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Temmuz ayında bir gün için tipik değişimi



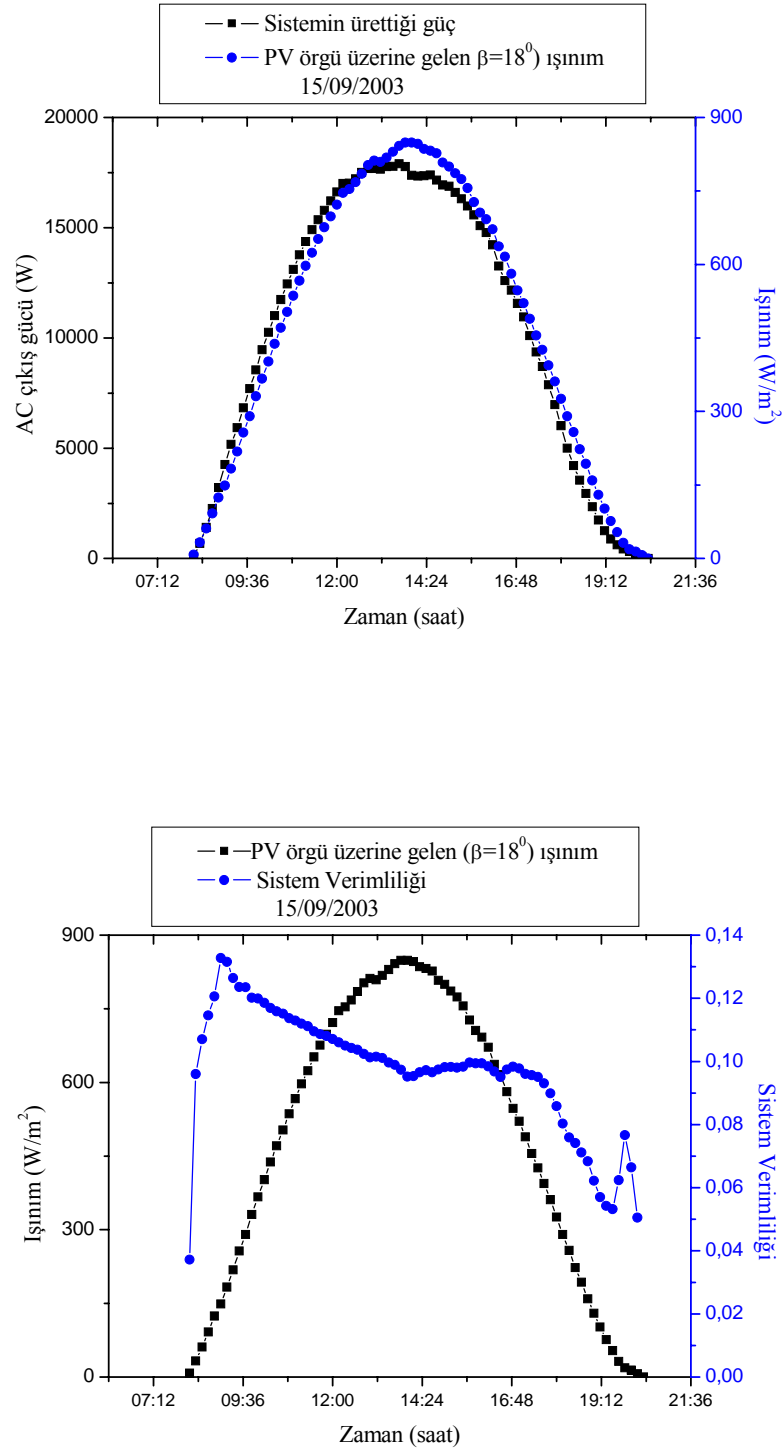
Şekil 4.11 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Mayıs ayında bir gün için tipik değişimi



Şekil 4.12 Işınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Haziran ayında bir gün için tipik değişimi

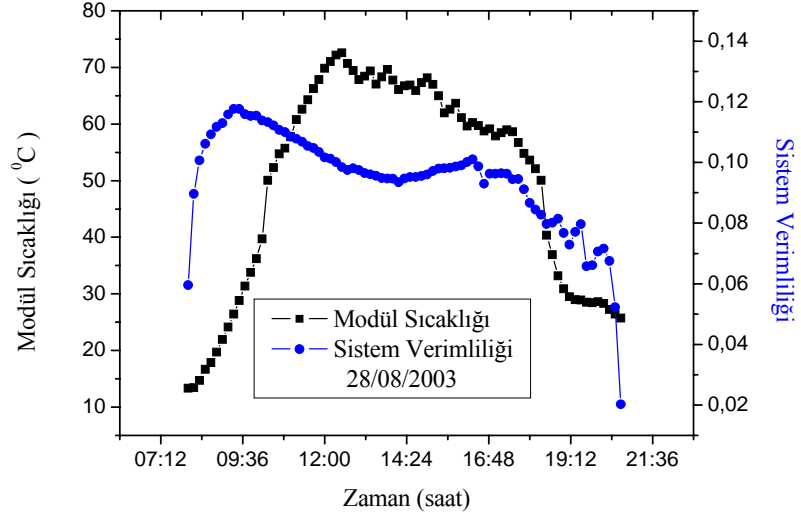


Şekil 4.13 Işınmaya bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Ağustos ayında bir gün için tipik değişimi

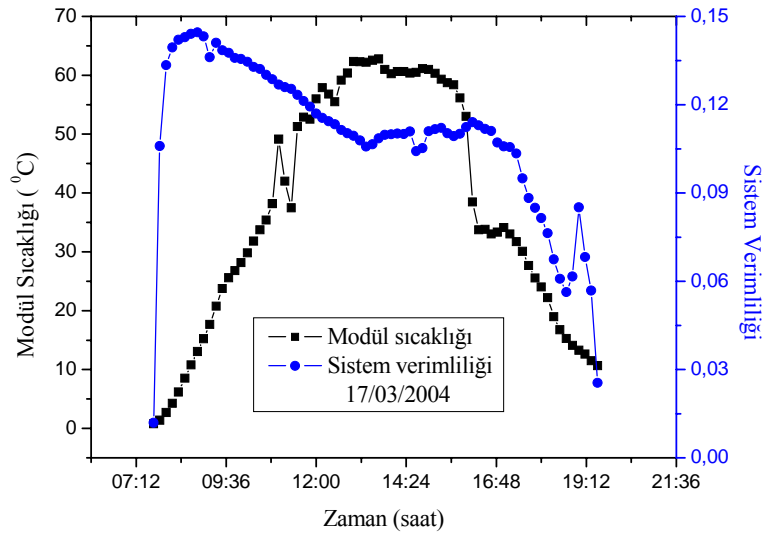


Şekil 4.14 Işınıma bağlı olarak PV sistem çıkış gücünün ve verimliliğinin Eylül ayında bir gün için tipik değişimi

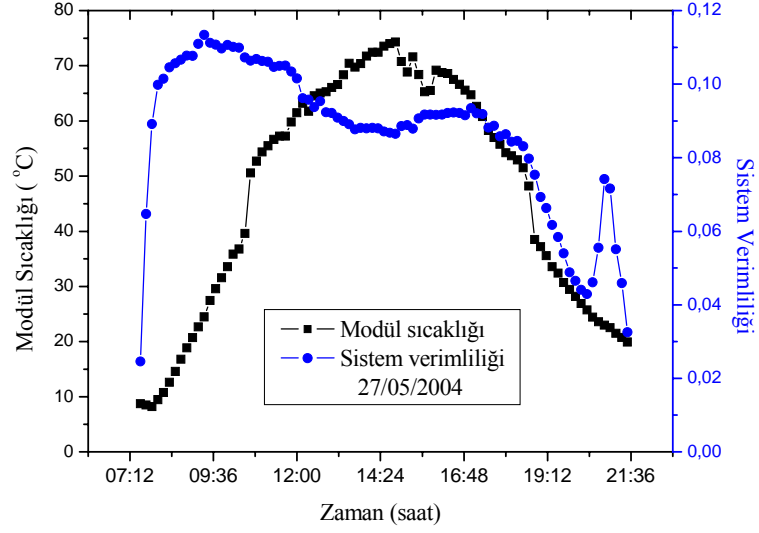
Şekil 4.9, 10, 11, 12, 13, 14 PV sistemin ürettiği gücün ve verimliliğinin ışınıma bağlı olarak zamana göre değişimi vermektedir. Sistem tarafından üretilen güç ışınımla doğru orantılı olarak artmakta fakat ışınımın maksimum olduğu zamanlarda azalmaktadır.



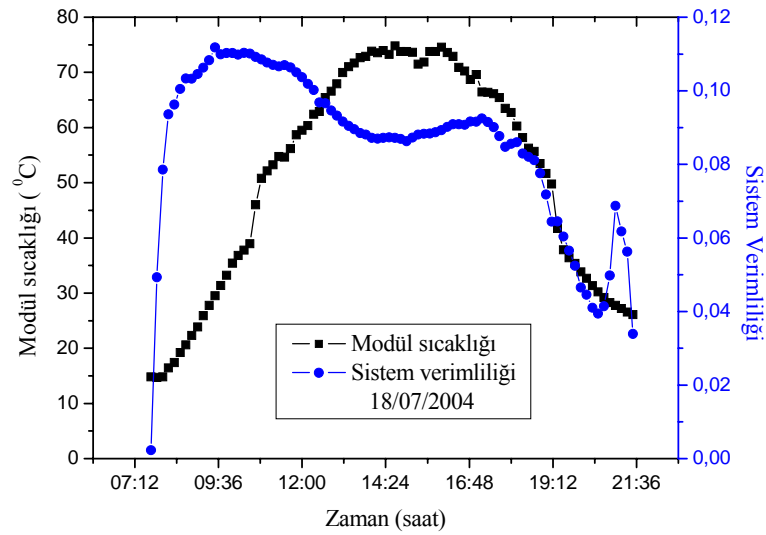
Şekil 4.15 Nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlı olarak Ağustos ayında bir gün için tipik değişimi



Şekil 4.16 Nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlı olarak Mart ayında bir gün için tipik değişimi

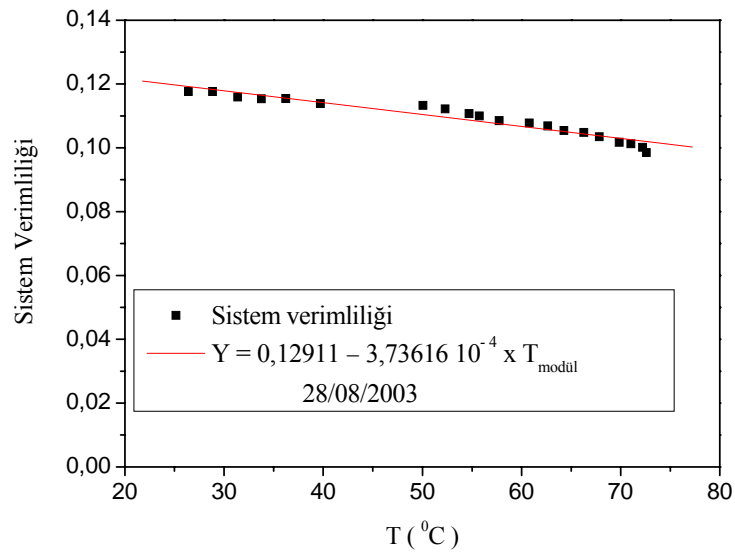


Şekil 4.17 Nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlı olarak Mayıs ayında bir gün için tipik değişimi

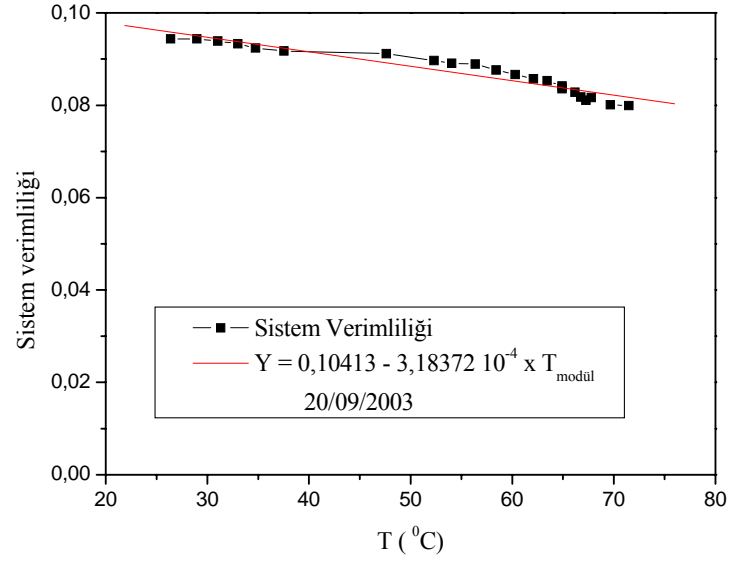


Şekil 4.18 Nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlı olarak Temmuz ayında bir gün için tipik değişimi

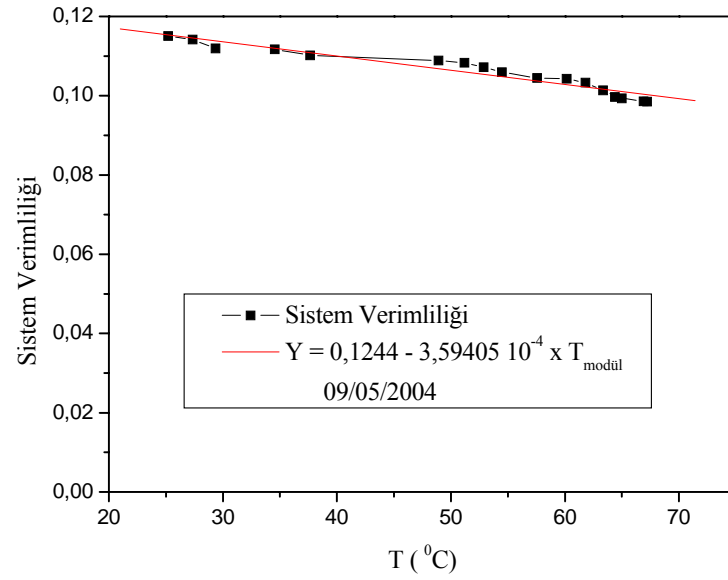
Şekil 15, 16, 17, 18 ışınının maksimum olduğu zaman dilimleri içerisinde modül sıcaklığının ve buna bağlı olarak sistem verimliliği oranındaki değişimi göstermektedir. Modül sıcaklığı modül üzerine gelen ışınım miktarı ile orantılı olarak artmakta ve sistem verimliliği bu artış ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Özellikle modül sıcaklığının 60 °C üzerine çıktığı anlarda sistem verimliliğindeki düşüşler büyük olmaktadır.



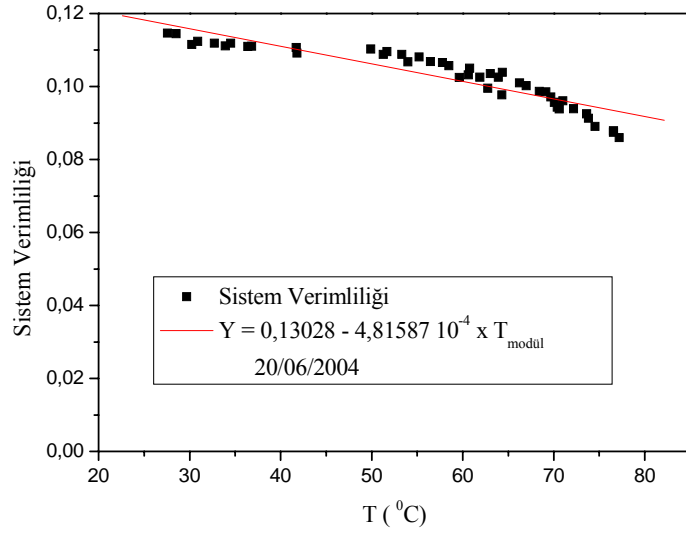
Şekil 4.19 Ağustos ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı



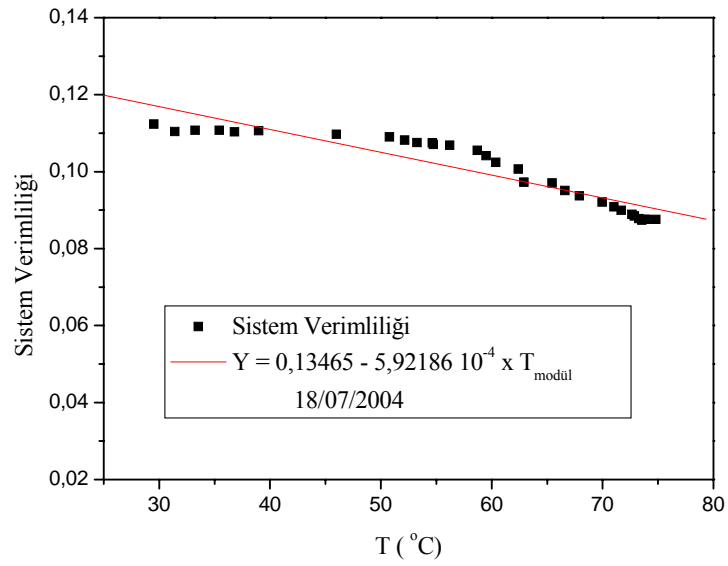
Şekil 4.20 Eylül ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı



Şekil 4.21 Mayıs ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı



Şekil 4.22 Haziran ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı



Şekil 4.23 Temmuz ayı için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığına bağlılığı

Bir yıl boyunca değişik günler için nominal sistem verimliliğinin modül sıcaklığı ile değişimi ve aralarındaki ilişki Şekil 4.19, 20, 21, 22, 23'de verilmektedir. Sistem verimliliği artan modül sıcaklığı ile lineer olarak azalmaktadır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Muğla bölgesinde 25,6 kWp kurulu güce sahip şebekeye bağlı fotovoltaik güç sisteminin yıllık performansı ve karakteristiği değerlendirildi. NEG LOG ölçüm sistemleri ile sistemden elde edilen verilerden yararlanarak her bir ay için günlük PV örgü AC çıkış gücü, 18° eğim açısına sahip modüllerden oluşan fotovoltaik örgü üzerine ve yatay düzlem üzerine gelen günlük ışınım enerjisi miktarları karşılaştırıldı. Yapılan simülasyon ile sistemin bir yıl boyunca aylara göre şebekeye aktardığı enerji dağılımı bulunarak, sistemden elde edilen veriler ışığında yapılan analizler ile karşılaştırıldı. Dünya üzerindeki diğer şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin kıyaslanmasında yaygın olarak kullanılan performans oranı, normalize edilmiş sistem enerji üretimi ve normalize edilmiş PV örgü üzerine gelen ışınım enerjisi oranlarının her bir ay için günlük ortalama değerleri bulunarak sistemin yıllık çalışma performansı ve verimliliği incelendi. Işınımına bağlı olarak değişen modül sıcaklığı ve buna bağlı olarak PV örgü AC çıkış gücü ile sistem verimliliği incelendi.

Sistemden elde edilen veriler ile yapılan değerlendirmeler sonucunda 18° eğim açısına sahip PV örgü üzerinde birim alana gelen yıllık ışınım değeri 1750.0 kW-saat/m² dir. Yatay düzlemede birim alana gelen yıllık ışınım değeri ise 1398.54 kW-saat/yıl olmaktadır. PV örgü üzerine gelen maksimum ışınım 7.157 kW-saat/gün değeri ile Temmuz ayında olup, minimum ışınım 1.96 kW-saat/yıl değeri ile Ocak ayında olmaktadır. Güneş yükseklik açısına bağlı olarak Mart ile Temmuz ayları arasında yatay düzlemede birim alana gelen ışınım enerjisi artmakta ve Temmuz ayında 6.86 kW-saat/yıl değerine ulaşmaktadır. Kış aylarında 18° eğim açısına sahip yüzey üzerine gelen ışınım ile yatay yüzey üzerine gelen ışınım arasındaki fark eğimli yüzey üzerindeki ışınımına özellikle kış aylarında yayılmış ve albedo ışınımın katkıları bulunmasından dolayı artmaktadır.

Sistemden elde edilen veriler ile yapılan değerlendirmeler sonucunda sistemin bir yıl boyunca şebekeye aktardığı enerji miktarı 35 640 kW-saat /yıl ve ortalama günlük enerji değeri 97.64 kW-saat/gün olarak bulunmuştur. Sistemin maksimum enerji üretimi ortalama günlük 132.7 kW-saat/gün değeri ile Temmuz ayında, minimum enerji üretimi ise 42.5 kW-saat/gün ortalama değeri ile Ocak ayında olmaktadır. Ayrıca Aralık ve Ocak aylarında günlük ortalama ışınım enerji değerleri

yaklaşık 2 kW-saat/m²-gün olmasına rağmen bu aylarda üretilen enerji değerlerindeki fark yaklaşık 5 kW-saat/gün olmaktadır. Ocak ayı içerisinde meydana gelen kar yağışından dolayı PV örgü yüzeyinin kar ile kaplı olması bu farkın ortaya çıkmasındaki en büyük etkidir.

Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda sistemin şebekeye aktardığı yıllık enerji değeri olarak 36 393 kW-saat/yıl ortaya çıkmaktadır. Temmuz ayında ortalama günlük sistem enerji üretiminin 157.8 kW-saat/gün değeri ile maksimum, Ocak ayında ise 40.33 kW-saat/gün değeri ile minimum olacağı bulunmuştur.

Sistemin yıllık enerji üretim değeri (35 640 kW-saat /yıl) ile simülasyon sonucunda ortaya çıkan değer (36 393 kW-saat/yıl) arasındaki 753 W-saat/yıl enerji farkı Mayıs ile Eylül ayları arasında sistemin enerji üretiminin simülasyon sonuçlarına göre düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu aylar arasında PV modüllerin sıcaklık değerlerindeki yükseliş ve PV örgü üzerinde meydana gelen tozlanmadan dolayı bu fark ortaya çıkmaktadır. Ekim ayında yapılan değerlendirme sonucunda PV örgü üzerinin toz kaplı olması durumunda sistem verimliliği % 7 seviyelerinde gerçekleşirken, yağmur sonrasında sistem verimliliği %10 seviyelerine yükselmektedir.

25,6 kWp kurulu güç değeri üzerinden yapılan değerlendirme sonucunda Watt başına üretilen enerjinin değerini gösteren normalize edilmiş yıllık sistem enerji üretim değeri, Y_f , 1392.2 kW-saat/kWp-yıl değerine eşittir. Aylara göre Y_f değeri, maksimum 5.184 kW-saat/kWp-gün ile Temmuz ayında ve minimum değerini 1.66 kW-saat/kWp-gün ile Ocak ayında almaktadır. Ülkelere göre elde edilen yıllık ortalama normalize edilmiş fotovoltaik sistem enerji üretimi Almanya ve Hollanda için 700 kW-saat/kWp-yıl, İsviçre için 790 kW-saat/kWp-yıl, Japonya için 990 kW-saat/kWp-yıl ve İsrail için 1840 kW-saat/kWp-yıl (Jahn vd, 2003), İtalya için 1183 kW-saat/kWp-yıl, Amerika için 1221 kW-saat/kWp-yıl, Brezilya için 1429 kW-saat/kWp-yıl (Ferreira de Oliveria S. H., 2001) değerlerine ulaşmaktadır. Fakat bu değerler yıllara göre çevresel etkiler ve güneş ışınımına bağlı olarak değişmektedir. Almanya daki sistemler için bu oran 400 - 950 kW-saat/kWp-yıl ve İsviçre deki sistemler için 500 - 1400 kW-saat/kWp-yıl değerleri arasında dağılmaktadır (Jahn vd, 2000).

PV örgü yüzeyine düşen normalize edilmiş yıllık ışınlam enerjisi, Y_R , 1765.5 kWh/kW_p-yıl değerine eşittir. Y_R 'nin aylara göre değişimi, PV örgü üzerine gelen ışınlam enerjisinin aylara göre değişimi ile aynıdır ve maksimum değerini 7.157 kW-saat/kW_p-gün ile Temmuz ayında, minimum değerini ise 1.96 kW-saat/kW_p-gün ile Ocak ayında almaktadır.

Eşitlik (4.3) ile verilen gerçek sistem enerji üretimi ile standart test koşulları altında tanımlı PV örgülerin verimlilik değerleri ile çalışan ideal sistemin enerji üretimi arasındaki oran olan sistemin yıllık performans oranı, PR , %78.9 dur. Aylara göre ortalama günlük sistem performansı değerlendirildiğinde en yüksek oran %92,6 ile Şubat ayında, en düşük oran %72.4 ile Temmuz ayında olmaktadır. 1995 yılından önce Almanya da kurulu PV sistemlerin performans oranı 0,65 civarında gerçekleşirken, daha sonra kurulan sistemler için bu performans oranı 0,74 oranına yükselmiştir. Japonya da ise bu oran 0,73 olup, Belçika da 0,70 dir (Haeberlin vd, 1995. Woyte 2003). Uluslararası fotovoltaiik güç sistemleri programı enerji acenteliği (IEA) bünyesinde bulunan 14 farklı ülkede 1996-2002 yılları arasında kurulan PV sistemlerin yıllık performans oranları %75 ile %80 arasında değişmektedir (Jahn U., 2003)

PV sistemin örgü yüzeyine düşen güneş enerjisini AC elektrik enerjisine çevirme oranı yıllık %9,5'dur. Ortalama günlük sistem verimliliği ise aylara göre %8 ile %11 arasında değişmektedir. Maksimum verimlilik % 11 değeri ile şubat ayında, minimum sistem verimliliği % 8.4 ile Temmuz ayında görülmektedir. Şekil 4.9, 10, 11, 12, 13, 14'de gösterildiği gibi özellikle yaz aylarında ışınlamın maksimum olduğu zaman dilimi içerisinde sistem çıkış gücünde ve verimliliğinde azalmalar meydana gelmektedir. Ayrıca bu grafiklerde özellikle sabah ve akşam saatlerinde PV örgünün ürettiği DC voltaj değerleri, invertörün tanımlı olan eşik voltajı değerlerinden düşük olması nedeniyle invertör tanımlı olan verimlilik değerlerinde çalışmamakta, sistem çıkış gücü ve verimliliği düşük olmaktadır. PV örgüden gelen DC voltaj değerleri invertörün eşik voltajına yakın değerlerde olduğu anlarda, sistemin verimliliği ve üretilen güç yükselmektedir. Şekil 15, 16, 17, 18'da ışınlam enerjisinin büyük bir kısmı modül üzerinde ısı olarak kaybolmasından dolayı modül sıcaklığı artmakta ve sistem verimliliği azalmaktadır. PV örgü sıcaklığının 24 saatlik zaman periyodu üzerinden değerlendirilmesi sonucunda en düşük günlük ortalama değeri 5.5 °C ile

Ocak ayında olup, en yüksek değer 38.9 °C ile Temmuz ayındadır ve bu aylara ait ışı nım değerleriyle uyuşmaktadır. Modül sıcaklığı Mart ayından başlamak üzere Temmuz ayına kadar artış göstermekte, özellikle yaz aylarında modül sıcaklığı 80 °C seviyelerine çıkmaktadır. Ayrıca modül sıcaklığının azalmasında önemli bir faktör olan hava akımının yaz aylarında düşük olması modül sıcaklığının azalmamasında önemli bir faktörü oluşturmaktadır.

Özellikle yaz ayları için yapılan değerlendirmeler sonucunda modül sıcaklığı ile sistem verimliliği arasındaki ilişki Şekil 4.19, 20, 21, 22, 23’de verilmektedir. Güneş enerjisinin AC elektrik enerjisine dönüştürülme oranı olan sistem verimliliği ile modül sıcaklığı arasında lineer bir ilişki söz konusudur ve artan modül sıcaklığı ile sistem verimliliği azalmaktadır. Farklı aylarda yapılan değerlendirmeler sonucunda STC altında tanımlı olan 25 °C sıcaklık değerinin üzerindeki 1 °C’lik modül sıcaklık artışı, nominal sistem verimliliğinde %0.3 ile %0.5 yüzdeler değerleri arasında azalmalara yol açmaktadır. Modül sıcaklığının yüksek olduğu yaz mevsimi için farklı aylarda yapılan korelasyon çalışmaları sonucunda 1 °C’lik modül sıcaklık artışı sistem verimliliğinde Mayıs ayı için %0.311, Haziran ayı için %0.4, Temmuz ayı için %0.49, Ağustos ayı için %0.312, Eylül ayı için %0.305 azalmalar görülmektedir. Bu değişim oranlarının aylara göre farklılık göstermesinin nedeni, aylık doğrudan ışı nım değerlerinin farklılığı olarak gösterilebilir. Temmuz ayında doğrudan gelen ışı nımın değerinin büyük olmasından dolayı çevre sıcaklığı yüksek olmakta ve modül üzerine gelen düşük ışı nım değerlerinde, modül sıcaklığı diğer aylar ile karşılaştırıldığında yüksek olmaktadır. Ayrıca çevre sıcaklığının büyük olduğu aylarda invertörler de meydana gelen enerji kayıpları, aylara göre sistem verimliliğindeki azalma oranlarının farklı olmasına neden olarak gösterilebilir.

Muğla Üniversitesi “Türk Evi”nde kurulu şebekeye bağlı fotovoltaik güç sisteminin 360 günlük çalışma süresi için yapılan değerlendirmeler sonucunda, yıllık sistem performansının diğer ülkelerdeki uygulama sonuçlarına göre yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. PV sistemin 35 yıl ömür süresi için şebekeye aktarılan enerjinin birim maliyeti 0.14 €/kW-saat olmaktadır. PV örgü üzerinde özellikle yaz aylarında oluşan tozlanmadan dolayı üretilen enerjideki kayıplar azaltılması ile yıllık sistem enerji üretiminin artacağı ve birim maliyetin azalacağı ekim ayında yapılan değerlendirme sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmadan çıkan sonuçlar

doğrultusunda, diğerk ÷lkelerdeki uygulamalar ile kıyaslandığında özellikle şebekeye bağlı fotovoltaik g÷ç sistemlerinin g÷neş enerjisi yönünden zengin olan ÷lkemizde, elektrik enerjisi üretimi açısından yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemli bir rol üstleneceği ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- 1) Hamakawa Y., 2002. Solar PV energy conversion and 21st century's civilization, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 74: 13-23
- 2) Goldemberg J., 2004. Renewable energy-traditional biomass vs. modern biomass, *Energy Policy*, 32, 711-714
- 3) <http://www.martinot.info/markets.htm>
- 4) Nebbia G., 2001. Twenty twenty-five, *Futures*, 33: 43-54
- 5) Gross R., Leach M., Bauen A., 2002. Environment international, *Progress in Renewable Energy*, 987 , 1-18
- 6) Maycock P., March and April 2004. *PV News*
- 7) <http://www.solarbuzz.com/Marketbuzz2004-intro.htm>
- 8) Goetzberger A., Hebling C., Schock H-W., 2003, Photovoltaic materials, history, status and Outlook, *Materials Science and Engineering*, R 40: 1-46
- 9) Waldau- Jäger A., 2002. Status of PV research,solar cell production and market implementation in Japan, Usa and European Union, European commission, 2-56
- 10) Maycock P., July-August 2004. *Renewable Energy World*, Volume 7
- 11) 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
- 12) Ocak M., Ocak Z., Bilgen S., Keleş S., KaygusuzK., 2004. Energy Utilization, environmental pollution and renewable energy sources in Turkey, *Energy Conversion and Management*, 45: 845-864
- 13) Ediger V. Ş., Kentel E., 1999. Renewable energy potential as an alternative to fosil fuels in Turkey, *Energy Conversion & Management*, 40: 743-755
- 14) Hepbaşlı A., Ulgen K., Eke R., 2004. Soler energy applications in Turkey, *Energy Sources*, 26, 551-561
- 15) Evrendilek F. , Ertekin C., 2003. Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey, *Renewable Energy*, 28: 2303-2315

- 16) Sidrach-de-Cardona M., L1. López M., 1999. Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system, *Energy*, 24: 93-102
- 17) Pietruszko S.M., Gradzki M., 2003. Performance analysis of a grid-connected small photovoltaic system in Poland, *Applied Energy*, 74: 177-184
- 18) Yang H., Zheng G., Lou C., An D., Burnett J., 2004. Grid-connected building-integrated photovoltaics: a Hong Kong case study, *Solar Energy*, 76: 55-59
- 19) Ferreira de Oliveria S. H., Zilles R., 2001. Grid-connected photovoltaic systems: The Brazilian experience and the performance of an installation, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 9: 341-347
- 20) Yamaguchi T., Okamoto Y., Taberi M., 2003. Investigation on abundant photovoltaic power generated by 40 kW PV system in Wakayama National College of Technology, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 75: 597-601
- 21) Prof. Ramsey W. J., Fall 2003. Thermal Environmental Engineering, University of Minnesota, ME 5103, 1-14
- 22) Uyarel Y., Öz E. S., 1987. *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*, Birsen yayınevi, 239 p.
- 23) Iqbal M., 1983. *An introduction to Solar Radiation*, Academic Press, 390 p.
- 24) Foukal P. V., 1990. *Solar Astrophysics*, Wiley, Newyork etc., 496p.
- 25) <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-98/ceos1/science/dg/dg16.htm>
- 26) Duffie J. A. , Beckman W., A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Sons, 919 p.
- 27) Atagündüz G., 1989. *Güneş enerjisi temelleri ve uygulamaları*, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Birsen Yayınevi
- 28) Rüther R., Klesis G., 1996. Advantages of thin Film Solar Modules in Façade, Sound Barrier and Roof-Mounted PV systems, Eurosun'96
- 29) Woyte A., 2003. Grid Connection of Photovoltaic Systems, 48 p.
- 30) Sze S.M., 1981. *The Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons
- 31) Decher R., 1997. *Direct Energy Conversion: Fundamentals of electric power production*, Oxford University Press. 258 p.
- 32) Neamen D. A., 1992. *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles*, Richard D. Irwin, Inc., 741 p.

- 33) Bhattacharya P., 1994. *Semiconductor Optoelectronic Devices*, PRENTICE-Hall International, Inc., 535 p.
- 34) Möller H. J., 1993. *Semiconductors for solar cells*, Artech House, Inc., 343 p.
- 35) Bucher E., 1986. *Photovoltaic Power*, Physics Technology 17, printed in Great Britain, 152-161
- 36) Goetzberger A., Christopher H., 2000. Photovoltaic materials, past, present, future, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 62: 1-19
- 37) Amorphous silicon technology: Coming of age; C:R: Wronski; *Solar Energy Materials & Solar cells*; 41/42; 1996; 427-439
- 38) D.E. Carlson ; Monolithic amorphous silicon alloy solar modules, *Solar Energy Material & Solar cells* 78, 2003, 627-645
- 39) Pearsall N. M., Hill R., 2001. , *Photovoltaic Modules, Systems and Applications*, Chapter 15, Northumbria Photovoltaic Applications centre University of Northumbria at Newcastle: 1-42
- 40) Rajapakse A, Chungpaibulpatana S., 1994. Dynamic simulation of a photovoltaic refrigeration system, *RERIC*: 16(3), 67-101
- 41) http://www.eere.energy.gov/solar/pv_systems.html
- 42) Roberts S., 1991, *Solar Electricity*, Prentice Hall, 434 p.
- 43) <http://www.spireolar.com/Solar/process.html>
- 44) PVSYST 3.02 paket programı
- 45) Green M. A., Emery K., King D. L., Igari S., Warta W., 2003. Solar Cell Efficiency Tables (version 21), *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 11: 39-45
- 46) Markvart T., 1994. *Solar Electricity*, John Wiley & Sons Ltd., 228 p.
- 47) Overstraeten R. J., Mertens R. P., 1986. *Physics, Technology and Use of Photovoltaics*, Adam Hilger Ltd., 278 p.
- 48) Perez R., Coleman S., 1993, PV angles, *home power page*: 1-3
- 49) <http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>
- 50) Ishikawa T., December 2002. Grid-connected photovoltaic power systems: survey of inverter and related protection equipment, *Technical report T05-05: 2002, IEA PVPS*: 1-17

- 51) Bower W., 2000. Inverters-Critical Photovoltaic balance-of-System: Status, Issues and New Millennium Opportunities, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8: 113-126
- 52) Ropp M.E., Begovic M., Rohatgi A., 1999. Prevention of Islanding in Grid-connected photovoltaic systems, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, 7: 39-59
- 53) Jahn U., Niemann M., Blaesser G., Dahl R., Castello S., Clavadetscher L., Faiman D., Mayer D., Van Otterdijk K., Sachau J., Sakuta K., Yamaguchi M., Zoglauer M., July 1998. International Energy Agency Task II database on Photovoltaic Power systems: Statistical and Analytical Evaluation of PV Operational Data; *15 th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Austria*: 1-4
- 54) Installation Instruction for Photovoltaic Module, Model: PV-MF120EA2
- 55) Maranda W., De Mey G., De Vos A., 1998. Optimization of the master-slave inverter system for grid-connected photovoltaic plants, *Energy Conversion & management*, 39: 1239-1246
- 56) Sitop solar invertör el kitapçığı
- 57) Ropp M.E., Begovic M., Rohatgi A., 1999. Prevention of Islanding in Grid-connected photovoltaic systems, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, 7: 39-59
- 58) Skytron-Regenerative Energietechnik, Instruction Manual for the measuring and visualization unit for solar facilities, NEG DIS
- 59) Haeberlin H., Beutler Ch., 1995. Normalized Representation of Energy and Power for Analysis of Performance and On-line Error Detection in PV Systems, *Proc. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice, France*: 934-937
- 60) Jahn U., Nasse W., 2003. Performance Analysis and reliability of Grid-connected PV Systems in IEA Countries, *WCPEC-3*: 1-4
- 61) Jahn U., Grimming B., Nasse W., 2000. Analysis of Photovoltaic Systems, *Technical Report T2-01, IEA-PVPS*: 1-8

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Cem TOZLU
Doğum Yeri ve Tarihi : MUĞLA / 17-07-1978

EĞİTİM ve AKADEMİK BİLGİLER

Lise :Muğla Turgut Reis Lisesi 1991-1994
Lisans :1996-2000 Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü
Y.Lisans :Muğla Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü
Yabancı Dil :İngilizce

MESLEKİ BİLGİLER

2000- : Muğla Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Araştırma Görevliliği ve Laboratuvar Öğretim Elemanı