

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN
KALİTE KARAKTERİSTİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ
VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Reza JALİLİSAATLOU

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mete ÇUBUKÇU

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.05.01

Sunuş Tarihi : 10.06.2015

Bornova-İZMİR

2015

Reza Jalilisaatlou tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Kalite Karakteristiklerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 10.06.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Yrd. Doç. Dr. Mete ÇUBUKÇU
Raportör Üye	: Prof. Dr. Mustafa GÜNEŞ
Üye	: Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜRLER

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Kalite Karakteristiklerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

10 / 06/ 2015

Reza JALİLİSAATLOU

ÖZET**FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN KALİTE
KARAKTERİSTİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

JALILISAATLOU, Reza

Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mete ÇUBUKÇU

Haziran 2015, 98 sayfa

Bu tezde, fotovoltaik güç sistemlerinin başarımını etkileyen temel karakteristiklerin tanımlanması ve uygulamalı bir fotovoltaik güç sistemi örneğinde ölçülerek değerlendirilmesi yapılmıştır. Tez kapsamında, hem benzetimle hesaplanan hem de gerçek zamanlı ölçülen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

FVGS sistem performansının sürekliliğini sağlamak amacıyla, sistemin kalite karakteristiklerini ortaya çıkarmak ve bu verilerden hareketle bir sistem modeli oluşturmak mümkündür. Bu çalışmada, bu hedef doğrultusunda iklim verilerinin ve sistem bileşenlerinin başarıma etkisi kapsamlı olarak incelenmektedir ve sonuçlar uluslararası değerlendirme ölçütleri ile açıklanmaktadır

Nilüfer – Bursa’da yerleşik bulunan ve uygulamalı incelenen 5,17 kWp gücündeki çift-eksen izleyicili şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sisteminin (FVGS), nihai yıllık hasadının 2065,2 kWh/y ve yıllık gerçekleştirme oranı (PR) ortalamasının % 84,2 olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, benzetim çalışmasına yakın bir değerdedir ve sabit açılı bir yerleşime göre % 31,6’nın üzerinde bir enerji üretimi anlamına gelmektedir.

Anahtar sözcükler: Fotovoltaik güç sistemleri, çift-eksen izleyicili sistem, enerji performans analizi.

ABSTRACT**QUALITY MEASUREMENT AND ASSESSMENT OF A
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM**

JALILISAATLOU, Reza

MSc in Dep. of Solar Energy

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mete ÇUBUKÇU

June 2015, 98 pages

This study aims to define the general parameters affecting the performance of a Photovoltaic Power System (PVPS) and assess these parameters in a practical PVPS pilot application. Under this thesis, the quality parameters are simulated and also real-time measured comparatively.

It is possible to find out the PVPS characteristics affecting the continuity of the performance and to form a model by considering the simulated and measured parameters. In this study, the impact of the meteorological conditions and the characteristics of system components to the overall performance are well-rounded analyzed in line with this purpose. The results are reported by using the international evaluation parameters.

The final yield and performance ratio (PR) of 5.17 kWp grid-connected 2-axis PVPS system reviewed under this thesis are observed as the following: 2065.2 kWh/y and 84.2 %. These results are compatible with the simulated ones. The resultant final yield means 31.6 % more energy generation compared with a fixed system.

Keywords: Photovoltaic power systems, 2-axis solar tracker system, energy performance analysis.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mete Çubukçu'ya ve Nilüfer – Bursa'da bulunan fotovoltaik güç sisteminin incelenmesine imkân tanıyan sistem sahibi BOSCH ile sistem kurulumcusu ENİSOLAR firmalarına teşekkürü bir borç bilirim

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİ VE BİLEŞENLERİNE GENEL BAKIŞ ...	21
3.1 Giriş	21
3.2 Fotovoltaik Sektörünün Tarihsel Gelişimi	25
3.3 FV Sektörünün Türkiye’deki Durumu	28
3.4 Fotovoltaik Teknolojisi.....	30
3.4.1 Farklı FV teknolojileri	30
3.4.2 Çalışma prensibi	36
3.4.3 Fotovoltaik hücrenin elektriksel modeli	37
3.5 FVGS Bileşenleri.....	39

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.6 FVGS Avantajları ve Dezavantajları	42
4. FVGS KALİTE TESTLERİ VE PERFORMANS ANALİZİ	44
4.1 Giriş.....	44
4.2 FVGS Performansını Etkileyen Faktörler.....	44
4.2.1 İklimsel ve çevre koşulları	45
4.2.2 Sistem bileşenlerinin kalitesi	46
4.2.3 FVGS tasarım kararları	53
4.3 FVGS Performans Analizi Parametreleri.....	54
4.4 Kaliteli Performans İzleme Nasıl Yapılır?	57
4.4.1 Planlama ve tasarım aşamasında yapılan kontroller	58
4.4.2 FVGS kurulumu sonrası işletmeye alma testleri.....	62
4.4.3 FVGS işletmesi sırasında kullanılan performans izleme bileşenleri	67
5. UYGULAMALI BAŞARIM İNCELEMESİ.....	73
5.1 Giriş.....	73
5.2 Nilüfer – Bursa’da Çift-Eksen İzleyicili Fotovoltaik Güç Sistemi	73
5.3 Nilüfer-Bursa Benzetim Çalışması	76
5.3.1 İklim verileri	76

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

5.3.2 Toplam sistem başarımı belirleyicileri ve enerji hasadı	79
5.4 Nilüfer-Bursa Uygulamalı Başarım İncelemesi	83
5.4.1 İklim Verilerinin İncelenmesi.....	83
5.4.2 FV güç sistemi başarım incelemesi	85
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	87
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	91
ÖZGEÇMİŞ	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Otomatik FV modül temizleyici sistemi.....	6
2.2 Modül üzerine monte edilen kuş oturma engelleyici	7
2.3 İncelenen 10 kWp FVGS blok diyagramı	12
2.4 FV güç sistemlerinde gerçek zamanlı ölçülmesi gereken değişkenler ..	18
3.1 Dünya enerji kaynakları ve tüketimi.	21
3.2 FVGS çatı uygulaması.....	23
3.3 Büyük ölçekli FVGS uygulaması, Waldpolenz, Almanya.	23
3.4 Odaklayıcı güneş ısı güç sistemleri (CSP).	24
3.5 Güneş ısı toplayıcı sistemi.....	24
3.6 FVGS kümülatif kurulu güç kapasitenin yıllara göre değişimi... ..	26
3.7 FVGS yıllık kurulu güç kapasitenin yıllara göre değişimi	27
3.8 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli	28
3.9 Güneş enerjisine dayalı elektrik üretim tesisi bağlanabilir konumlar	29
3.10 c-Si teknolojisi üretim zinciri	32
3.11 İnce film teknolojisi değer zinciri.....	33
3.12 1 kW kurulu güç için farklı FV teknolojilerinde gerekli alan	34
3.13 FV hücre teknolojileri ve dönüşüm verimleri	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.14 FV hücrenin temel çalışma prensibi	36
3.15 FV hücrenin basitleştirilmiş eşdeğer devresi	37
3.16 FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi	38
3.17 Şebeke bağlantılı bir FVGS	40
3.18 Şebekeden bağımsız bir FVGS.	41
3.19 Örnek bir FV hibrit güç sistemi.	41
4.1 FV hücre akım ve geriliminin sıcaklıkla değişimi... ..	45
4.2 Gölgeleme sonucu güç kaybı.....	46
4.3 Gerçekleşme oranının (PR) tarihsel gelişimi	55
4.4 Saha değerlendirmede kullanılan çeşitli araçlar	58
4.5 Küresel ışırtım ve güneş elektriği potansiyeli, Türkiye	59
4.6 Sistemin yön açısı	60
4.7 FV dizilerinin yerleşimi	60
4.8 Değişik modül tiplerinin aynı eviriciye bağlanması	64
4.9 FV modülün taşıyıcı konstrüksiyonuna uygun şekilde bağlanamaması.	64
4.10 Paratonerin FV modülleri gölgelemesi	65
4.11 FV hücrelerde mikro çatlakların gözlenmesi.....	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.12 FV hücre üzerindeki mikro çatlakların sebep olduğu ısı arızalar.....	65
4.13 Paratoner direğindin gölgesinden kaynaklanan ısı etkinin kızılötesi kamera ile tespiti.....	66
4.14 d.a dağıtım panosunun, dijital ve kızılötesi kamera ile fotoğraf çekimleri.	66
4.15 Meteorolojik ölçüm sensörleri bağlantı blok şeması.	67
4.16 FVGS’de d.a. ve a.a. bileşenlerinin ölçüm akış şeması.....	68
4.17 Örnek bir meteorolojik ölçüm montajı	69
4.18 Işınım sensörleri	70
4.19 Yatay düzlemde yerleştirilmiş ışınım sensörü.....	70
4.20 Ortam sıcaklık sensörünün montajı.	70
4.21 Rüzgâr hızı, rüzgar yönü ve yağmur sensörlerinin örnek yerleşimleri ..	71
4.22 Tek fazlı a.a. enerji sayacı	71
4.23 Üç fazlı a.a. enerji sayacı.....	71
4.24 Üç fazlı transformatörlü a.a. enerji sayacı.....	72
5.1 Şebeke bağlantılı FVGS enerji akış şeması, Nilüfer - Bursa.....	73
5.2 Şebeke bağlantılı FVGS fotoğrafları, Nilüfer - Bursa.....	74
5.3 Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, Bursa.....	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.4 Ayların ortalama günlük ısıtım [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{d})$] ve ortam sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$] verileri, Nilüfer –Bursa	78
5.5 Aylık toplam ısıtım [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{m})$] ve ortam sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$] verileri, Kassel-Almanya ve Kahire-Mısır.	79
5.6 PVGIS ve gerçek ısıtım değerlerinin karşılaştırılması [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{d})$], Nilüfer-Bursa	83
5.7 Sıcaklık karşılaştırmaları, Nilüfer-Bursa.	84
5.8 Günlük ısıtım şiddeti değişim örnekleri, Nilüfer-Bursa.	84
5.9 Günlük ortam sıcaklığı-modül sıcaklığı değişimi örnekleri, Nilüfer-Bursa... ..	85
5.10 Günlük ısıtım şiddeti-rüzgâr hızı değişim örnekleri, Kızılda-Fethiye.	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1	FV güç sistemlerinde gerçek zamanlı ölçülmesi gereken değişkenler ...18
2.2	FV ve melez güç sistemi incelemesi için türetilen ölçütler20
3.1	FV Sektörünün 2014 yılı ve kümülatif ölçekte lider 10 ülkesi27
3.2	Pazarda yer alan farklı FV teknolojilerinin verim karşılaştırması.....35
4.1	FVGS performansının etkileyen faktörler.....45
4.2	Fotovoltaik teknolojisinde EN 61215 standardında tanımlanan testler, tanımları, yöntem ve gereksinim duyulan ekipmanları48
4.3	FV güç sistemlerinin bileşenleri, kurulumu, bağlantısı ve teftişi ile ilişkili olan tüm standartların ayrıntılarını göstermektedir52
4.4	Ölçüm sensörü yükseklikleri ve konumları.....68
5.1	5,17 kWp gücünde şebekeye bağlı ve çift-eksen izleyicili FVGS bileşenlerinin özellikleri, Nilüfer - Bursa75
5.2	Yıllık ortalama en iyi eğim açıları, Nilüfer – Bursa76
5.3	Yatay düzlemdeki, yıllık ortalama en iyi eğim açısındaki ve çift-eksen izleyici düzlemindeki karşılaştırmalı günlük ortalama ısıtım değerleri, Nilüfer – Bursa77
5.4	Ortalama ortam sıcaklıkları, Nilüfer – Bursa77
5.5	Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’deki verilerin yıllık karşılaştırma tablosu79
5.6	FV dize toplam sistem verimi hesabı80

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.7 Nilüfer-Bursa’da kurulu olan sistemin aylık enerji üretim benzetimi. ..	81
5.8 Nilüfer-Bursa uygulaması için FV sistemi benzetim sonuçları.	82
5.9 5,17 kWp çift-eksen izleyicili FVGS giriş-çıkış enerji miktarları, Nilüfer – Bursa.	86
5.10 Şebeke bağlantılı FVGS yıllık ortalama başarımlar, Nilüfer – Bursa	86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
a.a.	Alternatif akım.
A_m	Modül alanı (m ²)
A_{PV}	FV üreticinin yüzey alanı (m ²).
CIS	Bakır İndiyum Selenür (CuInSe ₂) tipi FV modül.
d.a.	Doğru akım.
$E_{A,r}$	Diziden kullanılan net enerji (kWh).
$E_{in,r}$	Toplam sistem giriş enerjisi (kWh).
$E_{L,r}$	Yüke verilen net enerji (kWh).
$E_{PV,in}$	FV üreticisi üzerindeki güneş enerjisi (kWh)
E_{PV}	FV sistemin ürettiği aylık enerji (Wh)
$E_{TUN,r}$	Şebekeye verilen net enerji (kWh).
$E_{use,r}$	Toplam sistem çıkış enerjisi (kWh).
EÜ-GEE	Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü.
$F_{A,r}$	FV sistemin toplam giriş enerjisindeki oranı [-].
FF	Doluluk çarpanı.
FV	Fotovoltaik.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
FVGS	Fotovoltaik güç sistemi.
G_1	Toplam ışıınım, dize yüzeyinde (W / m^2).
$G_{I, ref}$	Referans ışıınım (1 kW/m^2).
$H_{I,d}$	Günlük küresel ışııtım, dize düzleminde ($kWh.m^{-2}.d^{-1}$).
IEA-PVPS	Uluslararası Enerji Ajansı – Fotovoltaik Güç Sistemleri.
I_A	FV dize çıkış akımı (A)
I_{FU}	Şehir şebekesinden kullanılan akım (A).
I_L	Yük akımı (A).
I_{MPP}	FV modülün en yüksek güç noktasındaki akımı (A).
I_{SC}	Kısa devre akımı (A).
I_{TU}	Şehir şebekesine verilen akım (A).
L_C	Dize yakalama kayıpları ($h.d^{-1}$).
L_{BOS}	Denge bileşenleri kayıpları ($h.d^{-1}$).
MPP	En Yüksek Güç Noktası.
$N_{gün}$	Hesaplama yapılan aydaki gün sayısı
P_A	FV dize çıkış gücü (kW).
P_{FU}	Şehir şebekesinden kullanılan güç (kW).

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
P_{FS}	Depodan kullanılan güç (kW).
P_{MPP}	FV modülün en yüksek güç noktasında ürettiği güç (W).
$P_{PV,STC}$	Standart deney koşullarında FV üretcin anma gücü.
PR	Gerçekleme oranı [-].
PVGIS	Avrupa Komisyonu – Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi.
ϕ_A	İzleyici yön (azimut) açısı (°).
ϕ_T	İzleyici eğim açısı (°).
STC	Standart Deney Şartları (SDŞ). Düzlemsel ışıınım şiddeti ($G_{I,ref}=1\ 000\ W/m^2$), FV hücre eklem sıcaklığı (25 C°) ve hava kütlesi (AM=1,5) için referans değerleri ifade etmektedir.
S_W	Rüzgâr hızı ($m.s^{-1}$).
T_{am}	Ortam hava sıcaklığı (°C).
T_m	Modül sıcaklığı (°C).
V_A	FV dize çıkış gerilimi (V).
V_{MPP}	FV modülün en yüksek güç noktasındaki gerilimi (V).
V_{OC}	Açık devre gerilimi (V).
V_U	Şebeke gerilimi (V).

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
W_{PV}	Gerekli Fotovoltaik gücü.
Y_A	Dize hasadı ($h.d^{-1}$).
Y_f	FV sistem nihai hasadı ($h.d^{-1}$).
Y_r	Referans hasat ($h.d^{-1}$).
η	Verim [-].
η_{Ah}	Amper-saat verimi [-].
η_{sis}	Sistem verimi [-].
η_{PV}	FV modül verimi [-].

1. GİRİŞ

Fosil yakıt rezervlerinin her geçen gün azalması, çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi hayati nedenlerle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Bu sistemlerin ilk yatırım maliyetleri de, yapılan araştırmalar ve gelişen teknolojiler sonucunda her geçen gün azalmaktadır. Güneş, hidrolik, rüzgâr ve jeotermal gibi doğal kaynaklar yenilenebilir olmalarının yanı sıra; temiz enerji kaynakları olarak da değerlendirilmektedir. Fosil yakıtlara alternatif olarak vazgeçilmez bir enerji kaynağı olması nedeniyle; yenilenebilir enerji sektörü günümüzün ve geleceğin en hızlı yükselen sektörü konumundadır.

Güneş enerjisinin; potansiyeli, kullanım kolaylığı, temizliği, yenilenebilirliği ve çevre dostu olması gibi nedenler ile yaygınlaşma potansiyeli diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazladır. Günümüzde, ülkelerin gelişmişliğinin kıyaslanmasında, sanayideki üretim kapasitelerinin artması ve yeni teknolojilerin güncel hayata geçirilme hızı önem taşımaktadır. Tüm bu gelişmeler, beraberinde yüksek enerji ihtiyaçlarını da getirmektedir. Gelişmiş bir ülkenin bireyi, hayatını sürdürürken diğer ülkelerin vatandaşlarına kıyasla daha fazla enerjiyi talep etmektedir. Enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtların tercih edilmesi, küresel iklim değişikliği ve sınırlı kaynakların hızla tükenmesi problemini doğurmuştur. Dolayısıyla, mevcut durumda bir ülkenin yüksek enerji tüketiyor olması, gelişmişliğinin bir göstergesi olmanın yanında, gelecek nesillere daha kirlenmiş ve kaynakları tüketilmiş bir dünya bırakması anlamına gelmektedir. Bu çelişkinin ortadan kaldırılmasının yegâne çözümü; sürdürülebilir, çevre dostu ve temiz enerji kaynaklarının kullanımının arttırılmasıdır. Bunun için de, öncelikle gelişmiş ülkelerin yüksek enerji tüketimlerinde, enerji verimliliğini arttırması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelik vermesi gerekmektedir. Bu kapsamda, Türkiye’de de yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik uygulama tecrübelerinin arttırılması son derece önemlidir.

Fotovoltaik sektörünün, Türkiye’de yakın gelecekte kayda değer bir gelişme göstermesi beklenmektedir. Özellikle, lisanssız elektrik enerjisi üretiminde (< 1 MW) uygulama sayılarında hızlı bir artış görülmektedir. 2015 yılının ilk yarısının sonunda, Türkiye’de kurulu kümülatif lisanssız Fotovoltaik Güç Sistemi (FVGS) gücü 100 MW’a yaklaşmıştır (Enerji Atlası, 2015). Kurulu kümülatif FVGS gücünün, 2012 yılı sonunda 2 MW, 2013 yılı sonunda 6 MW ve 2014 sonunda 60 MW olduğu dikkate alındığında, kaydadeğer bir yükselme olduğu

gözlemlenebilir (IEA-PVPS Annual Reports, 2012-2014). Ayrıca, toplam 600 MW gücündeki lisanslı güneş enerjisi santralleri için de Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu nezdindeki ihale süreçleri, 2015 yılının ilk yarısında tamamlanmıştır. Lisanslı FVGS'lerin kurulmasıyla birlikte, Türkiye'nin fotovoltaik temelli güneş enerjisi santralleri gücünün önümüzdeki yıllarda hızla artması beklenmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2015-2019 Stratejik Planına göre, önümüzdeki 4 yıl boyunca FVGS kurulu güç kapasiteleri şu şekilde olacaktır: 2015: 300 MW, 2017: 1800 MW ve 2019: 3000 MW. (ETKB 2016-2019 Stratejik Planı, 2014).

Bir fotovoltaik güç sisteminin ömrü, literatürde yaklaşık olarak 30-35 yıl olarak belirtilir. Bu süre zarfında sistemde meydana gelecek performans düşüşlerinin en aza indirilmesi için sistemin kalitesinin ve güvenilirliğinin izlenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda kurulması planlanan bir sistemi, ulusal ve uluslararası standartları dikkate alarak tesis etmek ve işletime almak gerekir. Sistem performansının sürekliliğini sağlamak amacıyla, incelenecek sistem parametreleri ve sistemin kalite karakteristiklerini ortaya çıkarmak ve bu verilerden hareketle bir sistem modeli oluşturmak mümkündür. Yakın gelecekte Türkiye'de ve komşu Ortadoğu ülkelerinde fotovoltaik güç sistemlerinin kullanımının yaygınlaşacağı göz önünde bulundurulursa, kalite ve sistem performansının izlenmesi ve raporlanması konularının öneminin giderek artacağı öngörülmektedir.

Bu tez projesi kapsamında yapılan çalışmada, öncelikle ulusal ve uluslararası ölçüm ve sistem kalite standartları incelenmektedir. Bu doğrultuda, kalite açısından dikkate alınması gereken parametreler tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, iklim verilerinin ve sistem bileşenlerinin başarıma etkisi kapsamlı olarak incelenmektedir ve sonuçlar uluslararası değerlendirme ölçütleri ile açıklanmaktadır.

Bu tezin 2. Bölümünde, FV güç sistemlerinin kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde literatürde dikkate alınan yöntemler tanıtılmış ve örnek çalışmalar incelenmiştir. 3. Bölümde, FVGS ve bileşenleri genel olarak tanıtılmıştır. 4. Bölümde, FVGS kalite testleri ve performans analizinin nasıl yapıldığı açıklanmıştır. 5. Bölümde, bu tez kapsamında dikkate alınan pilot bir sistemin gerçek uygulama sonuçları incelenmiştir. 6. Bölümde, çalışma sonuçları değerlendirilmiştir ve bu tez çalışmasının kazanımları vurgulanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bir fotovoltaik güç sisteminden en iyi verimi elde etmek için sistemde yer alan bütün bileşenlerin mühendislik açısından incelenmesi ve özellikle sistemin ana elemanlarından biri olan fotovoltaik modüllerin yönelimi ve konumlandırılmasına özellikle dikkat edilmesi gerekmektedir. Pazarda en yaygın olarak kullanılan (% 85 oranında) kristal silisyum teknolojisine dayalı fotovoltaik modüller, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir ve verimleri % 15-20 arasında değişmektedir. Fotovoltaik teknolojisinde sürdürülen Ar-Ge çalışmaları genellikle verimi artırmaya yöneliktir. Bunun paralelinde fotovoltaik güç sistemlerinin kalitesi, güvenliği ve izlenmesi konusu da öne çıkmaktadır. Fotovoltaik güç sistemlerinde yapılan kalite denetimi ve güvenlik çalışmaları, sistem performansının yanı sıra yatırımcı ve kredi kuruluşları açısından riski en aza indirme noktasında devreye girmektedir. Bir fotovoltaik güç sisteminin kalitesinin incelenmesi ve bu yönde yapılacak iyileştirme çalışmaları, sistem performansını artırmak açısından oldukça önemlidir.

FV modül üreticileri, 25 yıllık ürün garantisini sağlamak amacıyla ürünlerini uluslararası standartlarda tanımlanmış test işlemlerinden geçirmektedir. Örneğin, kristal silisyum temelli FV modülleri için TS EN 61215 standardı kapsamında, 18 adet test aşamasında kristal silisyum güneş panelinin elektriksel, optik, mekanik, iklimlendirme vb. testleri gerçekleştirilmektedir (TS EN 61215, 2006). İnce film temelli FV modülleri için de TS EN 61646 standardı kapsamında 20 adet test aşamasında ince film güneş panelinin elektriksel, optik, mekanik, iklimlendirme vb. testleri yapılmaktadır (TS EN 61646, 2010). Benzer şekilde, diğer FVGS bileşenlerinin de (evirici vb.) karşılaması beklenen bazı ürün standartları bulunmaktadır. Örneğin; TS EN 61683 standardı, güç şartlandırıcının çıkışı sabit frekanslı kararlı bir a.a. gerilimi veya kararlı bir d.a. gerilimi olduğunda, güç şebekeden bağımsız ve şebeke etkileşimli fotovoltaik sistemlerde kullanılan güç şartlandırıcının verim ölçülmesine dair kılavuz bilgileri kapsar (TS EN 61683, 2014). TS EN 61727 standardı, FV sistemi ile şebeke arasındaki bağlantı ara yüzünün özelliklerini kapsar (TS EN 61727, 2014). TS EN 50530/A1 standardı, şebeke bağlantılı fotovoltaik çeviricilerin toplam verimliliğinin nasıl hesaplanacağını belirler (TS EN 50530/A1, 2013). TS EN 62446 standardı, bir şebeke bağlantılı FV sisteminin tesis edilmesinden sonra alıcıya verilecek olan, gerekli asgari bilgi ve dokümantasyonu kapsar (TS EN 62446, 2013).

FVGS bileşenlerinin teker teker gerekli ürün standardını karşılamasının yanında, bir araya gelerek oluşturdukları sistemin de belirli bir kalitede olması beklenmektedir. Japonya’da küçük ölçekli 725 adet FV güç sistemi gözleme alındığında, gerçekleşen hataların % 84’ünün güç elektroniği bileşenlerinden kaynaklandığı gözlenmiştir (IEA-PVPS T2-06, 2007). FVGS bileşenlerinin herhangi birinde meydana gelecek bir sorun veya toplam sistemin tasarımının yol açacağı hata, toplam enerji üretiminde ciddi kayıplara sebep olmaktadır. Örneğin, gölgelenme faktörü FVGS enerji üretimini ciddi bir şekilde düşürmektedir. Gölgeleme nedeniyle % 48’i bulan ciddi enerji üretim kayıpları yaşanmaktadır (Karatepe, 2006). Kurulum aşamasında veya kurulum sonrası herhangi bir FVGS’nin gölge analizinin yapılması mümkündür. Çeşitli ölçüm yöntemleri kullanarak, bilgisayar ortamına aktarılan değerler, gölgelenmenin etkilerinin değerlendirilmesini ve giderilmesini sağlamaktadır.

FVGS tasarımlarında veri girdileri temelde iki sınıfta incelenmektedir. Birinci sınıf, kullanılacak sistem bileşenlerinin teknik karakteristikleridir. Sistem bileşenlerinin uluslararası standartlara uygun seçilmesi, bu ürünlerin ilgili uluslararası testlerden geçmiş olduğunu göstermektedir ve benzetim çalışmalarında doğru bir şekilde değerlendirilebilmektedir. İkinci sınıfta değerlendirilen veriler, kurulum yerindeki iklim bilgisi, kurulum yerinin fiziki koşulları ve yük gereksinimi gibi parametrelerdir. Tasarımın güvenilirliği, esas itibarıyla ikinci sınıfta tanımlanan bu verilerin doğruluğuna bağlıdır (Çubukçu, 2011).

FV güç sistemini etkileyen temel iklimsel koşullar şunlardır:

- Güneş ışırtımı
- Nem
- Rüzgâr ve kar
- Yağmur ve dolu
- Sıcaklık değişimleri
- Toz vb. kirliler

Ayrıca, farklı FV teknolojilerinin temel karakteristiklerinde de önemli bazı değişimler görülebilmektedir. Örneğin ince film teknolojilerinde, sıcaklığa bağlı gerilim düşümlerinin daha az gerçekleştiği birçok makalede yayınlanmıştır.

FV güç sistemlerinin izlenmesi ve performans analizine yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. FVGS uygulamalarının izlenmesi ve performansı analizi ile ilgili örnek bazı literatür çalışmaları ve sonuçları aşağıda özetlenmiştir

- Masoud Farhoodnea ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, şebekeye bağlı 3 kWp kurulu gücünde olan bir FVGS'yi altı ay boyunca (Ekim 2013 ve Mart 2014 aralığında), Malezya'da Kebangsaan Üniversitesi'nin kampüsünde, 1 dakikalık aralıkla izlemiş ve yapılan modelleme ile karşılaştırmasını yapmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucuna göre FV modülün verimi % 10,11, eviricinin verimi % 95,15, sistemin aylık ortalama performans oranı % 77,28 ve kapasite faktörü de % 15,7 olarak gözlenmiştir (Farhoodnea et al., 2015).
- Gölge etkeni, FVGS'de ciddi kayıplara sebep olmaktadır. FV sisteminin tasarımını yaparken, gölge konusu öncelikli dikkate alınmalıdır. Sistem dizilerinin arasındaki mesafeler, en uygun uzaklıkta konumlandırılmalıdır. Ayrıca, sistemin dışında ortaya çıkan her türlü gölge etkisinden uzak durulmalıdır. Bu doğrultuda yapılan araştırmalara, S. Malathy ve R.Ramaprabha tarafından yapılan çalışmayı örnek verebiliriz. Bu sonuçlara göre; FV dizinin gücü, FV dizinin bağlantısı ve FV modülerin konumu optimum şekilde tasarlanıp ve uygulanırsa, gölgeleme nedeni ile ortaya çıkan kayıplar en aza indirilmektedir. Dolayısıyla, sistemin nihai hasadında bir artış görülmektedir (Malathy and Ramaprabha, 2015).
- FVGS performansını etkileyen önemli parametrelerden birisi de modül sıcaklığıdır. FV hücreler, güneş ışınımının %80'ini soğurabilmektedir ve soğrulan bu enerjinin sadece belli bir yüzdesini (FV modülün verimine göre) elektrik enerjisine çevirebilmektedir. Geri kalanı, sıcaklık olarak hücrelere yansıtılmaktadır. PV-T olarak adlandırılan sistemler ile bu ortaya çıkan sıcaklık, sıcak su teminininde değerlendirilebilmektedir ve sistemin genel performansını iyileştirebilmektedir. Bu kapsamdaki örnek çalışmalardan birisi de Adham Makki ve arkadaşlarının yaptığı araştırmadır. Bu çalışmada, FV hücrelerde biriken sıcaklık, su ısıtma amacıyla kullanılarak, sıcaklığın olumsuz etkisi azaltılmış ve FV sisteminin performansında artış gözlenmiştir (Makki et al., 2015).
- FVGS performansını etkileyen faktörler bölgeden bölgeye değişmektedir. Pablo Ferrada ve arkadaşları, Antofagasta-Şili'nin kıyı bölgesinde bu

kapsamda uygulamalı bir çalışma yapmıştır. Bu bölgedeki global ışınlım, yaz aylarında $8,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ve kış aylarında $6 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ değerindedir. Bu çalışmada, farklı FV teknolojileri karşılaştırılmıştır. On altı ay boyunca izlenen sistemin performans oranı ve hasadı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre değişik teknolojiler arasındaki nihai hasad farkının, özellikle yaz aylarında gerçekleştiği gözlenmiştir (Ferrada et al., 2015).

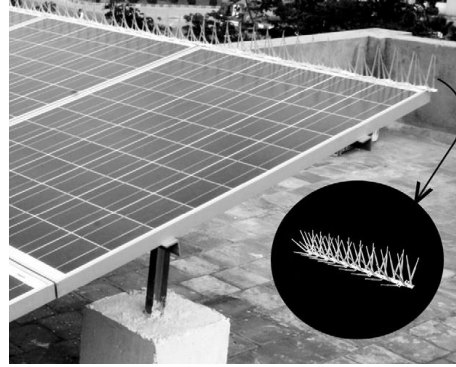
- Kuveyt'te bir okulun çatısında kurulu olan FVGS, 12 ay boyunca A. Al-Qattan ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu sistemlerde kullanılan FV teknolojisi, Bakır İndiyum Galiyom Selenid (CIGS) ince film teknolojisidir. Sistemlerden birisi $85,05 \text{ kWp}$ ve diğeri $21,6 \text{ kWp}$ gücündedir. Okulların enerji tüketimleri, FVGS enerji üretimi ve gerçek zamanlı performansı aylık olarak incelenmiştir. Bu araştırmada, düşünülen kullanılan otomatik modül temizleyici sistemi, modül üzerindeki kirlenmeyi ve sebep olduğu performans düşümünü ortadan kaldırmayı hedeflemiştir (Şekil 2.1). Bu sayede, FV sistemin performans oranı 0,7 den aşağıya inmemiştir. Aylık ortalama enerji hasadı 104 kWh/kWp ve nihai hasadı $4,5 \text{ kWh}/[(\text{kWp}) \cdot \text{d}]$ olarak tespit edilmiştir. Otomatik temizleme sayesinde, tozlanmaya bağlı performans düşüşleri % 1,7'nin altına düşmüştür. Otomatik temizlemenin bir başka avantajı, su tüketimini minimuma indirebilmesidir (Al-Qattan et al., 2015).



Şekil 2.1. Otomatik FV modül temizleyici sistemi.

- Hindistan'da bir sanayi bölgesinde, çatı üzerinde kurulu olan 20 kWp gücünde bir FVGS performans incelenmesi, Kevin Ark Kumar ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, sistem performansını düşüren kirlilik ve tozlanmanın yanında, kuş pisliğinin de neden olduğu “Sıcak benek (Hot spot)” etkisi incelenmiştir. Bu etki nedeni ile ortaya çıkan kayıplar, toz ve kirlilik kaynaklı kayıplardan daha fazla olmuştur. Modüllerin üst kenarına monte edilen hafif polikarbonatlı engelleyici

malzemelerle (Şekil 2.2), kuşların modüllerden uzak durması sağlanmıştır (Kumar et al., 2015).



Şekil 2.2. Modül üzerine monte edilen kuş oturma engelleyici.

- Ammar M. Al-Sabounchi ve arkadaşları, Abu Dhabi / Birleşik Arap Emirliği'nde yaptıkları çalışmada, şebekeye bağlı olan 36 kWp gücünde olan bir FVGS performansını, çok sıcak ve tozlu olan iklim koşullarında gerçek-zamanlı olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, FVGS üzerinde, fazla toz birikiminden ve aşırı ortam sıcaklığı nedeniyle ciddi kayıplar tespit edilmiştir. Bu iklim koşullarında yapılacak FVGS kurulumlarına ilişkin birkaç öneride bulunulmuştur. Örneğin: Alık periyotlarda FV modüllerin düzenli temizlenmesi önerilmiştir (Al-Sabunchi et al., 2015).
- Şili'de Atacama çölünde bir başka performans çalışması, Ferrada ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. İki farklı teknolojiye (ince film ve çok kristalli silisyum) FV sistemleri üzerinde karşılaştırmalı performans analizi yapılmıştır. FV sistemleri, 21 ay boyunca (Ocak 2013 ve Eylül 2014) izlenmiştir. Kurulum yeri, Atacama çölünün en sıcak bölgesinde yer almıştır ve güneş ışınım potansiyeli açısından da zengin bir potansiyele sahiptir. Ancak, aşırı sıcaklık performansı olumsuz etkilemektedir. Bölgenin güneş ışınım potansiyeli, yaz aylarında 8,5 kWh/[(m²).d] ve kış aylarında ise 6 kWh/[(m²).d] değerindedir. FVGS performans oranı, sıcak hava ve toz birikiminden dolayı olumsuz etkilenmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, sıcaklık artışı ile performans oranı ince film teknolojisinde aylık % -4,8 ile % -4,4, çok kristalli silisyum teknolojisinde ise % -6,3 ile % -3,7 oranında düşmektedir. İnce filminden üretilen enerjinin maliyeti 14,48 €-cent/kWh ve çoklu kristalli silisyum için 15,65 €-cent/kWh olarak hesaplanmıştır. Böylece,

gözlemlenen ortam koşullarında, ince film teknolojisinin daha avantajlı olduğu belirtilmiştir (Ferrada et al., 2015).

- FV sistemlerin nihai hasadını iyileştirmek için hibrit sistemlerin kullanımı da bir çözüm olarak görülmektedir. Hibrit sistemlerin kontrolü, boyutlandırılması ve performans incelemesine yönelik yapılan özgün bir çalışma da, Ammer Mohammed Ameen ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, fotovoltaiik, dizel jeneratör ve aküden oluşan hibrit bir sistem için basitleştirilmiş dinamik modelleme yapılmıştır. Matlab tabanlı yapılan modellemede, iki senelik kaydedilen gerçek-zamanlı veriler kullanılmıştır (Ameen et al., 2015).
- 5 MWp gücünde bir FVGS sistemi, Tailandu-Hindistan'da kurulmuş ve performans analizi yapılmıştır. Sistemin yıllık enerji üretimi yaklaşık 8495 MWh olmuştur ve ortalama aylık enerji üretimi yaklaşık 708 MWh değerindedir. Ortalama yıllık güneş enerjisi, ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı ve rüzgar hızı sırası ile 5,414 kWh/[(m²).d], 30,76°, 37,90° ve 3,191 m/s olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada RETscreen programı kullanılarak, enerji ve performans tahmini yapılmıştır. Gerçek ölçülen değer ile tahmin edilen değer birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir (Chandra Babu and Sundaram, 2015).
- FV modüllerin bozulma ve yaşlanmaları üzerine de çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Cezayir'de, Farida Bandaou ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bu konu üzerine odaklanmıştır. Çalışmalarında, 28 sene süresince, Sahra ortamında çalışan FV modüllerin yaşlanma mekanizması incelenmiştir. FV modülün renk solması, camlarında kırıklar ve çizgiler, laminasyon katmanlarının birbirinden ayrılması, bazı hücrelerin renk solması ve sıcak-benek noktalarının oluşması, oksidlenme ve termal şoklar gibi farklı türde bozulmalar görsel inceleme ile tespit edilebilmektedir. Tüm bu araştırmalar süresince, modüllerin akım-gerilim karakteristikleri dış ortamda ölçülmüştür. Elektriksel değerlerde gözlemlenen senelik düşüş miktarları şu şekildedir: maksimum güçte % 1,22, kısa devre akımında % 0,78, doluluk çarpanında %0,57 ve açık devre voltajında % 0,1 (Bandou et al., 2015).
- Radzimeska çalışmasında, FVGS performansı üzerinde tozun etkisine odaklanmıştır. Polonya'da yapılan performans incelemesinde, kristal

silisyum yapılı FV modülleri gözlenmiştir. Bu çalışmaya göre, FV modülün eğimi, rüzgâr hızı, tozun özellikleri ve çevre koşulları gibi etkenler, modüller üzerinde biriken toz miktarını etkilemektedir. FVGS performansında azalma, modül üzerinde biriken toz miktarı ile lineer olarak değişmektedir. Günlük enerji veriminde ortaya çıkan kayıp, kristal silisyum yapılı modüllerde 37° eğim açısında % 0,8 olarak gözlenmiştir. Bu araştırmaya göre, bütün modüllerde toz nedeniyle ortaya çıkan güç kaybı, senelik % 3 olarak raporlanmıştır (Radziemska, 2015).

- FVGS performansının tahminlenmesi için farklı modeller geliştirilmektedir. Bu çalışmalardan birisi de Y.M. Soro ve arkadaşlarına ait olan çalışmadır. Bu çalışmada, Matlab/Simulink uygulaması ve Levenberg Marquardt (LM) algoritması kullanılarak beş farklı elektrik modeli benzetimi yapılmıştır. Geliştirilen modelden hesaplanan sonuçlar ve deneysel çalışmadan ölçülen değerler karşılaştırılmış ve en fazla % 14'lük bir fark gözlenmiştir (Soro et al., 2014).
- Taylan'da yapılan bir çalışmada, şebekeden bağımsız FVGS performansı incelenmiştir. Bu kapsamda, dört adet şebekeden bağımsız FV sistemi, Bilgi ve İletişim Teknolojiler (ICT) merkezlerinde kurulmuştur (Jinayim et al., 2014).
- İtalya'da Trieste Üniversitesi'nde Micheli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, şebekeye bağlı aynı güce sahip, ama farklı FV teknolojilerinden oluşan iki ayrı FV sistemin bir sene boyunca (15 Ekim 2011 – 14 Ekim 2012 aralığında) izlemesi yapılmış ve özel bir sistemle veri kaydı gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada, ışınlam ve sıcaklık etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Veriler sınıflandırılarak ve normalize ederek, bir model oluşturulmuştur. Bu model, FV sistemin performansını kısa ve uzun vadede tahmin edebilmektedir (Micheli et al., 2014).
- Fotovoltaik sistemlerin ana bileşenlerinin birisi olan fotovoltaik modüllerin performansı üzerinde de deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birisi, Kolombiya'da Franklin Jaramillo ve arkadaşlarının yaptığı örnek araştırmadır. Bu çalışmada, iki farklı FV modül teknolojisi incelenmiştir: 55 Wp tek kristal silisyum temelli FV modül ile 12,4 Wp gücünde olan esnek organik yapılı FV modül incelenmeye alınmıştır. Elde edilen sonuçlarda, esnek organik yapıda olan FV modülün düşük güneş

ışınımlarda (400 W/m^2 den az ışıнімda) ve yüksek nem ortamlarda daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir (Jaramillo et al., 2014).

- FV hücreler üzerinde toplanan sıcaklık, FV modüllerin ömrünü azaltmaktadır. Bu sıcaklık, farklı bir biçimde kullanılabilir ve FV sistemin genel performansında artış sağlanabilir. Ahmad Fudholi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, fotovoltaiik termal (PVT) su kollektörleri kullanmışlardır ve toplam sistemin performansını incele-miştir. Bu çalışma, $500\text{-}800 \text{ W/m}^2$ güneş ışıınımlı altında yapılmıştır. Her kademedeki kütle akışı, $0,011 \text{ kg/s}$ ile $0,041 \text{ kg/s}$ aralığında değişmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, 800 W/m^2 güneş ışıınımlı ve $0,041 \text{ kg/s}$ kütle akışında, PVT sistemin verimi % 65, FV sisteminin verimi %13 olarak ve termal verim %52 olarak gözlenmiştir. Ayrıca, incelenen bu sistemde yaklaşık % 79 ile % 91 arası bir enerji tasarrufu gözlenmiştir. Sonuçta, FV modüllerin sıcaklık düşüşü ile birlikte veriminin de arttığını göstermektedir (Fudholi et al., 2014).
- FVGS performans incelemelerinde, yerinde kısa dönem incelemeleri de oldukça faydalı sonuçlar verebilmektedir. Örneğin: Tamer Khatib ve arkadaşlarının yaptıkları 31 günlük performans analiz çalışmasında, 5 kWp gücünde şebekeye bağlı bir fotovoltaiik sistemini, sıcak ve tropik hava şartları altında incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, performans oranı % 73,12, eviricin ortalama performansı % 98,56 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, sistemin günlük ortalama hasadı $2,51 \text{ kWh}/[(\text{kWp}).\text{d}]$ ve sistemin kapasite faktörü % 10,47 olarak hesaplanmıştır. Çıkan sonuçlar, sistemden beklenen performansı gösterememiştir. Sistemde bir problem olduğu anlaşılmıştır ve konunun gölgeleme açısından kontrol edilmesi önerilmiştir (Katib et al., 2014).
- Cardona ve arkadaşları, dört farklı teknoloji-den oluşan FV modüllerini aynı sahada aynı şartlar altında, 1 sene boyunca İspanya'nın güneyinde incelemiştir. Bu çalışmada incelenen ince film FV modül teknolojileri şunlardır: amorf silisyum (a-Si), tandem yapıli amorf silisyum ile mikro kristal silisyum (a-Si/ $\mu\text{c-Si}$) ve kadmium tellurid (CdTe). Ayrıca, çok kristalli silisyum modüller de (mc-Si) incelenmiştir. Yıllık performans karşılaştırılmasına göre, bu bölge için amorf silisyum (a-Si) modüller daha iyi sonuç vermiştir. Kadmium tellurid (CdTe) ve çok kristalli silisyum (mc-Si) modüller, kış aylarında daha iyi performans göstermektedir.

Amorf silisyum (a-Si) ve tandem yapılı amorf silisyum ile mikro kristal silisyum (a-Si/ μ c-Si) modüllerin yaz aylarında performansı daha iyidir (Caradona et al., 2014).

- FV modüllerinde oluşan sıcaklık, modülerin arkasına monte edilen soğuk su boruları ile ortadan kaldırılabilir. Rehman ve arkadaşları, bu kapsamda yaptıkları bir çalışmada, EES (Engineering Equation Solver) yazılımı ile bir sayısal model geliştirmiştir. Bu model ile performansı etkileyen değişik elektriksel ve ısı parametrelerin etkisi tahminlenmiştir. FV modüllerin arka yüzeyleri soğutulularak, inceleme yapılmıştır. Bu çalışma, Dhahran-Suudi Arabistan'da yapılmıştır ve sonucuna göre su soğutmasıyla FV modül sıcaklığı % 20 oranında düşürülmüş ve FV modülün verimi % 9 oranında yükseltilmiştir (Rehman et al., 2013).
- Bir başka performans analizi çalışması, Sardinia-İtalya'da Emilio Ghiani ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, şebekeye bağlı iki farklı FVGS incelenmiştir. Sistemlerden birisi, arazi uygulamalı 395,16 kWp kurulu gücüne sahiptir ve Kasım 2010'da işleme alınmıştır. Diğer sistem, çatı uygulamalı 1042,29 kWp kurulu gücündedir ve Kasım 2008'de işleme alınmıştır. Sistemlerin performans oranları, enerji dönüşüm zinciri içinde incelenmiştir. FV modülün çıkışında olan d.a. gücün, eviriciden sonra a.a güce dönüşümü ve transformatörün kayıpları incelenmiştir. Transformatörlü olan eviricilerde performans oranının daha düşük olduğu raporlanmıştır. Arazi üzerinde kurulan FVGS nihai hasadı 1700 kWh/[(kWp).y] ve performans oranı % 87,3'dür. Çatı uygulamasında ise nihai hasad 1500 kWh/[(kWp).y] ve performans oranı % 83,2'dir (Ghiani et al., 2013).
- Nipon Ketjoy ve arkadaşları, Tayland'da Naresuan Üniversitesi'nde 6 sene boyunca üç farklı teknolojinin karşılaştırmalı başarımını incelemişlerdir. İncelenen teknolojiler şunlardır: amorf silisyum (a-Si), çokkristalli silisyum (mc-Si) ve hibrit silisyum (HIT) (Bkz. Şekil 2.3). Toplam FVGS kapasitesinin kurulu gücü 10 kWp olmuş ve Haziran 2005 -Aralık 2010 aralığında sistem başarımı, IEC 61724 standardına uygun olarak izlenmiştir. Elde edilen sonuca göre, en iyi performans oranı a-Si teknolojisinden oluşan diziye aittir (Ketjoy et al., 2013).

- S.S.Chandel ve arkadaşları, Hindistan’da farklı FV teknolojilerinden oluşan sistemlerin performansını incelemiştir. Aynı yerde farklı teknolojileri test edilere, o bölgeye hangi teknolojinin uygun olduğunu ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Her bir teknoloji için kayıt edilen nihai hasat ve performans oranları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, FV benzetimi yapan yazılımlarla elde edilen sonuçlar, gerçek ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmadan çıkan sonuçlara göre, bu bölgede, HIT ve a-Si modülerinden oluşan diziler, mc-Si dizilerine göre daha iyi performans göstermektedir. a-Si modüller mc-Si modülleri ile karşılaştırıldığında, nihai enerji hasadı, yaz aylarında % 14 daha fazla ve kış aylarında % 6 daha az olmuştur. HIT modüller ile mc-Si modüllere göre, farklı aylarda % 4 - 12 arasında daha fazla enerji üretmiştir (Chandel et al., 2013).
- FVGS performans incelemesinde önemli parametrelerden birisi, FV modüllerin eğim açısıdır. FV modülün yerleştirilmesi beklenen en iyi eğim açısı, sistemin konumuna göre değişmektedir. Literatürde bu kapsamda birçok çalışma yapılmıştır. Tapan Kumar Saha ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, Avustralya Queensland Üniversitesi’nde bir sene boyunca izlenen sistem için en iyi FV modül eğim açısının 27° K (kuzeye doğru) olduğu tespit edilmiştir (Saha et al., 2013).

- PERSEL projesi, 2009 ile 2011 yılları arasında, İtalya ve Fransa'da gerçekleşmiştir. Bu proje ile farklı Güneş ısı ve FV santrallerin gerçek zamanlı verileri toplanmıştır. PERSEL, fotovoltaik bölümünde sistem kontrolü ve sistem izlemesine öncelik vermiştir. Bu proje, kurulu olan güneş ısı ve FV santrallerinin verilerini toplamak, iki ülke arasında teknoloji transferi geliştirmek, teknolojide yenilik yaratmak ve araştırma merkezleri ile sanayi arasındaki işbirliğini artırmak amacıyla yürütülmüştür. Bu proje kapsamında 2 yıl boyunca, 10 farklı noktada piranometre ile global ışınım ölçülmüştür. Ayrıca, bu projede 1 yıl boyunca 13 tane FV sistemi izlenmiştir ve sürekli kontrol edilmiştir. (Filippo ve Fabio, 2013).
- Yunanistan'da fotovoltaik (FV) güç sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en gelişen yatırım alanlarından birisidir, Labridis ve arkadaşları FV sistemlerin güvenilirlik ve performans iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapmıştır. (Labridis et al., 2012).
- Leloux ve arkadaşları, Fransa'da 6868 adet FV sisteminden aldıkları veriye dayanarak bir performans analizi yapmıştır. Bu tesislerin toplam gücü 20,5 MW dir ve 2007-2010 yılı arasında kurulmuşlardır. 2010 yılı boyunca, Fransa'da yıllık ortalama 1163 kWh/kWp enerji hasadı ve 0,76 gerçekleşme oranı gözlenmiştir (Leloux et al., 2012). Leloux ve arkadaşları, aynı çalışmayı Belçika'da 993 adet FV tesisten gelen veriler üzerinde yapmıştır. 2007-2010 yılları arasında kurulan bu sistemlerin toplam gücü 4 MW'tır. Ortalama yıllık 892 kWh/kWp enerji hasadı ve 0,78 gerçekleşme oranı raporlanmıştır (Leloux et al., 2012).
- Marion ve arkadaşları, farklı modül teknolojilerini 3 farklı konumda (Cocoa-Florida, Eugene-Oregon ve Golden- Colorado'da) incelemeye almış ve performans analizlerini yapmıştır. Sistemlerin konum farkı, referans hasat farkı ve modülerin karakteristiklerine bağlı değişikliklerden ötürü, sonuçlarda büyük farklar gözlenmiştir. Örneğin; en iyi performansı gösteren Cocoa'da bulunan sistem ile en kötü performansı gösteren Eugene'de bulunan sistemin hasadı arasında, % 60'lık dev bir fark vardır. Elde edilen sonuçlara göre kayıpların istatistiği şu şekildedir: güneşin geliş açısından doğan kayıplar % 2,5 ile %3 arasında, FV modüllerin sıcaklığa bağlı kayıpları % 2,3 ile % 10,8 arasında değişmiştir. Düşük

ışınım seviyesi kaynaklı kayıplar, CIGS modülleri için % 7,4 ve CdTe modülleri için % 0,3 olarak gözlenmiştir (Marion et al., 2012).

- Günümüzde FVGS'ler daha çok büyük ölçeklerde kurulmaktadır. Dolayısıyla, FVGS'lerin performansında küçük bir iyileşme ileride daha büyük finansal kazançlara sebep olmaktadır. Müller ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sistemin performans oranının (PR), esas itibariyle sistemin tasarım kararlarına ve seçilen bileşenlerin özelliğine bağlamıştır. Bu çalışmada, 3 farklı sistemde gerçekleşen iyileşmelerin sistem performansına katkısı gözlenmiştir. Örneğin; modülün açısının ve iç gölgelenme etkisinin iyileştirilmesi, sistemin hasadında % 5 lik bir kazanç sağlamıştır (Müller et al., 2012).
- Alonso-Tristan ve arkadaşları, 2 adet 100kWp şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin performans karşılaştırmasını yapmıştır (Alonso-Tristan et al., 2012).
- Mete Çubukçu, doktora tezinde (2011), Gebze, Gökçeada, İzmir ve Kızılada konumlarında kurulmuş yenilenebilir kaynaklı dört ayrı enerji üretim sisteminin başarımlarını incelenmiş ve karşılaştırmıştır. Bu tez kapsamında, iklim verilerinin, yük talebinin ve sistem bileşenlerinin başarıma etkisi kapsamlı olarak incelenmiş ve sonuçları uluslararası değerlendirme ölçütleri ile açıklanmıştır (Çubukçu, 2011).
- Protogeropoulos ve arkadaşları (2010), Güney Akdeniz iklim koşullarında çalışan 4 farklı FV güç sisteminin, IEC 61724 standardına uygun bir şekilde başarımlarını değerlendirmesini yapmıştır. İncelemeye alınan sistemler, Halandri-Atina-Yunanistan'da (Enlem: 38° 01'' Kuzey, Boylam: 23° 48'' Doğu) kurulmuştur. "Grup A" yüksek verimli melez tek kristal / amorf silisyum modüllerden oluşmaktadır. "Grup B" çok kristalli modüllerden, "Grup C" ince film CdTe modüllerden ve "Grup D" CIGS (Bakır İndiyum Galyum Selenid) modüllerden oluşmaktadır. A,C ve D gruplarında 1,1 kW anma güce sahip aynı tip eviriciler kullanılmıştır. Yüksek anma kapasitesi nedeniyle, B grubunda 1,7 kW anma gücünde evirici kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, dize düzlemindeki ışınlam (G_T , W/m²), ortam sıcaklığı (T_{am} , °C), rüzgâr hızı (S_w , m/s), modül sıcaklığı (T_m , °C), dize çıkış gerilimi (V_A , V) ve akımı (I_A , A) ile şebeke gerilimi (V_U , V) beşer dakikalık aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Protogeropoulos ve

arkadaşlarının sistem başarımları incelemesinde, ortam sıcaklığının yükseldiği Temmuz-Ağustos aylarında CdTe teknolojisini içeren ince film grubunun (Grup C) diğerlerine kıyasla daha yüksek başarımla çalıştığı gözlenmiştir. Öte yandan, CIGS tipi ince film grubunda (Grup D), diğerlerine kıyasla daha fazla kayıp gözlenmiş ve gerçekleştirme oranı da en düşük değerlerde olmuştur. İlgili makalede, teorik hesaplamalarla pratik ölçümlerin, kristal silisyum teknolojilerinde uzun yılları bulan bilgi birikimi sayesinde tutarlılık gösterdiği, ince film teknolojisinde ise tutarsız olduğu özellikle vurgulanmıştır (Protogeropoulos et al., 2010).

- Aristizabal and Gordillo (2008), Bogota-Kolombiya’da kurulan şebeke bağlantılı binaya tümleşik FV güç sisteminin 2 yıllık başarımlı değerlendirilmesini yapmıştır (Enlem: $4^{\circ} 35'$, Yükseklik: 2580 m, Kurulum sahibi: “Universidad Nacional de Colombia”). İzleme süresince, d.a. ve a.a. güç değerleri, evirici ve sistem dönüşüm verimleri, FV dize tarafında üretilen enerji miktarı, a.a. tarafındaki enerji miktarı, güç kalitesini incelemek için gerekli değişkenler (toplam harmonik bozulma yüzdesi, harmonik bileşenler, frekans, gerilim, güç faktörü, aktif güç, görünür güç ve reaktif güç değerleri), eğimli modül yüzeyine gelen ışıma şiddeti ve ortam sıcaklığı değerleri ölçülmüştür. Küresel ışımanın en yüksek değerleri Aralık-Şubat dönemlerinde [$4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], en düşük değerleri Nisan-Mayıs ve Ekim aylarında gözlenmiştir [$2,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]. Ortalama küresel ışıma değeri, 2005 yılında $3,64 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ve 2006 yılında $3,17 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ olmuştur. Ekvatora yakın ülkeler arasında sahip olunabilecek bu en düşük değerlere sebep olarak, dünyanın en uzun sıra sağlarından Andean dağlarına yakın olunması, kesintili bulut iklim koşullarının hâkim olması gösterilmiştir. Ortam sıcaklığı $13-16,5^{\circ}\text{C}$ değerleri arasındadır. 2005 yılında $14,76^{\circ}\text{C}$ olan ortalama sıcaklık, 2006 yılında $13,69^{\circ}\text{C}$ değerindedir. Bogota-Kolombiya’da incelemeye alınan FV güç sisteminin nihai hasat (Y_f) değerinin 2005 yılında $743,93 \text{ kWh}/(\text{kW}_{\text{anma}} \cdot \text{y})$ ve 2006 yılında $669,8 \text{ kWh}/(\text{kW}_{\text{anma}} \cdot \text{y})$ değerinde olduğu gözlenmiştir. Gerçekleştirme oranı (PR) ise $0,44-0,61$ aralığında hayli düşük bir değer göstermektedir. Hem nihai hasat hem de gerçekleştirme oranı değerleri beklenenin altında olup, bunun gerekçesi olarak da sistemde kullanılan 1 kW anma gücündeki eviricinin giriş gücünün düşük olması ve ayrıca şebeke bağlantısında gerilim düşürülmesi için ayrı bir transformatörün kullanılması gösterilmiştir (Aristizabal and Gordillo, 2008).

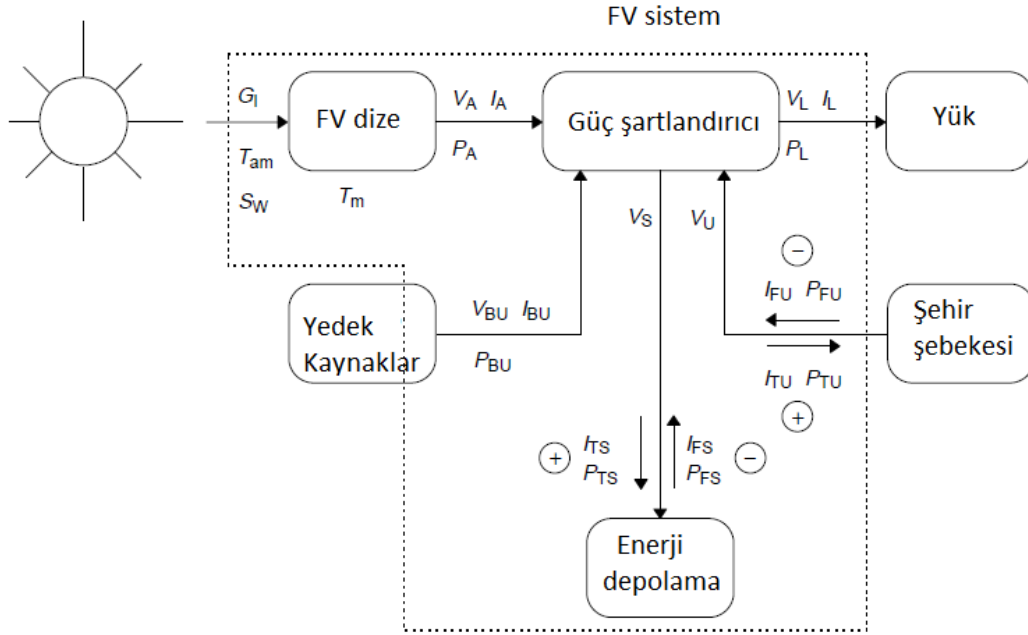
- Metwally, 2005 yılında Almanya’da Kassel Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Fakültesi’nde “Fotovoltaik Yakıt Pili Melez Sistemleri’nin Modellenmesi ve Benzetimi” başlıklı doktora tezini başarıyla tamamlamıştır. İlgili çalışmada, FV güç üreteçlerini, alkalın su elektrolizörünü, depolama gaz tankını, proton değişim membranlı yakıt pili (PEMFC) ve güç şartlandırıcı ünitelerini içeren farklı bağlantı tiplerindeki güç sistemlerinin incelemesi yapılmıştır. FV güç üreteçlerinin ürettiği enerji, gerektiğinde yük gereksinimini doğrudan karşılamış, ihtiyacın üzerindeki üretimlerde ise en fazla 30 bar basınçla alkalın su elektrolizörü kullanılarak hidrojen üretilmiştir. Bu çalışmada, Kassel-Almanya ve Kahire-Mısır konumları için FV yakıt pili güç sisteminin karşılaştırmalı benzetimi ve başarımlar değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, sistem başarımlarının sadece bileşenlerin verimine değil, aynı zamanda sistem tasarımına ve tüketici davranışlarına güçlü bir şekilde bağlı olduğu ortaya çıkmıştır (Metwally, 2005).
- IEA-PVPS raporlarında, farklı ülkeler için FV güç sistemi başarımlar değerleri karşılaştırılmaktadır. İncelemeye alınan 461 adet şebeke bağlantılı FV güç sisteminin yıllık nihai hasat değerinin 700-1840 kWh/(kW_{anma}·y) aralığında değiştiği raporlanmıştır. Şebeke bağlantılı FV güç sistemleri için hesaplanan gerçekleştirme oranlarının (PR) % 70 altında olması durumunda sistem koşullarının yeniden değerlendirilmesi önerilmektedir. Kirlilik, gölge gibi uyumsuzluk koşullarının ortadan kaldırılması gerektiği belirtilmektedir (IEA-PVPS T2-06, 2007).
- Son 20 yıl içinde, FVGS ortalama istatistik gerçekleştirme oranı 0,65 değerinden 0,85 değerine yükselmiştir. Bu iyileşme, FV sistemlerin performanslarının izlenmesi ve izlenen verilerin sürekli analizi sayesinde yakalanmıştır. Gerçekleştirme oranı, 1980’li yıllarda 0,5-0,75 aralığında ve 1990’lı yıllarda 0,65-0,7 arasında değişmekteydi. Günümüzde ise > 0,8 değerlerine yükselmiştir. Sistem çalışma karakteristiklerinin izlenmesinin temel amacı, FV sistemin performansını değerlendirmek ve tasarım hatalarını veya arızaları zamanında tanımlamaktır. Birçok büyük ölçekli FV sistemlerde, işletme sorunları nedeniyle oluşabilecek ekonomik kayıpları önlemek için analitik izleme yapılmaktadır (Muller et al., 2012).
- Günümüzde FV sistemlerinin ölçeği bir hayli büyümüştür. Dolayısıyla, gerçekleştirme oranındaki (PR) çok küçük bir iyileştirme, mali olarak da

kayda değer kazançlar sağlamaktadır. Gerçekleme oranı, sistemin bileşen özelliklerine ve birçok tasarım parametrelerine bağlıdır. Simülasyonu daha doğru yapabilmek için doğru bir veri tabanına ihtiyaç duyulmaktadır (DGS, 2009).

- Pontoriero ve arkadaşları, Arjantin’de kırsal alanda kullanılan güneş ev sistemleri üzerinde bir sistem verimlilik değerlendirmesi yapmıştır. Seçilen 3 sistem, üç yıl boyunca devamlı izleme altına alınmıştır (Pontoriero et al., 1998).

Fotovoltaik ve melez güç sistemlerinin başarımlarını incelemesinde zorunlu olan ölçüm ve değerlendirme değişkenleri, “*TS EN 61724: Fotovoltaik sistem başarımlarını izleme – Ölçüm, veri değişimi ve incelemesi için kılavuz*” başlıklı standart metninde açıklanmaktadır. Bu metinde, FV sistemin *düzlemsel ışınlama, dize çıkışı, depolama girişi ve çıkışı, güç şartlandırıcı girişi ve çıkışı* gibi karakteristiklerinin izlenmesi ve izlenen verinin değişimi ve incelemesi için yöntemler önerilmektedir. Bu yöntemlerin amacı, bağımsız veya şebeke bağlantılı veya jeneratör ve rüzgâr türbini gibi FV güç kaynağı olmayan kaynaklarla melezleştirilerek oluşturulan FV güç sistemlerinin toplam başarımlarını değerlendirmektir. Çubukçu, doktora tezinde, TS EN 61724 standardı kapsamında ölçülmesi istenen ve ölçümlerden türetilen değerlendirme değişkenlerini ayrıntılı olarak açıklamaktadır (Çubukçu, 2011).

TS EN 61724 standardı kapsamında, gerçek zamanlı ölçülmesi gereken değişkenler, Şekil 2.4’de blok şema ve Çizelge 2.1’de liste halinde gösterilmektedir. Çizelge 2.2’de ise ölçülen bu değerlerden yola çıkılarak türetilen ölçütler listelenmektedir.



Şekil 2.4. FV güç sistemlerinde gerçek zamanlı ölçülmesi gereken değişkenler (TS EN 61724, 1999).

Çizelge 2.1. FV güç sistemlerinde gerçek zamanlı ölçülmesi gereken değişkenler (TS EN 61724, 1999).

Değişken	Sembol	Birim
İklim verileri:		
Toplam ışınlım, dize yüzeyinde ¹⁾	G_1	W / m^2
İşinım korumalı ortam hava sıcaklığı	T_{am}	$^{\circ}C$
Rüzgâr hızı ²⁾	S_w	$m.s^{-1}$
Fotovoltaik dize:		
Çıkış gerilimi	V_A	V
Çıkış akımı	I_A	A
Çıkış gücü	P_A	kW
Modül sıcaklığı	T_m	$^{\circ}C$
İzleyici eğim açısı ⁵⁾	ϕ_T	<i>derece</i>
İzleyici yön (azimut) açısı ⁵⁾	ϕ_A	<i>derece</i>
Enerji depolama ³⁾ :		
Çalışma gerilimi	V_S	V
Depolanan akım ⁴⁾	I_{TS}	A
Depodan kullanılan akım ⁴⁾	I_{FS}	A
Depolanan güç ⁴⁾	P_{TS}	kW
Depodan kullanılan güç ⁴⁾	P_{FS}	kW

Yük ³⁾ :		
Yük gerilimi	V_L	V
Yük akımı	I_L	A
Yük gücü ⁶⁾	P_L	kW
Şehir şebekesi ³⁾ :		
Şebeke gerilimi	V_U	V
Şehir şebekesine verilen akım ⁴⁾	I_{TU}	A
Şehir şebekesinden kullanılan akım ⁴⁾	I_{FU}	A
Şehir şebekesine verilen güç ^{4), 6)}	P_{TU}	kW
Şehir şebekesinden kullanılan güç ^{4), 6)}	P_{FU}	kW
Yedek kaynaklar ³⁾ :		
Çıkış gerilimi	V_{BU}	V
Çıkış akımı	I_{BU}	A
Çıkış gücü	P_{BU}	kW
¹⁾ Toplam ışıınım, dize yüzeyindeki ışıınım olarak da bilinir, eğimli birim yüzey alana gelen doğrudan ve yayınık ışıınım gücünün toplamı olarak tanımlanır. ²⁾ Rüzgâr hızı gibi değişkenlerin ölçümü isteğe bağlıdır, fakat FV dizenin aşırı çalışma koşullarına tabi olması durumunda özel bir sözleşme ile zorunlu kılınabilir. ³⁾ a.a. ve d.a. miktarları, alt simgelerin eklenmesi ile ayırt edilebilir. Çok-fazlı sistemlerde, V_L, I_L ve P_L değişkenleri her bir faz için ayrı belirtilmelidir. ⁴⁾ Tek bir akım veya güç algılayıcısı, normalde hem giriş hem de çıkış yönleri için akım veya güç ölçümü için kullanılabilir. Algılayıcının çıkış sinyalindeki pozitif işareti enerji depolama cihazına veya şehir şebekesine giriş olduğunu gösterir, negatif işaret depolama cihazından veya şehir şebekesinden çıkış olduğunu gösterir. Tek bir algılayıcıdan giriş ve çıkış, yazılımda ayrı olarak toplanmalıdır. ⁵⁾ İzleyicili dize sistemlerinde, izleyici açısının ölçümü isteğe bağlıdır. Tek eksenli izleyicilerde, ϕ_T izleme eksenindeki dizinin konumunu tanımlamak için kullanılır. Örneğin, yatay tek eksenli bir izleyici için bu değişken yatay eksenden olan açıyı verecektir, doğu negatif ve batı pozitif olacaktır. ⁶⁾ Güç şartlandırıcının evirici kısmının güç çıkışının doğrudan ölçümü, doğruluğunu arttırıyorsa yapılabilir.		

TS EN 61724 standardına göre, farklı konumlardaki ve farklı yapıdaki FV sistemler, birimlenmiş sistem başarımlar ölçütleri (hasatlar, kayıplar ve verimler) değerlendirilerek karşılaştırılabilirler (Çubukçu, 2011).

- *Hasatlar, dize anma gücüne birimlenmiş enerji miktarlarıdır.*
- *Kayıplar, hasatlar arasındaki farklardır.*
- *Sistem verimleri, dize yüzey alanına birimlenmiştir.*

Çizelge 2.2. FV ve melez güç sistemi incelemesi için türetilen ölçütler (TS EN 61724, 1999).

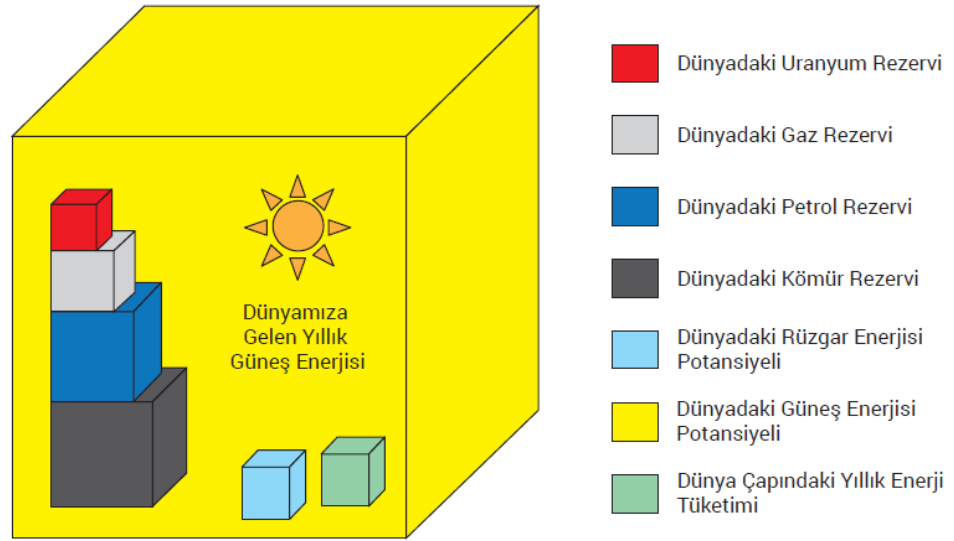
Ölçüt	Sembol	Birim
İklim verileri: Günlük küresel ısıtım, dize düzleminde.	$H_{I,d}$	$kWh.m^{-2}.d^{-1}$
Elektrik enerjisi miktarları:		
Dizeden kullanılan net enerji	$E_{A,r}$	kWh
Yüke verilen net enerji	$E_{L,r}$	kWh
Depolamaya verilen net enerji	$E_{TSN,r}$	kWh
Depodan kullanılan net enerji	$E_{FSN,r}$	kWh
Yedek kaynaklardan kullanılan net enerji	$E_{BU,r}$	kWh
Şebekeye verilen net enerji	$E_{TUN,r}$	kWh
Şebekeden kullanılan net enerji	$E_{FUN,r}$	kWh
Toplam sistem giriş enerjisi	$E_{in,r}$	kWh
Toplam sistem çıkış enerjisi	$E_{use,r}$	kWh
FV sistemin toplam giriş enerjisindeki oranı	$F_{A,r}$	Boyutsuz
Yük verimi	η_{LOAD}	Boyutsuz
Denge bileşenleri başarıımı:		
Denge bileşenleri verimi	η_{BOS}	Boyutsuz
Sistem başarıımı belirteçleri:		
Dize hasadı ¹⁾	Y_A	$h.d^{-1}$
FV sistem nihai hasadı ¹⁾	Y_F	$h.d^{-1}$
Referans hasat ¹⁾	Y_r	$h.d^{-1}$
Dize yakalama kayıpları ¹⁾	L_C	$h.d^{-1}$
Denge bileşenleri kayıpları ¹⁾	L_{BOS}	$h.d^{-1}$
Gerçekleme oranı	R_p	Boyutsuz
Ortalama dize verimi	$\eta_{Amean,\tau}$	Boyutsuz
Tüm FV santral verimi	$\eta_{tot,\tau}$	Boyutsuz
¹⁾ ($h.d^{-1}$) birimi daha tanımlayıcı olarak şu şekilde verilebilir: $(kWh.d^{-1})_{GERÇEK} / (kW)_{ANMA}$		

Yukarıda örnek olarak verilen yayınların sayısını arttırmak mümkündür. Özetle, FV sektörünün önemli bir beklentisi, kurulumu gerçekleştiren sistemlerin bilimsel yöntemlerle uluslararası standartlara uygun olarak gerçek zamanlı izlenmesi ve performans analizinin yapılarak raporlanmasıdır. Bu tez çalışmasının sistem başarıımı incelemesi bölümlerinde de literatürde izlenen benzer yöntemler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların teknik ve mali değerlendirmeleri yapılmıştır.

3. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİ VE BİLEŞENLERİNE GENEL BAKIŞ

3.1. Giriş

Güneş enerjisinin; potansiyeli, kullanım kolaylığı, temizliği, yenilenebilirliği ve çevre dostu olması gibi nedenler ile yaygınlaşma potansiyeli diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazladır (Bkz. Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Dünya enerji kaynakları ve tüketimi.

Güneş 1,4 milyon km çapıyla dünyanın 110 katı büyüklüğünde ve dünyadan 1,5x10¹¹ m uzaklıkta, yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı bir yıldızdır. Yüzey sıcaklığı yaklaşık 6.000 °K olup iç bölgelerindeki sıcaklığın 8x10⁶ °K ile 40x10⁶ °K arasında değiştiği tahmin edilmektedir. Güneş, orta büyüklükte bir yıldızdır ve yaklaşık olarak % 74 hidrojen, % 24 helyum ve % 2 diğer elementlerden oluşmaktadır. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ışıma enerjisidir. Termonükleer bir reaktör olan güneşten çeşitli dalga boylarında (62 MW/m²) enerji yayılmakta ve güneşin bütün yüzeyinden yayılan enerjinin sadece iki milyarda biri yeryüzüne gelmektedir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370 W/m² değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı 0-1100 W/m² değerleri arasında değişim gösterir. Dünyaya güneşten, 150 milyon km kat ederek gelen enerji, Dünyada bir yılda kullanılan enerjinin yaklaşık 10 bin katıdır. Güneşin yaydığı enerji yanında dünyanın enerji gereksinimi çok küçüktür. Dünyaya ulaşan enerji, dünyanın yıllık

enerji talebinin yaklaşık 400 katıdır. Güneş enerjisine bu açıdan bakıldığında, dünyadaki enerji talebini karşılayabilecek kapasiteye sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Güneş ışıınının tamamı yer yüzeyine ulaşamaz, % 30 kadarı atmosfer tarafından geriye yansıtılırken, % 50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile dünyanın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün olur. Rüzgâr hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına da bu ısınma neden olur. Güneşten gelen ışıınının % 20'si ise atmosfer ve bulutlarda tutulur. Yer yüzeyine gelen güneş ışıınının % 1'den azı bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır. Bitkiler, fotosentez sırasında güneş ışığıyla birlikte karbondioksit ve su kullanarak, oksijen ve şeker üretirler. Fotosentez, yeryüzünde bitkisel yaşamın kaynağıdır. Güneş, nükleer enerji dışındaki bütün enerjilerin dolaylı veya direkt kaynağıdır (EQF/NQF, 2014).

Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, böylece güneş enerjisi, temiz bir enerji kaynağı olarak kabul görmüştür. Dünya'ya ısı ve ışık biçiminde ulaşan güneş enerjisi, farklı teknolojilerle günlük yaşamda kullanılabilir hale getirilebilmektedir. Uygulamada kullanım alanı bulan güneş enerjisinin çevrim teknolojilerini genel olarak 3 başlık altında toplayabiliriz.

1. Fotovoltaik Güç Sistemleri (FVGS)

Güneş ışığının doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesini sağlayan yarı iletken teknolojisi tabanlı güç sistemleridir. Üretimi ileri teknoloji gerektirirken, kurulum sonrasında sifıra yakın bir işletim maliyeti ile 25-30 yıl boyunca elektrik üretebilmektedirler. Çatı (Bkz. Şekil 3.2) veya tarımsal uygulamalar gibi küçük ölçekli sistemlerin yanında, şehir şebekesini besleyen MW kapasiteli büyük ölçekli sistemler (Bkz. Şekil 3.3) de dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. FVGS çatı uygulaması.



Şekil 3.3. Büyük ölçekli FVGS uygulaması, Waldpolenz, Almanya.

2. Odaklayıcı Güneş Isıl Güç Sistemleri (CSP)

Bu teknoloji, güneş ışığının odaklanması ve elde edilen ısıya türbinler vasıtasıyla elektrik enerjisine çevrilmesi temeline dayanır. Daha çok çöl gibi yüksek ışıma altındaki coğrafyalarda kullanılan bu sistemlerin (Bkz. Şekil 3.4) küçük ölçekli kurulumları pek mümkün değildir.



Şekil 3.4. Odaklayıcı güneş ısı güç sistemleri (CSP).

3. Güneş Isıl Toplayıcıları

Bu sistemler Türkiye’de yaygın olarak kullanılan, elektrik üretimine dayalı olmayıp sıcak su eldesi gibi amaçlarla kullanılan sistemlerdir (Bkz. Şekil 3.5). Bu sistemler ısıнын yüksek oranda emilmesi ve hareketli akışkanlara transfer edilmesi prensibine dayanır ve çeşitli büyüklüklerde kurulabilmektedirler.



Şekil 3.5. Güneş ısı toplayıcı sistemi.

3.2. Fotovoltaik Sektörünün Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik etki, ilk olarak 1839 yılında, o zaman 19 yaşında olan Fransız fizikçi Edmond Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Buna göre bir eriyikte bulunan iki platin elektrotuna güneş ışığı düştüğünde, bir elektrik akımı meydana gelir. Ancak bu önemli buluşun etkisi, o yıllarda teknolojinin temelinin iyi anlaşılamaması ve geliştirilip uygulama alanı yaratılamaması nedeniyle çok küçük olmuştur.

1904 yılında ise Albert Einstein, fotoelektrik etki ve ışığın kuantum doğası hakkındaki ünlü çalışması ile bu teknolojiye ışık tutmuştur. Bu çalışması Einstein'a 1921 de Nobel Ödülü kazandırmıştır. 1946 yılında ise Russell Ohl modern jonksiyon yarıiletken fotovoltaik hücrelerin patentini almıştır.

Uygulamalarda kullanılabilen bir fotovoltaik hücrenin yapımı ise ancak yarıiletken teknolojisi geliştikten sonra mümkün olmuştur. Özellikle yüksek derecede saf silisyumun geliştirilmesi, önemli bir adım olmuştur. Silisyum günümüzde de fotovoltaik hücre üretiminde kullanılan en önemli malzemedir.

İlk silisyumlu fotovoltaik hücre ABD'deki Bell Laboratuvarlarında, Chapin, Fuller ve Pearson adlı bilim adamları tarafından 1954 yılında geliştirilmiştir. Bu hücre o yıllarda % 6 oranında bir verime sahiptir ve kısa süre içinde bu verim % 10 'a kadar yükseltilmiştir.

Fotovoltaik teknolojisinin ilk yıllardaki en önemli uygulama alanı uzay çalışmaları olmuştur. İlk önemli kullanımı, Vangard adlı uyduda 108 tane fotovoltaik hücre ile 1958 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu hücreler beklentilerin üzerinde performans göstererek uyduya beklenenden çok daha uzun süreyle elektrik sağlamıştır. Böylelikle, kısıtlı ama yüksek kaliteli bir fotovoltaik hücre piyasası gelişmeye başlamıştır.

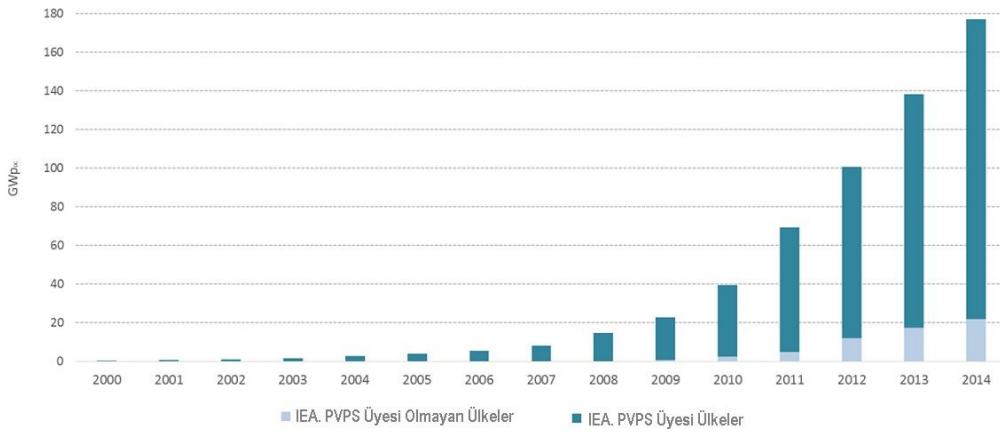
Yüksek maliyeti nedeniyle, fotovoltaik teknolojisinin uzay teknolojisi dışındaki alanlarda kullanılması ise uzun süre mümkün görülüyordu. Yine de bu hücrelerin sağladığı avantajlar hem bilim adamlarını, hem de toplumun hayal gücünü tetiklemeye devam ediyordu. Bu nedenle konuyla ilgili araştırmalar hiçbir zaman tamamıyla durmadı.

Fotovoltaik hücreler zamanla şebekeden bağımsız elektrik tedarik sistemlerinde uygulanmaya başlandı. Uygulamalar hesap makineleri ve saatlerle başlayıp zamanla daha büyük cihaz ve tesislere yayıldı.

Dünya genelinde, 1973 yılında yaşanan petrol krizinden sonra, yeni enerji kaynaklarına olan ihtiyaç artmıştır. Günümüzde de bu sektöre gösterilen ilginin ve dolayısıyla üretimlerin artmasıyla birim maliyetler uygun seviyelere inmekte, böylelikle yüzlerce MW lık güneş enerjisi santralleri kurulabilmektedir.

1990'lı yılların sonunda, FV sistemlerin bina çatılarına entegre olarak kullanılması ve üretilen enerjinin elektrik şebekesine verilmesi yöntemi, yaygınlık kazanmaya başlamıştır.

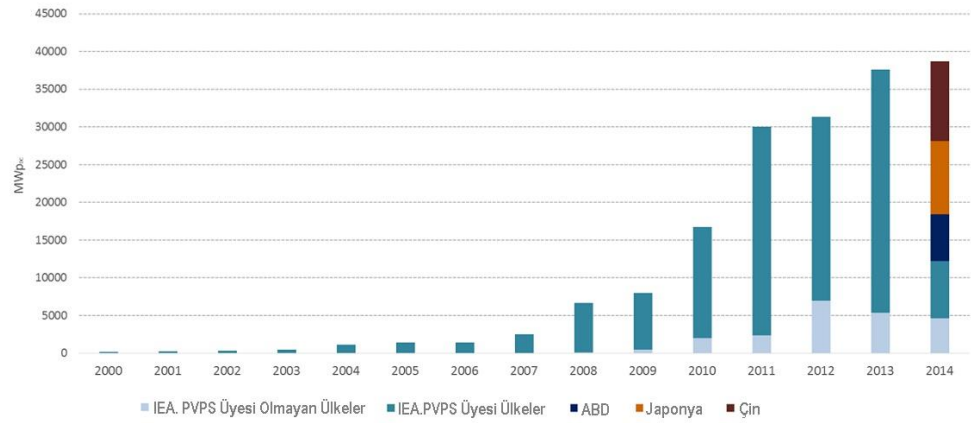
Avrupa Fotovoltaik Sanayi Birliği (EPIA) verilerine göre, küresel kümülatif FV kapasitesi ilk büyük artışını, 2008 yılında gerçekleştirmiştir. Bu kaydadeğer büyüme, ilerleyen yıllarda da devam etmiştir (EPIA, 2014). Küresel kümülatif fotovoltaik kurulu güç kapasitesinin büyümesi, Şekil 3.6'da gösterilmektedir. 2014 yılı sonu itibariyle, kurulu güç kapasitesi 180 GW değerine ulaşmıştır (IEA-PVPS T1-26, 2015).



Şekil 3.6. FVGS kümülatif kurulu güç kapasitenin yıllara göre değişimi
(IEA-PVPS T1-26, 2015).

2012 yılına kadar gerçekleşen küresel kurulum kapasitesinin, % 70'lik bir dilimi, Avrupa ülkelerine aitti. Avrupa ülkelerinde, devlet tarafından verilen teşvikler bu başarıya sebep olmuştur. Öte yandan, son yıllarda Avrupa'nın pazar payında ciddi bir düşüş yaşanmıştır. Günümüzde, bu pazar payı % 30'ların altına

çekilmiştir. Küresel pazardaki büyümeye karşın, Avrupa’da FV sektöründe küçülme olmuştur. 2013 yılında 11 GW’lık yıllık kurulumu olan Avrupa pazarı, 2014 yılında 7 GW’a düşmüştür. Avrupa’nın yıllık kurulumunda, % 36’lık bir düşüş gerçekleşmiştir (EPIA, 2014). Yıllık FV kurulu güç kapasitesinin değişimi, Şekil 3.7’de gösterilmektedir. 2014 yılında, küresel olarak 38,7 GW kurulum gerçekleşmiştir. Çizelge 3.1’de FV Sektörünün 2014 yılı ve kümülatif ölçekte lider 10 ülkesi listelenmektedir (IEA-PVPS T1-26, 2015).



Şekil 3.7. FVGS yıllık kurulu güç kapasitenin yıllara göre değişimi
(IEA-PVPS T1-26, 2015).

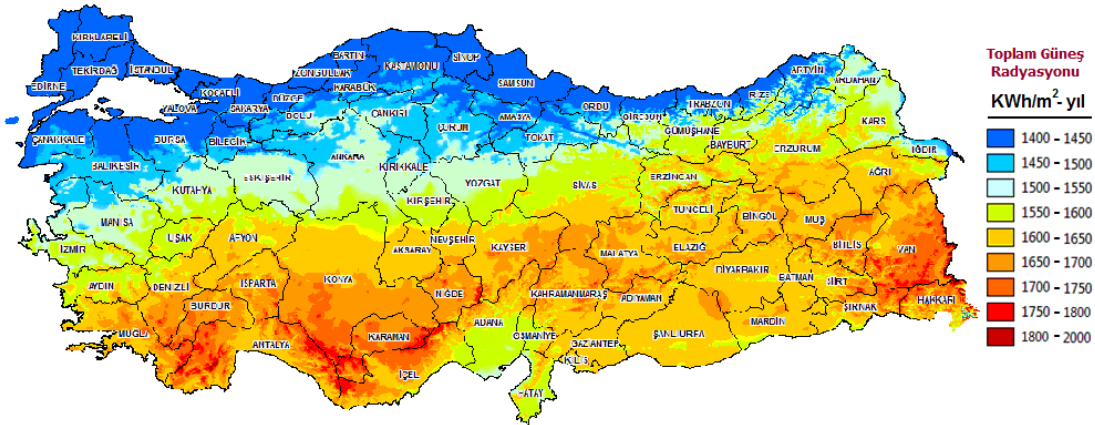
Çizelge 3.1. FV Sektörünün 2014 yılı ve kümülatif ölçekte lider 10 ülkesi
(IEA-PVPS T1-26, 2015).

	Yıllık Kurulu Güç Kapasitesi (2014)	Kümülatif Kurulu Güç Kapasitesi
1	Çin: 10,6 GW	Almanya: 38,2 GW
2	Japonya: 9,7 GW	Çin: 28,1 GW
3	ABD: 6,2 GW	Japonya: 23,3 GW
4	Birleşik Krallık: 2,3 GW	İtalya: 18,5 GW
5	Almanya: 1,9 GW	ABD: 18,3 GW
6	Fransa: 0,9 GW	Fransa: 5,7 GW
7	Avustralya: 0,9 GW	İspanya: 5,4 GW
8	Güney Kore: 0,9 GW	Birleşik Krallık: 5,1 GW
9	Güney Afrika: 0,8 GW	Avustralya: 4,1 GW
10	Hindistan: 0,6 GW	Belçika: 3,1 GW

3.3. FV Sektörünün Türkiye’deki Durumu

Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre 380 TWh/yıl olarak ifade edilmektedir. Türkiye bulunduğu coğrafi konum (36-42° kuzey enlemleri ve 26-45° doğu boylamları arasında) nedeniyle güneş enerjisi bakımından dünyanın şanslı bir bölgesinde bulunmaktadır. Devlet Meteoroloji İşlerinin güneşlenme süresi ve ışıyım şiddeti ölçümlerine dayanarak YEGM (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü) bölgesel güneş enerjisi potansiyelini çıkarmıştır. Bu çalışmaya göre, Türkiye’nin yıllık ortalama güneşlenme süresi 2640 saat, günlük olarak ortalama 7 saat, ortalama ışıyım şiddeti ise 1311 kWh/m² olduğu tespit edilmiştir (EQF/NQF, 2014).

Türkiye’de güneyden kuzeye doğru gidildiğinde yayılı ışıyımın giderek artacağı öngörülebilir. Bunun yanı sıra, kuzey bölgelere gidildikçe günlük ışıyım değerlerinde bir azalma da gözlenir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli.

Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili temel kanun, 2005 yılında kanunlaşan 5346 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” dur. Bu kanuna ilişkin son değişiklik, 8 Ocak 2011 tarihinde (Kanun No: 6094) gerçekleştirilmiş ve farklı yenilenebilir enerji kaynakları için farklı satın alma fiyatları belirlenmiştir. Kanun kapsamında, güneş enerjisine dayalı üretim tesisleri için on yıl süreyle 13,3 \$cent/kWh alım garantisi verilmiştir. Yerli üretim durumunda ise üretim tesisinin işletmeye giriş tarihinden itibaren beş yıl süreyle aşağıdaki ilave destekler öngörülmüştür:

- “PV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı”, (+0,8 \$cent/kWh)

- “PV modülleri”, (+1,3 \$cent/kWh)
- “PV modülünü oluşturan hücreler”, (+3,5 \$cent/kWh)
- “Evirici”, (+0,6 \$cent/kWh)
- “PV modülü üzerine güneş ışınını odaklayan malzeme”, (+0,5 \$cent/kWh)

Mevzuat gereğince, 1 MW üstündeki kurulumlarda, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’na (EPDK) başvurarak lisans alma zorunluluğu bulunmaktadır. Lisanslı güneş enerjisi santralleri için 2015 sonuna kadar bağlantı izni verilen konumlar, Bakanlık tarafından yayınlanmıştır (Bkz. Şekil 3.9). Her bir trafo merkezi bazında, bağlanabilirlik kapasitesi Bakanlıkça yayınlanmıştır. 2015 yılı sonuna kadar kurulması planlanan toplam 600 MW gücündeki lisanslı güneş enerjisi santralleri için de Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’na Haziran 2013 içerisinde başvurular yapılmıştır. 500’e yaklaşan toplam başvuru kurulu gücü 9 GW’a yaklaşmıştır. Lisanslı güneş enerjisi santralleri için 600 MW sınırına karşın, yatırımcı ilgisinin hayli yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Yönetmeliğe uygun olarak, izin verilen bağlantı kapasiteleri dikkate alınarak, başvuru yapan firmalar arasında ihale yapılmıştır.



Şekil 3.9. Güneş enerjisine dayalı elektrik üretim tesisi bağlanabilir konumlar.

< 1 MW gücündeki yenilebilir güç santrallerinde ise lisans alma zorunluluğu yoktur. Bu gruptaki enerji üreteçleri, lisanssız mevzuatına tabidir ve uygulama sayılarında hızlı bir artış görülmektedir. 2015 yılının ilk yarısının sonunda, Türkiye’de kurulu kümülatif lisanssız Fotovoltaik Güç Sistemi (FVGS) gücü 100 MW’a yaklaşmıştır (Enerji Atlası, 2015). Lisanslı FVGS’lerin kurulmasıyla birlikte, Türkiye’nin fotovoltaik temelli güneş enerjisi santralleri gücünün

önümüzdeki yıllarda hızla artması beklenmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2015-2019 Stratejik Planına göre, önümüzdeki 4 yıl boyunca FVGS kurulu güç kapasiteleri şu şekilde olacaktır: 2015: 300 MW, 2017: 1800 MW ve 2019: 3000 MW. (ETKB 2016-2019 Stratejik Planı, 2014).

3.4. Fotovoltaik Teknolojisi

Fotovoltaik etki, güneşteki fotonların soğurulması ile d.a. gerilim üretimidir. Mevcut durumda FV etkinin özel tasarlanmış yarıiletkenlerle üretildiği bilinmektedir. Bu etkinin sonucu, ışıma enerjisinin ısılmayan doğrudan yolla elektrik enerjisine dönüşümüdür (TSE CLC/TS 61836, 2010). Fotovoltaik kelimesi, “Photo” ve “Volt”, kelimelerinin birleşiminden oluşmaktadır. “Photo” kelimesi, Yunanca ışık anlamına gelir. “Volt” kelimesi ise, bir noktada elektrik potansiyelinin ölçümüdür. Özetle, güneş ışığı bir FV modülün yüzeyine geldiği zaman, ışınımın bir miktarı soğurulur ve elektrik enerjisine çevrilir. Soğurulamayan ışınım, modülün yüzeyinden yansır ve elektrik enerjisine dönüştürülemeden kaybedilir.

3.4.1. Farklı FV Teknolojileri

Fotovoltaik etki ile elektrik enerjisi üretimi için günümüzde pek çok değişik teknoloji ve malzeme kullanılmaktadır. En temel, bilinen ve yaygın uygulama, enerji yoğun bir süreçle üretilen kristal silisyum temelli FV malzemelerdir. Bu ürünler hâlihazırda ticari piyasanın neredeyse tümünü oluşturmaktadır. Bununla birlikte pazarda kullanılabilirliğini kanıtlamış başka teknolojiler de bulunmaktadır.

Fotovoltaik teknolojileri aşağıdaki başlıklarda sınıflandırılabilir:

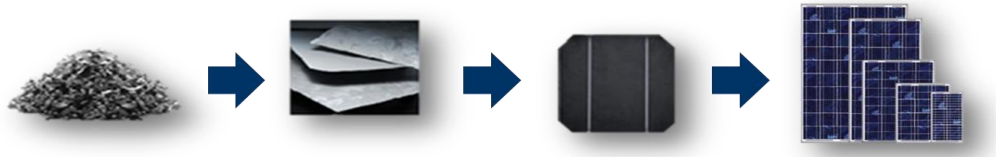
1. Dilim tabanlı kristal silisyum teknolojisi (c-Si)
 - i. Tek kristal silisyum teknolojisi
 - ii. Çok kristal silisyum teknolojisi
2. İnce film teknolojileri
 - i. İnce film silisyum teknolojisi: Amorf/mikromorf silisyum (a/ μ m-Si)
 - ii. Kadmiyum Tellür ince film teknolojisi (CdTe)

- iii. Bakır İndiyum Galyum Selenür Sülfür ince film teknolojisi, Cu(In,Ga)(Se,S)_2 (CIGS).
- 3. Odaklamalı Fotovoltaik (CPV) teknolojisi
- 4. Yeni ve Gelişen FV Hücre Teknolojileri (Boya-duyarlaştırmalı, Organik FV hücre)

Farklı FV teknolojileri, aşağıda kısaca özetlenmiştir (UFTP, 2012):

1. **Dilim tabanlı kristal silisyum teknolojisi (c-Si):** Bu teknoloji, 50 seneye yaklaşan geçmişi ile günümüzde birinci nesil teknolojisi olarak bilinmekte olup dünyadaki toplam FV üretiminin yaklaşık % 80'ini oluşturmaktadır. Bu teknolojiye tek- ve çoklu- kristal Si dilimler kullanılmaktadır. c-Si teknolojisi üretim zinciri 4 temel adımdan oluşmaktadır: Poli-Si, Dilim, Hücre ve Modül Üretimi (Bkz. Şekil 3.10). Tek c-Si kristalleri eriyikten gülle halinde çekilerek (Czochralski yöntemi), çoklu c-Si ise poli-Si hammaddesinin büyük kaplar (700–1000 kg) içerisinde eritilerek elde edilmektedir. Büyütülen kristaller veya kütükler daha sonra kılcal tellerle dilimlenerek hücre yapımındaki dilimleri oluştururlar. Üretimindeki ucuzluk ve kütle imalatı nedenleriyle çoklu-Si dilim teknolojisi ile üretilen modüller, c-Si pazar payının %60'ına yakın bir kısmını da oluşturmaktadır. Ticari c-Si modül verimlilikleri; tek-Si modüllerde % 14–20, çoklu-Si modüllerde ise % 12–17 aralarında değişmektedir. Kristal büyütme ve dilimleme süreçlerini de içerisine alan 60–100 MW birim kapasiteli c-Si hücre ve modül üretim hatları, 50 yıla yaklaşan teknoloji ve donanım olgunluğu sayesinde, 1,5 yıl gibi kısa bir sürede kurulup işletmeye alınabilmektedir. Standart süreçler teknoloji patenti gerektirmediği için, cihaz üreten firmalar, ürünlerinin yanı sıra süreçleri de birlikte sunabilmektedir. Bu yaklaşım ile kristal büyütülmesinden başlayarak, hücre verimli modül üretimine kadar kalite garanti eden firmalar mevcuttur. c-Si teknolojisinin temel hammaddesi olan Poli-Si üretiminin %80 ini oluşturan Siemens süreci, saf silan ve triklorasilan gazlarının reaksiyon çemberinde, elektrik akımıyla 1100–1175°C sıcaklıklarına çıkarılan poli-Si filamanlar üzerinde hidrojen gazı ile indirgenmesiyle oluşmaktadır. Diğer bir yöntemde düşük sıcaklıklardaki (750°C) akışkan yatak süreci (AY) "Fluidized-bed" olup, burada da tetrahidrosilan (veya triklorasilan) gazının hidrojen ile indirgenmesiyle elde edilen silisyumun karışımındaki yatak üzerine konulan poli-Si çekirdek kristaller üzerinde büyümesi ile gerçekleşmektedir. Günümüzde

hala 220 μm dilim kalınlığında hücreler ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Öte yandan, bazı firmalar tarafından hâlihazırda 180 μm kalınlıklardaki tek- ve çoklu-Si dilimler kullanılmaktadır. FV modül fiyatlarının daha da düşebilmesi; hammadde fiyatlarının, kullanılan dilim silisyum inceliğinin daha da düşmesi, dilimleme sırasındaki kayıpların azaltılması ve buna paralel olarak üretim süreç ve hücre verimliliklerinin artmasına bağlı olacaktır. Tahminler, 2020 yılına kadar üretim makinelerindeki gelişmeler ile, dilim kalınlığının $\leq 100 \mu\text{m}$ 'ye düşmesi ve hücre verimliliklerinin $\geq \% 20$ değerlerine ulaşacağını göstermektedir.



Şekil 3.10. c-Si teknolojisi üretim zinciri.

2. İnce film teknolojileri: Tüm ince film teknolojileri FV modül imalatında yüksek kapasite, hız ve düşük imalat fiyatı potansiyeline sahiptir. 2. nesli temsil eden ve günümüzde üretime geçmiş yarı-iletken tabanlı ince film FV teknolojileri şunlardır:

- İnce Film Si (amorf, mikro ve nano-Si).
- Kadmiyum Tellür (CdTe)
- Bakır İndiyum Galyum Selenür (veya Sülfür) (CIGS)

İnce film hücrelerini oluşturan aktif yarı-iletken tabaka kalınlıkları 2–8 μm arasında değişmektedir. Bu üç teknolojinin ortak yanları, cam veya esnek taşıyıcılar üzerine inşa edilmeleri, hücre yapımında saydam iletken oksit (TCO) ve metal tabakalar kullanmaları ve büyük alanlı modül üretiminde hücrelerin YAG-lazer ile hızla kesilip seri olarak bağlanarak yüksek voltaj verebilmeleridir. Bu teknolojilerin üretim donanımları ise c-Si teknolojisinin aksine düşük sıcaklık ve az malzeme kullanımı ilkesi üzerine tasarlanmış olup otomasyona uygundur. İnce film modül üretiminde kullanılan süreç adımları, c-Si teknolojisine göre daha azdır (Bkz. Şekil 3.11). Düşük sıcaklık, az malzeme ve seri üretim özellikleri ince film hücrelerinin enerji geri ödeme sürelerini kısaltmaktadır. Laboratuvarlarda üretilen ince film hücrelerden elde edilen verim cesaret

vericidir. Enerji dönüşüm verimlilikleri küçük alanlı laboratuvar hücrelerinde; a-Si için % 8–9, a/ μ m–Si:H için >% 14, CdTe için % 16,5 ve CIGS için % 19,5 seviyelerine ulaşmıştır. Bununla birlikte, büyük alanlı ticari modüllerin verimi de; a-Si % 6–7, a/ μ m–Si:H % 9–10, CdTe % 11 ve CIGS % 12 civarındadır. İnce film FV modül üreticileri, c-Si modüllerinde olduğu gibi ilk 10 sene sonunda % 90 verim ve sonraki 25 sene sonunda % 80 verimi garanti etmektedirler. Küçük ve büyük alanlı hücreler arasındaki verim farkı ise, ince film malzeme özelliklerinin, bilhassa büyük alanlı modül üreten süreçlerde, yeknesaklığını koruyamaması ve lazer seri bağlantısından kaynaklanabilen direnç kayıplarından kaynaklanabilmektedir. İnce film modüllerinin satış fiyatları c-Si modüllere göre daha ucuz olmasına rağmen, düşük verimleri nedeniyle aynı güçteki sistemler için daha fazla kurulum alanı gerektirirler. Bu nedenle sistem kurulum maliyet payları toplamda c-Si da % 5 iken ince filmlerde % 20 kadar olabilmektedir. Bununla birlikte, ince film modüllerin gün boyu topladıkları enerji, düşük sıcaklık katsayıları sebebiyle, özellikle güneş ışınımının fazla olduğu coğrafyalarda, c-Si modüllerin günlük verimiyle boy ölçülebilmektedir.



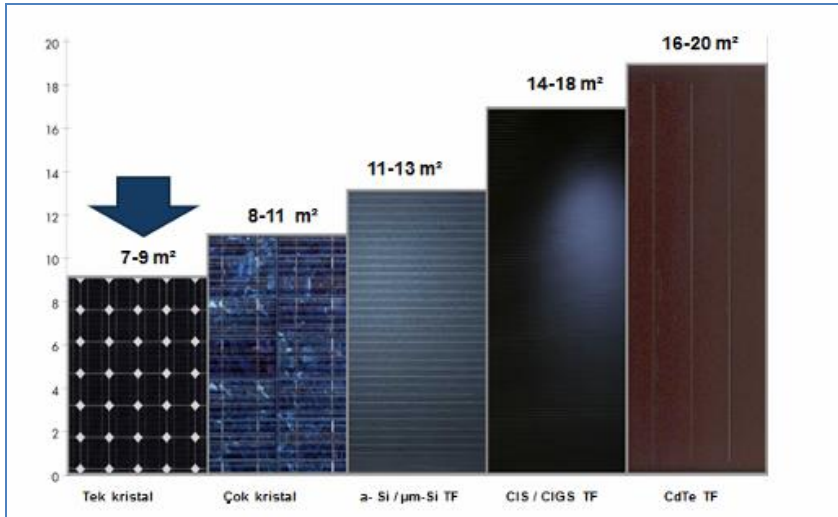
Şekil 3.11. İnce film teknolojisi değer zinciri.

- 3. Odaklamalı fotovoltaiik teknolojisi (Concentrated PhotoVoltaics, CPV):** Odaklamalı FV hücre teknolojisi, yarı-iletken materyallerin inceltirilerek kullanımlarının azaltılmalarının yanı sıra, güneş konsantrasyonu (XG) kullanarak hücre verimliliklerinin arttırılmasına alternatif bir strateji oluşturmuştur. Burada güneş ışını, su ile soğutulan hücreler üzerine mercek veya akrilik Fresnel aynaları ile odaklanarak konsantrasyon artışı ile artan elektrik gücü elde edilmektedir. Sistem verimlilikleri açısından en çok güneşli coğrafyalara uygun bir teknolojidir. Hücrelerin seri ve paralel bağlanarak elde edilen modüller güneşi takip eden 2-eksenli sistemler üzerine monte edilerek yüksek verim

sağlayabilmektedirler. Hücre verimi konsantrasyon ile arttığı için modül üretiminde küçük alan (birkaç mm²) ve yüksek verimli (>% 20) hücreler kullanılabilmektedir. CPV sistemlerinde, alçak ışınımlarda (1–3 XG) Si teknolojisi orta konsantrasyonda (3–100 XG) Si veya GaAs ve yüksek konsantrasyonlarda (>300 XG) ise çok-eklemlili (Si/Ge, GaAsP) hücreler kullanılmaktadır. CPV teknolojisindeki verimler ise; çok-eklemlili laboratuvar hücrelerde, Örneğin; GaInP/GaInAs /Ge, % 41,6 (Spectrolab), ticari hücrelerde % 35–39, modüllerde ise % 25–29 seviyelerindedir.

- 4. Yeni ve gelişen FV hücre teknolojileri:** Boya ile duyarlaştırılmış ve organik güneş hücreleri yeni gelişmekte olan teknolojiler olup, hücre verimlilikleri ve büyük alanlı modül imalatı açısından henüz inorganik ince film teknolojileri kadar gelişmemiştir. Bununla beraber üretiminde kullanılacak hammaddelerin ucuzluğu ve kaplama metotlarının basitliği nedenleriyle, düşük verimliliklerde olsa bile birçok alanda uygulama bulabileceklerdir. Bu teknolojinin daha da iyileştirilip geliştirilmesinde Ar-Ge yapan üniversite ve enstitülerin yanı sıra, üretim faaliyetlerini başlatan firmalar da bulunmaktadır.

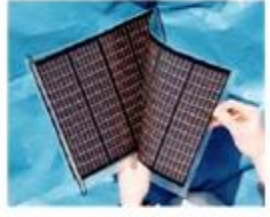
Pazarda yer alan farklı FV teknolojilerinin verimi, Çizelge 3.2’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca, 1 kW FVGS için gerekli alan karşılaştırması Şekil 3.12’de verilmektedir.



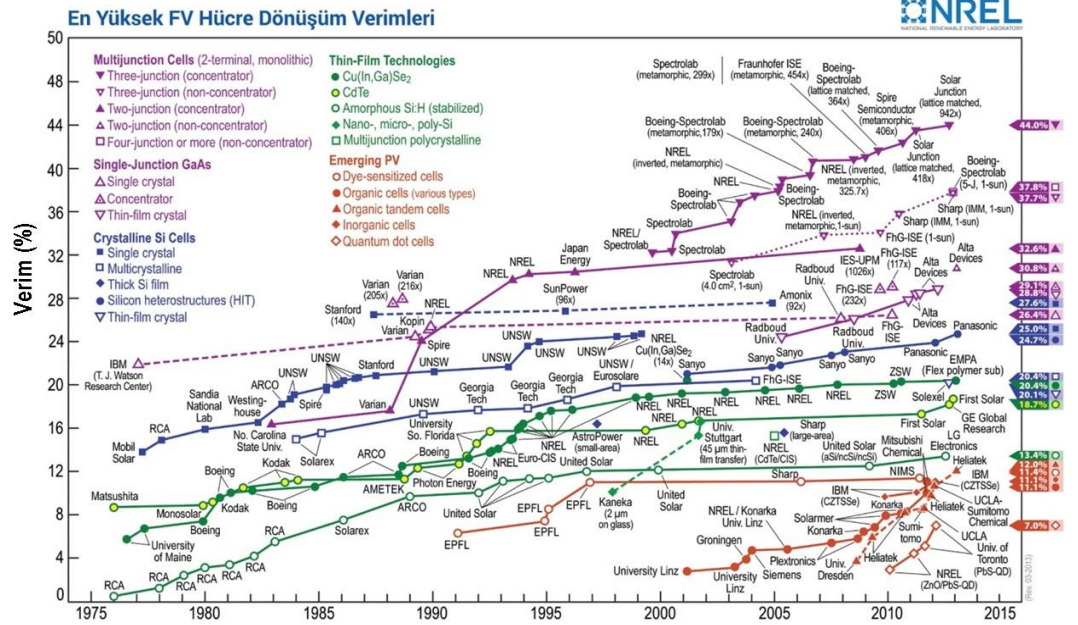
Şekil 3.12. 1 kW kurulu güç için farklı FV teknolojilerinde gerekli alan.

Çizelge 3.2 Pazarda yer alan farklı FV teknolojilerinin verim karşılaştırması.

Teknoloji:	Teorik Verim (%)	Panel Verimi (%)
Tek-kristal silisyum (c-Si)	24–25	13–20
Çok-kristalil silisyum (mc-Si)	15–20,3	12–18
Amorf silisyum (a-Si)	12,1	5–7
Kadmiyum Tellürid (CdTe)	13–18	9–11,1
CIS, CIGS teknolojileri	7–19,9	7–11

Tek-Kristal	Çok-Kristal	a-Si/c-Si	CdTe	Organik
				

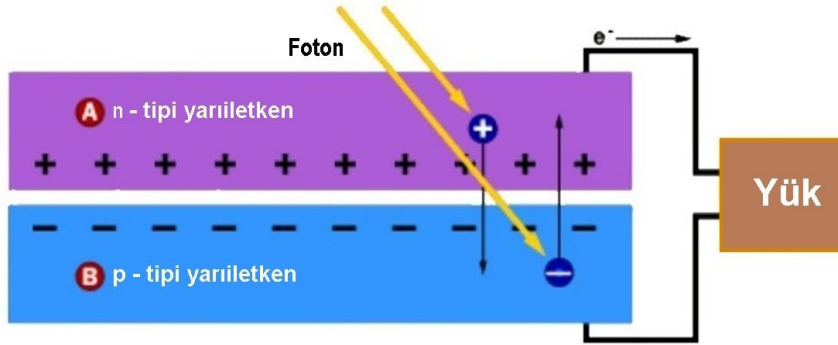
Günümüzde üzerinde çalışılan bütün teknolojiler ve vaad ettikleri ışık-elektrik dönüşüm verimleri Şekil 3.13’de gösterilmiştir (EQF/NQF, 2014).



Şekil 3.13. FV hücre teknolojileri ve dönüşüm verimleri.

3.4.2. Çalışma Prensibi

Bir FV hücrenin basit yapısı ve temel çalışma prensibi, Şekil 3.14’de gösterilmektedir. Bir FV hücrenin yapısı, basitçe p ve n tipi eklemlerden oluşan diyotlara benzer. Güneş ışığı eklem üzerine geldiği zaman, fotonlar tarafından kopartılan elektronlar harekete geçirilir ve elektronların bir eklemden diğer eklemeye akışı başlar. Dolayısıyla, bu akış bir elektrik akımı ve eklemler arasında bir elektrik alanı oluşturur.



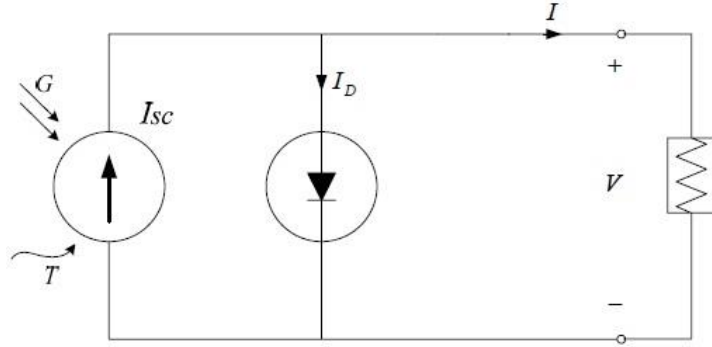
Şekil 3.14. FV hücrenin temel çalışma prensibi.

Fotovoltaik hücre yapımında çeşitli malzemeler kullanılıyor olursa da, günümüzde en yaygın kullanılan malzeme silisyumdur. Saf kristal silisyum, elektriksel olarak zayıf yarıiletken olarak tanımlanmaktadır. Çünkü saf kristal yapısında elektronlarının tamamı kilitli bulunmaktadır. Ancak katkılandırılması durumunda, iletkenlik özelliği kazanmaktadır. Bu nedenle, fotovoltaik teknolojisinde, saf kristal yerine katkılanmış silisyum (n-tipli silisyum ve p-tipli silisyum) kullanılmaktadır. n-tipli silisyum elde etmek için silisyum erisine periyodik cetvelin 5. Grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Değerlik elektron sayısı 5 olan fosforun 4 elektronu, silisyumun son yörüngesindeki 4 elektronla bağlantıyı sağlar ve beşinci elektronu açıkta kalır. Açıkta kalan bu elektron, bir uyartım enerjisi ile son yörüngesinden ayrılabilir. p-tipli silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum veya bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur. Bu elektron yokluğuna, “boşluk” denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de “p-tipi” ya da “alıcı” katkı maddeleri denir. Böylece, p ya da n tipli yarıiletkenlerle tabakalandırılan fotovoltaik hücre, güneş ışığı ile uyarıldığında, emilen fotonların enerjisi, malzemedeki elektronları hareket ettirir ve eklem bölgesinde bir potansiyel farkı oluşturulur. Sonuçta,

dışarıda bir yükün de devreye bağlanmasıyla, akım akışı sağlanır ve DC güç meydana getirir (Bkz. Şekil 3.14).

3.4.3. Fotovoltaik Hücresinin Elektriksel Modeli

İdeal bir fotovoltaik üreteç, Şekil 3.15’de gösterildiği gibi bir diyot ve paralel bir akım kaynağı kullanılarak modellenenebilir. Akım kaynağı, güneş kaynaklı ışık şiddeti G ile direkt orantılıdır. Şekildeki diyot, fotovoltaik üretecın, p-n geçiş bölgesini temsil etmektedir.



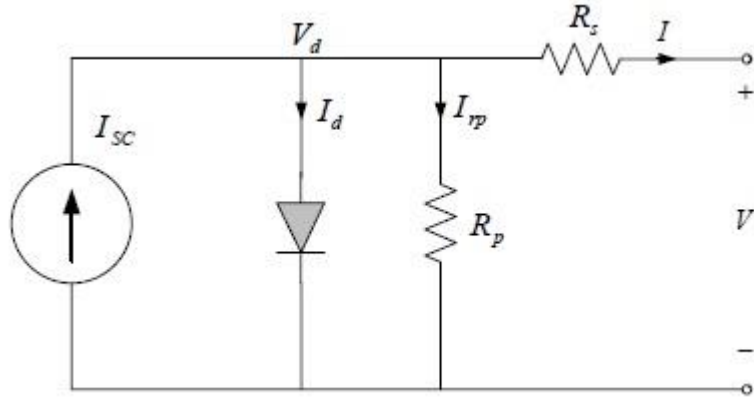
Şekil 3.15. FV hücresinin basitleştirilmiş eşdeğer devresi.

Basitleştirilmiş eşdeğer devrenin akım gerilim (I-V) denklemi, Kirchhoff’un akım kanunundan çıkarılabilir

$$I_{sc} = I - I_D = I - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right)$$

$$25^\circ\text{C için } I = I_{sc} - I_0 (e^{38.9V} - 1)$$

FV üretecın basitleştirilmiş eşdeğer devresi, FV hücresinin elektriksel en ideal gösterimini sunmaktadır. Gerçekte, harici kontaklar üzerinde de gerilim düşümü gözlenir. Buradaki gerilim kaybı, seri bir R_s direnci ile ifade edilebilir. Ayrıca paralel bir R_p direnciyle ifade edilecek olan sızıntı akımı da gözlenir (genelde R_p çok büyük seçilir, yani $R_p > R_s$). Sonuç olarak bu kayıpları da dikkate alan ve Şekil 3.16’da gösterilen eşdeğer devre elde edilir.



Şekil 3.16. FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi.

Şekil 3.16’da gösterilen temel elektriksel parametrelere ilişkin şu hususlar vurgulanabilir:

- **Fotovoltaik akım (I_{SC}):** Fotovoltaik üreteç üzerine düşen ışık radyasyonu ile doğru orantılıdır.
- **Diyot akımı (I_D):** Gerilime ve sızıntı akımına bağlıdır.

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right)$$

- **Paralel kol akımı (I_p):** Paralel kol direncindeki eklem gerilimi etkisi ile ortaya çıkan akımdır. Paralel kol direnci R_p , n ve p eklemeleri boyunca akan elektronlara bağlı olarak ortaya çıkan kaybı belirler (Dönmez, 2009).

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + IR_s}{R_p}$$

- **Hücreden akan çıkış akımı (I):** Aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir.

$$I = I_{SC} - I_D - I_p$$

$$I = I_{SC} - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

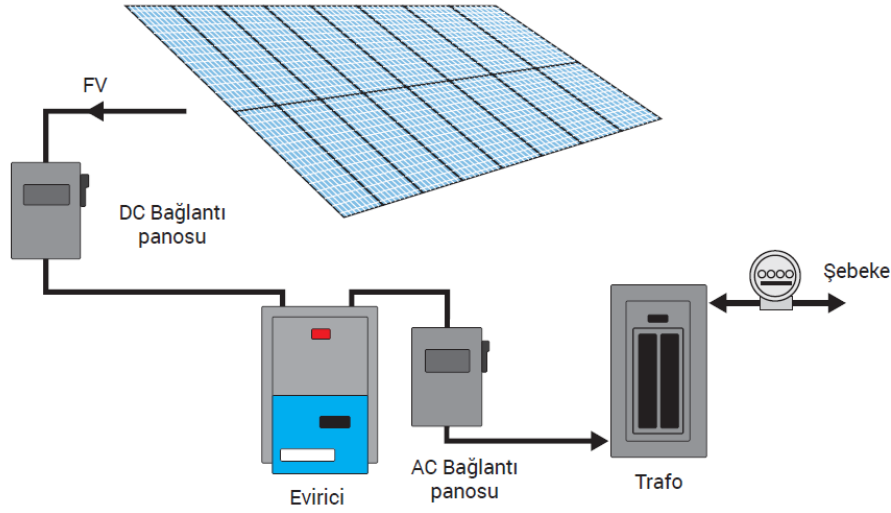
3.5. FVGS Bileşenleri

Tipik bir FVGS uygulamasında, sistem çıkışında elde edilen doğru gerilim, uygun güç şartlandırıcıları aracılığıyla doğrudan kullanılabilceği gibi, eviriciler yardımıyla alternatif gerilime dönüştürölerek de kullanılabilir.

Uluslararası Enerji Ajansı – Fotovoltaik Güç Sistemleri (IEA–PVPS) bünyesinde yapılan çalışmalarda, farklı FVGS uygulamaları 4 ana başlıkta toplanmıştır.

- Evsel bağımsız FVGS: Şebeke bağlantısı olmayan bir evin ya da küçük yerleşim alanının (köy vb.) ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini akülerde depolayarak karşılayan bağımsız güç sistemleridir.
- Evsel olmayan bağımsız FVGS: Su pompalama, sokak aydınlatma, baz istasyonları, sinyalizasyon sistemleri gibi şebekeden uzak bağımsız uygulamalardır. Enerjisini akülerde depolayabileceği gibi, depolamadan doğrudan da kullanabilir.
- Dağıtık şebeke bağlantılı FVGS: Kişisel (ev, bina vb.), kamuya ait (üniversiteler vb.) veya ticari işletmelerin (süpermarketler vb.) şebekeye bağlı uygulamalarıdır.
- Merkezi şebeke bağlantılı FVGS: Geniş alanlarda merkezi olarak kurulan şebeke bağlantılı sistemlerdir. Günlük konuşmada yaygın olarak “güneş tarlası” olarak da adlandırılırlar.

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler, fotovoltaik modüller aracılığıyla elde edilen elektriğin elektrik şebekesine verilmesini sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerin ilk yatırım maliyetleri, batarya ihtiyacı olmadığı için, şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin maliyetine oranla daha düşüktür. Şebeke bağlantılı bir fotovoltaik güç sisteminin temel bileşenleri ve bağlantısı Şekil 3.17’de görölmektedir

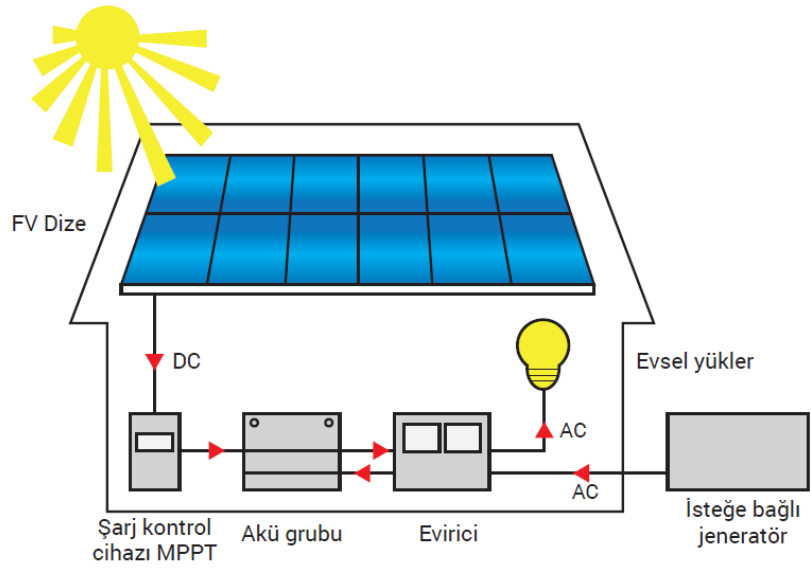


Şekil 3.17. Şebeke bağlantılı bir FVGS (EQF/NQF, 2014).

Şebekeye bağlantılı FV sistemlerin bir başka avantajı, bakım maliyetinin önemli ölçüde düşük olmasıdır ve uzun süre bakıma ihtiyacı olmadan çalışmaya devam edebilmeleridir. Bu sistemlerin elektriğin tüketildiği yere yakın olarak üretilmesi, enerji iletim kayıplarını azaltmaktadır.

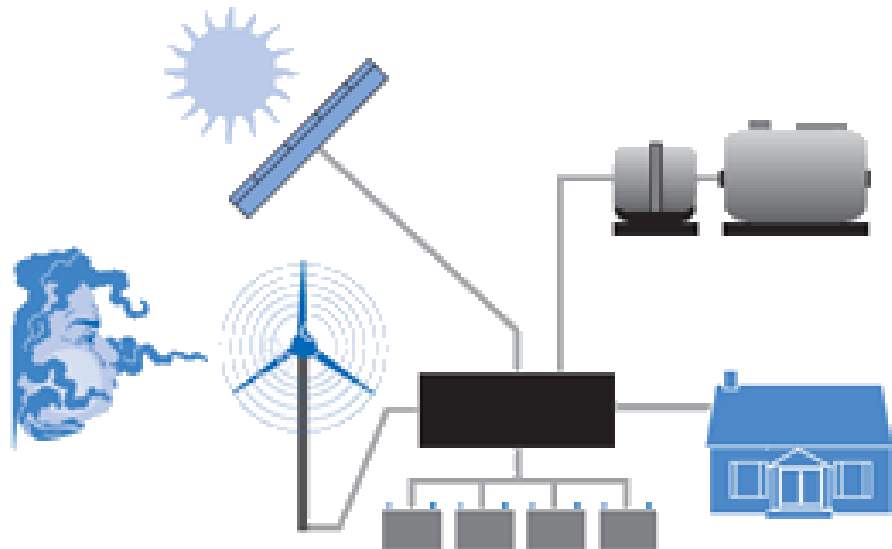
Şebeke bağlantılı FV sistemler şebeke yükünü hafifleterek gerekli şebeke yatırımlarını geciktirmekte ve hatta yatırımlara olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır (Çubukçu, 2009)

Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler ise, fotovoltaik modüller tarafından üretilen elektriğin ihtiyaç fazlası kısmının akülerde depolanarak, gerektiğinde kullanımına olanak sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerin ilk yatırım maliyetleri, batarya kullanımı ve bakım/yenileme ihtiyacı olduğu için, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin maliyetine oranla daha yüksektir. Şebekeden bağımsız bir fotovoltaik güç sisteminin temel bileşenleri ve bağlantısı Şekil 3.18’de görülmektedir.



Şekil 3.18. Şebekeden bağımsız bir FVGS.

FV sistemler, melez (hibrid) güç sistemi bileşeni olarak diğer enerji kaynakları ile birlikte de kullanılmaktadır (Şekil 3.19). Enerji taleplerinin yerel coğrafi ve geçici karakteristiklere göre düzenlenerek karşılanması için FV'ye ilaveten, dizel jeneratörler, rüzgâr jeneratörleri, küçük güçlü hidroelektrik santraller gibi diğer elektrik enerjisi kaynaklarından da yararlanılabilir. Bir hibrid güç sisteminin geliştirilmesi için mevcut kaynakların ve enerji ihtiyacının iyi bilinmesi temel unsurdur.



Şekil 3.19. Örnek bir FV hibrit güç sistemi.

3.6. FVGS Avantajları ve Dezavantajları

FVGS uygulamalarının temel avantajları şunlardır:

- Temiz bir enerji türüdür. Çevre kirleticisi, duman, gaz, karbondioksit, kükürt ve radyasyon gibi atıkları yoktur.
- Yerel uygulamalar için elverişlidir, enerjiye ihtiyaç duyulan hemen hemen her yerde güneş enerjisinden yararlanmak mümkündür. Bir hesap makinesinde, bir kol saatinde, bir su pompasında, sokak aydınlatmasında kullanılabileceği gibi bir uzay gemisinin enerji ihtiyacının karşılanmasında da kullanılabilir. Birçok uygulaması için karmaşık teknolojiye gerek duyulmamaktadır.
- Dışa bağlı olmadığından, doğabilecek ekonomik bulanmalardan ve krizlerden bağımsızdır.
- FVGS kurulum maliyetleri gün geçtikçe düşmektedir. 2010 yılından 2015 yılına kadar sistem maliyetleri tüm dünyada %80 oranında azalmıştır.
- FVGS bakım gereksinimi çok düşüktür.
- FVGS kurulumları, açık arazide yapılabileceği gibi atıl durumda bulunan bina yüzeylerinin ve çatı alanlarının üzerinde de gerçekleştirilebilmektedir.
- Türkiye'nin konumunun güneş enerjisi verimliliği birçok ülkeye ve alana kıyasla oldukça yüksek değerlerdedir.
- Türkiye'de 1000 kW ve altındaki FVGS kurulumları için herhangi bir lisans alma zorunluluğu bulunmamaktadır. Dolayısıyla, ilgili mevzuat çok daha basittir.
- Ürün tedarik zincirinde, küresel ölçekte birçok firma bulunmaktadır.
- FVGS ömrü 30-35 senedir. Sistemin ana bileşeni olan FV modül için 25 yıl üretici garantisi verilmektedir

- FVGS amortisman süreleri 6-7 yıldır.
- FVGS enerji üretimi, karbon salımını düşüren önemli bir parametredir.
- FVGS işletimi sırasında herhangi bir gürültü bulunmamaktır.
- Her şeyden önce, güneş bol ve tükenmeyen bir enerji kaynağıdır.

FVGS uygulamalarının başlıca dezavantajları, aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- FVGS kurulumlarında gölgeli alanlar kullanılamaz, ayrıca geceleri elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilemez. FVGS enerji üretiminin yetersiz olduğu saatlerde, şebeke elektriğinden yararlanılır.

4. FVGS KALİTE TESTLERİ VE PERFORMANS ANALİZİ

4.1. Giriş

Günümüzde fotovoltaik teknolojisi üzerinde yapılan akademik çalışmalar, genellikle modül performansının artırılmasına yöneliktir. Ancak, bu çalışmaların paralelinde, fotovoltaik güç sistemlerinin kalitesi, güvenilirliğinin kontrolü ve izlenmesi de önem kazanmaktadır. Zira sistem kalitesinin kontrol edilmesiyle, olası kayıpların tespiti ve giderilmesi sağlanabilmektedir. Etkin bir kalite denetimi ve sistem performans takibi sayesinde, yatırımcılar ve bankalar açısından da mali riskler en aza indirilmektedir.

FV ile üretilen enerjinin verimi, modül veriminin ötesinde, çok sayıdaki diğer sistem bileşenlerine de bağlıdır. Örneğin en iyi evirici en verimli modül için uygun olmayabilir. Bu durumda sistem performansı zayıflar ve enerji maliyeti de o oranda artabilir. Yeni geliştirilen ince film modüllerinden oluşan sistemler yanlış denge bileşenleri ile bazen dış-alan testlerinde başarısızlıkla sonuçlanmıştır. FV sistemlerini taşıyacak yapıların ve bağlantıların sistem tipine göre tasarlanması, imalat fiyatı ve uzun süre dayanıklılık açısından önem taşımaktadır (EQF/NQF, 2014). FVGS bileşenlerinin herhangi birinde meydana gelecek bir sorun veya toplam sistemi tasarımının yol açacağı hata, toplam enerji üretiminde ciddi kayıplara sebep olmaktadır.

Dünyada toplam kümülatif kurulu FVGS kapasitesi, 2014 yılın sonunda yaklaşık 180 GW'a ulaşmıştır. 2020 yılında ise kümülatif kurulu güç kapasitesinin 440 GW değerine ulaşması beklenmektedir (EPIA, 2015 ve EU-JRC, 2014). Son yıllarda, FVGS'lerin MW ölçeğinde büyük güçlerde kurulumu yaygınlaşmaya başlamıştır. Dolayısıyla, sistem performansındaki küçük bir iyileşme, toplam sistem üzerinde, kısa ve uzun vadede çok büyük kazançlara sebep olmaktadır.

4.2. FVGS Performansını Etkileyen Faktörler

Bir fotovoltaik sistemin performansını etkileyen faktörleri, üç ana başlıkta gruplandırabiliriz: İklimsel ve Çevre Koşulları, Sistemin Tasarım Kararları, Sistem Bileşenlerinin Kalitesi (Bkz. Çizelge 4.1).

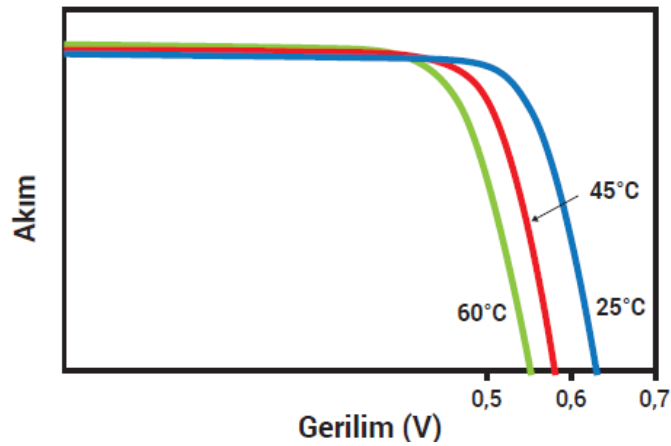
Çizelge 4.1. FVGS performansının etkileyen faktörler.

İklimsel ve Çevre Koşulları	Sistemin Tasarım Kararları	Sistem Bileşenlerinin Kalitesi
Işınım Şiddeti	Modül Açısı	Modül türü
Sıcaklık	Azimet açısı	Evirici Kayıpları
Toz ve kirlilik	Dizler arasındaki mesafe	Kablo Kayıpları
Dış gölgelenme	Evirici ve FV dizinin güç oranı	
	Kabloların optimizasyonu	
	Sigorta	
	Topraklama	
	Paratoner	

4.2.1. İklimsel ve Çevre Koşulları

Temel iklimsel parametreler şunlardır:

- **Işınım Şiddeti:** FVGS enerji üretiminde ve performansında en önemli faktör, güneş ışınımının şiddettir. Dolayısıyla; farklı yerlerde farklı performanslar beklenmektedir.
- **Sıcaklık:** FV modüllerin çıkış gücü, modülün çalışma sıcaklığıyla ters orantılıdır. Yani, modülün çalışma sıcaklığı arttığı zaman, çıkış gücü düşmektedir (Bkz. Şekil 4.1). Kristal hücrelerde gerilim 25°C'den her 1°C sapmada ortalama % -0,5 değişikliğe uğrar. Sıcaklık arttıkça gerilim azalır (EQF/NQF, 2014).



Şekil 4.1. FV hücre akım ve geriliminin sıcaklıkla değişimi.

- **Toz ve kirlilik:** Toz ve kirlilik nedeniyle, modüllerin bazı kısımları kapanabilir ve üzerinde sıcak noktalar oluşabilir. Sıcak noktalar, modülün çıkış gücünü düşürür ve dolayısıyla sistemin performansında düşüşe sebep olur. Araştırmalara göre bu tür kayıplar yaklaşık % 1,3 oranındadır.
- **Gölgeleme:** FVGS dizilerinin gölgesinin birbirinin üstüne düşmesiyle “iç gölgeleme” oluşabilir. Ayrıca, sistemin kurulduğu yerin çevre muhitine bağlı olarak da (ağaç, otlar, duvar, bina vb. nedeniyle) modüller üstünde, “dış gölgeleme” adını verdiğimiz gölgelemeler oluşabilir. Çeşitli akademik araştırmalarda, bu tür gölgelemelerden ötürü yaklaşık % 6 oranında kayıplar gözlenmiştir. Gölgeleme alanına göre, verim kayıpları daha fazla da olabilir (Bkz. Şekil 4.2).

FV Örgünün gölgelemesi	Gölgeleme nedeniyle güç kaybı	
% 13	% 44	
% 11	% 47	
% 9	% 48	
% 6.5	% 44	
% 3	%25	

Şekil 4.2. Gölgeleme sonucu güç kaybı.

4.2.2. Sistem Bileşenlerinin Kalitesi

FVGS’de yer alan bütün bileşenlerin özellikleri ve verim değerleri, sistemin toplam çıkış gücünü etkilemektedir. Fotovoltaik sektöründe ürünlerin ulusal ve uluslararası pazarda tercih edilebilir olması için standartlara uygunluk, önemli bir parametre olarak benimsenmiştir. İlgili standartlar, aşağıda özetlenmiştir:

Enerji toplama birimi (Fotovoltaik modüller) için:

- Kristal silisyum (amorf, mono, çoklu vb.) temelli FV modüller için TS EN 61215 ve ince film teknolojisindeki FV modüller için

TS EN 61646 standartlarına uygunluklarının belgelenmiş olması gerekir. TS EN 61215 standardı, “Kristal silisyum güneş paneli tasarım değerlendirmesi ve tip onayı” başlığındadır ve 18 adet test aşamasında kristal silisyum güneş panelinin elektriksel, optik, mekanik, iklimlendirme vb. testlerini gerçekleştirilmesi için gereken test yöntemlerini tanımlar (Bkz. Çizelge 4.2).

- FV modüllerin güvenliğinin TS EN 61730 standardına uygunluğunun belgelenmesi gerekir.
- FV modüllerin TS EN 50380 standardına uygun etiket ve veri sayfalarının bulunması gerekir.

FV modül çıkışındaki elektrik enerjisinin şebekeye aktarılmasını sağlayan birim (Evirici) için:

- FVGS’nin arıza durumunda şebekeden ayrılmasını düzenleyen TS EN 61727 ve TS EN 62116 standartlarına ve TS EN 62109 güvenlik standardına uygun olması gerekir.
- Eviricilerin TS EN 50524 standardına uygun etiket ve veri sayfalarının bulunması gerekir.
- Eviricilerin elektriksel dönüşüm verimi değerlerinin TS EN 50530 ve TS EN 61683 standartlarına uygun olarak ölçülüp belgelenmiş olması gerekir.

Sistemin şebekeye bağlantısına ve takibine ilişkin olarak:

1. Bağlantılarda kullanılan kabloların TS EN 50521 standardına uygun olması gerekir.
2. Bağlantı kutularının TS EN 50548 standardına uygun olması gerekir.
3. Şebeke bağlantısı ve sistem teftişine ilişkin olarak TS EN 60364-6, TS EN 60364-7 ve TS EN 62446 standartlarına uyulmalıdır.

Çizelge 4.2: Fotovoltaik teknolojisinde EN 61215 standardında tanımlanan testler, tanımları, yöntem ve gereksinim duyulan ekipmanları (TS EN 61215, 2006)

IEC 61215 No.	Deney Adı	Deney Tanımı	Donanım Gereksinimi	Sarf Malzemesi Gereksinimi
10.1	Görsel İnceleme	Kırık, kabarcık, kaplama bozuklukları, hatalı bağlantılar gibi görünür kusurların belirlenmesi	- İyi aydınlatılmış laboratuvar ortamı. (Aydınlatma > 1000 lüks) - Fotoğraf Makinası. - Kumpas.	- İşaretleyiciler - Kırtasiye - Askılar - Taşıyıcılar
10.2	Standart Sınama Koşullarında (SSK-STC) Başarım	Modül I-V karakteristiğinin belirlenmesi	- B yada üzeri sınıf güneş simülatörü (IEC 60904-9) yada doğal güneş ışığı - Referans FV hücre. (IEC 60904-2, IEC 60904-6) - SDŞ altında I-V karakteristik belirleyecek IEC 60904-1'e uygun donanım. (% $\pm 0,2$ doğrulukla referans aygıtın ve denenen modülün akım ve gerilim değerlerini ölçecek cihazlar) - Referans aygıtın ve denenen modülün sıcaklığı % ± 1 doğruluk ve % $\pm 0,5$ °C yinelenbilirlikle ölçülecek cihaz	- Askı - Taşıyıcı - Altlık
10.3	Yalıtım Sınaması	Modülün elektriksel yalıtım değerlerinin belirlenmesi	- Akım sınırlamalı 1 500 V DA gerilim kaynağı - Yalıtım direnci ölçer	- Bağlantı kabloları - Alüminyum folyo - Metal levhalar
10.4	Sıcaklık Katsayılarının Ölçülmesi	Başarımın çevre ve panel sıcaklığı ile ilişkisinin belirlenmesi	- B yada üzeri sınıf güneş simülatörü (IEC 60904-9) yada doğal güneş ışığı - Panelin ısıtılması ve soğutulması için, Bölüm 10.4'te açıklanan özelliklerde iklimlendirme odası - Referans FV hücre. (IEC 60904-2, IEC 60904-6) - % $\pm 0,2$ doğrulukla referans aygıtın ve denenen modülün akım ve gerilim değerlerini ölçecek cihazlar - Referans aygıtın ve denenen modülün sıcaklığı % ± 1 doğruluk ve % $\pm 0,5$ °C yinelenbilirlikle ölçülecek cihaz	- Işınımölçer -
10.5	Normal Çalışma Hücre Sıcaklığı	Modülün Standart Çalışma Koşullarını (800 W/m ² , 20 °C, 1 m/s) sağladığı hücre	- Modüller ve piranometre için montaj iskelesi - 0,25 m/s altındaki hızları ölçebilen rüzgâr hız ve yön	- Referans plakalar (En az üç, modül sayısından bir fazla,

	(NÇHS-NOCT) Ölçümü	sıcaklığı aralığının belirlenmesi.	ölçme cihazı (anemometre). - Ortam sıcaklığı sensörü. - Hücre sıcaklığı sensörleri. - Işınım, ortam ve FV hücre sıcaklıkları, rüzgar hızı ve yön bilgilerini kaydetmek için, kayıt aralığı 5 s ve daha kısa, sıcaklık hassasiyeti ± 1 °C olan veri kayıt sistemi.) - IEC 60904-3'e uygun BBB sınıfı yada daha iyi güneş ışığı simülatörü - Referans FV hücre.. (IEC 60904-2, IEC 60904-6) - SDŞ altında I-V karakteristik belirleyecek IEC 60904-1'e uygun donanım. (% $\pm 0,2$ doğrulukla referans aygıtın ve denenen modülün akım ve gerilim değerlerini ölçecek cihazlar) - Referans aygıtın ve denenen modülün sıcaklığını % ± 1 doğruluk ve % $\pm 0,5$ °C yinelenbilirlikle ölçecek cihaz - Modülü eş dağılımlı olarak NÇHS değerine ısıtacak iklimlendirme odası.	alüminyum plaka IEC 61215 10.5.4.2.)
10.6	SÇK/NÇHS İçin Başarım	Panelin NÇHS değerine ısıtıldığındaki elektriksel başarım değerlendirmesinin yapılması.	- IEC 60904-9'a uygun BBB sınıfı yada daha iyi güneş ışığı simülatörü - Referans FV hücre.. (IEC 60904-2, IEC 60904-6) - SDŞ altında I-V karakteristik belirleyecek IEC 60904-1'e uygun donanım. (% $\pm 0,2$ doğrulukla referans aygıtın ve denenen modülün akım ve gerilim değerlerini ölçecek cihazlar) - Referans aygıtın ve denenen modülün sıcaklığını % ± 1 doğruluk ve % $\pm 0,5$ °C yinelenbilirlikle ölçecek cihaz - Işınımı 200 W/m ² değerine düşürecek düzenek. (IEC 60904-10) - $\pm$ % 5 hassasiyette güneş ışıını ölçme cihazı. - Işınım ölçer ile modülü eş düzlemsel bağlama düzeneği. - Doğal güneş ışığı yada sürekli gün ışığı simülatörü (Işınım >700 W/m ² , eşdağılımsızlık $\leq \pm$ % 2, zamanla değişim $\leq \pm$ % 5)	- Askı - Altlık -
10.7	Düşük Işınımda Başarım	Olağan ışınım şiddetinin altındaki ışınım için elektriksel başarım değerlendirmesinin yapılması.	- IEC 60904-9'a uygun BBB sınıfı yada daha iyi güneş ışığı simülatörü - Referans FV hücre.. (IEC 60904-2, IEC 60904-6) - SDŞ altında I-V karakteristik belirleyecek IEC 60904-1'e uygun donanım. (% $\pm 0,2$ doğrulukla referans aygıtın ve denenen modülün akım ve gerilim değerlerini ölçecek cihazlar) - Referans aygıtın ve denenen modülün sıcaklığını % ± 1 doğruluk ve % $\pm 0,5$ °C yinelenbilirlikle ölçecek cihaz - Işınımı 200 W/m ² değerine düşürecek düzenek. (IEC 60904-10) - $\pm$ % 5 hassasiyette güneş ışıını ölçme cihazı. - Işınım ölçer ile modülü eş düzlemsel bağlama düzeneği. - Doğal güneş ışığı yada sürekli gün ışığı simülatörü (Işınım >700 W/m ² , eşdağılımsızlık $\leq \pm$ % 2, zamanla değişim $\leq \pm$ % 5)	- Askı - Altlık -
10.8	Dış ortam Deneyi	Doğal güneş ışınımında değerlendirme	- Denenen modülü SDŞ yüklemek için köryükler)	- Denenen modülü SDŞ yüklemek için köryükler)
10.9	Sıcak Nokta Dayanımı Deneyi	Panelde kısmi gölgelenme ile oluşacak sıcak noktanın elektriksel başarım etkisinin belirlenmesi	- Denenen hücreyi % 5 adımlarla gölgeleyebilecek opak örtüler.	- Denenen hücreyi % 5 adımlarla gölgeleyebilecek opak örtüler.

			- Doğal güneş ışığı yada C sınıfı sürekli gün ışığı simülatörü (Işınım $1\ 000\ \text{W/m}^2 \pm \% 10$) - Modülün akım gerilim karakteristiğini ölçecek donanım.		- Denenen modülün SDS yüklemekiçin köryükler)
10.10	UV Şartlandırma Deneyi	UV bozulmasına duyarlı malzemeleri belirlemek için yapılan UV koşullandırma.	- Modül sıcaklığı $60 \pm 5\ ^\circ\text{C}$ değerinde tutacak cihaz. - Modül sıcaklığı $\pm 2\ ^\circ\text{C}$ hassasiyetle ölçüp kaydedecek cihaz - UV ışınımı 280-320 nm ve 320-400 nm aralıklarında $\pm \% 15$ hassasiyetle ölçen cihaz - 280 nm altında önemli bir ısıma yapmayan, deney düzleminde $\pm \% 15$ aynılıkta ısıma oluşturan UV kaynak - Modülün SDS en yüksek güçte çalıştırarak elektriksel yük. - Bir yada daha fazla sayıda modül için -40 ± 2 ve $80 \pm 2\ ^\circ\text{C}$ aralığında sıcaklık çevrimini sağlayabilen hava dolaşımı iklimlendirme odası. - Modül sıcaklığı $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ hassasiyetle ölçüp kaydedecek cihaz.		
10.11	Isıl Çevrim Deneyi	Yinelenen sıcaklık değişimlerinde modülün yorulma ve diğer zorlamalara dayanımını belirlemek.	- Bir yada daha fazla sayıda modül için uç dayanım sıcaklıkları arasında sıcaklık için $\pm 2\ ^\circ\text{C}$, rutubet için $\pm \% 5$ kararlılıkta sıcaklık çevrimi sağlayacak bir yada iki iklimlendirme odası. - Modül sıcaklığı $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ hassasiyetle ölçüp kaydedecek cihaz. - Modül iç devresindeki sürekliliği izleyecek cihaz. (devre sürekliliği ve devre-çerçeve yalıtım sağlamlılığı) - IEC 60068-2-78'e uygun ($85 \pm 2\ ^\circ\text{C}$ sıcaklık, $\% 85 \pm \% 5$ nispi nem, 1 000 saat) sinamayı yapabilecek iklimlendirme odası. - IEC 60068-2-21'e uygun buru sinaması donanımı. - IEC 60068-2-21'e uygun gerilme ve esneme sinaması donanımı.		
10.12	Nem-Don Deneyi	Yüksek sıcaklık ve nem sonrasında sıfır altı sıcaklıkların oluşturduğu etkinin belirlenmesi.(Isıl şok deneyi değildir)			
10.13	Rutubet-Isı Deneyi	Modülün uzun süreli nem nüfuzuna dayanımını belirlemek.			
10.14	Bağlantı uçları sağlamlık Deneyi	Modül bağlantı uçlarının ve bağlantıların montaj ve diğer işlemlere dayanımının belirlenmesi			
10.15	Islaklık Kaçak Akımı	Modül ısıtılarak kaçak akım değerlerinin belirlenmesi			

				çözelti
10.16	Mekanik Yükleme Deneyi	Modülün yüzeyine uygulanan mekanik yüklemeye (kar-buz yükü gibi) karşı dayanımının belirlenmesi.	- 500 V ve üzerinde gerilim uygulayabilecek akım sınırlamalı DA kaynak - Sızıntı akımı - (yalıtım direnci) ölçme cihazı. - Modülü yüzeylerine eşdağılımlı olarak 2400 Pa yüklenme yapabilecek sinama düzeneği. - Panelin iç devresindeki sürekliliği izleyecek düzeneç. (devre sürekliliği)	-
10.17	Dolu Deneyi	Modülün dolu çarpmalarına dayanımı belirlenir.	- IEC 61215 10.17 Tablo 2'de tanımlanan çaplarda dolu taneleri için kalıplar. - -10 ± 5 °C sıcaklıkta çalışan dondurucu - Dolu tanelerini -4 ± 2 °C sıcaklıkta tutacak saklama kabı - Belirlenen hızdan $\pm$ % 5 sapma ile dik ve açılı olarak atabilen dolu fırlatma cihazı - Modül yüzeyinden en fazla 1 m uzaklıkta, $\pm$ % 2 hassasiyette hız ölçebilen cihaz. - Taneleri $\pm$ % 2 hassasiyette tartacak cihaz.Buz topu çapını ve kütleini $\pm$%5 hassasiyet ile ölçüp doğrulayacak donanım.	-
10.18	Yangeçit Diyodu Isınma Deneyi	Yangeçit diyodunun dayanımının belirlenmesi.	- Paneli 75 °C$\pm$5 °C sıcaklığa ısıtacak kabin. - Diyot sıcaklığını $\pm$1 °C hassasiyetle izleyebilecek donanım. - Yangeçit diyotlarından sabit akım geçirecek donanım. - Modül SDŞ kısa devre akım değerinin 1,5 katını uygulayabilecek cihaz. - Akım ölçme tertibatı	-

Çizelge 4.3, FV güç sistemlerinin bileşenleri, kurulumu, bağlantısı ve teftişi ile ilişkili olan tüm standartların ayrıntılarını göstermektedir.

Çizelge 4.3. FVGS bileşen, kurulum, bağlantı, teftiş ve takibine ilişkin TSE standartları listesi.

1	TS EN 50380 Güneş enerjisi pil modülleri için veri föyleri ve isimlik bilgileri
2	TS EN 50524 Fotovoltaik eviriciler için veri föyü ve isim plakası
3	TS EN 60269-6:2011 Alçak Gerilim Sigortaları-Bölüm 6-1:Güneş fotovoltaik enerji sistemleri Korunması için sigorta bağlantıları için tamamlayıcı özellikler
4	TS HD 60364-7-712 Binalarda elektrik tesisatı – Bölüm 7-712: Özel tesis ve yerler için kurallar – Solar fotovoltaik (PV) güç besleme sistemleri
5	TS EN 61215 Kristalin Silikon Karasal Fotovoltaik (PV) Modüller-Tasarım Değerlendirmesi ve Tip Kabulü
6	TSE CLC/TS 61836 Fotovoltaik güneş elektriği enerji sistemleri - Terimler, tarifler ve semboller
7	TS EN 61646 İnce filmli düz alanlı fotovoltaik modüler- tasarım nitelikleri ve tip onayı
8	TS EN 61727 Fotovoltaik (PV) Sistemler-Fayda Arayüzünün Karakteristikleri
9	TS EN 62109-2:2011 Fotovoltaik güç sistemlerinde kullanım için güç çeviricilerinin güvenliği- Bölüm 2: Dönüştürücüler için belirli kurallar
10	TS EN 62109-1:2010 Fotovoltaik güç sistemlerinde kullanım için güç çeviricilerinin güvenliği- Bölüm 1:Genel kurallar
11	TS EN 62116:2011 Fayda bağlantılı fotovoltaik çeviriciler için öbeklendirilmiş koruma ölçümlerinin deney işlemleri
12	TS EN 62446 Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler – Sistem dokümantasyonu, devreye alma deneyleri ve muayene için asgari kurallar
13	TS EN 61730-1:2007/A1:2012(EN) Fotovoltaik (PV) modül güvenlik niteliği - Bölüm 1- Yapım özellikleri
14	TS EN 61730-2:2007/A1:2012(EN) Fotovoltaik (PV) modül güvenlik niteliği - Bölüm 2- Deney özellikleri
15	TS EN 50521 Fotovoltaik sistemler için bağlayıcılar - Güvenlik kuralları ve deneyler
16	TS EN 50530 Izgara bağlanmış fotovoltaik çeviricilerin toplam verimliliği
17	TS EN 50548:2011 Fotovoltaik modüller için bağlantı kutuları
18	TS EN 61683 Fotovoltaik sistemler - güç şartlandırıcılar - Verim ölçme işlemi
19	TS EN 61724 Fotovoltaik sistem performans izleme-Ölçüm, veri değişimi ve analiz için kılavuz

4.2.3. FVGS Tasarım Kararları

Bir fotovoltaik güç sisteminden en yüksek verimi elde etmek için iyi tasarımın faydalarını gözden çıkaramayız. Sistemin iyi tasarlanması için iyi bir mühendislik çalışması gerekmektedir. Tasarım sürecindeki herhangi bir yanlış karar, sistemin genel performansını etkiler ve güvenilirliğini tehlikeye atar. FVGS tasarımında dikkat edilmesi gereken temel faktörler aşağıda özetlenmiştir:

- **Modül açısı:** Fotovoltaik sistemin kurulduğu konuma göre en uygun eğimin seçilmesi gerekir. Örneğin; İzmir’de yıllık ortalama en iyi eğim açısı 32 derecedir.
- **Azimet açısı:** FV modüllerin yön veya azimet açısını doğru belirlemek ve bütün sistemi o açıya göre tasarlamak oldukça önemlidir. Zira sistemin güneşlenme süresi ve ısıtım süresi, bu açıya göre değişecektir.
- **İç gölgeleme:** Birbirini takip eden modül dizilerinin arasındaki mesafenin az olması, iç gölgelenmeye sebep olur. Bu kayıpları önlemek için modül dizilerinin arasındaki mesafe doğru hesaplanmalıdır
- **Evirici ve FV dizinin güç oranı:** Bir eviricinin en iyi verimde çalışması, girişinde akım ve gerilim değerleriyle doğrudan ilgilidir. Her eviricinin ürün kataloğunda belirtilen verilere göre modül dizileri gruplandırılmalıdır. Uygun bir tasarıma imkan tanıyan çeşitli yazılımlar kullanılabilmektedir.
- **Kablo optimizasyonu:** Fotovoltaik dizilerin çıkış gücü, eviricinin çıkış gücü ve aradaki mesafeler dikkate alınarak uygun kablo türü ve kesiti seçilmelidir.
- **Sigorta, topraklama ve paratoner:** Bir fotovoltaik sistemin performansı, bileşen ömrü ve güvencesi ile ilişkilidir. Dolayısıyla, sistem güvenilirliğini artırmak için uygun sigorta, topraklama ve paratoner bileşen hesabı yapılmalıdır.

4.3. FVGS Performans Analizi Parametreleri

Kurulum öncesinde ve kurulum aşamasında, bir fotovoltaik güç sistemin bilimsel yöntemlerle denetlenmesi olası hataları ortadan kaldıracaktır. Aynı şekilde, kurulum sonrası da temel performans parametrelerinin gerçek zamanlı izlenerek yorumlanması, olası enerji kayıplarının tespit edilmesini ve önlenmesini sağlayacaktır.

Fotovoltaik (FV) ve hibrid güç sistemlerinin başarımlarını incelemesinde zorunlu olan ölçüm ve değerlendirme değişkenleri, “TS EN 61724: Fotovoltaik sistem başarımlarını izleme – Ölçüm, veri değişimi ve incelemesi için kılavuz” başlıklı standart metninde açıklanmaktadır. Bu metinde, FV sistemin düzlemsel ışınlam, dize çıkışı, depolama girişi ve çıkışı, güç şartlandırıcı girişi ve çıkışı gibi karakteristiklerinin izlenmesi ve izlenen verinin değişimi ve incelemesi için yöntemler önerilmektedir. Bu yöntemlerin amacı, bağımsız veya şebeke bağlantılı veya jeneratör ve rüzgâr türbini gibi FV güç kaynağı olmayan kaynaklarla melezleştirilerek oluşturulan FV güç sistemlerinin toplam başarımlarını değerlendirmektir (Çubukçu, 2011).

FVGS performansı analizinde incelenen temel karakteristikler şunlardır:

- **Toplam üretilen a.a. enerji:** Son kullanıcı ve yatırımcı açısından, sistemin en önemli çıktısı alternatif akım olarak elde edilen sistemin çıkış enerjisidir. FV sistemin çıkışında üretilen enerji miktarı, aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır.

$$E_{PV} = N_{gün} \times \frac{W_{PV} \times \eta_{sis} \times G_1}{1000 \times \eta_{PV}}$$

- **Dizi hasadı (Y_A):** Fotovoltaik modül dizisinin bir günde kWp başına ürettiği enerji miktarıdır ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Y_A = E_{A,d} / P_0 = \tau_r \cdot (\sum_{day} P_A) / P_0$$

- **FV sistemin nihai hasadı (Y_f):** Fotovoltaik sistemin anma gücü başına üretilen enerji miktarıdır ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$Y_f = Y_A \cdot \eta_{LOAD}$$

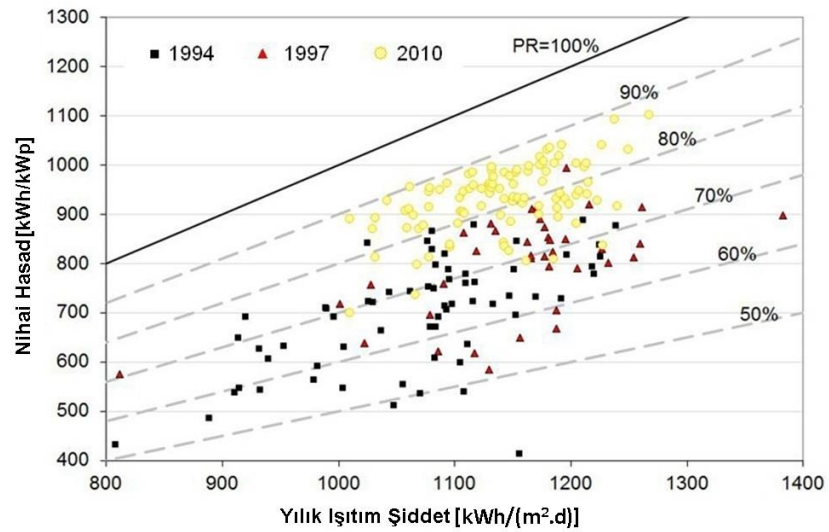
- **Referans hasadı (Y_r):** Fotovoltaik sisteme gelen toplam ışınlım miktarının, referans ışınlımına ($G_{I,ref}$ 1kW/m^2) bölümünden elde edilmektedir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Y_r = \tau_r \cdot (\sum_{day} G_I) / G_{I,ref} = H_I / G_{I,ref}$$

- **Gerçekleme oranı (PR):** Fotovoltaik sistemde gerçekleşme oranı (PR) uluslararası bir birimdir. Sistem konumundan, mevcut ışınlımından ve çevre şartlarından bağımsız olarak, fotovoltaik sistemin genel performansını ve sistemde var olan kayıpları açıklar. FV sistemin nihai hasadının (Y_f), referans hasatına (Y_r) oranıdır.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r}$$

Şekil 4.3’de, gerçekleme (performans) oranı üzerinde yapılan, uzun dönemli bir araştırmanın sonuçları gösterilmektedir. Bu araştırma, Fraunhofer ISE (Avrupa’nın en büyük güneş enerji araştırma enstitüsü) tarafından, 1994 ile 2010 yılları arasında yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucuna göre, performans oranı (PR), 1994 yılındaki % 70 değerlerinden, 2010 yılında %90’lara yükselmiştir (Reich et al., 2012).



Şekil 4.3. Gerçekleşme oranının (PR) tarihsel gelişimi (Reich et al., 2012)

- **Fotovoltaik modülün verim hesabı:** Fotovoltaik modülün anlık enerji dönüşüm verimi, aşağıda gösterilen formülle hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{P_{DC}}{G_m A_m}$$

Fotovoltaik modülün aylık enerji dönüşüm verimi ise aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\eta_{FV,m} = \left(\frac{\overline{E}_{DC,d}}{G_m A_m} \right) \times 100\%$$

- **Evirici verim hesabı:** Bir eviricinin verimi, anlık olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\eta_{in} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

Eviricinin aylık ortalama verimi ise aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\eta_{in,m} = \left(\frac{\overline{E}_{DC,d}}{\overline{E}_{DC,d}} \right) \times 100\%$$

- **Fotovoltaik sistemin verim hesabı:** Fotovoltaik sistemin verimi, anlık olarak aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\eta_{sys} = \frac{P_{AC}}{G_m A_a}$$

Sistemin aylık enerji verimi ortalaması, aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\eta_{sys,m} = \left(\frac{\overline{E}_{AC,d}}{G_m A_m} \right) \times 100\%$$

Fotovoltaik sistemin toplam verimi, bütün sistem bileşenlerinin verimin dikkate alınarak aşağıdaki eşitlikle de hesaplanabilmektedir.

$$\eta_{sys} = \eta_{FV} \eta_{in} \eta_C \eta_B \eta_O$$

- **Fotovoltaik sistemin kayıp hesabı:** TS EN 61724 standardına göre dikkate alınan kayıp parametreleri şunlardır:

- **Dize yakalama kayıpları** (Sembol: L_C): Belli bir FV sistemin kendi FV dizelerinin kayıplarına bağlı birimlenmiş kayıplardır. FV dize yakalama kayıpları, referans hasat ile FV dize hasadı farkından elde edilir. *Bu kayıplar, uyumsuzluk ve dönüşüm kayıplarından, dize topraklamalarından vb. kaynaklanır.* (TS EN 61724, 1999).

$$L_C = Y_r - Y_A$$

- **Denge bileşeni kayıpları (Sembol: L_{BOS}):** Bir FV sistemin kendi denge bileşenlerinin enerji kayıplarına bağlı birimlenmiş kayıplardır. Aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (TS EN 61724, 1999).

$$L_{BOS} = Y_A \cdot (1 - \eta_{BOS})$$

4.4. Kaliteli Performans İzleme Nasıl Yapılır?

Bir FVGS'nin kalitesi, temelde aşağıda belirtilen dört aşamada izlenebilir:

- Planlama ve Tasarım Aşamasında Yapılan Kontroller
- Yatırım Esnasında Yapılan Kontroller
- İşletmeye Alma Testleri ile Yapılan Kontroller
- İşletme Raporları Hazırlanarak Yapılan Kontroller

Önerilen bu kontroller, aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmaktadır:

4.4.1. Planlama ve Tasarım Aşamasında Yapılan Kontroller

FVGS kurulumu öncesi, sistemin planlama ve tasarımı aşamasında gerçekleştirilen kontrollerdir. Bu aşamada gerçekleştirilen kontroller şu şekilde özetlenebilir.

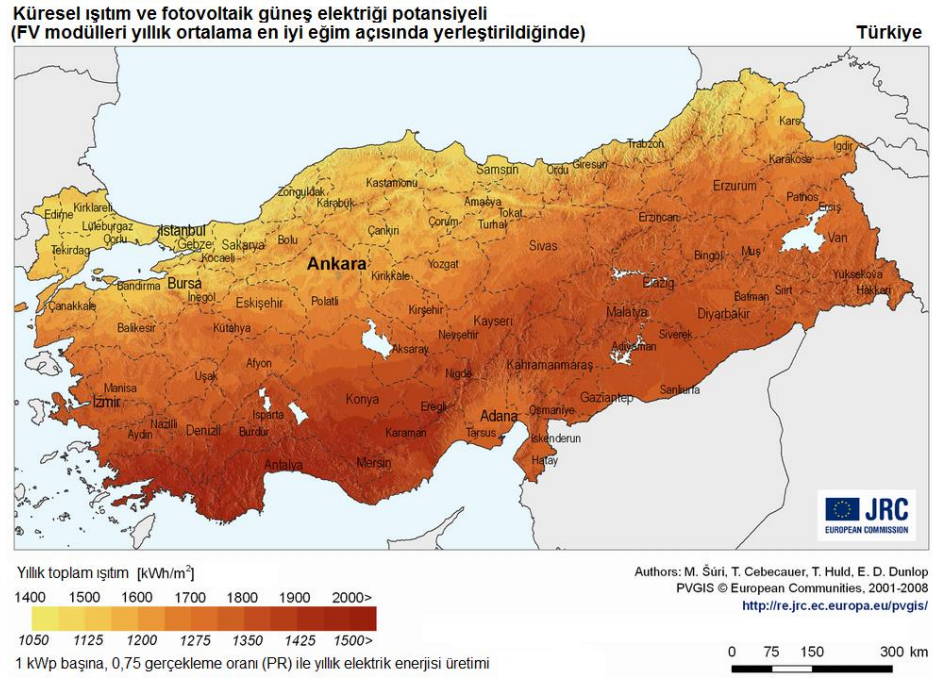
- Projenin saha incelemesinin yapılması: Jeolojik ve topografik incelemesinin ve gölge analizinin yapılması.
- Güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi
- Bileşen kalitesinin ve toplam sistem veriminin değerlendirilmesi
- Yüklenici ön tasarımının değerlendirilmesi: Temel Planlar, İnşaat planları ve beklenen enerji performansının sağlanmasını teminen santralin üretme kabiliyetinin değerlendirilmesinin yapılması.

Bazı saha inceleme araçları Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Kullanım özelliklerine ve bütçeye bağlı olarak elektronik cihazlar ile manuel cihazlar arasında tercih yapılabilir. Değerlendirme doğruluk ve hassasiyeti açısından biri diğerine üstün değildir. Elektronik cihazlar kayıt ve kullanım kolaylığı sağlarlar (EQF/NQF, 2014).



Şekil 4.4. Saha değerlendirmede kullanılan çeşitli araçlar.

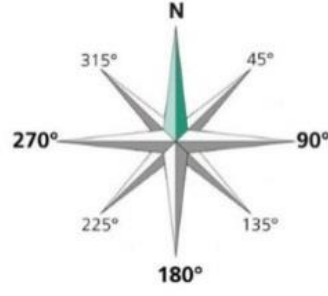
Avrupa Komisyonu – Ortak Araştırma Merkezi Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) tarafından sağlanan ısıtım şiddeti verilerine, güvenilir veri kaynakları olarak sıkça başvurulmaktadır. Bu kaynağa göre, Türkiye’de *yıllık ortalama en iyi eğim açısında* yerleştirilen FV güç sistemleri, 1400-2000 kWh/m² toplam ısıtım ve 1050-1500 kWh/(kW_{anma}·y) yıllık elektrik enerji hasadı potansiyeline sahiptir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Küresel ısıtım ve güneş elektrliği potansiyeli, Türkiye (PVGIS, 2015).

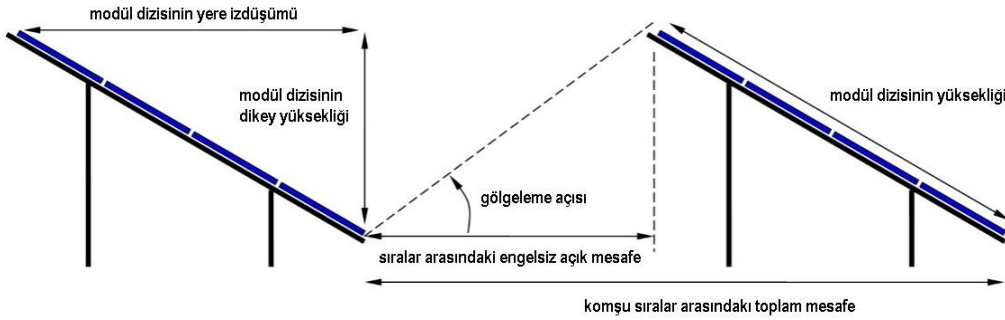
FV sistemin performansını, aşağıda sıralanan parametrelerin tasarımı etkileyecektir:

- Sistemin yön açısı (Bkz. Şekil 4.6).
- Modülün eğim açısı
- FV dizileri arası mesafe (Bkz. Şekil 4.7).
- Kullanılan FV bileşenlerinin özellikleri
- Dizileri oluşturan modül sayısı
- Dizi gücü
- Modül yüzey ve ortam sıcaklıkları
- Dizilerin MPP gerilimi çıkışı ile eviricinin MPP gerilimi girişinin karşılaştırılması
- FV dizilerinin açık devre gerilimi ve eviricinin d.a giriş gerilim sınır değeri ile karşılaştırılması.
- FV dizisinin kısa devre akımı ve eviricinin en yüksek d.a giriş akım sınır değeri ile karşılaştırılması.



Şekil 4.6. Sistemin yön açısı.

Sistem hasadı hesaplamalarında, referans hasadı içib en son 10 yılın verilerinin dikkate alınarak yapılması, veri güvenilirliğini artırır. Birçok benzetim programında, bu verilerin saatlik aralıklarda veri tabanına girişi yapılabilmektedir. Ayrıca, çeşitli yazılımlar aracılığıyla saatlik verilerin üretilmesi mümkün olabilmektedir. Örneğin, “Meteonorm® 4.0” yazılımı ile belirlenen bir konum için iklim verileri elde edilebilmektedir. Avrupa Komisyonu – Ortak Araştırma Merkezi Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) tarafından sağlanan ışınım şiddeti verileri, çok özel çözünürlüklü (1 km x 1 km) ve internet erişimlidir.



Şekil 4.7. FV dizilerinin yerleşimi.

Kurulum öncesinde yapılan verim tahminleme çalışmalarında, aşağıdaki hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır:

1. **Modül düzlemine gelen ışınlam hesabı:** FV modül düzlemine gelen (direkt ve difüz) ışınlam ayrı ayrı hesaplanır. Bu parametreler, sistemin konumuna ve modül açısına bağlıdır. Bu iki parametrenin toplamı, toplam (global) ışınlamı vermektedir. Perez ışınlam modellemesine uygun hesaplamalar yapılmaktadır.
2. **Gölgelemeden doğan kayıpların hesabı:** Sahanın konumuna ve sistemin yerleşim planlamasına göre gölge kayıpları değişmektedir.
3. **Kirlilik hesabı:** 15° üstünde açılarda yerleştirilen modüllerde, yağın yağmur, modülü temizleyecek potansiyele sahiptir. Dolayısıyla, yağmur alan bölgelerde, kirlenmeden doğan kayıplar çok az olmaktadır ve % 0,5 oranında hesaba katılmaktadır. Öte yandan, literatürde yağış oranı düşük alanlarda, kirlilik nedeniyle % 4'lere varan kayıplar raporlanmıştır.
4. **Uyumsuzluk kayıpları:** Uyumsuzluktan ortaya çıkan kayıplar, değişik faktörlerden ortaya çıkar. FV dizilerini oluşturan modül bağlantı yapısı ve eviriciye bağlı olan dizilerin iç bağlantılarından ortaya çıkan bağlantı kayıpları, bu kapsamda dikkate alınan birincil kayıplardır. Fraunhofer ISE verilerine göre, bu tür uyumsuzluktan kaynaklanan kayıplar, yaklaşık % 0,8 civarındadır. Aynı eviriciye bağlanan dizi içinde farklı güçte ve farklı teknolojide FV modülün kullanılması, modüllerin farklı açılarda yerleşimi, aynı mesafeler için farklı uzunluklarda d.a kablo kullanımı, uyumsuzluk kaybını arttıran parametrelerdir (Reich et al., 2012).
5. **Kablo kayıpları:** Kablo uzunluğundan ve kesitinden kaynaklanan kayıplardır. Bu kayıpları en aza indirmek için uzunluğa göre en uygun kablo kesitinin seçilmesi gerekmektedir.
6. **Eviriciden kaynaklanan kayıplar:** Eviriciden kaynaklan kayıpları, 4 grupta sınıflandırabiliriz:
 - **Verimlilik kayıpları:** Eviricinin çalışma sıcaklığı ve giriş gerilim değeri, verimini etkileyen en önemli parametrelerdir.

- **Eviricinin güç sınırlamasından kaynaklan kayıplar:** Eviricinin çıkışındaki a.a gücün girişindeki d.a güce oranı, “Boyutlanma Oranı” olarak adlandırılır ve evirici performansını doğrudan etkiler.
 - **Reaktif güç şartlarından oluşan kayıplar:** Güç faktörü $\cos(\phi) < 1$ olarak dikkate alındığında, eviricinin modeline bağlı olarak yüksek dönüşüm kayıplarına sebep olabilmektedir.
 - **a.a güç sınırlanması kayıpları:** Eviricinin maksimum güç çıkışının sınırlandırılmasından ortaya çıkan kayıplardır..
- 7. Ek tüketimden kaynaklanan kayıplar:** Havalandırma ve aydınlatma gibi yük tüketimleri eviriciden alındığında ortaya çıkan kayıplardır. Bu ek enerji tüketimini hesaplamak için ayrı bir sayaç kullanılabilir.
- 8. Trafodan kaynaklanan kayıplar:** Trafonun üreticisi tarafından temin edilen ve teknik özelliklerinde belirtilen verim eğrisinden yola çıkarak hesaplanır.

4.4.2. FVGS Kurulumu Sonrası İşletmeye Alma Testleri

İşletmeye alma testleri, temelde aşağıdaki adımlar izlenerek yapılmaktadır:

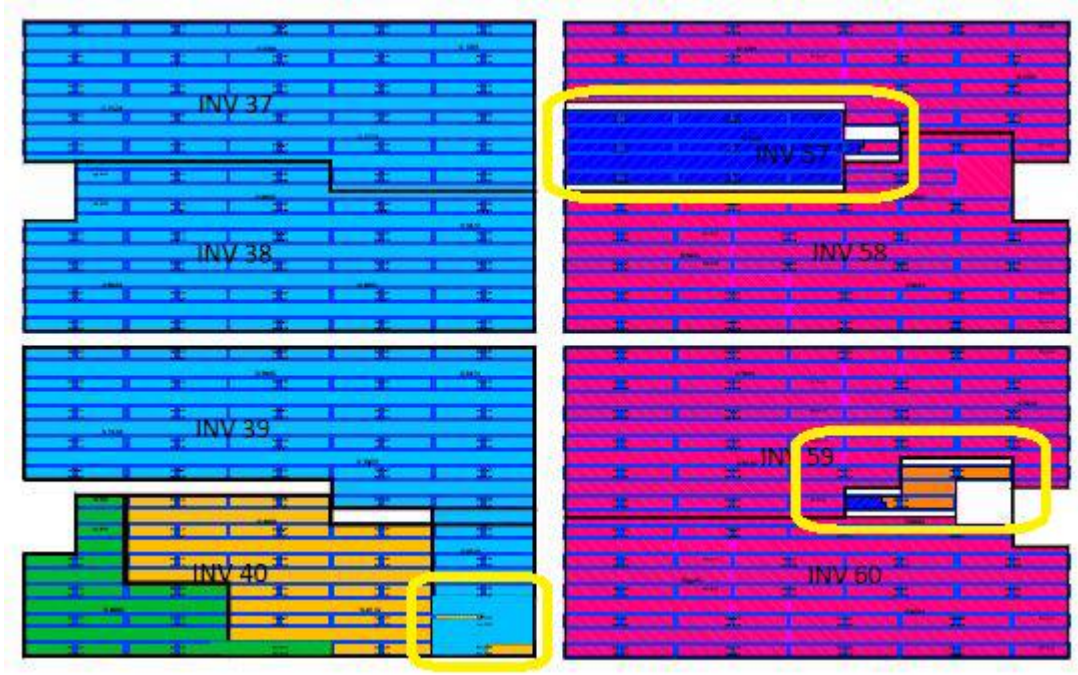
- Genel sistem kontrolü (Kurulumun projeye uygunluğunun, sistem bileşenlerinin ve işçiliğin denetimi)
- Fotovoltaik sistemin % 5 -10 oranlık bir kısmının elektriksel testlerinin yapılması
- Tüm sistemin kızılötesi kamera testlerinin yapılması
- Sistem güvenliği ve performans izleme denetiminin yapılması
- Sistemde olası hataların belirlenmesi ve çözümü için öneriler sunulması
- Sistem performansının değerlendirilmesi ve önceden sunulan fizibilite raporları ile karşılaştırılması.

İşletmeye alma testleri adım adım aşağıdaki şekilde yapılır:

- Sistemin geneli, görsel olarak incelenir. Görsel bu incelemede, modül açısı, azimut açısı, gölge açısı, dış etkenlerden oluşan gölge ve tozlanma dikkate alınır.
- Fotovoltaik sistemin % 5 -10 oranlık bir kısmının mobil I-V Ölçüm Cihazı ile ölçümleri yapılır ve kaydedilir.
- Sistemin tamamının kızılötesi kamera (Infrared) ile çekimi yapılır ve veriler kaydedilir.
- FV sisteminin toplam d.a. çıkış gücü ve evirici çıkışındaki a.a. gücü ölçülür. Böylece, a.a. ve d.a. tarafta olan kayıplar hesaplanır.
- Eviricilerin konfigürasyonları kontrol edilir. Evirici girişlerindeki dizilerin gerilim ve akımı, değişik şartlarda ölçülür.
- Sistemde kullanılan kabloların kesiti ve türü incelenir.
- Sistemdeki sigortalar ve kesiciler kontrol edilir.
- Topraklama, konstrüksiyon bileşenleri ve izleme sistemleri incelenir.

Örnek bir işletmeye alma testinin sonuçları, aşağıda fotoğraflarla gösterilmektedir:

- Şekil 4.8’de, farklı FV modül türlerinden oluşan diziler bir eviriciye bağlanmıştır ve eviricinin verimi düşürülmüştür.



Şekil 4.8. Değişik modül tiplerinin aynı eviriciye bağlanması.

- Şekil 4.9’da, FV modülü taşıyıcı konstrüksiyona sabitleyen aparatın vidası iyi sıkılmamıştır. Bu işçilik hatası, sistemde büyük arızalara yol açabilir.



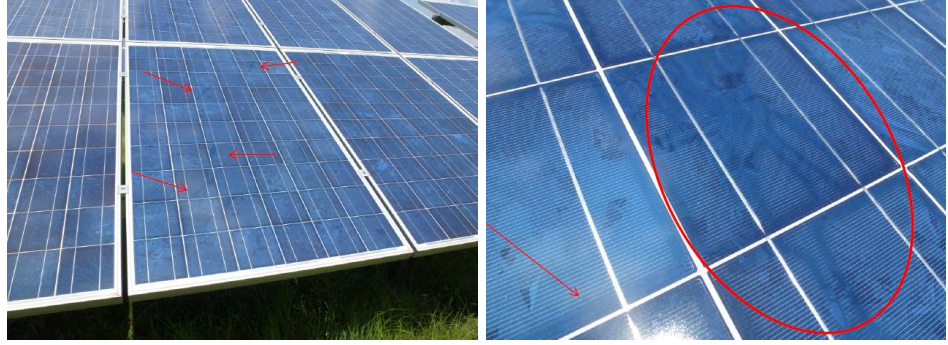
Şekil 4.9. FV modülün taşıyıcı konstrüksiyonuna uygun şekilde bağlanamaması.

- Şekil 4.10’da, yıldırımdan koruma amaçlı yerleştirilen paratoner direği, modüllerin önüne monte edilmiştir ve FV modülerin üzerinde gölge oluşturmuştur.



Şekil 4.10. Paratonerin FV modülleri gölgelemesi.

- Şekil 4.11’de, bazı modüllerin hücrelerinde gözlenen mikro çatlakların gösterilmektedir.



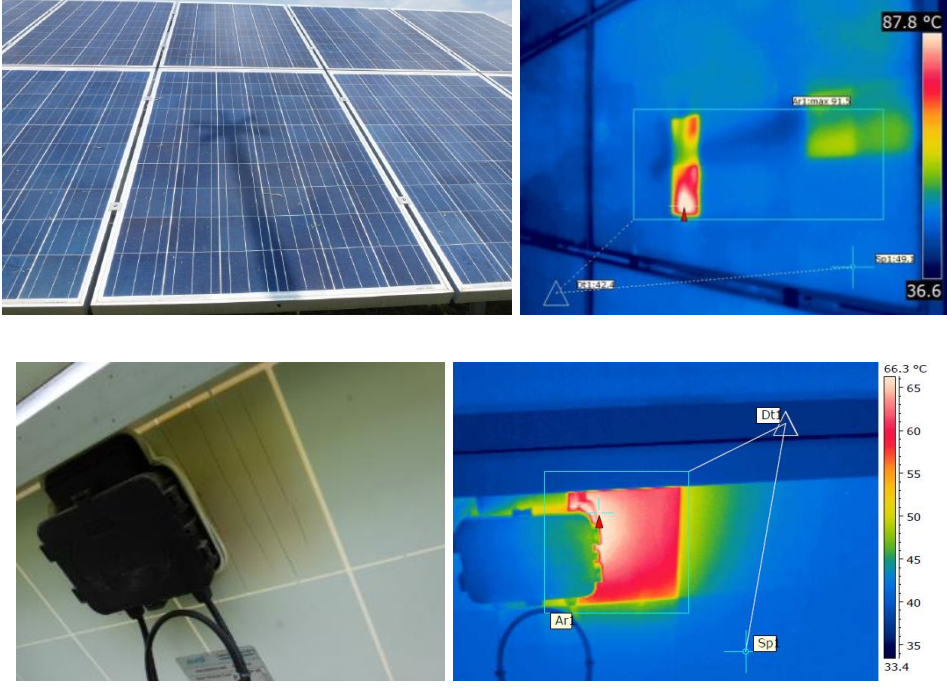
Şekil 4.11. FV hücrelerde mikroçatlakların gözlenmesi.

Hücre üzerindeki mikroçatlaklar, modül üzerinde ısı ve elektriksel arızalara sebep olmaktadır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. FV hücre üzerindeki mikroçatlakların sebep olduğu ısı arızalar.

- Gölge sebebiyle oluşan ısı farkları, kızılötesi kamera ile gözlenebilmektedir. Şekil 4.13’de, paratoner direğinin gölgesinden oluşan sıcaklık farkları, kızılötesi kamera ile fotoğraflanmıştır.



Şekil 4.13. Paratoner direğindin gölgesinden kaynaklanan ısı etkinin kızılötesi kamera ile tespiti.

- Modüllerin ötesinde, FV sistemin diğer bileşenlerinde de bir arıza olup olmadığı, termal kamera ile gözlemlenebilir. Örneğin; Şekil 4.14’de, sistemin d.a dağıtım panosunun kızılötesi kamera ile çekilen bir fotoğrafı gösterilmektedir.



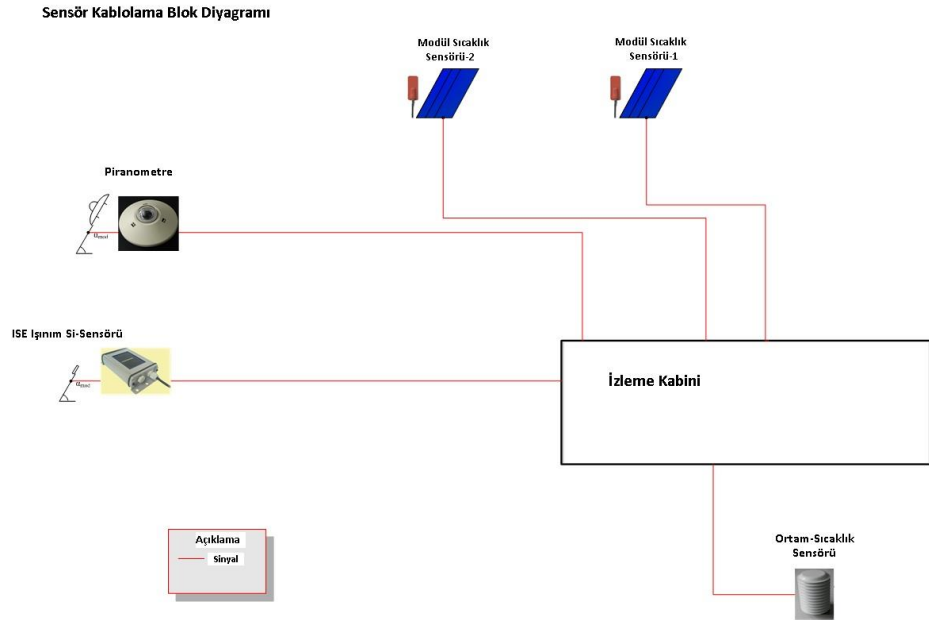
Şekil 4.14. d.a dağıtım panosunun, dijital ve kızılötesi kamera ile fotoğraf çekimleri.

4.4.3. FVGS İşletmesi Sırasında Kullanılan Performans İzleme Bileşenleri

Uygun bir izleme sistemi, 5 dakikalık aralıklarla, sistemin performansını etkileyen tüm etkenleri gerçek zamanlı ölçmektedir ve kaydetmektedir.

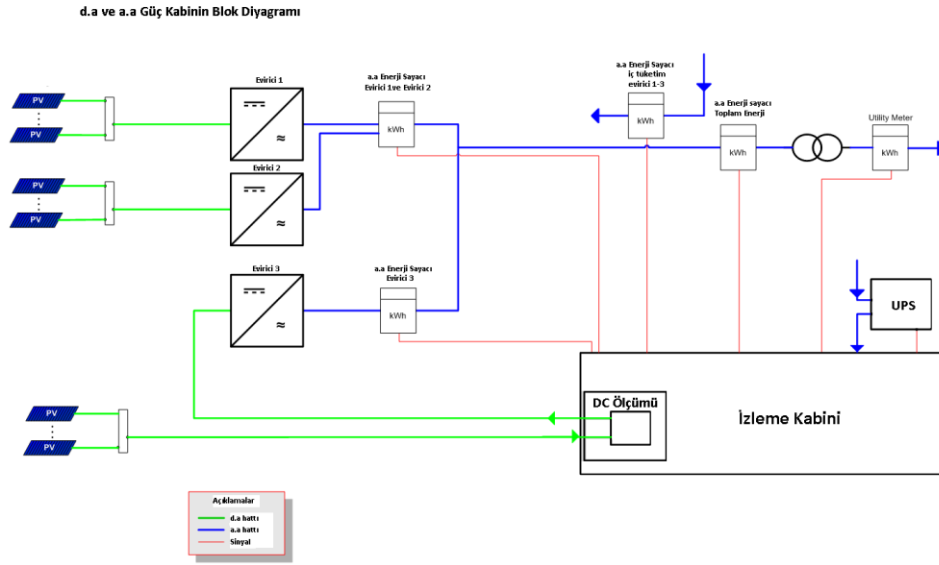
Kaliteli ve doğruluk payı yüksek bir izleme sisteminin, meteorolojik veri ölçüm bileşenleri aşağıda listelenmiştir (Bkz. Şekil 4.15).

1. İzleme kabini
2. Piranometre
3. Modül sıcaklık sensörü
4. Ortam sıcaklık sensörü
5. Rüzgâr hız sensörü
6. Işınım Sensörü
7. UPS



Şekil 4.15. Meteorolojik ölçüm sensörleri bağlantı blok şeması.

FVGS’de, d.a. ve a.a. bileşenlerinin ölçüm akış şeması, Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



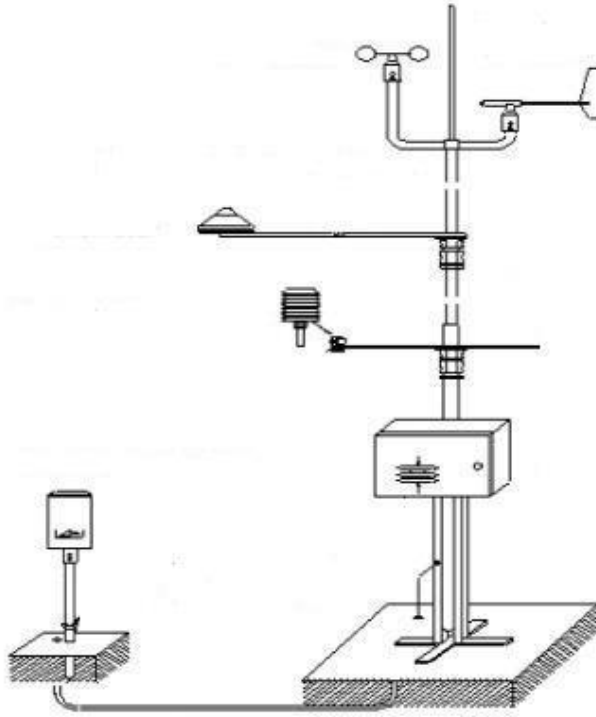
Şekil 4.16. FVGS’de d.a. ve a.a. bileşenlerinin ölçüm akış şeması.

Bütün izleme bileşenleri, mekanik olarak da uygun konumda yerleştirilmelidir. Bileşenlerin, kendilerine has ve önerilen kablo türü ile bağlantısı yapılmalıdır. Örnek ölçüm sensörü yerleşim yüksekliği ve konumları, Çizelge 4.4’de gösterilmektedir (Kaynak: Fraunhofer ISE).

Çizelge 4.4. Ölçüm sensörü yükseklikleri ve konumları.

Ölçüm Sensörü:	Yüksekliği:	Konumu:
Piranometre (eğim açısında)	2 m	FV santralin kenarına, gölge almayacak şekilde monte edilmelidir.
Piranometre (yatay)	2 m	FV santralin yanında, gölge almayacak şekilde monte edilmelidir.
Birleşik nem ve ortam sıcaklık sensörü	2 m	1.seçenek: FV santralin 50 metre uzaklığında konulmalıdır. 2.Seçenek: FV santralin yakınında,, 5 metreden az bir mesafede konulmalıdır.
Rüzgâr hız sensörü	FV modüller ile aynı yükseklikte olmalıdır.	FV modüllerine yakın bir yerde, ama gölgeye neden olmayacak şekilde yerleştirilmelidir.
Rüzgâr yön sensörü	FV modüller ile aynı yükseklikte olmalıdır.	FV modüllerine yakın bir yerde, ama gölgeye neden olmayacak şekilde yerleştirilmelidir.
Yağmur Sensörü	1 m	FV modüllerin kenarına, gölgeye sebep olmayacak şekilde konulmalıdır.

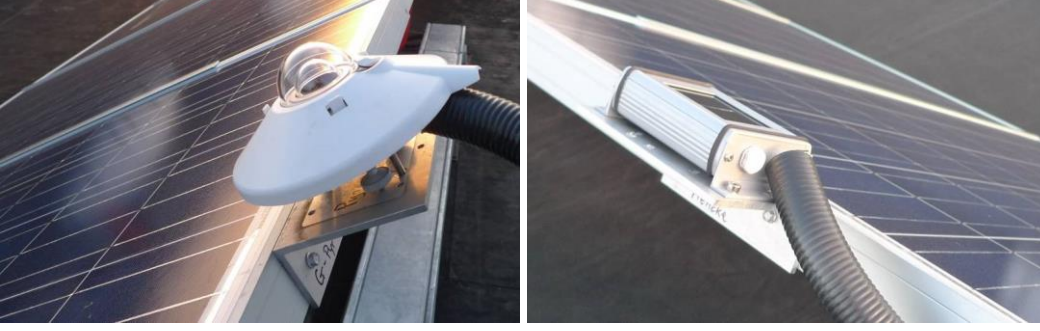
Örnek bir meteorolojik ölçüm montajı, Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Örnek bir meteorolojik ölçüm montajı.

Ölçüm sensörlerinde aranan özellikler, aşağıda özetlenmiştir.

- Işınım Sensörü olarak referans silisyum sensörler ya da piranometre kullanılabilir (Bkz. Şekil 4.18). Işınım sensörleri yerleştirilirken, FV modülü ile aynı eğim ve yön açısında olmasına dikkat edilmelidir. Karşılaştırma yapmak amacıyla, yatay düzlemde de ayrıca ışınım sensörleri bağlanabilir (Şekil 4.19). Bağlantılar için esnek ve zırlı kablo kullanılmalıdır. Ölçü kabloları, esnek kablo koruyucu içinden geçirilmelidir ve direk güneş ışınımından korunulmalıdır.
- Birleşik nem ve ortam sıcaklık sensörü, gölgeli bir alanda, direk güneş ışınımına maruz kalmadan yerleştirilmelidir (Şekil 4.20).
- Modül sıcaklık sensörü, FV modülün arka yüzeyine monte edilmelidir. Kablo bağlantısı esnek, zırlı ve mekanik streten uzak olmalıdır.
- Rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve yağmur sensörlerinin örnek yerleşimleri Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.18. Işınım sensörleri.



Şekil 4.19. Yatay düzlemde yerleştirilmiş ışınlm sensörü.

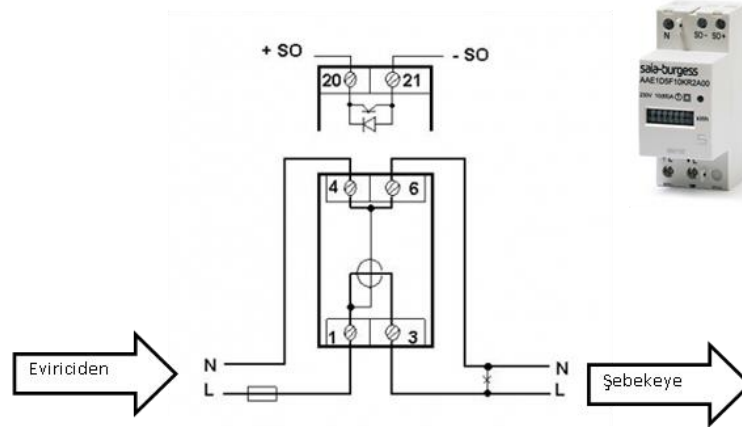


Şekil 4.20. Ortam sıcaklık sensörünün montajı.

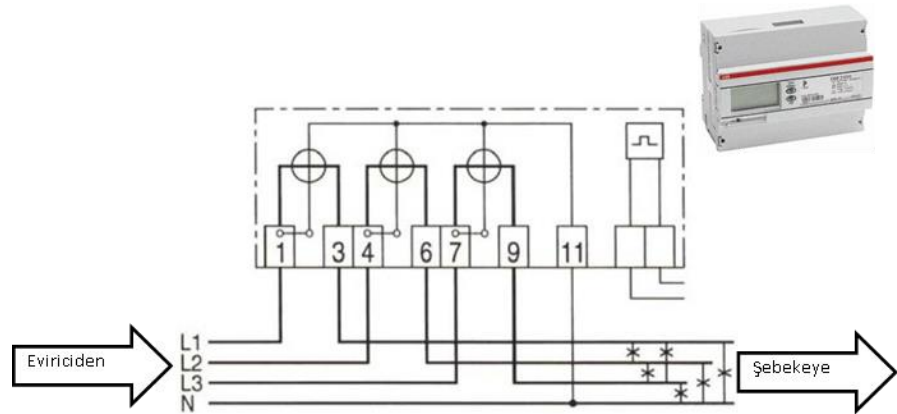


Şekil 4.21. Rüzgâr hızı, rüzgar yönü ve yağmur sensörlerinin örnek yerleşimleri.

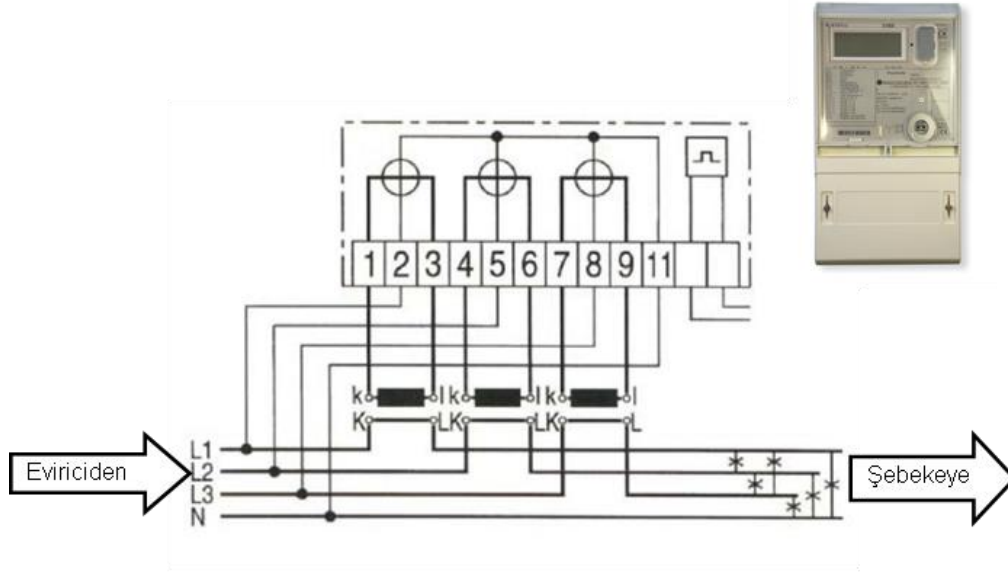
a.a. enerji üretim sayaçları, tek ve üç fazlı olarak evirici çıkışında, transformatör ve şebeke bağlantısında kullanılabilir. Örnek sayaç bağlantıları, Şekil 4.22 - 4.24'de gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Tek fazlı a.a. enerji sayacı.



Şekil 4.23. Üç fazlı a.a. enerji sayacı.



Şekil 4.24. Üç fazlı transformatörlü a.a. enerji sayacı.

İzleme sistemlerinde kesintisiz veri kaydını sağlamak amacıyla, kesintisiz güç kaynaklarının (UPS) kullanılması öncelikle önerilmektedir.

Bir izleme sisteminde, temelde aşağıdaki adımlarda kontrol yapılması önerilebilir:

- Bütün ölçüm sensörleri ve izleme kabini arasında doğru kablolama yapılmıştır.
- Enerji sayacı ile izleme kabini arasında doğru kablolama yapılmıştır. Enerji sayacı, doğru faz sırasına göre bağlanmıştır.
- İzleme kabini ile kesintisiz güç kaynağı arasında doğru kablolama yapılmıştır.

5. UYGULAMALI BAŞARIM İNCELEMESİ

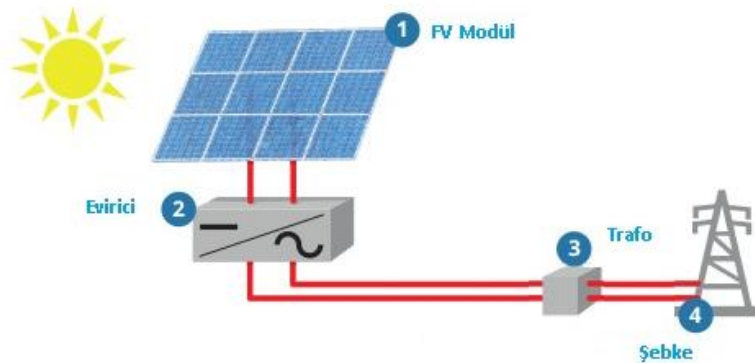
5.1. Giriş

Bu bölümde, YL tezi kapsamında uygulamalı olarak incelenen Nilüfer-Bursa'da yerleşik çift-eksen izleyicili bir FVGS'nin benzetim ve gerçek zamanlı performans analizi yapılmaktadır. İklim verilerinin ve temel sistem bileşenlerinin, YL çalışması kapsamında incelenen sistem için analizi yapılmıştır.

Benzetimde kullanılan veriler, ulusal ve uluslararası kaynaklı gerçek ölçüm değerlerinden ve/veya güvenilir veri tabanlarından temin edilmiştir. Gerçek zamanlı analizde ise ölçüm sensörleri ve üretim sayaçlarıyla ölçülen gerçek değerler kullanılmıştır. Ayrıca, benzetim ve gerçek zamanlı analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

5.2. Nilüfer – Bursa'da Çift-Eksen İzleyicili Fotovoltaik Güç Sistemi

BOSCH firması, yürüttüğü kurumsal sosyal sorumluluk projesinin ilk adımı olarak, Bursa'da Nilüfer Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren iki fabrikasına, 5'er kWp'lik iki adet çift-eksen izleyicili sistem kurmuştur. Bu sistemler, Enisolar Çevre Teknolojileri Enerji ve Tekstil San. Tic. Ltd. Şti. firması ile işbirliğinde kurulmuş ve Ocak 2011'de devre alınmıştır. Sistemde kullanılan 235 Wp gücünde birim FV modüller, BOSCH tarafından sağlanmıştır. Şebeke bağlantılı FVGS'nin enerji akış şeması Şekil 5.1'de, sistem fotoğrafları Şekil 5.2'de ve bileşenlerinin özellikleri Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Şebeke bağlantılı FVGS enerji akış şeması, Nilüfer - Bursa.



Şekil 5.2. Şebeke bağlantılı FVGS fotoğrafları, Nilüfer - Bursa.

Sistemin temel elemanları şunlardır:

- *FV modüller:* Güç sisteminde 22 adet 235 Wp anma gücünde FV modül kullanılmıştır.
- *FV eviriciler:* 1 adet 5 kW anma çıkış gücüne sahip (SMA SMC5000A) evirici kullanılmıştır. 11 adet FV modülün seri bağlanması ile oluşturulan iki adet FV dizinin her biri, evirici girişine bağlanmıştır.
- *Diğer bileşenler:* Sisteme iklim verileri algılayıcısı (SMA Sunny Sensor Box), veri kaydetme ve izleme bileşeni (SMA Webbox) ilave edilmiştir.

Çizelge 5.1: 5,17 kWp gücünde şebekeye bağlı ve çift-eksen izleyicili FVGS bileşenlerinin özellikleri, Nilüfer - Bursa.

FV modül özellikleri:							
	Pmpp (W)	Isc (A)	Voc (V)	Impp (A)	Vmpp (V)	Modül Verimi (%)	Alan (m²)
BOSCH c-Si M60 tipi FV modül (22 adet, çok kristalli silisyum)	235	8,45	36,80	7,76	30,30	14,63	1,64

Evirici özellikleri:	
Model	SMC 5000A (1 adet)
En yüksek giriş gücü	5750 W
En yüksek giriş gerilimi	600 V
MPP gerilim aralığı / Anma giriş gerilimi	246 V – 480 V / 246 V
En düşük giriş gerilimi / Başlangıç giriş gerilimi	211 V / 300 V
En yüksek giriş akımı	26 A
Anma çıkış gücü	5000 W
En yüksek çıkış akımı	26 A
En yüksek verimi / Avrupa verimi	% 96,1 / % 95,3
Çalışma sıcaklığı aralığı	–25 °C - +60 °C
Boyutlar	468 / 613 / 242 mm
Ağırlık	62 kg

İzleyici sistemin özellikleri:	
Model	Degerenergie 5000NT
En yüksek nominal çıkış gücü (modülün türüne bağlı)	4 – 7 kWp
En yüksek alabileceği modül alanı	40 m²
En yüksek yüzey boyutları	8,3 m x 5,3 m
Doğu - batı dönme açısı	300 °
Çalışma gerilimi	100-240 VAC
Kontrol modunda güç tüketimi	1 W
Hareket anında güç tüketimi	12 W
En yüksek dayanabileceği rüzgar hızı	300 km/h

5.3. Nilüfer-Bursa Benzetim Çalışması

5.3.1. İklim Verileri

İncelemeye alınan uygulamalı sistemin koordinatları şunlardır: 40°14'44" N, 28°56'50" E.

FV güç sistemi için en önemli iklim verileri, ışıyım şiddeti [W/m^2] ve ortam sıcaklığı [$^{\circ}C$] değerleridir. PVGIS veri tabanından temin edilen ve bu YL çalışması kapsamında incelemeye alınan çift-eksen izleyicili sistemin Nilüfer-Bursa konumu için ortalama en iyi eğim açıları Çizelge 5.2’de gösterilmektedir. PVGIS kaynaklı yatay düzlemdeki, yıllık ortalama en iyi eğim açısındaki ve çift-eksen izleyici düzlemindeki karşılaştırmalı günlük ortalama ısıtım değerleri Çizelge 5.3’de gösterilmektedir.

Bursa için iklim verilerine, ulusal meteoroloji kuruluşlarının ölçüm istasyonlarından da ulaşmak mümkündür. Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden (MGM) temin edilen ve uzun yıllar içinde gerçekleşen (1950-2014) ortalama ortam sıcaklığı ölçüm verileri, Çizelge 5.4’de gösterilmektedir. PVGIS veri tabanındaki aylık ortalama sıcaklık verileri ile MGM ölçüm verileri arasındaki uyumluluk dikkat çekmektedir.

Çizelge 5.2. Yıllık ortalama en iyi eğim açıları, Nilüfer – Bursa (PVGIS, 2015).

[°]	Nilüfer-Bursa
Ocak	59
Şubat	51
Mart	40
Nisan	26
Mayıs	15
Haziran	7
Temmuz	12
Ağustos	23
Eylül	38
Ekim	51
Kasım	60
Aralık	62
Ortalama	31

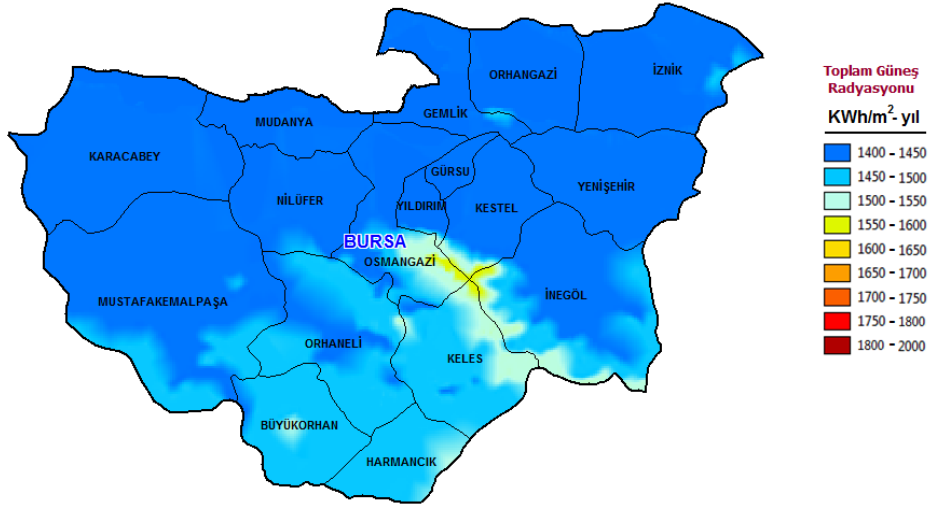
Çizelge 5.3. Yatay düzlemdeki, yıllık ortalama en iyi eğim açısındaki ve çift-eksen izleyici düzlemindeki karşılaştırmalı günlük ortalama ısıtım değerleri, Nilüfer - Bursa (PVGIS, 2015).

[kWh/(m ² .d)]	Yatay düzlemdeki ısıtım değerleri	Yıllık ortalama en iyi eğim açısındaki ısıtım değerleri	Çift-eksen izleyici düzlemindeki ısıtım değerleri
Ocak	1,60	2,37	2,90
Şubat	2,23	2,98	3,56
Mart	3,74	4,49	5,41
Nisan	4,81	5,18	6,50
Mayıs	6,30	6,23	8,38
Haziran	7,29	6,85	9,87
Temmuz	7,60	7,35	10,30
Ağustos	6,78	7,15	9,79
Eylül	4,97	5,97	7,72
Ekim	3,34	4,54	5,73
Kasım	2,25	3,52	4,52
Aralık	1,46	2,26	2,78
Ortalama	4,38	4,91	6,46

Çizelge 5.4. Ortalama ortam sıcaklıkları, Nilüfer – Bursa (PVGIS, 2015 ve MGM, 2015).

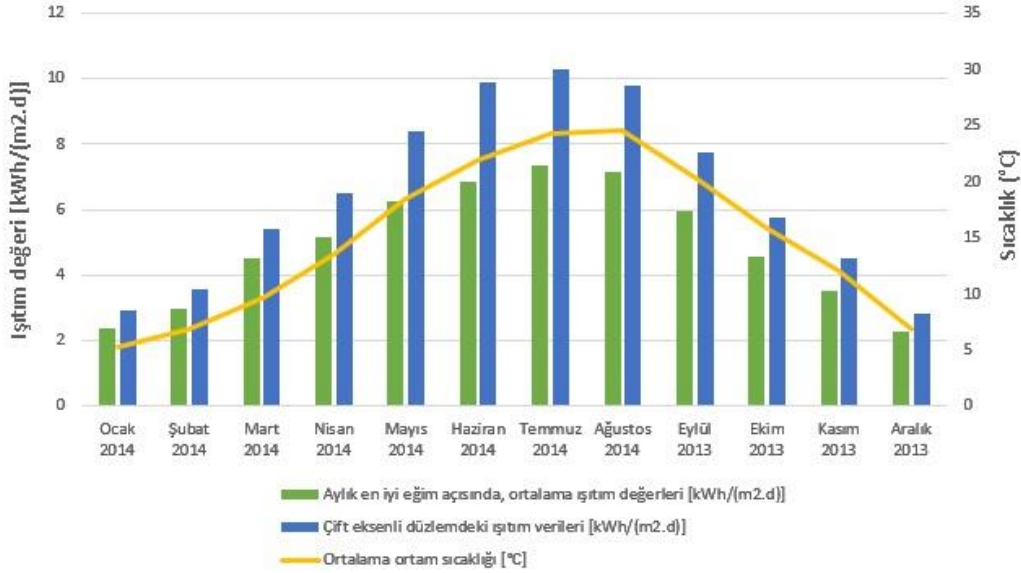
[°C]	PVGIS	MGM
Ocak	5,3	5,4
Şubat	6,8	6,3
Mart	9,6	8,4
Nisan	13,5	12,8
Mayıs	18,5	17,5
Haziran	22,0	22,1
Temmuz	24,3	24,6
Ağustos	24,5	24,2
Eylül	20,4	20,1
Ekim	15,8	15,2
Kasım	12,0	10,7
Aralık	6,8	7,4
Ortalama	14,96	14,56

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlan Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası'nda Bursa iline ilişkin güneş ısınım verileri, Şekil 5.3'de gösterilmektedir.

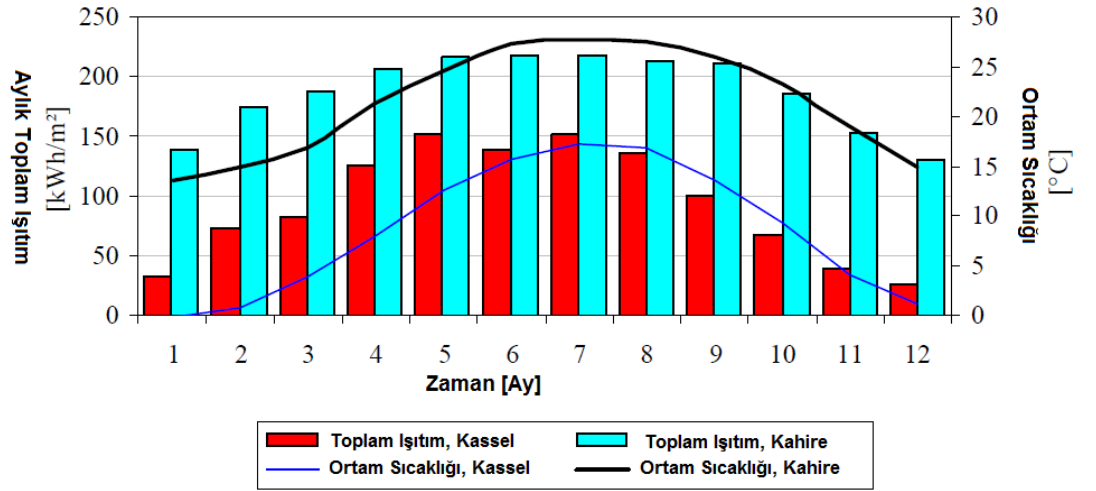


Şekil 5.3. Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, Bursa (GEPA, 2015).

PVGIS veri tabanı kullanılarak, Nilüfer-Bursa için *en iyi eğim açısındaki ve çift-eksen izleyici düzlemindeki günlük ortalama ısıtım değerleri ve ortam sıcaklık değerleri* grafiksel olarak karşılaştırılmıştır (Şekil 5.4). Şekil 5.5’de, Kassel-Almanya ve Kahire-Mısır’da yapılan benzer bir karşılaştırmanın grafiksel sonucu gösterilmektedir (Metwally, 2005). Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’deki verilerin yıllık özet bir karşılaştırması Çizelge 5.5’de verilmektedir.



Şekil 5.4. Ayların ortalama günlük ısıtım [kWh/(m².d)] ve ortam sıcaklığı [°C] verileri, Nilüfer –Bursa.



Şekil 5.5. Aylık toplam ısıtım [kWh/(m².m)] ve ortam sıcaklığı [°C] verileri, Kassel-Almanya ve Kahire-Mısır (Metwally, 2005).

Çizelge 5.5. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'deki verilerin yıllık karşılaştırma tablosu.

	Yıllık en iyi eğim açısı (°)	Yıllık toplam ısıtım [MWh/(m².y)]	Yıllık ortalama ortam sıcaklığı [°C]
Nilüfer-Bursa (sabit sistem)	31	1,8	14,96
Nilüfer-Bursa (çift-eksen izleyicili sistem)	Çift eksen izleyicili	2,36	14,96
Kassel-Almanya	35	1,12	8,56
Kahire-Mısır	25	2,25	21,38

5.3.2. Toplam Sistem Başarımı Belirleyicileri ve Enerji Hasadı

Sistemde kullanılan FV modüllerin alan ve verim bilgileri ve bulunulan konumun günlük güneş enerjisi ısıtım [kWh/(m².d)] değerleri kullanılarak, FV dizinin enerji üretim potansiyeli [kWh/d] aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilmektedir (Çubukçu, 2011):

$$E_{PV} = A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot H_{I,d}$$

E_{PV} : FV dize günlük enerji üretimi, [kWh/d]

A_{PV} : FV dize yüzey alanı, [m²]

$H_{I,d}$: Günlük güneş ısıtımı, [kWh/(m².d)]

FV Dize çıkışında hesaplanan d.a. enerji miktarları, güç sistemi bileşenlerindeki kayıplar nedeniyle düşecektir. Bu bölümde, uygulaması yapılan sistemin verim, kayıp ve başarımları hesaplanmış ve kayıplar sonucunda birim güç (kW) başına elde edilecek enerji miktarları hesaplanmıştır.

Nilüfer-Bursa'da uygulaması yapılan sistemin bileşenlerinin ve toplam sistemin verimi, simüle edilmiştir. *Şebeke bağlantılı bu FV güç sistemi için % 12,4 sistem verimi hesaplanmıştır (Bkz. Çizelge 5.6).*

Çizelge 5.6. FV dize toplam sistem verimi hesabı.

Uygulama Türü:	Şebeke bağlantılı
Anma gücü:	5,17 kW
Bağlantı yapısı:	a.a.
FV verimi (η_{PV}):	% 14,63
Güç şartlandırıcı verimi (η_{PCU}):	% 96.1
Kablo verimi:	% 98
Diğer kayıplar (sıcaklık, toz, gölge vb.) sonrası dönüşüm verimi*:	% 90
FV sistem verimi (η_{SP}):	% 12,4

* Gerçekte elde edilecek FV dize anma verimi, modül üreticisi tarafından bildirilen modül veriminden daha düşük olacaktır. Bu kaybın temel nedeni, sıcaklık, kısmi gölge vb. durumlardır. Bu kaybın hangi oranda gerçekleştiğini karşılaştırmanın en basit yöntemi, *FV ortalama dize verimi* ile *dize anma verimi* arasındaki farkın karşılaştırılması olacaktır. Benzetimde, FV dize üzerindeki bu kayıplar % 10 olarak dikkate alınmıştır (Çubukçu, 2011).

Nilüfer-Bursa'da kurulu olan 5,17 kW gücündeki FVGS dikkate alınarak, en iyim eğim açısında sabit ya da çift-eksen izleyicili konumlandırılabilir uygulamalar için aylık enerji üretim miktarları (Bkz. Çizelge 5.7) ve TS EN 61724 standardına uygun olarak yapılan benzetimin başarımları hesaplanmıştır (Bkz. Çizelge 5.8).

Çizelge 5.7. Nilüfer-Bursa’da kurulu olan sistemin aylık enerji üretim benzetimi.

Nilüfer-Bursa	En iyi eğim açısında	Çift-eksen izleyicili düzlemde
	5,17 kW	5,17 kW
	a.a.	a.a
Ocak [kWh/m]	329,34	402,99
Şubat [kWh/m]	374,03	446,83
Mart [kWh/m]	623,93	751,78
Nisan [kWh/m]	696,60	874,11
Mayıs [kWh/m]	865,72	1164,49
Haziran [kWh/m]	921,17	1327,30
Temmuz [kWh/m]	1021,36	1431,29
Ağustos [kWh/m]	993,57	1360,42
Eylül [kWh/m]	802,83	1038,17
Ekim [kWh/m]	630,88	796,24
Kasım [kWh/m]	473,36	607,84
Aralık [kWh/m]	314,05	386,31
TOPLAM (kWh/y)	8046,85	10587,77
FV sistem verimi [η_{sp}]	0,124	0,124
kWh/kW_{anma}/y	1556,5	2048

Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8 incelendiğinde, aşağıdaki özet değerlendirme yapılabilir:

- *1 kW anma gücü başına, Nilüfer-Bursa’da yıllık en iyi eğim açısında (31°) yerleştirilen FVGS için 1556,5 kWh/y, çift-eksen izleyicili sistemde ise 2048 kWh/y enerji üretmek mümkün olabilecektir. Yani, çift-eksen izleyicili sistemin yıllık enerji üretim kazancı, sabit sisteme göre % 31,6’dır. Ayrıca, % 87 performans oranını yakalamak mümkündür.*

Çizelge 5.8. Nilüfer-Bursa uygulaması için FV sistemi benzetim sonuçları.

Uygulama yeri:	En iyi eğim açısında sabit konumlandırılmış	Çift-eksen izleyicili
Uygulama türü:	Şebeke bağlantılı	Şebeke bağlantılı
FV Dize Özellikleri:		
Kurulu FV gücü [kW]:	5,17	5,17
Birim FV modül anma gücü [W]:	235	235
FV modül sayısı [adet]:	22	22
Birim FV modül alanı [m ²]:	1,6434	1,6434
FV dize alanı [m ²]:	36,15	36,15
Enerji Hesaplamaları:		
Yıllık ortalama en iyi eğim açısındaki günlük toplam ısıtım [kWh/(m ² .d)]:	4,91	6,46
Yıllık ortalama en iyi eğim açısındaki toplam ısıtım [kWh/(m ² .y)]:	1795,1	2362
FV dize yüzeyine gelen güneş enerjisi [kWh/y]:	64893,95	85385,22
FV dize çıkışındaki enerji [kWh/y]:	8544,59	11242,67
FV sistemi çıkış enerjisi [kWh/y]:	8047,12	10588,12
Verim Hesaplamaları:		
FV dize verimi [η_{PV}]:	0,1463	0,1463
FV dize üzerindeki diğer kayıpların (diyot, kablo, sıcaklık, gölge vb. uyumsuzluklar) dönüşüm verimi:	0,9	0,9
Ortalama FV dize verimi [η_{Amean}] ¹⁾ :	0,1317	0,1317
Denge bileşenleri verimi [η_{BOS}] ¹⁾²⁾ :	0,94	0,94
FV sistem verimi [η_{SP}]:	0,124	0,124
Sistem Başarımı Belirleyicileri:		
Referans hasadı (Y_r), [kWh/d/kW _{anma}]:	4,91	6,46
Dize hasadı (Y_a), [kWh/d/kW _{anma}]:	4,53	5,96
Nihai sistem hasadı (Y_f), [kWh/d/kW _{anma}]:	4,26	5,61
Dize yakalama kayıpları (L_c), [kWh/d/kW _{anma}]:	0,38	0,50
Denge bileşeni kayıpları (L_{BOS}), [kWh/d/kW _{anma}]:	0,18	0,23
Gerçekleme oranı (PR):	0,87	0,87
Nihai yıllık hasat, [kWh/y/kW _{anma}]:	1556,5	2048

¹⁾ Ortalama dize verimi, FV dize anma verimi ile karşılaştırma için yararlıdır. Ortalama ve anma verimleri arasındaki fark, diyot, kablo, uyumsuzluk ve FV sistem çalışması sırasındaki diğer kayıpları temsil eder. Benzetimlerde bu dönüşüm verimi % 90 olarak hesaplanmıştır.

²⁾ Denge bileşenleri verimi, FV dize dışında kalan, anahtarlar, kontrollere, kablolar, ölçme cihazları, şartlandırıcı donanım, FV destek yapısı, elektrik depolama bileşenleri gibi parçalarının dönüşüm verimini ifade eder.

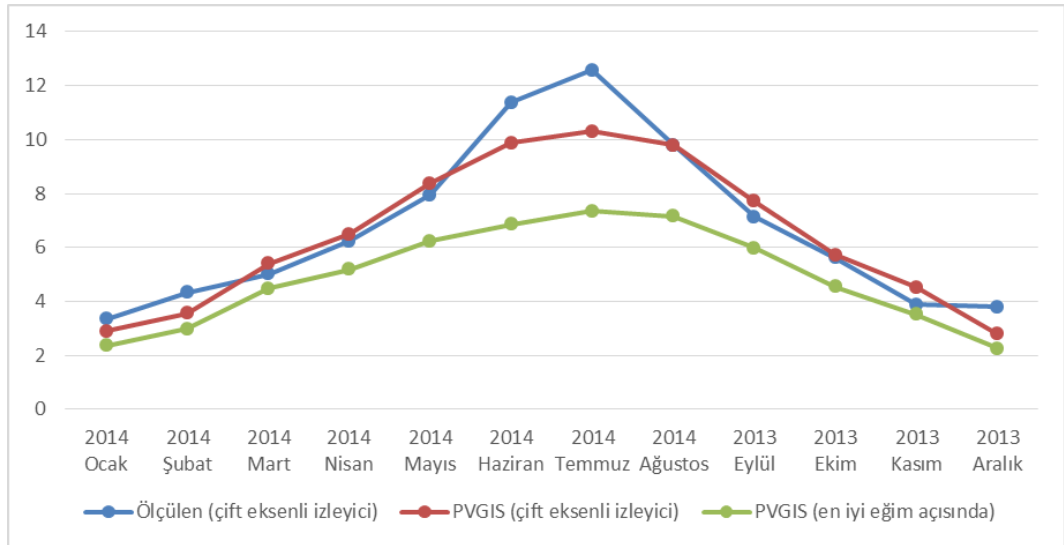
5.4. Nilüfer-Bursa Uygulamalı Başarım İncelemesi

Bu çalışma kapsamında, Nilüfer-Bursa'da 5,17 kW anma gücündeki şebeke bağlantılı çift-eksen izleyicili FVGS, *1 Eylül 2013-31 Ağustos 2014* döneminde izlenmiştir.

5.4.1. İklim Verilerinin İncelenmesi

İzleme döneminde, SMA SUNNY SENSORBOX algılayıcı kullanılmıştır. Bu algılayıcı aracılığıyla, dize düzlemindeki ışıyım şiddeti (W/m^2), ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$) ve modül sıcaklığı ($^{\circ}C$) beşer dakikalık aralıklarla ölçülmüştür.

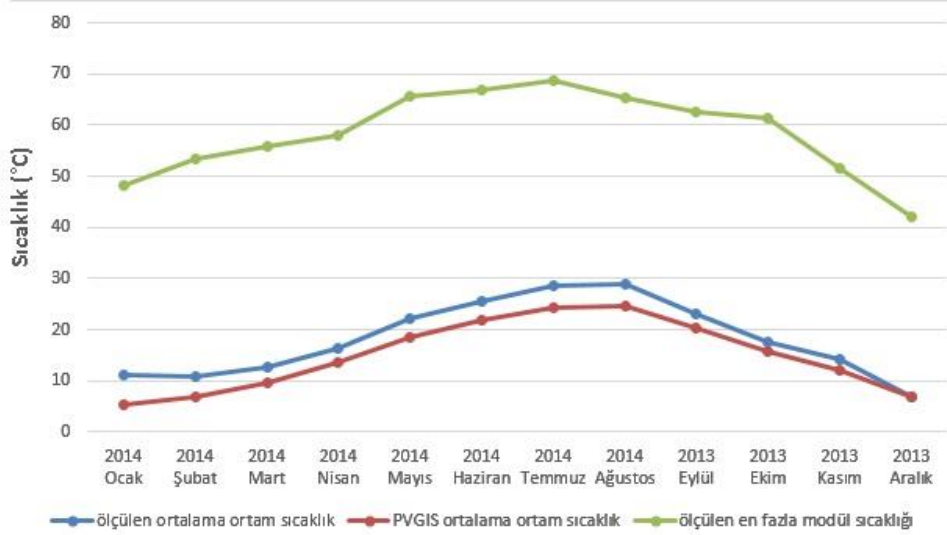
Çift-eksen izleyici düzleminde ölçülen ısıtım değerleri [$kWh/(m^2.d)$], Çizelge 5.3'de sunulan PVGIS verileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.6). *Çift-eksen izleyici düzleminde ortalama ısıtım değeri, ölçüm sonuçlarında 6,76 [$kWh/(m^2.d)$] ve PVGIS veri tabanında 6,46 [$kWh/(m^2.d)$] olarak hesaplanmıştır. PVGIS aylık ortalama verilerinin, kurulum yerinde hesabı yapılan değerlerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.*



Şekil 5.6. PVGIS ve gerçek ısıtım değerlerinin karşılaştırılması [$kWh/(m^2.d)$], Nilüfer-Bursa.

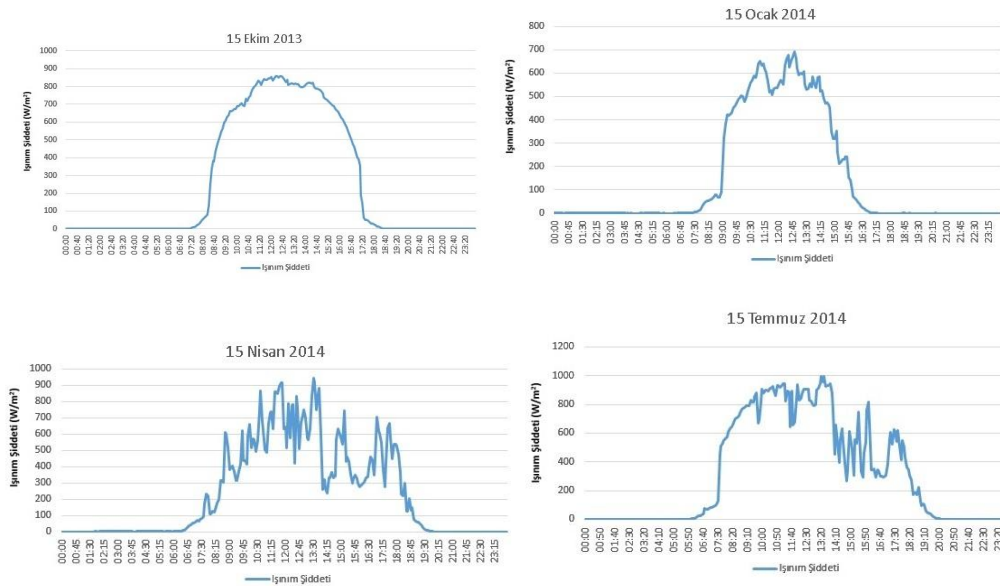
2013-2014 döneminde ölçülen ortalama ortam sıcaklığı ve en yüksek modül sıcaklığı, PVGIS ortalama ortam sıcaklığı (Bkz. Çizelge 5.4.) ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.7'de gösterilmektedir. *Kurulum yerinde izleme döneminde ölçülen yıllık ortalama sıcaklık değeri 18,23 $^{\circ}C$ dir. Bu değerler, PVGIS veri tabanında belirtilen 14,96 $^{\circ}C$ ortalama değerinin üstündedir. Öte yandan, PVGIS ve ölçüm*

değerlerinin karşılaştırılmasında, aylık ortalamaların değişimi uyum göstermektedir. Ölçülen en yüksek modül sıcaklıkları ise 42-69 °C aralığında değişmektedir.

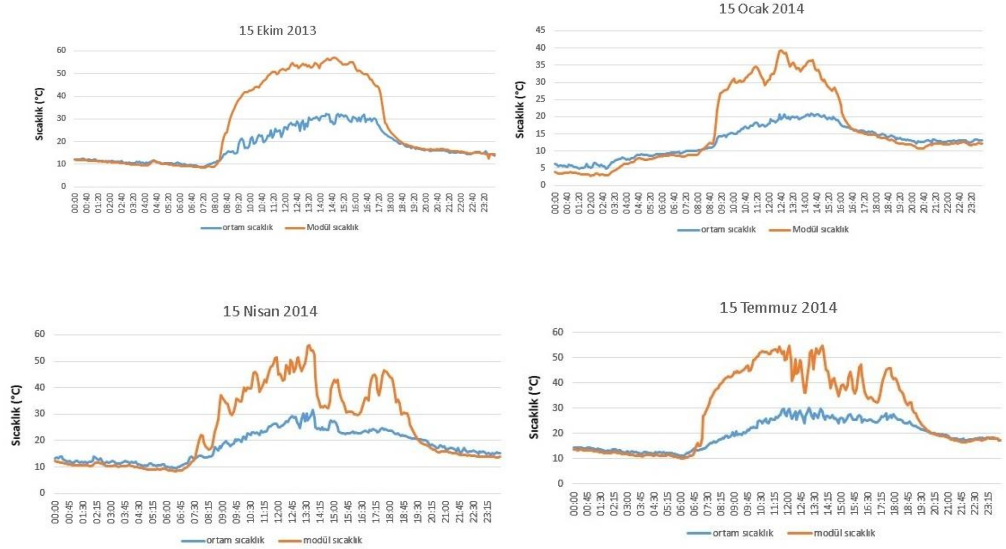


Şekil 5.7. Sıcaklık karşılaştırmaları, Nilüfer-Bursa.

Mevsimsel olarak seçilen örnek günlerin ışıınım şiddeti ve ortam sıcaklığı-modül sıcaklığı değişimleri Şekil 5.8-5.9'da gösterilmektedir. Akşam saatlerinde ortam sıcaklığına yakın olan modül sıcaklığının, gün içinde arttığı anlaşılmaktadır. Herhangi bir kısmi gölgelenme durumunda, ışıınım şiddetinde anlık düşüşler gerçekleşebilmektedir (Çubukçu, 2011).



Şekil 5.8. Günlük ışıınım şiddeti değişim örnekleri, Nilüfer-Bursa.



Şekil 5.9. Günlük ortam sıcaklığı-modül sıcaklığı değişimi örnekleri, Nilüfer-Bursa.

5.4.2. FV Güç Sistemi Başarım İncelemesi

Beşer dakikalık aralıklarla ölçümü yapılan ışıınım şiddeti (W/m^2) değerlerinden, dize düzlemine gelen toplam ısıtım hesaplanmıştır. FV modül teknik karakteristiğinde belirtilen dönüşüm verimi (0,1463) kullanılarak, toplam $36,15 m^2$ alanı kaplayan FV dize çıkışında beklenen enerji miktarı hesaplanmıştır. İşletme esnasında, FV eviricilerin girişinde ve çıkışında ölçülen enerji miktarları karşılaştırmalı olarak listelenmiştir. (Bkz. Çizelge 5.9). Eviricilerin yıllık ortalama % 95 verim değerinde çalıştığı gözlenmiştir.

5,17 kW anma gücündeki şebeke bağlantılı çift-eksen izleyicili FVGS başarım değerleri, gerçek ölçümler kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.10). 2013-2014 yılı izleme döneminde, bu uygulamanın benzetiminde öngörülen % 87 gerçekleştirme oranına karşılık gerçekte yıllık ortalama % 84,2 oranında performans gözlenmiştir. Gerçekleştirme oranı, karşılaştırmalı olarak Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

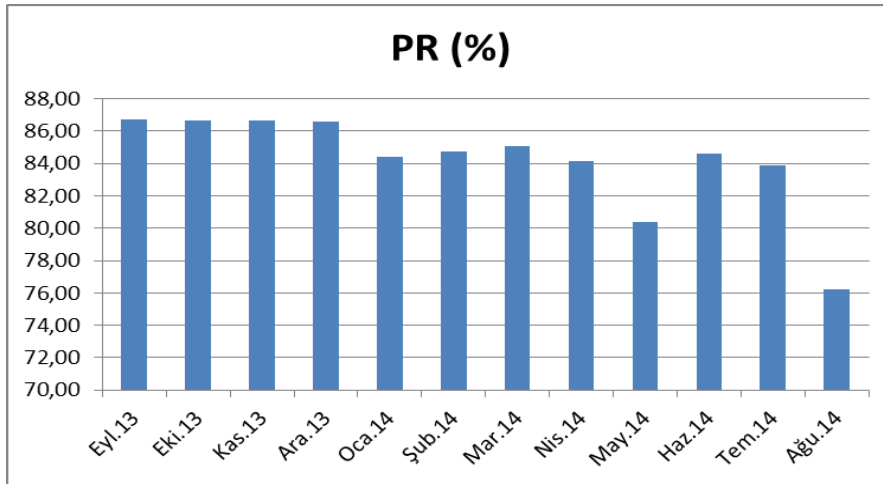
Çizelge 5.9. 5,17 kWp çift-eksen izleyicili FVGS giriş-çıkış enerji miktarları,

Nilüfer – Bursa.

Çalışma Dönemi:	FV dize düzelemine gelen ışıltım (kWh/m)	FV dize çıkışı enerji üretimi (kWh/m)	FV evirici çıkışı enerji üretimi (kWh/m)
Ocak 2014	3754,18	476,81	453,08
Şubat 2014	4392,95	559,33	532,24
Mart 2014	5614,46	717,94	683,14
Nisan 2014	6767,28	853,81	814,33
Mayıs 2014	8909,17	1092,28	1024,55
Haziran 2014	12330,77	1573,36	1492,02
Temmuz 2014	14086,57	1770,36	1690,39
Ağustos 2014	10982,37	1236,65	1197,08
Eylül 2013	7732,49	1047,42	959,24
Ekim 2013	6298,05	817,58	780,65
Kasım 2013	4218,71	534,19	522,67
Aralık 2013	4258,47	555,22	527,52
TOPLAM (kWh/y)	89345,45	11234,95	10676,91

Çizelge 5.10. Şebeke bağlantılı FVGS yıllık ortalama başarımlar değerleri, Nilüfer – Bursa.

	η_{SP} [-]	Yr [h.d ⁻¹]	Ya [h.d ⁻¹]	Yf [h.d ⁻¹]	Lc [h.d ⁻¹]	PR [%]	Nihai yıllık hasat (Yf), [kWh/y/kW _{anma}]
2013-2014	0,117	6,76	5,95	5,66	0,80	84,18	2065,17



Şekil 5.10. Şebeke bağlantılı çift-eksen izleyicili FVGS gerçekleştirme oranları (PR), Nilüfer-Bursa.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemlerinin elektrik enerjisi arzındaki payı, her geçen gün artmaktadır. Bu sistemlerin kalitesindeki en ufak bir iyileşme, teknik ve mali açıdan birçok kazanımı da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla, FVGS kalitesinin ve güvenilirliğinin arttırılmasına yönelik çabalar, ilgili tüm paydaşların dikkatini çekmektedir.

Başarılı bir fotovoltaik (FV) güç tesisinin işletmesine pek çok paydaş dahil olmaktadır: üreticiler, proje planlamacıları, işletmeciler, yatırımcılar, bankalar ve sigorta şirketleri.

Günümüzde, kurulu olan FVGS'lerin büyük bir çoğunluğu güneye yönelimli ve yıllık ortalama en iyi eğim açısında sabit olarak yerleştirilmektedir. Öte yandan, tek-eksen izleyicili sistemlerde % 10'luk daha fazla bir yatırım maliyetiyle % 15-20'lere yaklaşan daha fazla enerji üretilebileceği raporlanmıştır. Çift-eksen izleyicili sistemlerde ise % 20'ye yaklaşan daha fazla yatırım maliyetleriyle, % 35'leri bulan enerji üretim artışları sağlanabilmektedir. Bu nedenle, birçok yatırımcı açısından çeşitli dezavantajlarına (daha fazla bakım-onarım gerektirmesi gibi) karşın, izleyicili sistemler hala ilgi odağıdır.

Türkiye'de uluslararası standartlara ve akademik literatüre uygun az sayıda FVGS performans analizi çalışması yapılmıştır. İzleyicili FVGS sistemlerine ilişkin kapsamlı bir çalışmaya ise rastlanmamıştır. Bu gerekçeyle, Nilüfer-Bursa'da kurulu bulunan çift-eksenli bir FVGS'nin bir yıllık izleme periyodunda, performans analizi gerçekleştirilmiş ve değerlendirme sonuçları, bu tez kapsamında irdelenmiştir.

Bu yüksek lisans tezi, tipik bir FV güç sisteminin kalite karakteristiklerinin neler olduğu ve ne şekilde belirlenebileceği konusuna odaklanmış ve Nilüfer – Bursa'da kurulu 5,17 kWp gücündeki çift-eksen izleyicili bir FVGS örneğinde de uygulamalı analizini yapmıştır.

Bir fotovoltaik sistemin performansını etkileyen faktörleri, üç ana başlıkta gruplandırabiliriz: *İklimsel ve Çevre Koşulları*, *Sistemin Tasarım Kararları*, *Sistem Bileşenlerinin Kalitesi*. Bu tez kapsamında yapılan incelemelerde de, bu üç aşama dikkate alınmıştır.

FVGS kurulum yerine ilişkin, güvenilir veri kaynakları kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Ayrıca, gerçek zamanlı bir yıllık izleme dönemindeki (Eylül 2013 – Ağustos 2014 aralığı) 5 dakikalık ölçümler kullanılarak, uygulamalı analizler yapılmıştır. Benzetim ve gerçek zamanlı uygulama sonuçları kıyaslanmıştır. İklim verilerine ilişkin dikkat edici bazı sonuçları şu şekilde özetleyebiliriz:

- Çift-eksen izleyici düzleminde ortalama ısıtım değeri, ölçüm sonuçlarında 6,76 [kWh/(m².d)] ve PVGIS veri tabanında 6,46 [kWh/(m².d)] olarak hesaplanmıştır. PVGIS aylık ortalama verilerinin, kurulum yerinde hesabı yapılan değerlerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Avrupa Komisyonu – Ortak Araştırma Merkezi Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) tarafından sağlanan ışınım şiddeti verilerine, güvenilir veri kaynakları olarak başvurulabileceği anlaşılmaktadır.
- Ölçülen yıllık ortalama sıcaklık değeri 18,23 °C dir. Bu değerler, PVGIS veri tabanında belirtilen 14,96 °C ortalama değerinin üstündedir. Öte yandan, PVGIS ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılmasında, aylık ortalamaların değişimi uyum göstermektedir.
- Ölçülen en yüksek modül sıcaklıkları ise 42-69 °C aralığında değişmektedir

Nilüfer-Bursa'da 5,17 kW anma gücündeki şebeke bağlantılı çift-eksen izleyicili FVGS başarımı belirleyicileri, benzetim ve uygulamalı çalışmasında aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

- Benzetim çalışmasında elde edilen FVGS başarım belirleyicileri şu şekildedir:
 - PVGIS verilerine göre, yıllık ortalama en iyi eğim açısındaki (31°) sabit açılı yerleşimde beklenen toplam ısıtım, 1795,1 [kWh/(m².y)]'dir.
 - PVGIS verilerine göre, çift-eksen izleyicili bir sistem için yüzeye gelen toplam ısıtım, 2362 [kWh/(m².y)]'dir.

- Beklenen sistem verimi % 12,4'dür.
- 5,17 kWp sabit açılı FVGS çıkışında beklenen a.a. çıkış enerjisi 8047,12 kWh/y değerindedir. Çift-eksen izleyicili FVGS çıkışında bu değer yaklaşık % 31,6 artışla 10588,12 kWh/y olmaktadır. Yani, 1 kW anma gücü başına, en iyi eğim açısında (31°) yerleştirilen FVGS için 1556,5 kWh/y, çift-eksen izleyicili sistemde ise 2048 kWh/y enerji üretmek mümkün olabilecektir.
- Yani, çift-eksen izleyicili sistemin yıllık enerji üretim kazancı, sabit sisteme göre % 31,6'dır. Ayrıca, % 87 performans oranını yakalamak mümkündür.
- Sistemden beklenen gerçekleştirme oranı (PR), % 87'dir.
- Gerçek-zamanlı uygulama sonucunda elde edilen FVGS başarımlarını belirleyicileri şu şekildedir:
 - Çift-eksen izleyicili sistem için yüzeye gelen toplam ısıtım, 2471,5 [kWh/(m².y)]'dir. Yani, izleme döneminde, PVGIS veri kaynaklarında öngörülenden daha fazla ısıtım gözlenmiştir.
 - Gözlemlenen sistem verimi % 11,7 olmuştur ve benzetimde öngörülen de biraz daha düşük bir değerdir.
 - 5,17 kWp çift-eksen izleyicili FVGS çıkışında elde edilen a.a. çıkış enerjisi 10676,91 kWh/y değerindedir. Sistem verimi benzetim değerlerinden biraz daha düşük olmasına karşın, uygulamada daha fazla ısıtım alındığından, beklenenin biraz daha üstünde bir enerji üretimi gerçekleşmiştir.
 - Çift-eksen izleyicili FVGS çıkışında, 1 kW anma gücü başına, 2065,17 kWh/y enerji üretmek mümkün olmuştur.
 - Benzetimde öngörülen % 87 gerçekleştirme oranına (PR) karşılık, gerçekte yıllık ortalama % 84,2 oranında performans gözlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada uygulamalı incelemesi yapılan sistemin benzetim hesaplamaları ve gerçek ölçümleri arasında belirgin bir uyumluluk gözlenmiştir.

Bu tezin sonuç ve tartışma bölümünde, şu hususlara ayrıca vurgu yapmak yerinde olacaktır:

- FV güç sistemlerinin uluslararası değerlendirme ölçütleri ile incelenmesi, izleme sonuçlarının güvenilir bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Günümüzde, şebeke bağlantılı FV güç sistemlerinde gerçekleştirme oranlarının (PR), % 80 altına düşmesi, sistemin çalışmasında çeşitli hata etkenlerinin olduğunu göstermektedir. Kirlilik, gölge, yük talebindeki değişim gibi uyumsuzluk koşullarının ortadan kaldırılması gerekmektedir.
- Yeni ve gelişmekte olan sistem bileşenleriyle ilgili uygulamada karşılaşılan en önemli sorun, belirtilen ürün teknik karakteristiklerinin işletme esnasında yakalanamama riskidir. Bu ürünlerin karakteristiklerinin, uluslararası standartlara uygun testlerden geçirilerek belirlenmesi son derece önemlidir.
- Türkiye’de, FV güç sistemlerinde müşteri memnuniyetini artırmanın en önemli etkenlerinden birisi de şüphesiz teknik destek hizmetinin kalitesinin artırılması ve sürecin hızlandırılmasıdır. Uluslararası kalite standartlarında yerli ürün geliştirilmesi, ürün ve hizmet teknik desteğinin kalitesinin ve sürecinin iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır.
- FV güç sistemlerinin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetlerinin daha ayrıntılı irdelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alonso-Tristan, C., Diez-Mediavilla, M., Rodriguez-Amigo, M.C., Garcia-Calderon, T., and Dieste-Velasco, M.I.,** 2012, Performance Analysis of PV Plants: Optimization for Improving profitability, *Energy Conversion and management*, 54: 17-23 pp.
- Al-Qattan, A., Al-Otaibi, A., Fairouz, F., and Al-Mulla, A.,** 2015, Performance evaluation of photovoltaic systems on Kuwaiti schools' rooftop, *Energy Conversion and Management*, 95: 110-119 pp.
- Al-Sabounchi, A.M., Yalyali, S.A., and Al-Thani, H.A.,** 2015, Design and performance evaluation of a photovoltaic grid-connected system in hot weather conditions, *Renewable Energy*, 53: 71-78 pp.
- Ameen, A.M., Pasupuleti, J., and Khatib, T.,** 2015, Simplified performance models of photovoltaic/diesel generator/battery system considering typical control strategies, *Energy Conversion and Management*, 99: 313-325 pp.
- Aristizabal, A.J., and Gordillo, G.,** 2008, Performance monitoring results of the first grid-connected BIPV system in Colombia, *Renewable Energy*, 33: 2475-2484.
- Bandou, F., Arab, A.H., Belkaid, M.S., Logerais, P.O., Riou, O., and Charki, A.,** 2015, Evaluation performance of photovoltaic modules after a long time operation in Saharan environment, *International Journal of Hydrogen Energy* xxx: 1-10 pp.
- Cardona, M.S., Cañete, C., and Carretero, J.,** 2014, Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions, *Energy*, 65: 295-302 pp.
- Chandel, S.S., Sharma, V., Kumar, A., and Sastry, O.S.,** 2013, Performance assessment of different solar photovoltaic technologies under similar outdoor conditions, *Energy*, 58: 511-518 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Chandra Babu, J.S., and Sundaram, S., 2015, Performance evaluation and validation of 5 MWp grid connected solar photovoltaic plant in South India, *Energy Conversion and Management*, 100: 429-439 pp.

Çubukçu, M., 2011, Türkiye'nin Farklı Konumlarında Farklı Topolojilerde Fotovoltaik-Rüzgar-Yakıt Pili Hibrid Güç Sistemlerinin Modellenmesi Karşılaştırmalı Simülasyonu ve Uygulamalı Performans Analizi, (Doktora Tezi), Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir.

DGS (The German Energy Society), 2009, Planning & Installing Photovoltaic Systems, Book, 384 pp.

Enerji Atlası, <http://www.enerjiatlası.com/gunes/> (Erişim tarihi: 1 Haziran 2015)

EPIA, 2014, Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018, Report, 58 pp.

EPIA, Mart 2015, Europe's solar market falls over 30 percent in 2014 as global solar installations continue to grow, Press Release.

EQF/NQF Renewable Energy Specialists-RES-2, 2014, Fotovoltaik Güç Sistemleri Kurulum ve Devreye Alma.

EQF/NQF Renewable Energy Specialists-RES-2, 2014, Güneş Enerjili Sıcak Su Sistemleri Kurulum ve Devreye Alma.

ETKB Stratejik Planı 2015-2019, <http://www.etkb.gov.tr/tr-TR/Stratejik-Plan> (Erişim tarihi: 1 Haziran 2015)

EU - JRC Report (European Commission, DG Joint Research Center Report), Kasım 2014, PV Status Report 2014, 54 pp.

Farhoodnea, M., Mohamed, A., Khatib, T., and Elmenreich, W., 2015, Performance evaluation and characterization of a 3-kWp grid-connected photovoltaic system based on tropical field experimental results: new results and comparative study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 1047-1054 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ferrada, P., Araya, F., Marzo, Aitor., and Fuentealba, E.,** 2015, Performance analysis of photovoltaic systems of two different technologies in a coastal desert climate zone of Chile, *Solar Energy*, 114: 356-363 pp.
- Ferrada, P., Fuentealba, E., Araya, F., Marzo, A., Parrado, C., and Portillo, C.,** 2015, Photovoltaic performance and LCoE comparison at the coastal zone of the Atacama Desert, Chile, *Energy Conversion and Management*, 95: 181-186 pp.
- Filippo, S., Fabio, C.,** 2013, Monitoing and Cheking of Performance in Photovoltaic Plants: A Tool for Design, Installation and Maintenance of Grid-Connected Systems, *Renewable Energy*, 60, 722-732 pp.
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Ruslan, M.H., Ibrahim,A., and Kazem, H.A.,** 2014, Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors, *Energy Conversion and Management*, 78: 641-651 pp.
- GEPA (Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası),**
<http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> (Erişim tarihi: 1 Haziran 2015)
- Ghiani, E., Pilo, F., and Cossu, S.,** 2013, Evaluation of photovoltaic installations performances in Sardinia, *Energy Conversion and Management*, 76: 1134-1142 pp.
- IEA-PVPS Annual Report,** 2014, Imprimerie St-Paul, Fribourg, Switzerland, ISBN: 978-3-906042-34-3, 130 pp.
- IEA-PVPS Annual Report,** 2013, Imprimerie St-Paul, Fribourg, Switzerland, ISBN: 978-3-906042-22-0, 130 pp.
- IEA-PVPS Annual Report,** 2012, Imprimerie St-Paul, Fribourg, Switzerland, ISBN: 978-3-906042-11-4, 118 pp.
- IEA-PVPS T1-26,** 2015, Snapshot of Global PV Markets, 16 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- IEA-PVPS T2-06**, 2007, Cost and Performance Trends in Grid-Connected Photovoltaic Systems and Case Studies, 54 pp.
- Jaramillo, F., Velilla, E., and Valencia, J.**, 2014, Performance evaluation of two solar photovoltaic technologies under atmospheric exposure using artificial neural network models, *Solar Energy*, 107: 260-271 pp.
- Jinayim, T., Mungkung, N., and Kasayapanand, N.**, 2014, Performance Analysis of Off-Grid Solar Photovoltaic Electrification Systems for Sustainable ICTs Development: Field Study in 4 Regions of Thailand, *Energy Procedia*, 61: 1925-1928 pp.
- Karatepe, E.**, 2006, Fotovoltaik Jeneratörlerin Kısmi Gölgeleme ve Uyumsuzluk Koşullarında Bulanık Mantık Kontrolör ile Maksimum Güç Noktası Kontrolü ve Farklı Sistem Konfigürasyonlarının Karşılaştırılması, (Doktora Tezi), Ege Üniversitesi, İzmir.
- Ketjoy, N., Sirisamphanwong, C., and Khaosaad, N.**, 2013, Performance evaluation of 10 kw photovoltaic power generator under hot climatic condition, *Energy Procedia*, 34: 291-297 pp.
- Khatib, T., Sopian, K., and Kazem, H.A.**, 2013, Actual performance and characteristic of a grid connected photovoltaic power system in the tropics: A short term evaluation, *Energy Conversion and Management*, 71: 115-119 pp.
- Kumar, K.A., Sundareswaran, K., and Venkateswaran P.R.**, 2014, Performance study on a grid connected 20 kWp solar photovoltaic installation in an industry in Tiruchirappalli (India), *Energy for Sustainable Development*, 23: 294-304 pp.
- Labridis, D., Bouhoouras, A., Marinopoulos, A., and Dokopoul, P.**, 2010, Installation of PV Systems in Greece – Reliability Improvement in the Transmission and Distribution System, *Electric Power System Research*, 80: 547- 555 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Leloux, J., Narvarte, L., and Trebosc, D.,** 2012, Review of the Performance of Residential PV Systems in France, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 1369- 1376 pp.
- Leloux, J., Narvarte, L., and Trebosc, D.,** 2012, Review of the Performance of Residential PV Systems in Belgium, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 178-184 pp.
- Makki, A., Omer, S., and Sabir, H.,** 2015, Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance, *Renewable and Sustainable Energy review*, 41: 658-684 pp.
- Malathy, S. and Ramaprabha, R.,** 2015, Comprehensive analysis on the role of array size and configuration on energy yield of photovoltaic systems under shaded conditions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 672-679 pp.
- Marion, B., Deceglie, M.G., and Silverman, T.J.,** 2014, Analysis of measured photovoltaic module performance for Florida, Oregon, and Colorado locations, *Solar Energy*, 110: 736-744 pp.
- Metwally, A.E.,** 2005, Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System, PhD Thesis, Faculty of Electrical Engineering, University of Kassel, Germany, 166 pp (unpublished).
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü),** www.mgm.gov.tr
(Erişim tarihi: 1 Haziran 2015)
- Micheli, D., Alessandrini, S., Radu, R., and Casula, I.,** 2014, Analysis of the outdoor performance and efficiency of two grid connected photovoltaic systems in northern Italy, *Energy Conversion and Management*, 80: 436-445 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Muller, B., Reis, Th., Driesse, A., and Reise, Ch.**, 2012, Maximizing the Yield of Large PV Power Plants: What Can We Learn from Monitoring and Simulation ?, *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Frankfurt-Germany.
- Pontoriero, D., Blasco, I., and Hoses, A.**, 1998, Efficiency Analysis on Solar Home PV-System in Rural Areas, *Renewable Energy*, 15: 602-605 pp.
- Protopogopoulos, C., Klonaris, I., Petrocheilos, C., Charitos, I., and Martinac, I.**, 2010, Performance evaluation of different PV module technologies in a grid-connected pilot project in Greece, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain.
- PVGIS (European Commission – Joint Research Center, Photovoltaic Geographical Information System)**, 2015, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, (Erişim tarihi: 1 Haziran 2015).
- Radziemska, E.K.**, 2015, Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland, *Renewable Energy*, 78: 418-426 pp.
- Reich, N.H., Mueller, B., Armbruster, A., Sark, W.G.J.H.M., and Kiefer, K., Reise, C.**, 2012, Performance ratio revisited: is PR>90% realistic?, *Progress in Photovoltaics*, 20: 717-726 pp.
- Rehman, S., Bahaidarah, H., Subhan, A., and Gandhidasan, P.**, 2013, Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions, *Energy*, 58: 511-518 p.
- Saha, T.K., Yan, R., Meredith, P., and Goodwin, S.**, 2013, Analysis of yearlong performance of differently tilted photovoltaic systems in Brisbane, Australia, *Energy Conversion and Management*, 74: 102-108 pp.
- Soro, Y.M., Tossa, A.K., Azoumah, Y., and Yamegueu, D.**, 2014, A new approach to estimate the performance and energy productivity of

photovoltaic modules in real operating conditions, *Solar Energy*, 110: 534-560 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

TS EN 50530/A1, 2013, Izgara bağlanmış fotovoltaiik çeviricilerin toplam verimliliği, 12 s.

TS EN 61215, 2006, Kristalin silikon karasal fotovoltaiik (PV) modüller-Tasarım değeriendirmesi ve tip kabulü, 54 s.

TS EN 61646, 2010, İnce filmlili karasal fotovoltaiik modüler- Tasarım yeterliliği ve tip onayı, 48 s.

TS EN 61683, 2014, Fotovoltaiik sistemler - Güç şartlandırıcılar - Verim ölçme prosedürü, 27 s.

TS EN 61724, 1999, Fotovoltaiik sistem başarıml izleme – Ölçüm, veri değerişimi ve incelemesi için kılavuz, 26 s.

TS EN 61727, 2014, Fotovoltaiik (PV) sistemler – Şebeke bağlantı arayüzü karakteristikleri, 20 s.

TSE CLC/TS 61836, 2010, Fotovoltaiik güneş elektrikli enerji sistemleri - Terimler, tarifler ve semboller, 77 s.

TS EN 62446, 2013, Şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistemler - Sistem dokümantasyonu, devreye alma deneyleri ve muayene için asgari kurallar, 29 s.

UFTP, 2012, Ulusal Fotovoltaiik Platformu Faaliyet Raporu, ISBN: 978-605-86412-0-4.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Reza JALİLİSAATLOU

Doğum Tarihi -Yeri: 06.05.1986 – Orumieh / IRAN

Lisans: Orumieh Azad Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü (2011).

Uluslararası Konferans:

Bildiri:

- **Jalili, R., Cubukcu, M., Celiktaş, M.S., Kocar, G.,** 2012, Technology Roadmap for Solar Photovoltaic. *6th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Pages 425-441, Izmir, Turkey.

Poster:

- **Jalili, R. Cubukcu, M.,** 2012, Modeling and Control of Hybrid Wind Photovoltaic Systems using PETRI networks. *SOLARTR-2 Solar Electricity Conference & Exhibition*, November 7-9, 2012, Antalya, Turkey.

- **Jalili, R.,** 2012, Movable Photovoltaic Array for Enhancing Output Power of Photovoltaic Cells. *SOLARTR-2 Solar Electricity Conference & Exhibition*, Antalya, Turkey.

Ulusal Konferans:

Bildiri:

- **Odabaşı, K., Jalili, R., Güneş, M.,** 2013, Fotovoltaiklerin Taşıtlara Entegrasyonunda Gelişmeler, Sorunlar, Çözüm Önerileri. *ULIBTK'13 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Sayfa 1601-1607, Samsun, Türkiye.

E-mail: reza_jalili@hotmail.com