



GÖKÇEADA'DA ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ BİR FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİ BENZETİMİ VE KARŞILAŞTIRMALI GERÇEK PERFORMANS İNCELEMESİ

SIMULATION AND COMPARATIVE PRACTICAL PERFORMANCE ANALYSIS OF A STAND-ALONE PV POWER SYSTEM IN GÖKÇEADA

Mete ÇUBUKÇU^{1*}, Metin ÇOLAK²

¹Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, 35100, İzmir.

mete.cubukcu@uftp.org.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, 35100, İzmir.

metinc17@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 07.12.2012, Kabul Tarihi/Accepted: 11.01.2013

doi: 10.5505/pajes.2013.08108

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Özet

Bu çalışmada, Gökçeada/Türkiye'de yerleşik ve şebekeden bağımsız 2 kW anma gücündeki bir fotovoltaik (FV) güç sisteminin benzetim ve uygulamalı başarımları analizi yapılmaktadır. Sistemin başarımları, hem benzetim hem de gerçek zamanlı ölçüm değerleri kullanılarak incelenmiştir. Benzetim çalışmasından hesaplanan % 5 sistem verimi ve % 41 gerçekleştirme oranı parametreleri, gerçek çalışma koşullarında izleme dönemi ortalaması olarak sırasıyla % 4 ve % 32,4 olarak gerçekleşmiştir. Bu çalışmada, uluslararası değerlendirme parametreleri dikkate alınmıştır. Benzetim ve gerçek zamanlı başarımlar arasındaki farkın temel gerekçesi kısmi gölge etkileri ve belli dönemlerde düşük yük talebinin üstünde üretilen enerjinin sınırlanması olarak gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik, Fotovoltaik güç sistemi analizi.

Abstract

This study simulates and analyzes the practical performance of a 2 kW stand-alone PV power system located in Gökçeada/Turkey. System performance was calculated both by simulation and real life measurements. Although the total system efficiency and the performance ratio is simulated 5 % and 41 %, these values are calculated averagely during the real-life monitoring period as 4 % and % 32.4 respectively. The results were reported using the international evaluation parameters. The main reasons of the difference between the simulated and practical calculated values are the partial shadow effects and the limited energy generation due to the low load demand.

Keywords: Photovoltaics, PV Power system analysis.

1 Giriş

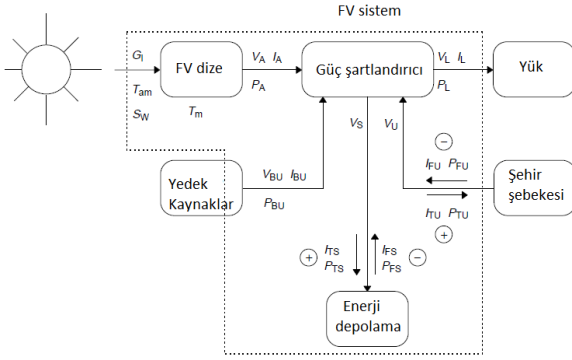
Yüksek güneş enerjisi potansiyeline karşın Türkiye'de kurulu FV Güç Sistemi (FVGS) kapasitesi yaklaşık olarak 6,5-7 MW civarındadır [1]. Günümüzde, Türkiye'de kurulu FVGS'lerin % 90'ı şebekeden bağımsız sistemlerdir [2]. Önümüzdeki yıllarda, şebeke paritesinin yakalanmasıyla şebeke bağlantılı uygulamaların artması beklenmektedir.

Şehir şebekesinin ulaşmadığı noktalarda, genellikle dizel jeneratör tercih edilmektedir. Kurulum maliyetinin düşük olmasına karşın, bu sistemlerin işletme maliyetleri oldukça yüksektir ve toplam enerji dönüşüm verimleri hayli düşüktür. 1 kW gücündeki bir jeneratörün toplam sistem verimi % 8-15 arasındadır [3]. Jeneratörlerin bakım maliyetleri yüksek, çalışmaları gürültülü ve kirli gaz çıkışları fazladır. Ayrıca, tepe enerji taleplerinde jeneratörün başarımları ciddi bir şekilde düşmekte ve devre dışı kalabilmektedir. Bu nedenle, farklı kaynakları kullanan üreteçlerin ve depolama ünitelerinin kullanılması, enerji arz güvenliğini arttırmaktadır.

Günümüzde şebekeden bağımsız fotovoltaik güç sistemleri, ağırlıklı olarak şebeke elektriğinin ulaşmadığı kırsal alanlarda kullanılmaktadır. Bu sistemlere ilişkin mevcut durum ve gelişmekte olan uygulama yöntemleri Chaurey'in makalesinde irdelenmektedir [4]. Şebekeden bağımsız güç sistemleri yaygın olarak doğru akım (d.a.) veya alternatif akım (a.a.) bağlantılı biçimde yapılandırılmaktadır. d.a. bağlantılı yapıda, tüm enerji üretici ve depolama üniteleri gerektiğinde d.a./d.a. güç şartlandırıcısı kullanılarak d.a. barasında toplanmaktadır. Sistemde a.a. bir yük kullanılması

durumunda, d.a./a.a. eviricisi kullanılarak yük beslenmektedir. d.a. bağlantılı yapının en önemli sakıncası, toplam sistem dönüşüm verimliliğinin düşük olmasıdır. Ayrıca, yeni eklenecek üreteçlerin sisteme ilavesinde mevcut d.a./a.a. evirici anma kapasitesi sınırlayıcı olmaktadır [5]. a.a. bağlantılı yapıda ise, hem yük hem de enerji üretim baralarında a.a. enerji bulunmaktadır. a.a. bağlantılı yapıda, d.a. bağlantılı yapıya kıyasla daha yüksek sistem verimleri elde edilmektedir [6].

Bu çalışmada, "TS EN 61724: Fotovoltaik Sistem Performans İzleme - Ölçüm, Veri Değişimi ve Analiz İçin Klavuz" standardına uygun olarak Gökçeada'da kurulu olan 2 kW anma gücünde şebekeden bağımsız bir FVGS başarımları analizi yapılmaktadır. FV ve melez güç sistemlerinin başarımlarının incelenmesinin gerçekleştirildiği birçok literatür çalışmasında TS EN 61724 standardında açıklanan değişkenler kullanılmaktadır [7]. Bu uluslararası standart, enerji ile ilgili FV sistemin düzlemsel ışınım, dize çıkışı, depolama girişi ve çıkışı ve güç şartlandırıcı girişi ve çıkışı gibi karakteristiklerinin izlenmesi ve izlenen verinin değişimi ve analizi için yöntemleri önermektedir. Bu yöntemlerin amacı, bağımsız veya şebeke bağlantılı veya motorlu üreteç ve rüzgâr türbini gibi FVGS olmayan kaynaklarla melezleştirilerek oluşturulan FV sistemlerin toplam performansını değerlendirmektir [8]. Şekil 1'de TS EN 61724 standardına uygun olarak ölçülmesi gereken değişkenler bir akış diyagramında gösterilmektedir. İlgili semboller, Tablo 8'de tanıtılmaktadır.



Şekil 1: FV güç sistemlerinde gerçek zamanlı ölçülmesi gereken değişkenler

FV ve melez güç sistemleri başarımının TS EN 61724 standardında tanımlanan yöntemlere uygun olarak analiz edildiği birçok makale bulunmaktadır. Literatürde raporlanan örnek bazı çalışmalar şunlardır:

- Singapur'da 142,5 kW gücünde şebeke bağlantılı binaya entegre bir FVGS için başarım incelemesi yapılmıştır [9]. Sistemin temel başarım değişkenleri şu şekilde raporlanmıştır: PR = % 81, $Y_f = 3,12$ [h.d⁻¹], $\eta_{SP} = \% 11,8$, $L_c = 0,58$ [h.d⁻¹]
- Sitia/Crete/Yunanistan'da kurulan 171,36 kW gücündeki şebeke bağlantılı bir FVGS'nin 1 yıl süre boyunca başarım incelemesi yapılmıştır. Yıl boyunca PR değeri % 58-73 ve Y_f değeri 1,96-5,07 [h.d⁻¹] aralığında değişmiştir. Nihai yıllık hasat, 1336,4 [kWh/y/kW_{anma}] olarak hesaplanmıştır [10].
- Suudi Arabistan'da kurulu bulunan 5,28 kW gücündeki şebekeden bağımsız bir FVGS için başarım incelemesi yapılmıştır. PR değerinin % 40-60 aralığında değiştiği gözlenmiştir [11].
- Arjantin'de 12 kırsal alanda yerleşik şebekeden bağımsız güç sisteminin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu sistemlerden beşinde sadece FVGS kullanırken, diğerlerinde destekleyici olarak dizel jeneratör de kullanılmıştır. FVGS tarafında, nihai yıllık hasat, 600-1000 [kWh/y/kW_{anma}] olarak gözlenmiştir [12].
- Yeni Delhi/Hindistan'da kurulu bulunan 1,2 kW ve 1,12 kW güçlerindeki şebekeden bağımsız FV güç sistemleri incelenmiştir. Toplam sistem verimi günlük değişiminin % 3,9-9,5 aralığında olduğu raporlanmıştır [13].
- Aristizabal and Gordillo, Bogota-Kolombiya'da kurulan şebeke bağlantılı binaya tümleşik FVGS için 2 yıllık başarım değerlendirmesi yapmıştır. Bu sistemin nihai hasat (Y_f) değerinin 2005 yılında 743,93 kWh/(kW_{anma}.y) ve 2006 yılında 669,8 kWh/(kW_{anma}.y) değerinde olduğu gözlenmiştir. Gerçekleme oranı ise 0,44-0,61 aralığında gerçekleşmiştir [14].
- IEA-PVPS raporlarında, farklı ülkeler için FVGS başarım değerleri karşılaştırılmaktadır. İncelemeye alınan 461 adet şebeke bağlantılı FVGS'nin yıllık nihai hasat değerinin 700-1840 kWh/(kW_{anma}.y) aralığında değiştiği raporlanmıştır. Şebeke bağlantılı bu tip sistemlerde gerçekleme oranlarının % 70 altında olması durumunda sistem koşullarının yeniden değerlendirilmesi önerilmektedir. Kirlilik,

gölge gibi uyumsuzluk koşullarının ortadan kaldırılması gerektiği belirtilmektedir [15].

- FVGS başarımının bu yöntemlere uygun olarak analiz edildiği birçok makale çalışması bulunmaktadır [Bkz. [16], [17], [18], [19]]. İlgili çalışmalardan birkaçı incelenerek bu makalenin yöntemi belirlenmiştir.

Gökçeada, Türkiye'nin en büyük ve aynı zamanda karadan uzak adasıdır. Birleşmiş Milletlerin mali desteği ile Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü (EÜ-GEE) ve Gökçeada Belediyesi arasında yapılan işbirliği çerçevesinde adanın meydan aydınlatması şebekeden bağımsız bir fotovoltaik güç sisteminden sağlanmıştır (Şekil 2-3). Sistem, d.a. bağlantılı devre yapısında çalışmaktadır. Sistem bileşenlerinin özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Sistemin temel elemanları şunlardır:

- *FV modüller:* 2 kW anma gücündeki şebekeden bağımsız FVGS, 2 adet birer kW'lık dizeden oluşmaktadır. Her bir dizede 10 adet 200 W anma gücünde FV modül bulunmaktadır.
- *Akü grubu:* Sistemin akü kapasitesi 24 V 800 Ah'dir. 8 adet 12 V 200 Ah kapasitedeki aküler (MUTLU akü, FULL Energy tipi), 4 paralel ve 2 seri kolda bağlanmıştır.
- *Evirici:* Anma çıkış gücü 700 VA (JAZZ) olan bir evirici kullanılmıştır.
- *d.a./d.a. güç şartlandırıcı:* Birer kW'lık FV dizelerine karşılık birer adet Steca TAROM 245 güç şartlandırıcı kullanılmıştır.
- *Veri kaydedici:* 1 adet STECA TARCOM kaydedici kullanılmıştır.
- *Yük:* 30 adet 11 W enerji verimli alternatif akım (a.a.) lamba kullanılmıştır. Otomatik açma kapama için 1 adet STECA PA EV200A tipi röle ve 1 adet STECA PA 15 uzaktan kontrol cihazı kullanılmıştır.
- *Işınım şiddeti algılayıcısı:* Mart-Ekim 2008 döneminde, "SMA RA100T" algılayıcı kullanılarak ışınım şiddeti ölçülmüştür.



Şekil 2: Şebekeden bağımsız FVGS, Gökçeada.



Şekil 3: Gökçeada meydan aydınlatması.

Tablo 1: FVGS bileşenleri.

Bileşen:	Özellikleri:
FV Modül (GFM210P)	$P_{mpp}=200\text{ W}$, $I_{sc}=7,98\text{ A}$, $V_{oc}=35,8\text{ V}$, $I_{mpp}=6,99\text{ A}$, $V_{mpp}=28,6\text{ V}$, $\eta_{pv}=\%12,32$, $A_{pv}=1,62\text{ m}^2$
Evirici (JAZZ 700 VA)	Anma çıkış gerilimi: 230 V [a.a], Çıkış frekansı: 50 Hz, Anma akımı: 3 A, Çıkış dalga şekli: Tam sinüs, Anma giriş gerilimi: 24 V, Gerilim aralığı: 21-30 V, En yüksek verimi: % 93, Tam yük altında verimi: % 89 Çalışma sıcaklığı aralığı: $-10^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$, Boyutları: 29,5x18x7,5 cm (LxWxH), Ağırlık: 2,9 kg
d.a./d.a. güç şartlandırıcı (Steca TAROM 245)	Sistem gerilimi: 24 V, En yüksek FV modül giriş kısa devre akımı: 45 A, En yüksek yük çıkış akımı: 45 A, Çalışma sıcaklığı aralığı: $-10^{\circ}\text{C}+60^{\circ}\text{C}$, Boyutları: 188 x 128 x 49 mm (LxWxH), Ağırlık: 550 g

Bu makalenin yazımı sırasında, TSE CLC/TS 61836 numaralı ve "Fotovoltaik güneş elektrliği enerji sistemleri - Terimler, tarifler ve semboller" başlıklı standart metnine uyum sağlanmıştır [20].

2 Benzetim Çalışması

Bu bölümde, iklim verilerinin, yük talebinin ve temel sistem bileşenlerinin benzetimi yapılmıştır. Benzetimde kullanılan veriler, ulusal ve uluslararası kaynaklı gerçek ölçüm değerlerinden ve/veya güvenilir veri tabanlarından temin edilmiştir.

2.1 İklim Verileri

Tipik bir FVGS için en önemli iklim verileri, ışıma şiddeti [W/m^2] ve ortam sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$] değerleridir. Birçok benzetim programında, bu verilerin saatlik aralıklarda veri tabanına girişi yapılabilmektedir. Avrupa Komisyonu - Ortak Araştırma Merkezi Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) tarafından sağlanan ışıma şiddeti verilerine, güvenilir veri kaynakları olarak sıkça başvurulmaktadır. PVGIS veri tabanından temin edilen ve Gökçeada konumunun aylara göre ortalama en iyi eğim açıları, yıllık ortalama en iyi eğim açısına karşılık gelen günlük ortalama ısıtım değerleri, yatay düzlemdeki günlük ortalama ısıtım değerleri ve aylık ortalama sıcaklık değerleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2: PVGIS ortalaması veriler [21].

	En iyi eğim açıları [$^{\circ}$]	En iyi eğim açısındaki ısıtım verileri [$\text{Wh}/(\text{m}^2.\text{d})$]	Yatay düzlemdeki ısıtım verileri [$\text{Wh}/(\text{m}^2.\text{d})$]	Ortalama ortam sıcaklıkları [$^{\circ}\text{C}$]
Ocak	57	2.290	1.640	6,1
Şubat	50	2.980	2.290	6,7
Mart	39	4.170	3.520	8,6
Nisan	26	5.210	4.830	12,5
Mayıs	14	5.780	5.810	17,7
Haziran	8	6.200	6.500	22,4
Temmuz	11	6.190	6.340	25,1
Ağustos	22	5.890	5.610	24,9
Eylül	37	5.220	4.440	20,6
Ekim	49	4.130	3.150	16,1
Kasım	56	2.670	1.900	11,5
Aralık	56	1.800	1.310	7,9
Ortalama	30	4.380	3.950	15

Bu veriler ışığında, Gökçeada'da yıllık en iyi eğim açısında (30°) toplam yıllık ısıtım potansiyeli $1,6\text{ MWh}/(\text{m}^2.\text{y})$ olarak hesaplanmaktadır.

2.2 Yük Talebi

Yük talebi, özellikle şebekeden bağımsız güç sistemlerinde kritik bir rol üstlenmektedir. Üretilen ve depolanan enerjinin, yük talebinin altında olması, sistemin işlevsiz kalmasına sebep olacaktır. Yük talebinin üstündeki enerji üretimi durumunda ise sistemin güç elektroniği bileşenleri enerji üretimini kısacaktır ve böyle durumlarda enerji üretim potansiyeli değerlendirilemeyecektir. Gökçeada uygulamasında, yük olarak 30 adet 11 W enerji verimli a.a. lamba kullanılmıştır (Şekil 3). Anlık en yüksek 330 W güç talebinde, günlük ortalama 10 saatlik çalışma süresi ile enerji gereksinimi $3,3\text{ kWh}/\text{d}$ olarak hesaba katılmıştır. FVGS, güneş enerjisi potansiyelinin düşük olduğu dönemlerde de toplam yük ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Dolayısıyla, güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu dönemlerde bir miktar enerjinin sınırlanması durumuyla karşılaşılabilecektir.

2.3 Güneş Elektrliği Üretimi

Sistem bileşenlerinin dikkate alınan verimleri, Tablo 3'de gösterilmektedir. Bu değerler, ürünlerin teknik karakteristikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Benzetim çalışmasında, Tablo 2'de sunulan ısıtım verileri kullanılarak, TS EN 61724 standardına uygun performans parametreleri hesaplanmıştır (Tablo 4). Tabloda listelenen bu parametreler, şu şekilde hesaplanmaktadır:

Tablo 3: FV dize toplam sistem verimi hesabı.

Uygulama Türü:	Şebekeden bağımsız
Bağlantı yapısı:	Dolaylı d.a.
Anma gücü (P_{MPP}):	2 kW
FV dize verimi (η_{PV}):	% 12,32
Güç şartlandırıcı verimi (η_{PCU}):	% 65,1
Akü grubu verimi (η_B):	% 70
Kablo verimi (η_C):	% 98
FV dize üzerindeki diğer kayıplar (diyot, kablo, sıcaklık, gölge vb. uyumsuzluklar)	% 90
sonrası dönüşüm verimi (η_D)	

Tablo 4: FVGS benzetim sonuçları.

Enerji Hesaplamaları:	
Ortalama en iyi eğim açısındaki günlük toplam ısıtım ($H_{l,d}$):	4,38 [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{d})$]
Ortalama en iyi eğim açısındaki yıllık toplam ısıtım ($H_{l,y}$):	1598,7 [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{y})$]
FV dize yüzeyine gelen güneş enerjisi ($E_{PV,in}$):	25963 [kWh/y]
FV dize çıkışındaki enerji (E_A):	2878,8 [kWh/y]
FV sistemi çıkış enerjisi (E_{use}):	1298 [kWh/y]
Verim Hesaplamaları:	
Ortalama FV dize verimi (η_{Amean}):	0,11
Denge bileşenleri verimi (η_{BOS}):	0,45
FV sistem verimi (η_{SP}):	0,05
Sistem Başarımı Belirleyicileri:	
Referans hasadı (Y_r):	4,38 [$\text{kWh}/\text{d}/\text{kW}_{anma}$]
Dize hasadı (Y_a):	3,94 [$\text{kWh}/\text{d}/\text{kW}_{anma}$]
Nihai sistem hasadı (Y_i):	1,78 [$\text{kWh}/\text{d}/\text{kW}_{anma}$]
Dize yakalama kayıpları (L_c):	0,44 [$\text{kWh}/\text{d}/\text{kW}_{anma}$]
Denge bileşeni kayıpları (L_{BOS}):	2,17 [$\text{kWh}/\text{d}/\text{kW}_{anma}$]
Gerçekleme oranı (PR):	41[%]
Nihai yıllık hasat:	649 [$\text{kWh}/\text{y}/\text{kW}_{anma}$]

- **Toplam ısıtım Hesabı (H_i):** Örnekleme aralığında ölçümü gerçekleştirilen dize yüzeyindeki toplam ışıma değerleri (G_i), bir gün içerisinde birim alana düşen Wh enerji değerine dönüştürülür. Örneğin, 15 dakikalık aralıklarla ölçümü gerçekleştirilen toplam ışıma değerlerinin $15/60 = 0,25$ h değeri ile çarpımı ve günlük toplamının alınmasıyla, o gün için küresel ısıtım değeri ($H_{i,d}$) hesaplanmış olacaktır [8]. PVGIS veri tabanından ortalama günlük ve yıllık ısıtım değerleri alınabilmektedir (Tablo 2).
- **FV dize yüzeyine gelen güneş enerjisi ($E_{PV,in}$):** Toplam FV dize alanı (A_A) ile FV yüzeyine gelen toplam ışımanın (H_i) çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Gökçeada uygulamasında, toplam dize alanı $16,24 \text{ m}^2$ 'dir.

$$E_{PV,in} = H_i \cdot A_A \quad (1)$$

- **FV dize çıkışındaki enerji (E_A):** Modül dönüşüm verimi ve ilgili diğer kayıplar (sıcaklık, toz, gölge vb.) sonrası FV dize çıkışında hesaplanan enerjidir.

$$E_A = E_{PV,in} \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_0 \quad (2)$$

- **FV sistem verimi (η_{SP}):** Bütün sistemin verimidir.

$$\eta_{SP} = \eta_{PV} \cdot \eta_{PCU} \cdot \eta_B \cdot \eta_C \cdot \eta_0 \quad (3)$$

- **FV sistemi çıkış enerjisi (E_{use}):** Sistemde gözlemlenen tüm kayıplar sonrası yüke beslenen enerji miktarıdır.

$$E_{use} = E_{PV,in} \cdot \eta_{SP} \quad (4)$$

- **Ortalama FV dize verimi (η_{Amean}):** 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.

$$\eta_{Amean} = \eta_{PV} \cdot \eta_0 = E_A / (A_A \cdot H) \quad (5)$$

- **Denge bileşenleri verimi (η_{BOS}):** Denklem (6)'da hesaplama eşitliği verilmektedir.

$$\eta_{BOS} = \eta_{SP} / \eta_{Amean} \quad (6)$$

- **Referans hasadı (Y_r):** Gerçekleşen anlık ışıtmı elde etmek için referans ışıtmı seviyesinde bulunması gereken süreyi (saat olarak) gösterir. Dize düzlemindeki toplam ışıtmının (H_i), referans ışıtmı ($G_{i,ref}$, genellikle 1 kW/m^2) bölümünden hesaplanmaktadır [8].

- **Dize hasadı (Y_a):** Birim anma dize kapasitesi başına, FV dize tarafından üretilen enerji miktarıdır.

$$Y_a = E_A / (P_{MPP} \cdot 365) \quad (7)$$

- **Nihai sistem hasadı (Y_f):** Birim anma kapasitesi başına, elektrik üretici sistemde üretilen net enerjinin FV dize tarafından sağlanan kısmıdır

$$Y_f = E_{use} / (P_{MPP} \cdot 365) \quad (8)$$

- **Dize yakalama kayıpları (L_c):** Belli bir FV sistemin kendi FV dizelerinin kayıplarına bağlı birimleşmiş kayıplarıdır. FV dize yakalama kayıpları, referans hasat ile FV dize hasadı farkından elde edilir. Bu kayıplar, uyumsuzluk ve dönüşüm kayıplarından, dize topraklamalarından vb. kaynaklanır.

$$L_c = Y_r - Y_a \quad (9)$$

- **Denge bileşeni kayıpları (L_{BOS}):** Bir FV sistemin kendi denge bileşenlerinin enerji kayıplarına bağlı birimleşmiş kayıplarıdır.

$$L_{BOS} = Y_a \cdot (1 - \eta_{BOS}) \quad (10)$$

- **Gerçekleme oranı (PR):** FV sistem kayıplarının FV anma dize kapasitesine etkisini belirten göstergedir. FV sistem kayıpları genellikle FV dize sıcaklığı, ışıtmı tam kullanamama ve bileşenlerin verimsizliği ya da arızalarına bağlı olarak oluşur. Gerçekleme oranı nihai sistem hasadının referans hasat değerine oranından hesaplanır

$$PR = Y_f / Y_r \quad (11)$$

- **Nihai yıllık hasat:** FV dizinin bir yıl boyunca, birim anma kapasitesi başına yüke verdiği toplam enerjidir.

$$(\text{Nihai Yıllık Hasat}) = E_{use} / P_{MPP} \quad (12)$$

Ayrıca, Gökçeada'da kurulu olan sistemin aylık enerji üretim benzetimi yapılmıştır (Tablo 5). FVGS aylık enerji üretimi ($E_{use,m}$), Denklem (13)'deki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$E_{use,m} = H_{i,m} \cdot A_A \cdot \eta_{SP} \quad (13)$$

Tablo 5: FVGS aylık enerji üretimi benzetimi.

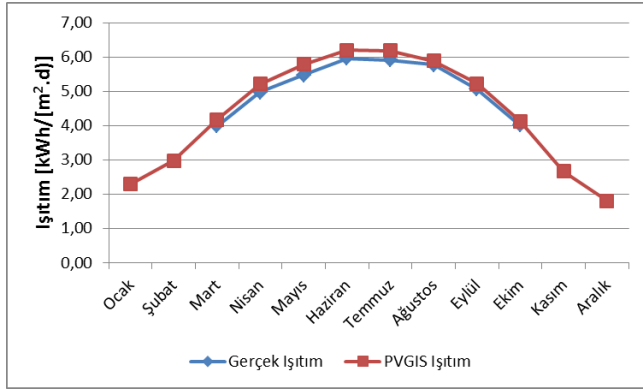
Ay:	[kWh/m]
Ocak	57,6
Şubat	67,7
Mart	104,8
Nisan	126,9
Mayıs	145,5
Haziran	150,8
Temmuz	155,8
Ağustos	148,2
Eylül	127,1
Ekim	103,7
Kasım	65
Aralık	45,3
TOPLAM (kWh/y)	1298
kWh/kW _{anma} /y	649

3 Uygulamalı Başarım İncelemesi

Bu çalışma kapsamında, Gökçeada'da 2 kW anma gücündeki şebekeden bağımsız FVGS için 1 Mart-31 Ekim 2008 izleme döneminde başarım incelemesi yapılmıştır.

3.1 İklim Verilerinin İncelenmesi

1 Mart-31 Ekim 2008 izleme döneminde "SMA RA100T" ışıtmı şiddeti algılayıcısı, FV modüller ile aynı düzlemde yerleştirilmiştir. FV modüller, Gökçeada için yıllık ortalama en iyi eğim açısı olan 30° 'de yerleştirilmişlerdir. Sekizer dakikalık aralıklarla ölçülen ışıtmı şiddetleri kullanılarak, dize düzlemindeki ışıtmı miktarı (kWh/m^2) hesaplanmıştır ve PVGIS verileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4). 8 dakikalık aralıklarla ölçümü gerçekleştirilen toplam ışıtmı değerlerinin $8/60 = 0,133$ h değeri ile çarpımı ve günlük toplamının alınmasıyla, o gün için küresel ışıtmı değeri ($H_{i,d}$) hesaplanmıştır. PVGIS verilerinin gerçek ölçümler sonucunda hesaplanan ışıtmı değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. İzleme dönemindeki ortalama toplam ışıtmı değeri, ölçüm sonuçlarında $5,15 \text{ [kWh/(m}^2 \cdot \text{d)]}$ ve PVGIS veri tabanında $5,35 \text{ [kWh/(m}^2 \cdot \text{d)]}$ olarak hesaplanmıştır.

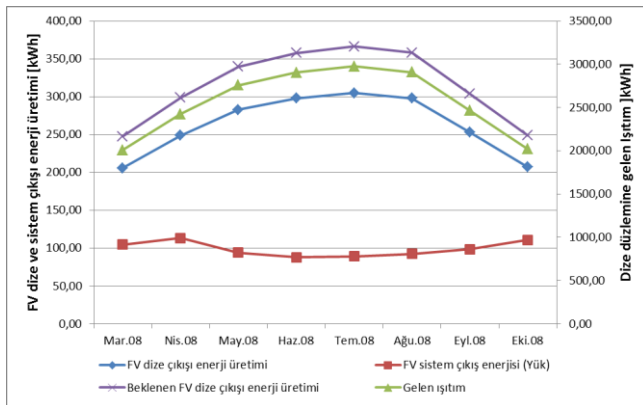


Şekil 4: Dize düzlemindeki ısıtım miktarının PVGIS verileri ile karşılaştırılması.

Herhangi bir konum için iklim verilerine, ulusal meteoroloji kuruluşlarının ölçüm istasyonlarından da ulaşmak mümkündür. Gökçeada için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) ortam sıcaklığı ölçüm verileri temin edilmiştir. MGM verilerine göre 2004-2006 yılları arasında yıllık ortalama sıcaklık değerleri, 14,9-15,6 °C arasında değişmiştir [22]. Bu değerler, PVGIS veri tabanındaki aylık ortalama sıcaklık verisi ile (15 °C) kayda değer bir uyumluluk içindedir.

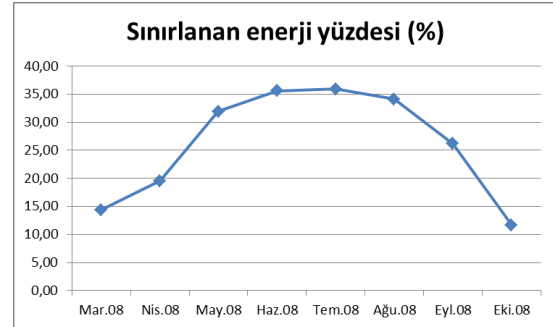
3.2 FVGS Başarım İncelemesi

Sekizer dakikalık aralıklarla ölçümü yapılan ışınım şiddeti (W/m^2) değerlerinden, dize düzlemine gelen aylık toplam ısıtım hesaplanmıştır. FV modüllerin teknik karakteristiğinde belirtilen dönüşüm verimi kullanılarak FV dize çıkışında beklenen enerji miktarı (E_A) belirlenmiştir. İzleme döneminde, FVGS çıkışında yüke beslenen enerji miktarı (E_{use}) ölçülmüştür. Şekil 5'de ölçülen ve gerçek ölçüm değerlerinden hesaplanan enerji miktarları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. 8 aylık izleme döneminde, toplamda 2520,7 kWh olması beklenen dize çıkışı enerji miktarı, 2098,5 kWh olarak gerçekleşmiştir. Dize çıkışında beklenenden % 16,75 daha düşük bir enerji üretiminin gerçekleşmesinin temel nedeni, FV modülleri üzerindeki kısmi gölgelenme etkisidir. Birleşmiş Milletlerin desteği ile kurulan bu sistemin en önemli hedeflerinden birisi farkındalığı yaratmaktır. Dolayısıyla, ada meydanını gölgelendiren çeşitli yapıların varlığına karşın sistemin bu alanda kurulması istenmiştir [18].

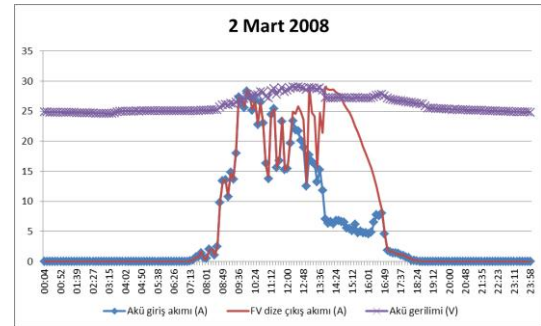


Şekil 5: FV dize düzlemine gelen ısıtım, dize ve sistem çıkışı enerji üretimleri.

Gölgelenme etkisinin yanında, başarımı etkileyen bir diğer önemli etken de bazı dönemlerde yük talebinin üzerinde enerji üretiminin gerçekleşmesidir. Bu dönemlerde, akülerin dolu olması nedeniyle enerji üretimi sınırlanmaktadır. Şekil 6'da izleme döneminde yük talebinin üzerinde üretilen ve değerlendirilmeyen enerji miktarının toplam üretimdeki yüzdeleri görülmektedir. ısıtım potansiyeline ve yük talebine bağlı olarak % 11-36 oranında kayıp olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6: Sınırlanan enerji miktarı ve toplam üretimdeki yüzdesi.



Şekil 7: Akım sınırlaması örneği, Gökçeada.

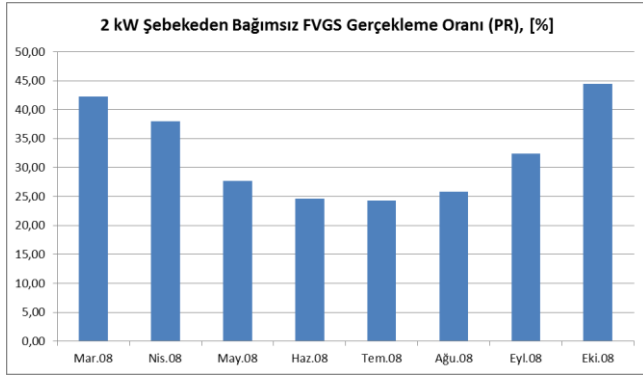
Örnek bir günün dize çıkışında yapılan akım sınırlaması Şekil 7'de gösterilmektedir. Akü doluncaya kadar FV dize çıkışı akımı, akü giriş akımı ile aynı değerdedir. Akünün dolmasıyla, akım sınırlanmaya başlar.

Sistemin başarım değerleri, gerçek ölçümlerin Denklem (1-12) eşitliklerinde kullanılmasıyla hesaplanmıştır (Tablo 6). Toplam FV sistem verimi % 3-5 arasında değişmiştir. Sistemin gerçekleştirme oranı % 24-45 aralığındadır. Mart-Ekim 2008 izleme döneminin ortalama sistem verimi % 4 ve gerçekleştirme oranı % 32,4 değerindedir. Bu uygulamanın benzetiminde, % 5 sistem verimi ve % 41 gerçekleştirme oranı öngörülmüştü. Uygulamada daha düşük değerler elde edilmesinin iki temel nedeni vardır: Gölge etkisi ve yük talebinin üstünde enerji üretilmesi.

Gerçekleştirme oranı, karşılaştırmalı olarak Şekil 8'de gösterilmiştir.

Tablo 6: Toplam FV sistemi başarım değerleri.

Çalışma dönemi:	η_{SP} [-]	Y_r [h.d ⁻¹]	Y_a [h.d ⁻¹]	Y_r [h.d ⁻¹]	L_c [h.d ⁻¹]	PR [%]
Mar.08	0,05	3,99	3,32	1,69	0,67	42,23
Nis.08	0,05	4,98	4,15	1,89	0,83	37,95
May.08	0,03	5,48	4,56	1,52	0,92	27,65
Haz.08	0,03	5,96	4,96	1,47	1,00	24,58
Tem.08	0,03	5,91	4,92	1,44	0,99	24,28
Ağu.08	0,03	5,78	4,81	1,49	0,97	25,80
Eyl.08	0,04	5,06	4,21	1,64	0,85	32,41
Eki.08	0,05	4,01	3,34	1,79	0,67	44,49



Şekil 8: Gerçekleme oranları (PR).

Benzetim ve gerçekleşen başarımların değerleri karşılaştırması Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7: Benzetim ve gerçekleşen başarımların değerleri karşılaştırması.

	Şebekeden bağımsız FVGS, Gökçeada	
	Benzetim (1 yıl)	Mart-Ekim
Uygulama türü	d.a.	d.a.
Yapı	30°	30°
Eğim açısı	4,38	5,15
Toplam ısıtım [kWh/(m ² .d)]	41	32,42
FVGS gerçekleme oranı (PR), [%]	0,05	0,04
FV sistem verimi [η_{SP}]		

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, temel veri girdileri *iki sınıfta* incelenmiştir. *Birinci sınıf*, kullanılacak *sistem bileşenlerinin teknik karakteristikleridir*. Sistem bileşenlerinin uluslararası standartlara uygun seçilmesi, bu ürünlerin ilgili uluslararası testlerden geçmiş olduğunu göstermektedir ve benzetimde doğru bir şekilde değerlendirilebilmektedir. *İkinci sınıfta* değerlendirilen veriler, kurulum yerindeki *iklim bilgisi ve yük gereksinimidir*. Sistem tasarımı yapılırken çoğu zaman, hem iklim koşulları hem de yük gereksinimi için gerçek ölçüm verilerine ulaşılamamaktadır. Bu nedenle, benzetimin güvenilirliği esas itibariyle ikinci sınıfta tanımlanan bu verilerin doğruluğuna bağlıdır. Bu çalışmanın sonuçları da, benzetim ve gerçek ölçüm sonuçlarının tutarlı olmasının, doğru yük hesabı ve iklim verilerinin temin edilmesiyle sağlanabileceğini göstermiştir.

PVGS toplam ısıtım verilerinin, kurulum yerinde hesabı yapılan gerçek değerlerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Gökçeada uygulamasında, Mart-Ekim 2008 aralığını kapsayan izleme döneminde, ortalama toplam ısıtım değeri, ölçüm sonuçlarında 5,15 [kWh/(m².d)] ve PVGIS veri tabanında 5,35 [kWh/(m².d)] olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen gerçek zamanlı sıcaklık ölçümleriyle, PVGIS tahminlerinin tutarlı olduğu gözlenmiştir. Bu kapsamda, FV sektöründe güvenilir bir veri kaynağı olarak sıkça kullanılan PVGIS veri tabanının tutarlılığı teyit edilmiştir.

Yük talebi, özellikle şebekeden bağımsız güç sistemlerinde kritik bir rol üstlenmektedir ve kullanıcı alışkanlıklarına ve bulunulan konumdaki elektrik tüketim maliyetlerine bağlı olarak ülkeden ülkeye ciddi farklılıklar göstermektedir. Birçok benzetim yazılımında, yük talebi yıllık ya da mevsimsel ortalamalar şeklinde dikkate alınmaktadır. Gerçek çalışma koşullarında ise, planlananın dışında yük talepleri ile

karşılaşılabilmektedir. Şebeke bağlantılı sistemler, gerektiğinde şebekenin devreye girmesi nedeniyle çok daha esnek tasarlanabilmektedir. Şebekeden bağımsız bir güç sisteminde ise yük gereksiniminin tamamen karşılanması gerekmektedir. Üretilen ve depolanan enerjinin, yük talebinin altında olması, sistemin yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Öte yandan, güneş enerjisi potansiyelinin düşük olduğu mevsimsel dönemlere göre yüksek güçlü FVGS tasarımı yapılması, enerji potansiyelinin yüksek olduğu dönemlerde enerji üretiminin sınırlandırılmasına neden olacaktır. Gökçeada uygulamasında da, ısıtım potansiyeline ve yük talebine bağlı olarak % 11-36 oranında sınırlama olduğu ve toplam FV sistem veriminin % 3-5 olarak gerçekleştiği gözlenmiştir. FV dize çıkışında, beklenenden % 16,75 daha düşük bir enerji üretiminin gerçekleşmiştir. Şebekeden bağımsız tasarlanan bu sistemin, ısıtımın en kötü olduğu Kasım-Şubat aralığında yükü sorunsuz beslemesi planlanmıştır. Ancak, bu korunaklı tasarım, Mart-Ekim aralığında yük talebinin üzerinde gerçekleşen enerji üretiminin sınırlandırılmasına neden olmuştur.

Şebeke bağlantılı sistemlerde % 10-12 aralığında değişen toplam sistem verimleri, şebekeden bağımsız sistemlerde özellikle enerji depolama bileşenlerindeki kayıplar nedeniyle % 4-6 aralığına düşmektedir. a.a. yüklerin kullanıldığı sistemlerde, d.a. bağlantısının tercih edilmesi sistem verimini düşürmektedir. Bu tip uygulamalarda, a.a. yapının tercih edilmesi verimi arttırmaktadır. a.a. bağlantılı uygulamalarda, üretilen enerjinin % 40'lık bir kısmı akülerde depolanmadan doğrudan kullanılabilir [18]. Bu durumda, enerji üretici ve yük arasında tek kayıp, eviricide (en verimli bileşen olan) olmaktadır ve bu nedenle sistem verimi belirgin biçimde artmaktadır.

Herhangi bir konum için iklim verileri ve yük talebi bilgilerinin doğru bir şekilde temin edilmesi ve sistem bileşenlerinin teknik karakteristiklerinin dikkate alınması ile gerçeğe oldukça yakın benzetimler kolaylıkla ve hızla yapılabilir. Benzetim ve gerçek ölçümler arasındaki olası farklar, yük talebinin uygun bir şekilde gerçekleşmemesi ve/veya kısmi gölgelenme etkisi ile düşen enerji üretiminden kaynaklanacaktır.

Günümüzdeki bileşen teknolojileri ve maliyetler göz önüne alındığında, elektrik dağıtım şebekesinin ulaştığı yerlerde en ekonomik ve verimli FVGS çözümü şebeke bağlantılı a.a. yapıdaki sistemlerdir. Öte yandan, herhangi bir konumda potansiyeli yüksek enerji kaynaklarıyla melezlenecek sistemlerde daha olumlu sonuçlar alınabilecektir. Örneğin, rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksek olan Gökçeada'da FV ve rüzgâr türbini melez güç sisteminin başarımlarını hem teknik hem de ekonomik bağlamda artacaktır.

Bu çalışma ile Türkiye'de kurulumu gerçekleştirilen şebekeden bağımsız bir fotovoltaik güç sisteminin literatürde kullanılan uluslararası değerlendirme parametrelerine göre gerçek zamanlı performans analizi yapılmış ve sonuçların kurulum öncesinde yapılan benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada detaylandırılan ve Gökçeada örneğinde incelenen performans değerlendirme parametreleri, şebeke bağlantılı veya şebekeden bağımsız diğer FVGS'lerin analizinde de kullanılabilir. Ulusal ve uluslararası ortamda yapılan benzer çalışmalar ile karşılaştırılabilir.

Tablo 8: Simgeler ve Kısaltmalar.

a.a.	Alternatif akım
A_A	FV dize alanı (m^2)
A_{PV}	FV üreticinin yüzey alanı (m^2)
d.a.	Doğru akım
E_A	Dizeden kullanılan net enerji (kWh)
$E_{PV,in}$	FV dize yüzeyine gelen güneş enerjisi (kWh)
E_{use}	Toplam sistem çıkış enerjisi (kWh)
EÜ-GEE	Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü.
FV	Fotovoltaik
FVGS	Fotovoltaik Güç Sistemi
G_t	Toplam ışınım, dize yüzeyinde (W/m^2)
$G_{l,ref}$	Referans ışınım ($1 kW/m^2$)
$H_{l,d}$	Günlük küresel ışıtm, dize düzleminde ($kWh.m^{-2}.d^{-1}$)
$H_{l,m}$	Aylık küresel ışıtm, dize düzleminde ($kWh.m^{-2}.m^{-1}$)
IEA-PVPS	Uluslararası Enerji Ajansı – Fotovoltaik Güç Sistemleri
I_A	FV dize çıkış akımı (A)
I_{BU}	Yedek kaynak çıkış akımı (A)
I_{FS}	Depodan kullanılan akım (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_{TS}	Depolanan akım (A)
I_{TU}	Şehir şebekesine verilen akım (A)
L_C	Dize yakalama kayıpları ($h.d^{-1}$)
L_{BOS}	Denge bileşenleri kayıpları ($h.d^{-1}$)
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
P_A	FV dize çıkış gücü (kW)
P_{BU}	Yedek kaynak çıkış gücü (kW)
P_{FS}	Depodan kullanılan güç (kW)
P_{FU}	Şehir şebekesinden kullanılan güç (kW)
P_L	Yük gücü (kW)
P_{MPP}	FV modülün en yüksek güç noktasında ürettiği güç (W)
PR	Gerçekleme oranı [-]
P_{TS}	Depolanan güç (kW)
P_{TU}	Şehir şebekesine verilen güç (kW)
PVGIS	Avrupa Komisyonu-Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi
S_W	Rüzgâr hızı ($m.s^{-1}$)
T_{am}	Ortam hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_m	Modül sıcaklığı ($^{\circ}C$)
V_A	FV dize çıkış gerilimi (V)
V_{BU}	Yedek kaynak çıkış gerilimi (V)
V_L	Yük gerilimi (V)
V_{MPP}	FV modülün en yüksek güç noktasındaki gerilimi (V)
V_{OC}	Açık devre gerilimi (V)
V_S	Enerji depolama çalışma gerilimi (V)
V_U	Şebeke gerilimi (V)
Y_a	Dize hasadı ($h.d^{-1}$)
Y_f	FV sistem nihai hasadı ($h.d^{-1}$)
Y_r	Referans hasat ($h.d^{-1}$)
$\eta_{Amean,t}$	Ortalama dize verimi [-]
η_{BOS}	Denge bileşenleri verimi [-]
η_C	Kablo verimi [-]
η_{LOAD}	Yük verimi [-]
η_O	FV dizesi üzerindeki ilgili diğer kayıplar (sıcaklık, toz, gölge vb.) sonrası dönüşüm verimi
η_{PCU}	Güç şartlandırıcı verimi [-]
η_{SP}	FV sistem verimi [-]
T	Raporlama dönemi

5 Teşekkür

Gökçeada Belediyesi ve Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü personeline kurulum ve veri izleme süreçlerindeki desteklerinden ötürü teşekkür ederiz.

6 Kaynaklar

- [1] İçli, S., Çolak, M. ve Çubukcu, M., "TURKEY: PV Technology Status and Prospects-Pieces Falling into Place", IEA-PVPS Annual Report 2011, pp. 102-105, 2012.
- [2] Çubukcu, M., Çolak, M. "National Survey Report of PV Power Applications in Turkey", IEA-PVPS Task 1 Report, 2011.
- [3] Benz, J., Ortiz, B., Roth, W., and et al., "Fuel Cells in Photovoltaic Hybrid Systems for Stand-Alone Power Supplies", 2nd European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, Kassel, Germany, 232-239, 2003.
- [4] Chaurey, A., Kandpal, T. C., "Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: an overview", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2266-2278, 2010.
- [5] Ibrahim, M., "Decentralized Hybrid Renewable Energy Systems Control Optimization and Battery Ageing Estimation Based on Fuzzy Logic", Ph.D. dissertation, University of Kassel, Germany, 2002.
- [6] Kleinkauf, W., Sachau, J., "Components for Modular Expandable and Adaptable PV systems, 12th EUPVSEC, Amsterdam, the Netherlands, pp. 1711-1713, 1994.
- [7] DGS (The German Energy Society), "Planning & Installing Photovoltaic Systems", Book, 384 p, 2009.
- [8] TS EN 61724, "Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis", 26 p, 1999.
- [9] Wittkopf, S., Valliappan, S., Liu, L., Ang, K.S., Cheng, S.C.J., "Analytical performance monitoring of a 142.5 kWp grid-connected rooftop BIPV system in Singapore", Renewable Energy 47, 9-20, 2012.
- [10] Kymakis, E., Kalykakis, S., Papazoglou, T.M., "Performance analysis of a grid-connected photovoltaic park on the island of Crete", Energy Conversion and Management 50, 433-438, 2009.
- [11] Rehman, S., El-Amin, I., "Performance evaluation of an off-grid photovoltaic system in Saudi Arabia", Energy 46 (2012) 451-458, 2012.
- [12] Diaz, P., Pena, R., Munoz, J., Arias, C.A., Sandoval, D., "Field analysis of solar PV-based collective systems for rural electrification", Energy 36, 2509-2516, 2011.
- [13] Sharma, R., Tiwari, G.N., "Technical performance evaluation of stand-alone photovoltaic array for outdoor field conditions of New Delhi", Applied Energy, 92, 644-652, 2012.
- [14] Aristizabal, A.J., and Gordillo, "Performance monitoring results of the first grid-connected BIPV system in Colombia", Renewable Energy 33: 2475-2484, 2008.
- [15] IEA-PVPS T2-06, "Cost and Performance Trends in Grid-Connected Photovoltaic Systems and Case Studies", 54p, 2007.
- [16] Metwally, A.E., "Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System", PhD Thesis, Faculty of Electrical Engineering, University of Kassel, Germany, 166p, 2005.
- [17] Protogeropoulos, C., Klonaris, I., Petrocheilos, C., Charitos, I., and Martinac, I., "Performance evaluation of different PV module technologies in a grid-connected pilot project in Greece", 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 6–10 September 2010.
- [18] Çubukcu, M., 2011, "Türkiye'nin Farklı Konumlarında Farklı Topolojilerde Fotovoltaik-Rüzgâr-Yakıt Pili Hibrid Güç Sistemlerinin Modellenmesi, Karşılaştırmalı Simülasyonu ve Uygulamalı Performans Analizi", Ege

- Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 2011.
- [19] Jallouli, R., Krichen, L., "Sizing, techno-economic and generation management analysis of a stand alone photovoltaic power unit including storage devices", *Energy*, 40, 196-209, 2012.
- [20] TSE CLC/TS 61836, "Fotovoltaik güneş elektriği enerji sistemleri - Terimler, tarifler ve semboller", 77 s, 2010.
- [21] PVGIS (European Commission – Joint Research Center, Photovoltaic Geographical Information System), <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>, (Erişim tarihi: 18 Temmuz 2011).
- [22] MGM (Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü), yazılı görüşme, 2010.