

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FOTOVOLTAİK SİSTEM GÜÇ KARAKTERİSTİKLERİNİN
DENEYSEL YÖNTEMLE BELİRLENMESİ**

Metin AYDIN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2006**

Doç. Dr. Bülent YEŞİLATA danışmanlığında, Metin AYDIN'ın hazırladığı “Fotovoltaik Sistem Karakteristiklerinin Deneysel Yöntemle Belirlenmesi” konulu bu çalışma 30/06/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Bülent YEŞİLATA

Üye : Doç. Dr. Hüsamettin BULUT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nurettin BEŞLİ

Bu Tezin Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim BOLAT
Enstitü Müdürü

Bu çalışma HÜBAK tarafından desteklenmiştir.
Proje No: 457

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
1.GİRİŞ	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. MATEYAL ve YÖNTEM	8
3.1. Data Ölçüm ve Kayıt Sistemi	8
3.1.1. Tek eksen de güneş i takip eden sistem sehpaları	9
3.1.2. İki eksen de güneş i takip eden sistem sehpas ı	11
3.2. Veri izleme ve Kayıt Kartı (DAQ)	12
3.3. Fotovoltaik Hücrelerin Teorik Olarak Modellenmesi	14
3.4. Sistemdeki Temel Kayıplar	17
3.4.1. Sıcaklık kayb ı	17
3.4.2. Bağlant ı kayb ı.....	18
3.4.3. Uyumsuzluk kay ıpları.....	19
3.4.4. Tozlanma ve yansıma kay ıpları.....	19
3.5. Ölçüm Sistemine İnverter İlavesi.....	19
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	22
4.1. Tek PV Panel İçin Optimal Elektriksel Yük Direncinin Belirlenmesi	22
4.2. Çoklu PV Panel Konfigürasyonlarının Karakterizasyonu.....	26
4.2.1. (2s*2p) PV panel konfigürasyonunun karakterizasyonu	27
4.2.2. (1s*4p) PV panel konfigürasyonunun karakterizasyonu	28
4.2.3. (4s*1p) PV panel konfigürasyonunun karakterizasyonu.....	30
4.3. Fotovoltaik Panellerde Eğim Açısı Etkisinin Deneysel Olarak Saptanması.....	32
4.4. Oniki Aylık Ölçümlerde Güç Parametrelerinde Görülen Değişimler.....	39
5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER	56
5.1. Sonuçlar.....	56
5.2. Öneriler.....	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	67
ÖZET	68
SUMMARY	69
EKLER	70

ÖZ
Yüksek Lisans Tezi

FOTOVOLTAİK SİSTEM GÜÇ KARAKTERİSTİKLERİNİN
DENEYSEL YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

Metin AYDIN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Bülent YEŞİLATA
Yıl : 2006, Sayfa : 69

Bu tez çalışmasında dinamik ve gerçek meteorolojik şartlar altında fotovoltaik (PV) sistem güç karakteristiklerinin tespiti ve farklı çalışma koşullarında PV sistem performansındaki değişimler araştırılmıştır. Deneysel yöntem kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, aşağıda belirtilen aşamaların tümü gerçekleştirilmiştir:

- 1) Panellerin eğim açılarının belirlenen zaman aralıklarında kolayca değiştirilmesini sağlayabilecek hareketli sehpa tasarımı ve imalatı yapılmıştır.
- 2) Tekli PV panel için farklı elektriksel yük (direnç) değerlerinde akım (I) – gerilim (V), güç (P)- verim (η) karakteristik eğrileri belirlenmiştir.
- 3) Panel eğim açısının PV panel güç çıkışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.
- 4) Çoklu PV panel sistemleri için, farklı elektriksel bağlantı konfigürasyonlarının (4 seri, 4 paralel ve 2 seri*2 paralel) sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmış ve bağlantı kayıpları tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, fotovoltaik sistemler üzerinde gerçek atmosferik koşullarda elde edilen güç değerlerinin, teorik beklentilerden farklı olduğunu göstermektedir. Deneysel olarak elde edilen sistem güç çıkışı üzerinde; elektriksel yük değeri, eğim açısı ve elektriksel bağlantı konfigürasyonu gibi parametrelerin etkisinin oldukça önemli olduğu gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : fotovoltaik, PV karakterizasyonu, optimum yük

ABSTRACT
MSc Thesis

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM'S
POWER CHARACTERISTICS**

Metin AYDIN

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Bülent YEŞİLATA
Year: 2006, Page : 69

In this thesis, power characteristics of photovoltaic (PV) systems under real atmospheric environment and effect of different operating conditions on system performance are investigated. The outline of all accomplished steps in this experimental work is given below:

- 6) A special experimental set-up along with a data acquisition system was designed to measure load-resistant, panel current and voltage, total solar radiation intensity and panel temperature at specified time-intervals.
- 7) Ergonomical racks with simple manual tracking system for PV panels was constructed to provide that the slope angle can be adjusted mechanically at specified time-periods.
- 8) The current-voltage and power-efficiency characteristic curves of a single panel at various linear electrical loads were experimentally determined.
- 9) The effect of panel slope angle on PV panel power output was investigated..
- 10) The effect of array electrical configuration for multiple panels were investigated and the system connection losses were estimated.

The results show that there is significant deviation between PV panel power outputs expected from theoretical modeling and measured under real atmospheric conditions. The considerable influences of some parameters, such as electrical load, slope angle, electrical connection arrangement, on system power output are also observed.

KEY WORDS : photovoltaics, characterisation of PV, optimum load

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının tım aŐamalarında benden zamanını, bilgisini ve desteğini esirgemeyen danıŐmanım Doç. Dr. Bülent YEŞİLATA'ya, çalışmanın tamamlanmasında birçok farklı noktadaki katkılarından dolayı Doç. Dr. Hüsamettin BULUT (HRÜ), Yrd. Doç. Dr. Murat KISA (HRÜ), Yrd. Doç. Dr. Nurettin BEŞLİ (HRÜ) ve Öğr. Gör. Serkan KAYA (HRÜ)'ya, başta Asım Fatih DURMAZ ve Yusuf İŐIKER olmak üzere Mühendislik Fakültesindeki tüm Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma, Elektrik-Elektronik Mühendisi arkadaşım M.Hadi Süzer'e, Makine Mühendisi arkadaşlarım M. Selim ÜÇGÜL ve Cüneyt ERDEM'e can-ı gönülden teşekkür ediyorum. Ayrıca tüm öğrenim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ailemin tüm bireyelerine, sevgili eşim Naciye AYDIN'a ve biricik kızım Elif Merve AYDIN'a Őükranlarımı sunuyorum.

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1. 1000 W/m ² ışınım şiddetindeki farklı çalışma sıcaklıklarında SX60U tipi fotovoltaiik panelin her bir sıcaklık değerinde maksimum güç elde edilen çalışma noktalarındaki akım ve voltaj değerleri.....	18
Çizelge 4.1. Farklı aylarda ölçüm yapılan günler	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. a) PV panel I-V ölçümü eşdeğer elektriksel devresi, b) data ölçüm ve kayıt sistemini oluşturan bileşenler.....	9
Şekil 3.2. a) Eğimi 5°er derece aralıklarla ayarlanabilen tekli PV panel sehпасı, b) eğimi 3°er derece aralıklarla ayarlanabilen çoklu PV panel sehпасı.....	10
Şekil 3.3. a) PV sistem sehпасı ölçüleri ve üretim detayları, b) yatay kızak, c) açılı ayar noktaları ..	10
Şekil 3.4. İki ekseninde güneşi takip edebilen sistem sehпасı.....	11
Şekil 3.5. Tasarımı ve üretimi yapılan veri izleme ve kayıt kartına ait blok diyagram.....	12
Şekil 3.6. Veri izleme ve kayıt kartına ait programın ara yüz görünümü.....	13
Şekil 3.7. a) Veri kartı ile yapılan ölçümde akım-voltaj değişimleri, b) veri kartı ile yapılan ölçümde güç-ışınım şiddeti değişimleri.....	14
Şekil 3.8. a) SX60U tipi fotovoltaik panelin 25 °C sabit çalışma sıcaklığında ve 100 W/m ² ile 1000 W/m ² ışınım şiddeti aralığındaki performans eğrileri, b) 1000 W/m ² sabit ışınım şiddeti altında ve farklı çalışma sıcaklıklarında fotovoltaik cihazın performans eğrileri.....	17
Şekil 3.9. İnverterli halde ölçüm sisteminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.10. PV ölçüm ve kayıt sisteminin inverterli ve veri izleme-kayıt kartlı bağlantı şeması.....	21
Şekil 4.1. a) 1 PV panele ait akım-gerilim (I-V) eğrisi, b) farklı ışınım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri, c) farklı ışınım şiddetlerinde elde edilen güç değerleri ve maksimum güç noktaları.....	25
Şekil 4.2. Sistemin, dört farklı ışınım şiddetinde farklı dirençler kullanılarak elde edilen toplam güç değerleri (kesik çizgili düşey hat optimal direnci belirtmek için kullanılmıştır).....	26
Şekil 4.3. a) (2s*2p) panel konfigürasyonu I-V eğrisi, b) farklı ışınım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri, c) farklı ışınım şiddetlerinde elde edilen güç değerleri ve maksimum güç noktaları, d) R=4,72 ohm ile elde edilen güç değerinin zamanla değişimi.....	28
Şekil 4.4. a) (1s*4p) panel konfigürasyonu I-V eğrisi, b) farklı ışınım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri, c) farklı ışınım şiddetlerinde elde edilen güç değerleri ve maksimum güç noktaları, d) (1s*4p) için R=1,2 ohm değeri ile elde edilen güç değerinin zamanla değişimi.....	29
Şekil 4.5. a) (4s*1p) panel konfigürasyonu I-V eğrisi, b) farklı ışınım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri, c) farklı ışınım şiddetlerinde elde edilen güç değerleri ve maksimum güç noktaları	31
Şekil 4.6. Saatlik-ortalama, aylık ortalama ve yıllık-ortalama değerler doğrultusunda hesaplanan optimum eğim açılı (α_{saat} , α_{ay} ve α_{yil}) yüzeyler üzerine gelen günlük toplam ışınım miktarının aylara göre değişimi.....	33
Şekil 4.7. Şanlıurfa ili için uzun dönem verileri kullanılarak tespit edilen yüzey eğim açısının aylara göre değişimi.....	35
Şekil 4.8. Eğimi ayarlanabilen PV panel sehпасı.....	35
Şekil 4.9. a, b) Kasım 2004'te gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları, c, d) Aralık 2004'te gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları.....	36
Şekil 4.10. a, b) Ocak, c) Şubat ve d, e) Mart 2005 aylarında yapılan ölçümlerin sonuçları.....	37
Şekil 4.11. 2004 yılı Mayıs ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	9
Şekil 4.12. 2004 yılı Haziran ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	40
Şekil 4.13. 2004 yılı Temmuz ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	41
Şekil 4.14. 2004 yılı Ağustos ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	42
Şekil 4.15. 2004 yılı Eylül ayı içerisinde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	43

Şekil 4.16. 2004 yılı Ekim ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	44
Şekil 4.17. 2004 yılı Kasım ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	45
Şekil 4.18. 2004 yılı Aralık ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	46
Şekil 4.19. 2005 yılı Ocak ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	47
Şekil 4.20. 2005 yılı Şubat ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	48
Şekil 4.21. 2005 yılı Mart ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	49
Şekil 4.22. 2005 yılı Nisan ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler.....	50
Şekil 4.23. Akım parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki değişimler.....	51
Şekil 4.24. Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki voltaj değişimleri..	52
Şekil 4.25. Güç parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylarda görülen değişimler.....	53
Şekil 4.26. Işınım şiddeti parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki değişimler.....	53
Şekil 4.27. Verim parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki değişimler.....	54
Şekil 4.28. Verim parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki değişimler.....	55

SİMGELER DİZİNİ

A	Isıl Katsayı
A_{ref}	Referans Isıl Katsayı Değeri
Ah	Akü Kapasitesi (Amper-Saat)
A.M.	Hava Geçirgenlik Katsayısı
DAQ	Veri İzleme ve Kayıt Kartı
E_q	Elektron Yükü
I	Akım (A)
I_L	Yüzeğe Işık Düştüğünde Üretilen Akım (A)
$I_{L,ref}$	Yüzeğe Işık Düştüğünde Üretilen Referans Akım (A)
I_{mpp}	Maksimum Güç Noktası Akım Değeri
$I_{mp,ref}$	Maksimum Güç Noktası Referans Akım Değeri
I_{sc}	Kısa Devre Akımı (A)
I_0	Karanlık Akım (A)
$I_{0,ref}$	Referans Karanlık Akım (A)
MPP	Maksimum Güç Noktası
N_s	Seri Bağlı Hücre Sayısı
P	Güç (W)
p	Paralel
PV	Fotovoltaik
P_{mpp}	Maksimum Güç Noktası Güç Değeri
P_{nom}	Nominal Güç (W)
P_T	Toplam Güç (W)
R	Direnç Değeri (Ohm)
$R_{eş}$	Eşdeğer Direnç (Ohm)
R_{opt}	Optimum Direnç Değeri (Ohm)
R_s	Seri Direnç Değeri (Ohm)
$R_{s,ref}$	Referans Seri Direnç Değeri (Ohm)
R_{sh}	Paralel Direnç Değeri (Ohm)
s	Seri
STK	Standart Test Koşulları
T	Çalışma Sıcaklığı ($^{\circ}C-^{\circ}K$)
T_a	Çevre Sıcaklığı ($^{\circ}C-^{\circ}K$)
T_c	Çalışma Sıcaklığı ($^{\circ}C-^{\circ}K$)
G	Işınım Şiddeti (W/m^2)
G_{noc}	Normal Çalışma Işınım Şiddeti (W/m^2)
V	Voltaj (V)
V_{mpp}	Maksimum Güç Noktası Voltaj Değeri (V)
$V_{mp,ref}$	Maksimum Güç Noktası Referans Voltaj Değeri (V)
V_{oc}	Açık Devre Gerilimi (V)
$V_{oc,ref}$	Referans Açık Devre Gerilimi (V)
α	Eğim Açısı ($^{\circ}$)
α_{saat}	Saatlik Eğim Açısı ($^{\circ}$)
$\alpha_{aylık}$	Aylık Eğim Açısı ($^{\circ}$)
α_{mevs}	Mevsimlik Eğim Açısı ($^{\circ}$)
α_{yillik}	Yıllık Eğim Açısı ($^{\circ}$)
μ_{isc}	Panel Akım Sıcaklık Katsayısı ($\% / ^{\circ}C$)
μ_{voc}	Panel Voltaj Sıcaklık Katsayısı ($mV / ^{\circ}C$)
η	Verim
Ω	Direnç (Ohm)

1. GİRİŞ

Fotovoltaik (PV) paneller, üzerlerine düşen ışınımı doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Fotovoltaik paneller, üretim maliyetlerinde son yıllarda sağlanan iyileştirmelere rağmen, bir PV sistemi kullanıcısı için hala yeterince ucuz bir seçenek değildir. Bu nedenle bir PV sisteminin tasarımı aşamasında istenilen amaca en az sayıda panel ile ulaşmak temel hedeftir. Bu ciddi bir optimizasyon problemidir ve hedefe ulaşmada ilk yaklaşım sistemin maksimum güç noktalarında çalışmasının teminidir.

PV panel sisteminin kullanım yeri ve amacına uygun olarak optimizasyonunda çeşitli zorluklar söz konusudur. Öncelikle; PV sistem elektriksel güç çıktısı, diğer güneş enerjisi uygulamalarından farklı olarak, ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığı yanında, güç temin ettiği elektriksel cihazın (yükün) iç direncine bağlı olarak da lineer olmayan (eksponansiyel) bir değişim gösterir (Fıratoğlu ve Yeşilata, 2004; Aktacir ve Yeşilata, 2001). Diğer bir ifadeyle, PV panelleri, sistemin tahrik ettiği elektriksel cihazın akım-voltaj (I-V) karakteristiklerini dikkate almadan, maksimum elektriksel güç üreteceği noktalara (MPP) göre tasarlamak kullanıcıyı önemli yanılgılara götürebilir. Doğru optimizasyon için PV panel-yük elektriksel karakteristiklerinin bir arada değerlendirilmesi gerekir. Optimizasyonda diğer bir önemli unsur ise, uygulamanın niteliğine bağlı olarak (kullanım yeri, amacı, ağırlıklı kullanım dönemi) sistemden yoğun olarak yararlanılması istenilen ışınım seviyesi aralıklarının doğru belirlenmesidir. Bunun en önemli sebebi; PV sistemin akım ve gerilim karakteristikleri, dolayısıyla güç çıktıları, ışınım şiddetinin direkt fonksiyonu olduğundan, sistemin tahrik ettiği cihaza (yüke) gönderilen gücün gün boyunca sinüsoidal bir değişim göstermesidir. Aynı şekilde, güç çıktılarında aylık, mevsimlik ve yıllık bazda da önemli değişimler söz konusudur (Fıratoğlu ve Yeşilata, 2004; Green ve Emery, 1993). Sonuç olarak, optimizasyonun kritik ışınım şiddeti aralığı, PV panel ve yük elektriksel karakteristikleri üçgeni içerisinde yapılması gerekmektedir (Fıratoğlu ve Yeşilata, 2003; Hsieh, 1985; Kou ve ark., 1998). Teorik çalışmalarda bu karmaşık optimizasyon problemi, PV panel için üretici firma tarafından sunulan teknik verilere dayanılarak yapılmaktadır. Ancak söz konusu

veriler laboratuvar şartlarında, kontrol edilebilen ortam koşulları ve güneş simülatörü kullanılarak elde edildiğinden, dinamik ve gerçek meteorolojik şartlarında bu verilerden sapma olabilmektedir (Kou ve ark., 1998). Ayrıca veriler tek bir PV panel testini içerdiğinden, çoğunlukla birden fazla panelin elektriksel olarak seri-paralel bağlantı konfigürasyonunda ortaya çıkan bağlantı kayıplarını teorik anlamda tahmin etmek mümkün gözükmemektedir.

SX60U tipi fotovoltaik panelin Şanlıurfa ili meteorolojik şartlarındaki performansını ortaya çıkarmak amacıyla, farklı amaçlara yönelik olarak Mayıs 2004 – Mayıs 2005 tarihleri arasında farklı günlerde yapılan ölçümler de aranan parametrelere bağlı olarak farklı ölçüm yöntemleri uygulanmıştır.

Tekli ve çoklu PV panel karakterizasyonuna yönelik olarak gerçekleştirilen ölçümlerde;

1. Tekli PV panel deneysel karakterizasyonu
2. 4 seri x 1 paralel bağlantı kombinasyonunun deneysel karakterizasyonu
3. 2 seri x 2 paralel bağlantı kombinasyonunun deneysel karakterizasyonu
4. 1 seri x 4 paralel bağlantı kombinasyonunun deneysel karakterizasyonu

yapılmıştır.

PV panel/panellere, ışınım şiddetinin sabit kabul edilebileceği kadar kısa bir süre içerisinde, sürgülü reosta ile farklı yükler bağlanarak, PV panel/panellerin her bir yük değerindeki akım-gerilim çıktıları ölçülmüştür. Bu işlem, gün içerisinde farklı ışınım seviyelerinde gerçekleştirilerek PV panelin dış atmosfer şartlarında gösterdiği performans değerleri tespit edilmiştir. 1 dakikalık zaman dilimi içerisinde gerçekleştirilen ölçümlerde ışınım değişimi olduğu zaman, panel karakteristik I-V eğrilerinde bozukluklar ve sapmalar görülmüştür. Bu şekilde hatalı tespit edilen eğriler dikkate alınmamıştır. Ayrıca, aynı ışınım şiddeti için uygulanacak yük sayısı ne kadar çok olursa, elde edilecek I-V eğrilerinin de o nispette daha hassas sonuçlar vereceği unutulmamalıdır. PV panel açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) direkt olarak fotovoltaik panelin çıkış uçlarından ölçülmüştür. Tekli panel ve farklı çoklu PV panel kombinasyonlarını karakterize etmek için gerekli direnç aralığı, farklılık gösterdiğinden gerekli yük değerini sağlamak için birden çok sayıda sürgülü reosta kullanılmıştır. Örneğin; sistemde bulunan 4 adet SX60U tipi PV

panelin birbirine seri bağlandığı, bağlantı kombinasyonunda direnç değerleri, sürgülü reostanın 10 Ω 'luk ölçüm aralığından daha büyük olduğu için birden çok sayıda sürgülü reosta birbirine seri bağlanarak bu sorun çözülmüştür.

Eğim açısı optimizasyonuna yönelik olarak gerçekleştirilen ölçümlerde ise, birisi aylık optimum eğim açısında, diğeri ise Türkiye şartlarında önerilen (α =Enlem derecesi) yıllık sabit eğim açısında $\pm 3^\circ$ derece hassasiyetle yerleştirilen 2 adet PV panel kullanılmıştır. Ölçümlerde her yarım saatlik zaman dilimlerinde anlık voltaj, akım ve ışınım şiddeti değerleri kaydedilmiştir. Ölçü alım işlemi öncelikle fotovoltaik panellerden birisinin piranometre ile ışınım, multimetre ve ampermetre ile akım-voltaj ve panelin arka yüzeyine yapıştırılmış sensörle de panel yüzey sıcaklığı tespit edilmiştir. Ölçülen bu değerler kaydedilmiş ve ölçü alınan panelin çıkış uçları devreden sökülerek diğer panelin çıkış uçları devreye bağlanmıştır. Aynı zamanda piranometre de yeni ölçü alınacak panelle aynı açıda yerleştirilmiş ve yukarıda sayılan büyüklükler bu panel için de ölçülmüş ve kaydedilmiştir. İki panel çıktılarının ölçümü sırasında geçen süre 1 dakika seviyesindedir.

Başlangıçta kurulan PV data kayıt ve ölçüm sisteminde gerilim değerleri sürekli 1'er dakika aralıklarla, akım değerleri ise 30'ar dakika aralıklarla ölçülmektedir. Akım, gerilim ve ışınım şiddeti değerlerinin 1'er dakika aralıklarla ölçümüne olanak sağlayan bir veri izleme ve kayıt kartı tasarlanmış ve hazırlanan bu veri kartı ile daha hassas sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır.

Kurulan sistemin geliştirilmesine yönelik bir diğer çalışma da sisteme Solarix RI 900 model inverter ilavesidir. Seçilen inverterin sistemde sürekli olarak güç çıktısı verebilmesi için gerekli olan (Nurettin Beşli, 2005) toplam 24 V 400 Ah kapasitesinde 2 adet batarya alınmış ve sisteme bağlanmıştır. Sisteme bataryaların ilavesi ile inverterden sürekli bir güç çıkışı sağlanmış ve böylece AC ile çalışan cihazların performanslarının ölçümüne olanak sağlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Güneş enerjisinin direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü yöntem fotovoltaik enerji dönüşüm yöntemi olarak adlandırılmaktadır (Towsend, 1989). Fotovoltaik cihazlar yarı iletken malzemeler kullanarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler (Muntasser ve ark., 2000). Fotovoltaik cihazların yapımında en çok kullanılan yarı iletken malzemeler silisyum ve silisyum alaşımlarıdır.

Petrol ve diğer yenilenemeyen enerji kaynaklarının maliyetlerinin giderek artması ve bu tip kaynakların çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, dünya üzerinde birçok insan konvansiyonel güç üretim yöntemleri yerine güneş enerjisi (başta PV sistemler olmak üzere) ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiş ve bunun bir sonucu olarak günümüzde bu tip enerji kaynaklarının kullanımı artmıştır (Koutroulis ve ark., 2001). Kullanımdaki bu artışa rağmen, fotovoltaik yöntemle elektrik üretimi, ancak çok uzun arayışlar sonucunda insanların kullanabileceği forma dönüştüğünden, pratikteki başarılı uygulama sayısı, sahip olunan güneş enerjisi potansiyelini yansıtmamaktadır (Kattakayam ve Srinivasan, 1997).

Fotovoltaik yöntem; elektrik üretimi için uygun bir yöntem olmakla birlikte, henüz büyük miktarlardaki elektrik üretimi için diğer yöntemlerle rekabet edebilecek düzeyde değildir (Durisch ve ark., 2000). Fotovoltaik sistemlerin ilk yatırım maliyetleri ve diğer dezavantajları göz önünde tutulduğunda, kurulacak bir sistemin optimum şartlarda çalışabilmesi için, kurulum aşamasında sistemin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu optimizasyonda dikkat edilecek en önemli noktalardan bir tanesi; PV sistem elektriksel güç çıkışının, diğer güneş enerjisi uygulamalarından farklı olarak, ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığının yanında, güç temin edilen elektriksel cihazın (yükün) iç direncine bağlı olarak da lineer olmayan (eksponansiyel) bir değişim göstermesidir. Diğer bir ifadeyle, PV panelleri, sistemin tahrik ettiği elektriksel cihazın akım-voltaj (I-V) karakteristiklerini dikkate almadan, maksimum elektriksel güç üreteceği noktalara (MPP) göre tasarlamak, kullanıcıyı önemli yanlışlara götürebilir. Doğru optimizasyon için PV panel-yük elektriksel

karakteristiklerinin bir arada değerlendirilmesi gerekir. Optimizasyonda diğer bir önemli unsur ise, uygulamanın niteliğine bağlı olarak (kullanım yeri, amacı, ağırlıklı kullanım dönemi) sistemden yoğun olarak yararlanılması istenilen ışınım seviyesi aralıklarının doğru belirlenmesidir. Bunun en önemli sebebi; PV sistemin akım ve gerilim karakteristikleri, dolayısıyla, güç çıktıları ışınım şiddetinin direkt fonksiyonu olduğundan, sistemin tahrik ettiği cihaza (yüke) gönderilen gücün gün boyunca sinüsoidal bir değişim göstermesidir. Aynı şekilde, güç çıktılarında aylık, mevsimlik ve yıllık bazda da önemli değişimler söz konusudur. Sonuç olarak, optimizasyonun kritik ışınım şiddeti aralığı, PV panel ve yük elektriksel karakteristikleri üçgeni içerisinde yapılması gerekmektedir (Fıratoglu ve Yeşilata, 2004).

PV hücreler lineer olmayan enerji kaynakları olup hava şartları değiştiği anda sistemin çalışma noktaları da değişmektedir. Çünkü fotovoltaik cihazların akım-gerilim değerleri, dolayısıyla güç çıktıları ve çalışma verimleri; ışınım şiddeti ve sıcaklık gibi yerel iklim şartları ve mevsimsel parametrelere bağlıdır (Carstensen ve ark., 2003; Li ve ark., 2005). Bu nedenle aynı amaca yönelik farklı cihazlar içerisinde performans ve maliyet açısından en uygun olanın seçilebilmesi için, cihazların meteorolojik koşullara sahip bölgelerdeki gerçek çalışma şartları altında göstermiş oldukları performanslarının bilinmesi gereklidir (Kou, 1996). Genellikle cihaza ait bu bilgiler üretici firma tarafından verilmemekte, bu değerler yerine Standart Test Koşulları (STK) olarak adlandırılan 1000 W/m^2 ışınım şiddeti, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ hücre sıcaklığı ve $AM=1.5$ (atmosferin güneş ışığını geçirme oranı) şartlarındaki performans değerleri verilmektedir (Durisch ve ark., 2000). Gerçek çalışma şartları ve laboratuvar ortamındaki şartlar farklı olduğundan, üretici firmalar tarafından verilen katalog performans değerlerine, gerçek çalışma şartları altında, özellikle de meteorolojik şartların sert olduğu bölgelerde ulaşamamakta ve bunun sonucunda kullanılan cihazların performanslarında düşüşler görülmekte veya başarısız sonuçlar elde edilebilmektedir (Gxasheka, 2005; İkisava ve ark., 1998; Durisch ve ark., 2000). Bu nedenle gerçek çalışma şartları altındaki performans değerleri kullanılarak yapılan tasarımlar, kullanıcı açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. Cihazların dış ortam şartlarındaki çalışma performansları ancak, oldukça yüksek maliyetlerle sahip olunabilen “Veri İzleme ve Kayıt Cihazları” ile gerçekleştirilen ölçümlerle elde edilmektedir. Fotovoltaik sistemlerin performanslarının tespiti için akım, gerilim

(voltaj), çevre sıcaklığı (dolayısıyla panel yüzey sıcaklığı) ve rüzgar hızı gibi parametrelerin ölçümü gereklidir.

Fotovoltaik sistem karakteristiklerini tespit etmek amacıyla, ölçüm düzeneklerinde en çok kullanılan yükler, rezistans tipi yükler, kapasitans tipi yükler ve elektronik yüklerdir (Kohuzam ve ark., 1991; Morgan ve ark., 1994). Elektronik yükler, sistem parametrelerinin hızlı, kolay, doğru ve istenilen hassasiyette tespit edilmesine ve bilgisayar desteği ile de bu parametrelerin izlenebilmesine olanak sağlamaktadır. Elektronik yüklerin en önemli dezavantajları ise, ilk yatırım maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır. Sistem parametrelerinin tespiti amacıyla kullanılan yükler içerisinde maliyet açısından en uygun yük tipi, rezistans tipi yüklerdir. Rezistans tipi yüklerin dezavantajı ise, yük değişimlerinde kademeler arasındaki geçişte üniform bir yük değişiminin sağlanamaması ve bu yük değişimi için geçen sürede, ışınım şiddetinin bir miktar değişim göstermesidir. Çok kısa bir zaman dilimi içerisinde gerçekleştirilen ölçümlerde panel kapasitans etkileri, uzun bir zaman dilimi içerisinde gerçekleştirilen ölçümlerde ise ışınım şiddetindeki değişimden dolayı elde edilen eğrilerde hatalar oluşmaktadır (Blaesser, 1997).

Daha önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlara bakıldığında, PV hücrenin ürettiği akım değeri ile yüzeye gelen ışınım şiddeti arasında lineer bir ilişkinin mevcut olduğu, ışınım şiddetinin artışı ile akımın ve sistemin ürettiği gücün arttığını, sıcaklık artışı ile de açık devre geriliminde (V_{oc}) büyük miktarda düşüş ve kısa devre akımında ise küçük bir miktarda artış olduğu görülmektedir (Van Dyk, 2005). Kısa devre akımında gün boyunca meydana gelen değişim, açık devre geriliminde meydana gelen değişimden çok daha fazladır. Bu nedenle sistemin günlük verim değişimi incelendiğinde, kısa devre akımının değişimine paralel bir değişim görülmektedir (Metren ve Andreu, 1998).

Fotovoltaik sistem karakteristiklerinde mevsimsel olarak meydana gelen değişimlerin incelendiği çalışmalarda (Hirata ve ark., 1998; Metren ve Andreu, 1998) elde edilen sonuçlar, ölçümlerin yapıldığı bölgenin meteorolojik şartlarına (Itoh ve ark., 2001; Nishioka ve ark., 2003) ve ölçümlerde kullanılan fotovoltaik cihazların elektriksel karakteristiklerine (özellikle de μ_{isc} ve μ_{voc} katsayılarına) bağlı olarak

farklı değişimler göstermektedir (Nishitani ve ark., 1998; King ve ark., 1997; Hirata ve Tani, 1995). Özellikle sıcak iklime sahip bölgelerde yaz aylarında görülen yüksek çevre sıcaklığı dolayısıyla da panel yüzey sıcaklığının fotovoltaik sistem güç çıktısı üzerindeki etkisi çok büyüktür. Bu nedenle sistem tasarımında sıcaklık etkisinin mutlaka göz önünde bulundurulması gereklidir.

Literatürde fotovoltaik sistemlerin karakterizasyonuna yönelik birçok çalışma olup (Eikelboom ve Jansen, 2000; Whitaker ve ark., 1997), bu karakterizasyon yöntemlerinin bir kısmı sadece panel katalog değerleri ile, bazıları ise bir yörede uzun süreli olarak gerçekleştirilen ölçümlerle sonuca ulaşmaktadır (Marion ve ark., 2005; Kou, 1996).

Sistem performansına etki eden ışınım şiddeti ve çevre (dolayısıyla panel çalışma) sıcaklığından başka diğer bir önemli parametre ise, PV panellerin yatay yüzeyle yaptığı açıdır. Yıl ve gün boyunca deklinasyon açısına, bölgenin enlemine ve güneş batış açısına bağlı olarak, güneş ışınımının dünyanın yatay yüzeyine geliş açısı değişir. Işınım şiddetinden maksimum şekilde yararlanabilmek için panel veya kollektörlerin, güneş geliş açısı dikkate alınarak, optimum açılarda yatay yüzeye yerleştirilmesi gereklidir (Fıratoğlu, 2003). Farklı bölgeler için optimum panel eğim açılarının tespitine yönelik çalışmalar mevcut olup (Aydın ve Yeşilata, 2004; Yakup ve ark., 2001), bu çalışmalarda (Tang ve Wu, 2004; Hussein ve ark., 2004) genellikle uygulanan yöntem, mevcut cihaz kullanım bölgesi için uzun dönem meteorolojik verilerinin kullanılarak, en fazla ışınımın geldiği saatlik, aylık ve yıllık eğim açısının tespit edilmesi şeklindedir (Sariah ve ark., 2002; Asl-Soleimani ve ark., 2001; Fıratoğlu ve Yeşilata, 2003). Bir veya daha çok eksenle güneşi izleyen sistemlerde panel yüzeyine gelen ışınım şiddeti miktarında artış görülmekte (Abdallah, 2004), ancak sisteme eklenen bu mekanizmalar sistem maliyetini arttırdığından uygulanabilir görünmemektedir (Fıratoğlu ve Yeşilata, 2001; Abdallah ve Nijmeh, 2004; Karimov ve ark., 2005).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Data Ölçüm ve Kayıt Sistemi

Bu deneysel çalışmada, bir PV panel tarafından tahrik edilen eşdeğer direnci sabit bir elektriksel yük (cihaz) dikkate alınmaktadır. Bu şartlarda bir elektriksel cihazın PV paneller ile birlikte kullanımı oldukça yaygın bir uygulama olup, PV akupleli pompa sistemleri dışında birçok uygulamayı (tüm elektrikli ev cihazları, su ısıtıcıları, aydınlatma araçları vs.) temsil eder (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003).

Bu deneysel araştırmada çok sayıda parametrenin birlikte ölçümü gerektiğinden, bilgisayar destekli bir data kayıt sistemi kurulmuştur. Şekil 3.1'deki düzenek yardımıyla panel eğimi, panele bağlı yük direnci, panel akımı ve voltajı, toplam güneş ışınım şiddeti ve panel yüzey sıcaklığı değerleri ölçülmüştür.

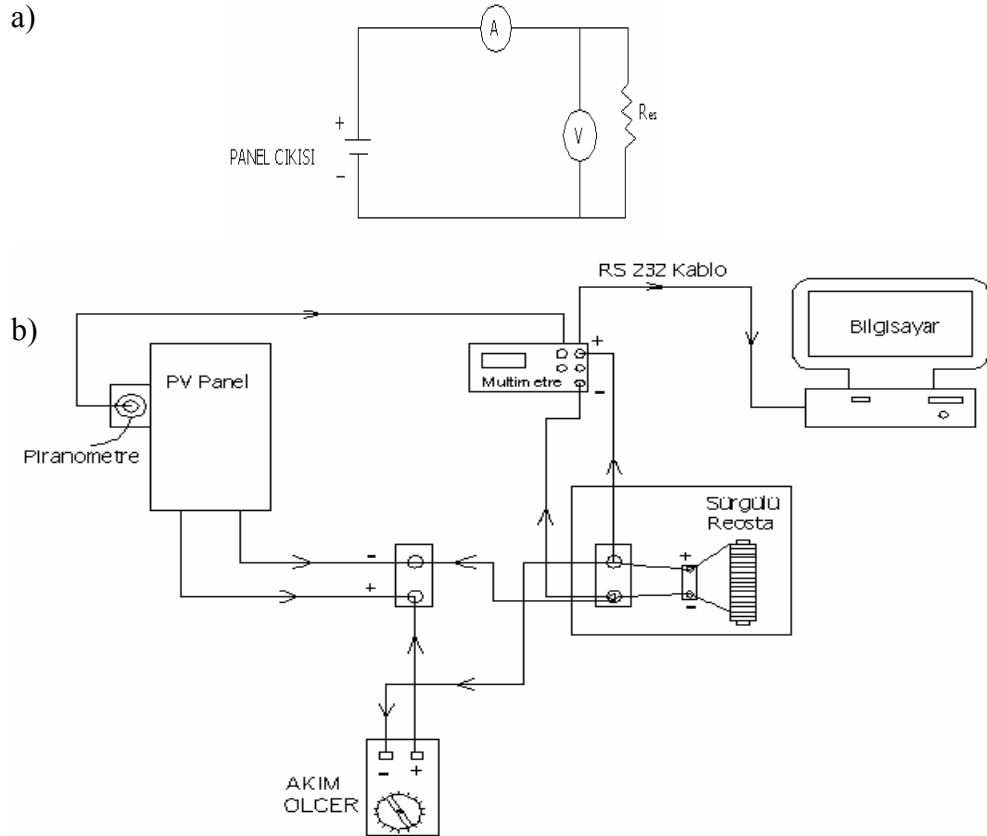
Kurulan sistem; panel eğimini ayarlamak için tasarlanarak üretilen ve Şekil 3.2a ve 3.2b'de verilen toplam 3 adet PV sistem sehпасı (fotovoltaik panelin eğimini 3'er derece aralıklarla ayarlamaya olanak tanıyan 2 adet ve panel eğimini 5'er derece aralıklarla ayarlamaya olanak tanıyan 1 adet), sürekli voltaj ölçümü için kullanılan multimetre, ışınım ölçmek için kullanılan piranometre, akım ölçümü için kullanılan ve 20 Ampere kadar ölçüm yapabilen ampermetre, dataların depolanması için kullanılan bir bilgisayar ve üretilen elektrikle çalıştırılan cihazın iç direncini temsil eden bir sürgülü direnç (yük)'ten oluşmaktadır. Ölçümlerde kullanılan sürgülü reosta 0-10 Ω aralığında yük değişimine olanak sağlamaktadır. Sürgülü reostadaki kademeler arasında ise yaklaşık 0,2 ohm'luk bir yük farkı bulunmaktadır. İstenilen yük değeri reostanın sürgüsü kaydırılarak ayarlanmış ve böylece her bir direnç değerindeki akım-gerilim değerlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Multimetre ile bilgisayarın ara bağlantısı RS-232 kablo ile sağlanmıştır. Böylece analog olarak ölçülen veriler dijitale dönüştürülmüştür. Piranometrenin ölçtüğü ışınım şiddeti çıktısı, multimetre ile ölçülmekte ve piranometre çıktısı 0-6 milivolt (mV) aralığında olmaktadır. Milivolt olarak okunan bu değer ile

piranometrenin katalog değeri olan katsayı ile çarpılarak ışınım şiddeti (W/m^2) cinsinden elde edilmiştir. Bu dönüşüm denklem 3.1’le sağlanmaktadır.

$$\frac{W}{m^2} = \frac{mV}{5,18 \left(\frac{\mu V}{W/m^2} \right)} \quad (3.1)$$

PV panel ve piranometrenin çıkış uçları, panel voltaj ve akımını ölçmek için hazırlanan devrenin giriş uçlarına bağlanmaktadır. Şekil 3.1a’da şematik olarak gösterildiği üzere, voltaj ölçmek için kullanılan multimetrenin uçları devredeki yüke paralel olarak, ampermetrenin uçları ise yüke seri olacak şekilde bağlanmıştır. Şekil 3.1b’de ise ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi yer almaktadır.

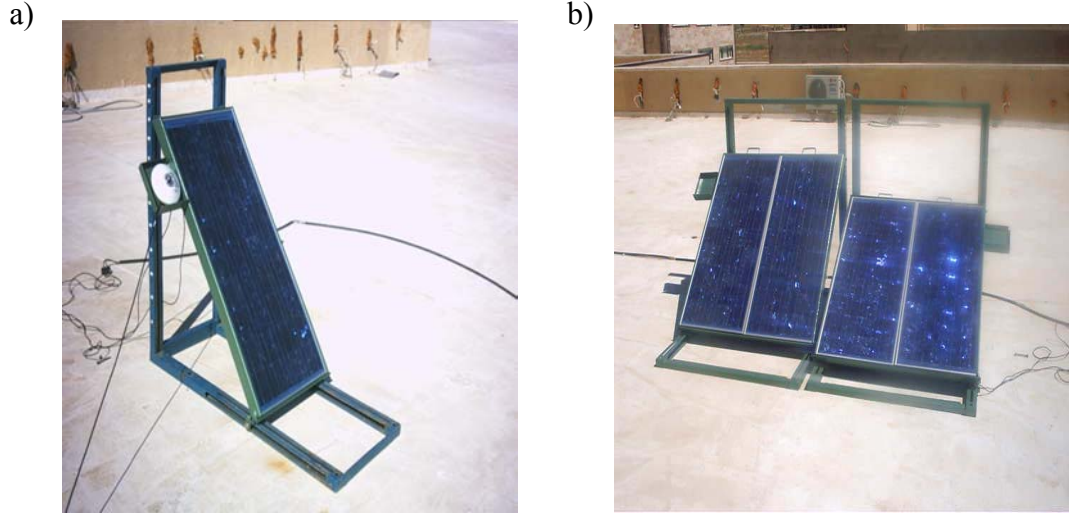


Şekil 3.1. a) PV panel I-V ölçümü eşdeğer elektriksel devresi, b) data ölçüm ve kayıt sistemini oluşturan bileşenler

3.1.1. Tek ekseninde güneşi takip eden sistem sehpaları

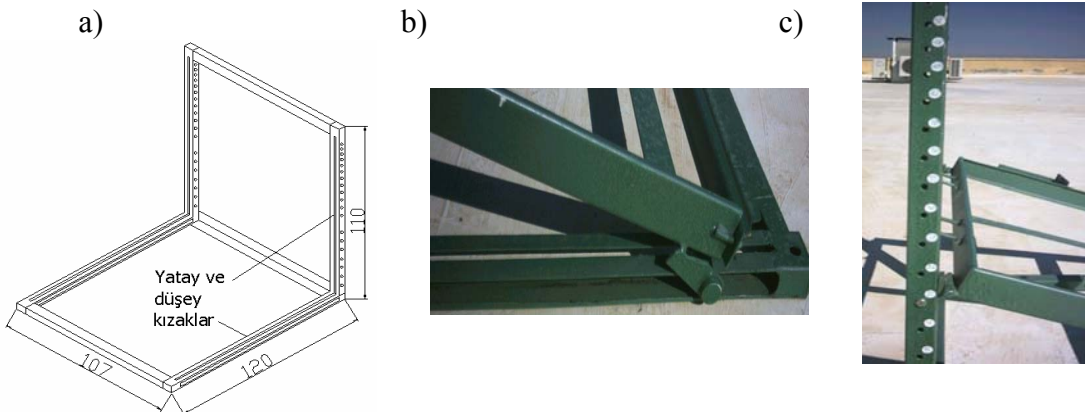
Tasarımı yapılarak üretilen ve Şekil 3.2a ve 3.2b’de görülen 3 PV sistem sehpa sadece dikey ekseninde güneşi izleyebilmektedir. Panel eğiminin ayarlanması el yardımıyla yapılmaktadır. Sistem sehparından 1 tanesi, PV panel eğiminin 0° - 65° eğim aralığında 5° ’er derece, 2 tanesi ise 0° - 60° eğim aralığında 3° ’er

derece aralıklarla ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Sistem sehparından 2 tanesi aynı anda 2 PV panelin eğimini ayarlayabilecek kapasitededir. Diğer sehpa ise tek bir PV panelin eğimini ayarlayabilmektedir.



Şekil 3.2. a) Eğimi 5'er derece aralıklarla ayarlanabilen tekli PV panel sehpası, b) eğimi 3'er derece aralıklarla ayarlanabilen çoklu PV panel sehpası

Ölçüleri Şekil 3.3a'da verilen PV sistem sehpasında, L tipi şaseler 60x40 mm'lik profilden yapılmıştır. Yatay profil 120 cm uzunluğunda, dikey profil ise 110 cm uzunluğunda olup elektrot kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Panelin eğimi, L tipi şaselerde yatay ve dikey yönde açılan kanallarla sağlanmaktadır. Bu amaçla yatay ve dikey profillerde, Şekil 3.3b'de gösterilen ve önceden ölçüleri belirlenmiş aralıkta kanallar açılmıştır. Dikey ekseninde Şekil 3.3c'de de görülen 3'er ve 5'er derece aralıklarla delikler açılmıştır. Eğim sabitleme işlemi bu deliklerle rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.3. a) PV sistem sehpası ölçüleri ve üretim detayları, b) yatay kızak, c) açılabilir noktaları

Panel eğimini görmek için, her bir deliğin yanına karşılık geldiği eğim açısı değerini gösteren bir gösterge yapıştırılmıştır. Ayrıca PV sistem sehpaları, panellerle aynı açıda olması gereken piranometrenin yerleştirilebileceği yüzeylere de sahiptirler.

3.1.2. İki eksende güneşi takip eden sistem sehpası

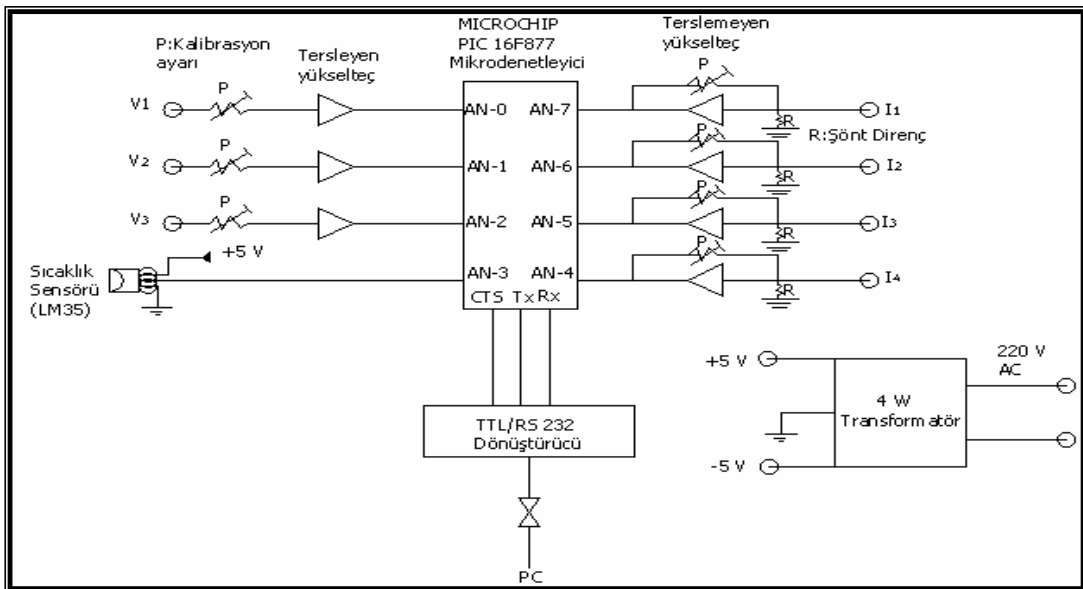
Şekil 3.4'te verilen sistem sehpası, güneşi gün içerisinde hem yatay hem de düşey ekseninde takip edebilmektedir. Doğu-Batı yönündeki takip işlemi, sehpa ayaklarına monte edilmiş yarım daire şeklindeki kızak ile gerçekleştirilmektedir. Sehpanın dönme merkezine konulan gösterge sayesinde dönme miktarı görülebilmektedir. Düşey yöndeki takip işlemi ise, panelin konulacağı yüzeyin altına yerleştirilen bağlantı elemanları ile sağlanmaktadır. Fotovoltaik panel yüzeye bağlandıktan sonra, panel istenilen miktarda eğilip kaldırılarak eğimi ayarlanmaktadır. Panelin bağlandığı yüzeye konulan bir gösterge ile panel eğimi görülebilmektedir. Sistemin çalışması oldukça pratik olup, gün içerisinde tek veya iki ekseninde güneşin izlenmesine olanak sağlamaktadır (Aydın ve Yeşilata, 2005).



Şekil 3.4. İki eksende güneşi takip edebilen sistem sehpası

3.2. Veri izleme ve Kayıt Kartı (DAQ)

Mevcut sistem kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerde, panel gerilim değeri gün boyunca 1'er dakika aralıklarla alınırken panel akım çıktısı ve ışınım şiddeti değerleri ise yarım saatlik zaman dilimlerinde alınmaktadır. Mevcut ölçüm sisteminde yalnızca voltaj değerleri sürekli kaydedilebilirken, akım, ışınım şiddeti ve çevre-panel çalışma sıcaklığı değerleri sürekli olarak kaydedilememektedir. Mevcut sistemdeki bu sıkıntıyı ortadan kaldırmak ve panel akım-gerilim, ışınım şiddeti ve panel-çevre sıcaklığı değerlerinin, gün boyunca çok kısa zaman aralıklarında ölçülebilmesi için bir veri izleme ve kayıt kartının tasarımı uygun çözüm olarak görülmüştür. Piyasadaki mevcut datalogger cihazlarının maliyetlerinin çok yüksek olması, veri izleme-kayıt kartları ve datalogger cihazlarının ölçüm aralıklarının mevcut sisteme uymaması bu çözüm yönteminin tercih edilmesinde etkili olan parametrelerdir. Tasarımı yapılarak üretilen veri izleme ve kayıt kartı, mevcut sistemde bulunan panellerin tamamının seri, tamamının paralel veya farklı kombinasyonlarda bağlanması durumunda, sistem çıktılarının ölçümüne olanak sağlamaktadır. Şekil 3.5'te blok diyagramı verilen veri izleme ve kayıt kartı, 10 bit hassasiyetinde ve 8 kanallı olup, bu kanallardan 3 tanesi voltaj ölçmek amacıyla, 4 tanesi akım ölçmek amacıyla ve geriye kalan 1 kanal da çevre-panel yüzey sıcaklığının tespiti amacıyla kullanılmaktadır (Aydın ve ark., 2005).

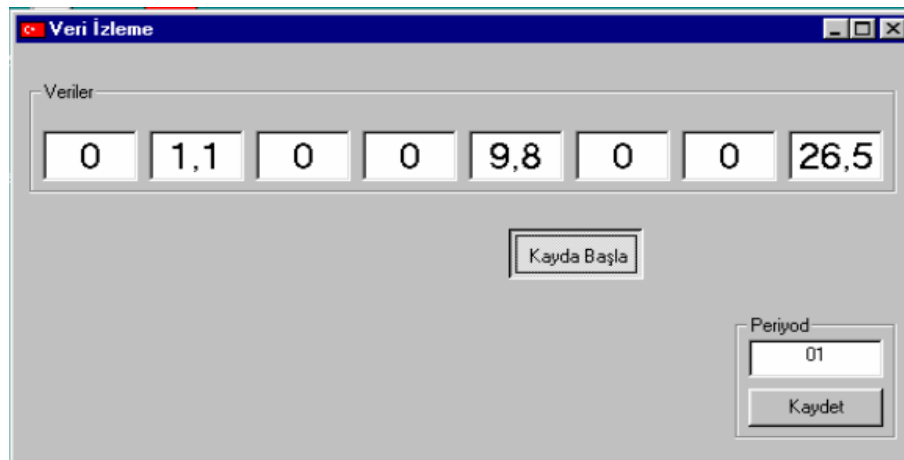


Şekil 3.5. Tasarımı ve üretimi yapılan veri izleme ve kayıt kartına ait blok diyagram

Veri kartı kullanılarak 0-64 saniyelik zaman aralıklarında ölçümler yapılabilmektedir. Panel yüzey sıcaklığının tespitinde LM35 tip sıcaklık sensörü kullanılmaktadır. Sensör PV panelin arka yüzeyine yapıştırılarak sıcaklık tespit edilmektedir. Veri kartının bilgisayarla bağlantısı RS-232 kablo ile sağlanmaktadır.

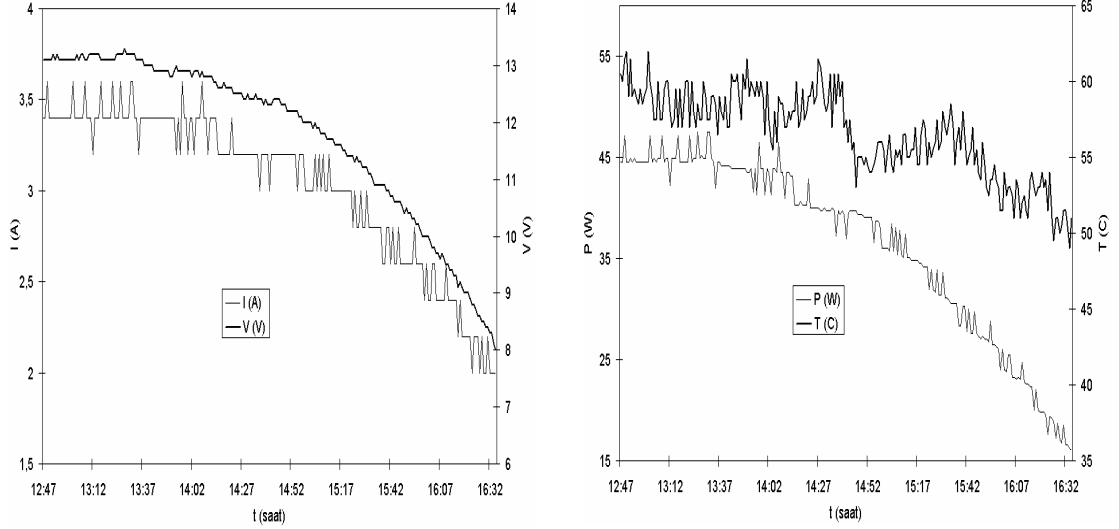
Veri izleme ve kayıt kartının eklenmesinden sonra, sistemde kullanılmayan multimetreler kullanılarak veri kartına ait her bir kanalın kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Veri kartında, piranometreden gelen ışınım şiddeti değerleri daha önce de bu amaçla kullanılan multimetre ile veya piranometreye ait datalogger ile ölçülerek kaydedilebilmektedir. Multimetre ile ölçüm yapıldığı zaman, veriler bilgisayara RS-232 kablo ile iletilmektedir.

Ayrıca veri izleme ve kayıt kartının ölçüm yapabilmesi için gerekli yazılım da, Visual Basic programlama dili ile yazılmış ve bu basit programın görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu kayıt programı ile ölçülen veriler, bir metin belgesine kaydedilmekte ve bu metin belgesi Excel dosyasından çağrıldığında, her bir kanaldan ölçülen değerler ayrı eksenlerde görülmektedir. Veri İzleme ve Kayıt kartı kullanılarak 0-64 saniye gibi çok küçük zaman aralıklarında dahi gerçekleştirilebilen ölçümler sayesinde, PV panellerin Şanlıurfa ili atmosferik şartlarındaki performansları daha hassas olarak tespit edilmektedir. Şekil 3.6'da verilen ekranda, 2 no'lu kanal akım, 5 nolu kanal voltaj ve 8 nolu kanalda ölçülen sıcaklık değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.6. Veri izleme ve kayıt kartına ait programın ara yüz görünümü

Sisteme eklenen veri kartı ile ışınım şiddeti dışındaki tüm parametreler çok kısa zaman aralıklarında ölçülebildiğinden anlık sistem performansının tespiti oldukça kolaylaşmaktadır. Şekil 3.7a ve b'de veri kartı ile herhangi bir günde ölçülen akım-voltaj ve güç-ışınım şiddeti parametrelerindeki değişimler görülmektedir.



Şekil 3.7. a) Veri kartı ile yapılan ölçümde akım-voltaj değişimleri, b) veri kartı ile yapılan ölçümde güç-panel yüzey sıcaklığı değişimleri

3.3. Fotovoltaik Hücrelerin Teorik Olarak Modellenmesi

Fotovoltaik cihazlardan elde edilecek güç çıktılarına en çok etki eden parametreler ışınım şiddeti ve sıcaklıktır (Li ve ark., 2005; Fıratoğlu, 2003). Fakat fotovoltaik cihazlar lineer olmayan enerji kaynaklarıdır, yani lineer bir ışınım şiddeti artışına paralel olarak, cihazlardan elde edilen güçlerde de lineer bir artış görülmez. Buna ilave olarak PV cihaz kullanıcısının sistem tasarımı yapabilmesi için üretici firmanın verdiği standart test koşullarındaki tasarım değerleri yeterli değildir. Bu nedenlerle cihazların standart test koşullarındaki çalışma karakteristiklerini referans alarak, cihazın farklı çalışma şartlarındaki performanslarının tahminine yönelik olarak teorik matematiksel modeller geliştirilmiştir. Literatürde fotovoltaik cihazların karakterizasyonuna yönelik birçok matematiksel model bulmak mümkündür (Durisch ve ark., 2005; Whitaker ve ark., 1997; Marion ve arkadaşları, 2005). Bu modellerden bir kısmı cihazın belirli bir çalışma bölgede uzun yıllar boyunca göstermiş olduğu performansın tespit edilmesi ve bu süreç sonunda bu ölçümlerden elde edilen bazı deneysel katsayıların kullanılarak matematiksel formülasyonların

yapılması esasına dayanmaktadır. Bu tez çalışmasında, seçilen matematiksel modelde ise, fotovoltaik cihazların teorik modellemesi için, cihaz kataloglarında verilen parametreler yeterlidir.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{A}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.1)$$

Denklemden I_L yüzeye ışık düşünce üretilen akımı, I_0 karanlık akımı, I çalışma akımı, V çalışma voltajı, A ısıl katsayı, R_{sh} paralel devre direnci ve R_s seri direnç değerini göstermektedir. $R_{sh} \gg R_s$ çok büyük olduğundan denklemin son kısmı ihmal edilerek gerekli parametre sayısı dörde indirilir (Towsend, 1989; Eckstein, 1990; Al-Ibrahim, 1996). Karakterizasyon işlemi aşağıda verilen 3.2–3.11 denklem sistemi ile gerçekleştirilmektedir.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{A}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Referans akım değerleri;

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref} \quad (3.3)$$

$$I_{0,ref} = \frac{I_{L,ref}}{\exp\left(\frac{V_{oc,ref}}{A_{ref}}\right) - 1} \quad (3.4)$$

Referans seri direnç değeri;

$$R_{s,ref} = \frac{A_{ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{L,ref}}\right) - V_{mp,ref} + V_{oc,ref}}{I_{mp,ref}} \quad (3.5)$$

Referans ısıl katsayı;

$$A_{ref} = \frac{\mu_{Voc} T_{c,ref} - V_{oc,ref} + E_q N_s}{\frac{T_{c,ref} \mu_{Isc}}{I_{L,ref}} - 3} \quad (3.6)$$

Çalışma sıcaklığı;

$$T_c = T_a + \frac{G}{G_{noc}} (T_{c,ref} - T_a) \quad (3.7)$$

Yüzeye ışık düşünce oluşan akım;

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \left[I_{L,ref} + \mu_{Isc} (T_c - T_{c,ref}) \right] \quad (3.8)$$

Karanlık akım;

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{N_s E_g}{A} \right) \left(1 - \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right) \right] \quad (3.9)$$

$$R_s = R_{s,ref} \quad (3.10)$$

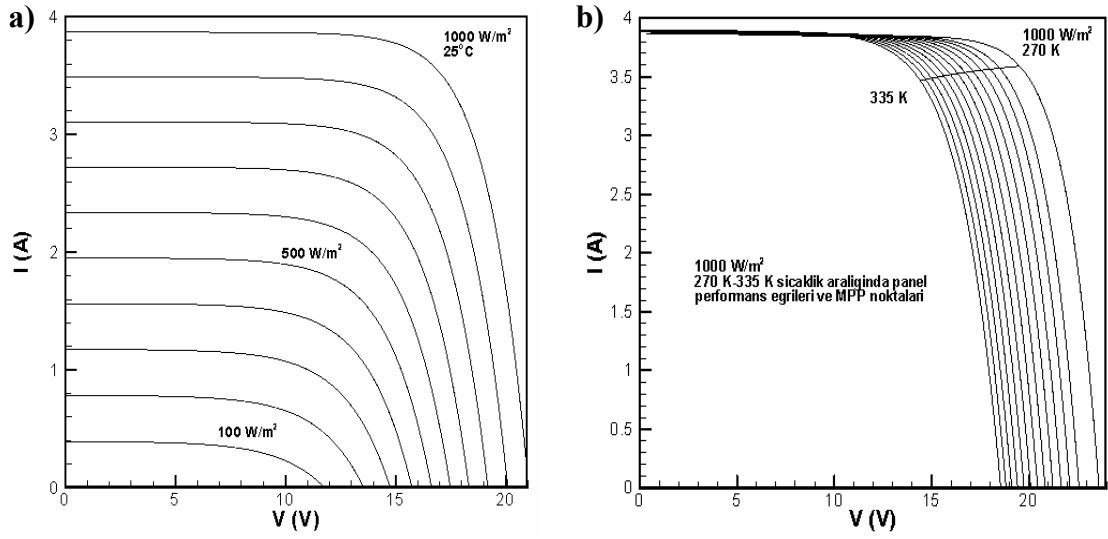
Isıl katsayı ve referans ısıl katsayı ilişkisi;

$$A = A_{ref} \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (3.11)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Ölçümlerde kullanılan ve Solarix firması tarafından üretilen SX60U tipi fotovoltaik panelin yukarıda anlatılan matematiksel modelle teorik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bunun için birinci aşamada 25 °C sabit çalışma sıcaklığında ve 100 W/m²–1000 W/m² ışınım şiddeti aralığında fotovoltaik panelin göstermiş olduğu performans eğrileri tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise cihazın güç çıktısı üzerinde sıcaklığın etkisini incelemek için 1000 W/m² sabit ışınım şiddeti ve farklı çalışma sıcaklıklarında fotovoltaik cihazın performans eğrileri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.8a ve b’de verilmiştir.



Şekil 3.8. a) SX60U tipi fotovoltaik panelin 25 °C sabit çalışma sıcaklığında ve 100 W/m² – 1000 W/m² ışınım şiddeti aralığındaki performans eğrileri. b) 1000 W/m² sabit ışınım şiddeti altında ve farklı çalışma sıcaklıklarında fotovoltaik cihazın performans eğrileri

3.4. Sistemdeki Temel Kayıplar

Bu deneysel çalışmanın ilk aşamasında oluşturulan ve ölçümlerin gerçekleştirildiği data ölçüm ve kayıt sisteminde; gerek bileşenlerin karakteristiklerinden ve gerekse çevresel meteorolojik etkilerden kaynaklanan birtakım kayıplar mevcuttur.

3.4.1. Sıcaklık kaybı

Fotovoltaik sistemlerde ışınım şiddetinden sonra sistem üzerine en fazla etkili diğer parametre, çevre (dolayısıyla panel çalışma) sıcaklığıdır. Ölçümlerin gerçekleştirildiği Şanlıurfa ili meteorolojik açıdan gündüz saatlerinde en yüksek çevre sıcaklığının görüldüğü iller arasında yer almaktadır. Bu durum Şekil 3.8b'deki eğrilerin etkilerinin ölçümler süresince fazlasıyla görülmesine yol açmıştır.

Kış aylarında gerçekleştirilen ölçümlerde dahi 40-45 °C gibi yüksek çalışma sıcaklıklarının görülmesi bu yörede kurulması düşünülen sistemler için tasarım aşamasında, çevre sıcaklığı faktörünün kesinlikle göz önünde tutulması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Şekil 3.8b'de görülen durumun sayısal olarak ifade edilmesi durumunda ortaya çıkan sonuçlar Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. 1000 W/m² ışınım şiddetindeki farklı çalışma sıcaklıklarında SX60U tipi fotovoltaik panelin her bir sıcaklık değerinde maksimum güç elde edilen çalışma noktalarındaki akım ve voltaj değerleri

Çalışma Sıcaklığı (°K)	V _{mpp}	I _{mpp}	P _{mpp}
335	14.41822	3.46981	50.0284839
330	14.69437	3.480399	51.1422707
325	14.98976	3.490089	52.31559649
320	15.30095	3.499879	53.55147359
315	15.62914	3.509669	54.8531082
310	15.9756	3.519359	56.2238716
305	16.34124	3.528949	57.6674026
300	16.7256	3.538739	59.1875330
295	17.13589	3.54743	60.7883703
290	17.56218	3.55732	62.4742942
285	18.01631	3.566211	64.2499629
280	18.49624	3.574802	66.1203957
270	19.5317	3.592484	70.1673197

3.4.2. Bağlantı kaybı

Oluşturulan PV ölçüm ve kayıt sisteminde ekipmanlar arasındaki bağlantı elektrik kabloları ile yapılmıştır. Bu ara bağlantı elemanlarının uzunluğu ve kabloların birbirine bağlandığı noktalarda oluşan direnç değerlerinin etkisi ile üretilen güçte bir miktar düşüş görülmektedir. Mevcut sistem için bağlantı kaybının tespitine yönelik yapılan çalışmalarda;

$$P = I^2 \cdot (0,4) \quad (3.12)$$

denklemleri ile ifade edilen bir bağlantı kaybının var olduğu tespit edilmiştir (Beşli ve Suzer, 2005). Denklem incelendiğinde panellerin birbirine paralel bağlandığı kombinasyonlarda daha fazla bağlantı kaybının oluşacağı görülmektedir. Bu kayıpların azaltılması için kablo kesitlerinin sistem güç akışına cevap verebilecek özellikte olması ve bağlantı noktalarında bağlantının doğru bir şekilde yapılması gereklidir.

3.4.3. Uyumsuzluk kayıpları

Kurulan ölçüm ve kayıt düzeneğinde kullanılan her bir ekipman kendine özgü karakteristiklere sahiptir. Bu farklı cihazların birbirine eklenmesi sonucunda ekipmanlar arasında mevcut sistem için, doğrudan ölçülemezle birlikte bir bağlantı kaybının ortaya çıkacağı unutulmamalıdır. Literatürde uyumsuzluk kayıplarının tespitine yönelik çalışmalar mevcut olup (Chamberlin ve ark., 1995) genellikle % 3 seviyesinde kayıp görülmektedir.

3.4.4. Tozlanma ve yansıma kayıpları

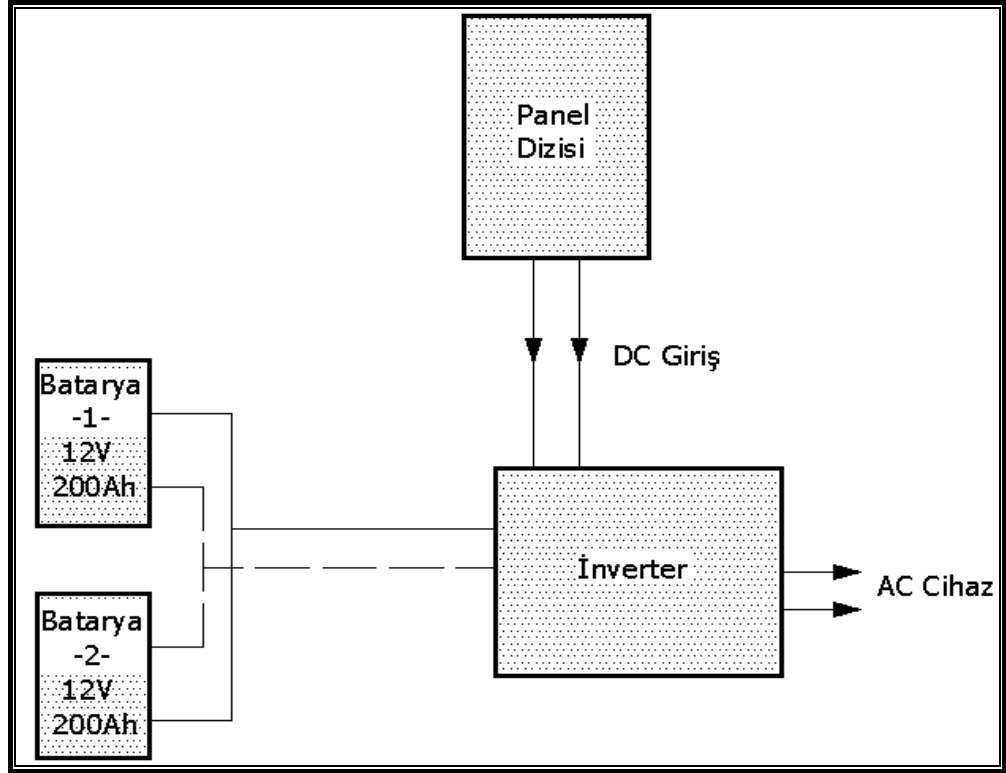
DeneySEL çalışmanın gerçekleştirildiği Şanlıurfa ilinde, panellerin yüzeylerine ışınımın gelmesini önleyecek miktardaki aşırı tozlu hava şartları, bu kayıpların ortaya çıkmasında etkili olan faktördür. Panellerin yüzeyleri sık sık temizlendiği halde, çok kısa bir sürede bahsedilen tozlanma yeniden görülmektedir.

3.5. Ölçüm Sistemine İnverter İlavesi

Fotovoltaik paneller doğru akım kaynaklarıdır. Bu nedenle PV sistemlerin ürettiği elektrik enerjisi doğru akım (DC) ile çalışan cihazlara direkt olarak uygulanmasına karşın, günlük hayatta kullandığımız birçok cihaz alternatif akım (AC) ile çalışmaktadır. Bu durumda PV sistem ile cihaz arasında bir DC/AC dönüştürücü (inverter) gereklidir. İnverter kullanımının, sistem performansını ve güvenilirliğini azaltması dışında maliyetin yükselmesine sebep olması gibi dezavantajları söz konusudur (Yeşilata ve Aktacir, 2001). Ancak fotovoltaik cihaz ile AC karakterli bir cihazın çalıştırılması şart ise, bu durumda sisteme inverter ilavesi kaçınılmaz bir durum olarak sistem tasarımcısının önüne çıkmaktadır.

DeneySEL çalışmanın bu aşamasında, sıfırdan kurulan ölçüm ve kayıt sistemine bir inverterin eklenmesi durumu ele alınmıştır. Sisteme eklenmesi düşünülen inverterin katalogunun incelenmesi ve üretici firma ile gerçekleştirilen bilgi alışverişi neticesinde, mevcut inverterin tek başına sisteme ilavesi durumunda inverterin sürekli güç çıktısı veremeyeceği, seçilen inverterle birlikte sisteme 12 V – 200 Ah kapasitesinde 2 adet batarya eklenmesi gerektiği anlaşılmıştır (Beşli ve Suzer, 2005).

İnverterli sistemin şematik gösterimi Şekil 3.9’da verilmektedir.

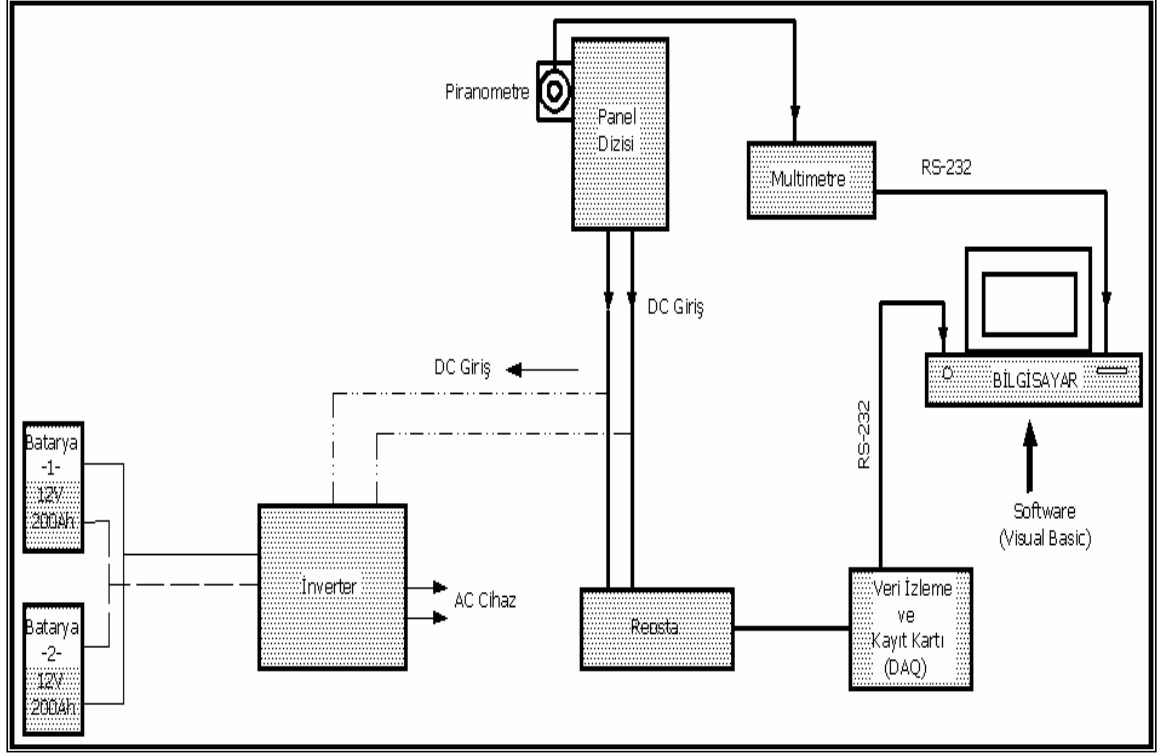


Şekil 3.9. İnverterli halde ölçüm sisteminin şematik gösterimi

Şematik şekilde verilen sistemde güneşin var olduğu ve panel dizisi tarafından elektriğin üretildiği saatlerde üretilen elektrik, bataryalarda kimyasal enerjiye dönüştürülerek depolanmaktadır. Depolanan bu enerji güneşin olmadığı kapalı günlerde ve gece boyunca bataryalardan tekrar çekilmektedir. Sistemde kullanılan bataryalar likit tiptir. Sistemin emniyetini sağlamak üzere ara bağlantı kablolarında uygun bir yere 20 Amperlik bir sigorta da konulmuştur. Sisteme eklenen inverterin % 92 verime sahip olması nedeniyle bir güç kaybı söz konusudur.

Ölçüm sisteminin geliştirilmesine yönelik olarak tasarlanan veri kartı ve inverterin sisteme ilave edilmesiyle birlikte ölçüm sistemi daha iyi sonuçlar verebilecek hale gelmiştir.

Tüm geliştirme çalışmalarının neticesinde oluşan ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10. PV ölçüm ve kayıt sisteminin inverterli ve veri izleme-kayıt kartlı bağlantı şeması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Tek PV Panel İçin Optimal Elektriksel Yük Direncinin Belirlenmesi

Fotovoltaik enerji dönüşüm teknolojisi henüz büyük miktardaki elektrik üretimi için diğer alternatif güç üretim yöntemleri ile rekabet edebilecek seviyede değildir. Bu nedenle PV panel sisteminin kullanım yeri ve amacına uygun olarak optimizasyonu gerekmektedir. Tüketici ihtiyaçlarını karşılayabilecek fotovoltaik sistem elemanlarının doğru olarak tespit edilebilmesi için, sistem elemanlarının, farklı meteorolojik koşullara sahip bölgelerde, gerçek çalışma şartları altındaki davranışlarının (performanslarının) bilinmesi gereklidir. Fotovoltaik cihazlara ait bu bilgiler genellikle üretici firmalar tarafından verilmemekte, bu bilgiler yerine fotovoltaik cihazların, tüm parametrelerin kontrol altında tutulabildiği laboratuarlarda gerçekleştirilen Standart Test Koşulları (STK – $1000 \text{ W/m}^2 - 25 \text{ }^\circ\text{C} - \text{AM}:1,5$) altındaki ölçümlerde elde edilen değerler verilmektedir. Ancak bu değerlere gerçek çalışma şartları ve laboratuvar şartları arasındaki farklılıklardan dolayı pratikte ulaşılamamaktadır (Cartensen ve ark., 2003). Çünkü; standart test koşulları, açık-berrak bir yaz gününe ait ışınım şiddeti ve kış aylarında görülebilecek bir çalışma sıcaklığından oluşmaktadır (Li ve ark., 2005). Optimum sistem tasarımı açısından, fotovoltaik cihazların gerçek çalışma şartları altındaki performans değerleri daha gerçekçi sonuçlar vermekte, ancak cihazların gerçek çalışma şartları altındaki performans değerlerini hazır olarak elde etmek mümkün olmayıp, oldukça yüksek maliyetlerle sahip olunan Data Acquisition Card (Veri izleme ve kayıt kartı) cihazları ile gerçekleştirilen ölçümlerle elde edilmektedir.

Ayrıca, PV panel üreticileri tarafından verilen tasarım parametreleri, yalnızca bir fotovoltaik panele ait değerleri içerdiğinden, birden çok sayıdaki fotovoltaik panelin birlikte kullanıldığı farklı panel konfigürasyonlarında ortaya çıkacak bağlantı kaybı ve bileşenler arasındaki farklılıklardan kaynaklanacak uyumsuzluk kaybı gibi kayıp parametrelerinin tahmin edilebilmesi mümkün gözükmemektedir.

PV sistem elektriksel güç çıktısı, diğer güneş enerjisi uygulamalarından farklı olarak, ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığı yanında, güç temin ettiği elektriksel cihazın

(yükün) iç direncine bağlı olarak ta lineer olmayan (eksponansiyel) bir değişim gösterir. Diğer bir ifadeyle, PV panelleri, sistemin tahrik ettiği elektriksel cihazın akım-voltaj (I-V) karakteristiklerini dikkate almadan, maksimum elektriksel güç üreteceği noktalara (MPP) göre tasarlamak kullanıcıyı önemli yanılgılara götürebilir.

Doğru optimizasyon için PV panel-yük elektriksel karakteristiklerinin bir arada değerlendirilmesi gerekir. Optimizasyonda diğer bir önemli unsur ise, uygulamanın niteliğine bağlı olarak (kullanım yeri, amacı, ağırlıklı kullanım dönemi), sistemden yoğun olarak yararlanılması istenilen ışınım seviyesi aralıklarının doğru belirlenmesidir. Bunun en önemli sebebi; PV sistemin akım ve gerilim karakteristikleri dolayısıyla güç çıktıları, ışınım şiddetinin direkt fonksiyonu olduğundan, sistemin tahrik ettiği cihaza (yüke) gönderilen gücün gün boyunca sinüsoidal bir değişim göstermesidir. Aynı şekilde, güç çıktılarında aylık, mevsimlik ve yıllık bazda da önemli değişimler söz konusudur. Sonuç olarak, optimizasyonun kritik ışınım şiddeti aralığı, PV panel ve yük elektriksel karakteristikleri üçgeni içerisinde yapılması gerekmektedir (Fıratoglu ve Yeşilata, 2004).

Haziran ve Temmuz 2004 tarihlerinde gerçekleştirilen ölçümlerde, 0-33 ohm arasında değişebilen bir yük değeri için maksimum gücü verecek panel konfigürasyonu araştırılmıştır. Bu deneysel çalışmada çok sayıda parametrenin birlikte ölçümüne olanak sağlayan bilgisayar destekli bir ölçüm düzeneği kullanılmıştır. Düzenek yardımıyla panel eğimi, panele bağlı yük direnci, panel akımı ve voltajı, toplam güneş ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığı değerleri ölçülmüştür.

Ölçümlerde kullanılan sürgülü reosta 0-10 Ω aralığında yük değişimine olanak sağlamaktadır. Sürgülü reostalardaki kademeler arasında ise yaklaşık 0,2 ohm'luk bir yük farkı bulunmaktadır. Reostanın sürgüsü, ışınım değişiminin ihmal edilebileceği kadar kısa bir süre içerisinde kaydırılarak istenilen yük değeri ayarlanmış ve böylece her bir direnç değerindeki akım-gerilim değerlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılan dirençlerin sayısı bağlantı konfigürasyonunun yük aralığına ve reostanın hassasiyetine bağlı olarak değişimler göstermektedir.

Bu işlem, gün içerisinde farklı ışınım seviyelerinde gerçekleştirilerek, PV panelin dış atmosfer şartlarında gösterdiği performans değerleri tespit edilmiştir.

Bir dakikalık zaman dilimi içerisinde gerçekleştirilen ölçümlerde ışınım değişimi olduğu zaman, panel karakteristik I-V eğrilerinde bozulma ve sapmalar görülmüştür. Bu şekilde hatalı tespit edilen eğriler dikkate alınmamıştır. Ayrıca, aynı ışınım şiddeti için uygulanacak yük sayısı ne kadar çok olursa, elde edilecek I-V eğrilerinin de o nispette daha hassas sonuçlar vereceği unutulmamalıdır.

PV panel açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) direkt olarak fotovoltaiik panelin çıkış uçlarından ölçülmüştür. Tekli panel ve çoklu PV panel kombinasyonlarını karakterize etmek için gerekli direnç aralığı, farklılık gösterdiğinden gerekli yük değerini sağlamak için birden çok sürgülü reosta kullanılmıştır. Örneğin; sistemde bulunan 4 adet SX60U tipi PV panelin birbirine seri bağlandığı, bağlantı kombinasyonunda direnç değerleri, sürgülü reostanın 10Ω 'luk ölçüm aralığından daha büyük olduğu için, birden çok sürgülü reosta birbirine seri bağlanarak, bu sorun çözülmüştür.

Ölçümlerde toplam 4 adet fotovoltaiik panel kullanıldığından optimal direnci aranan PV panel konfigürasyonları şu şekilde sıralanmaktadır.

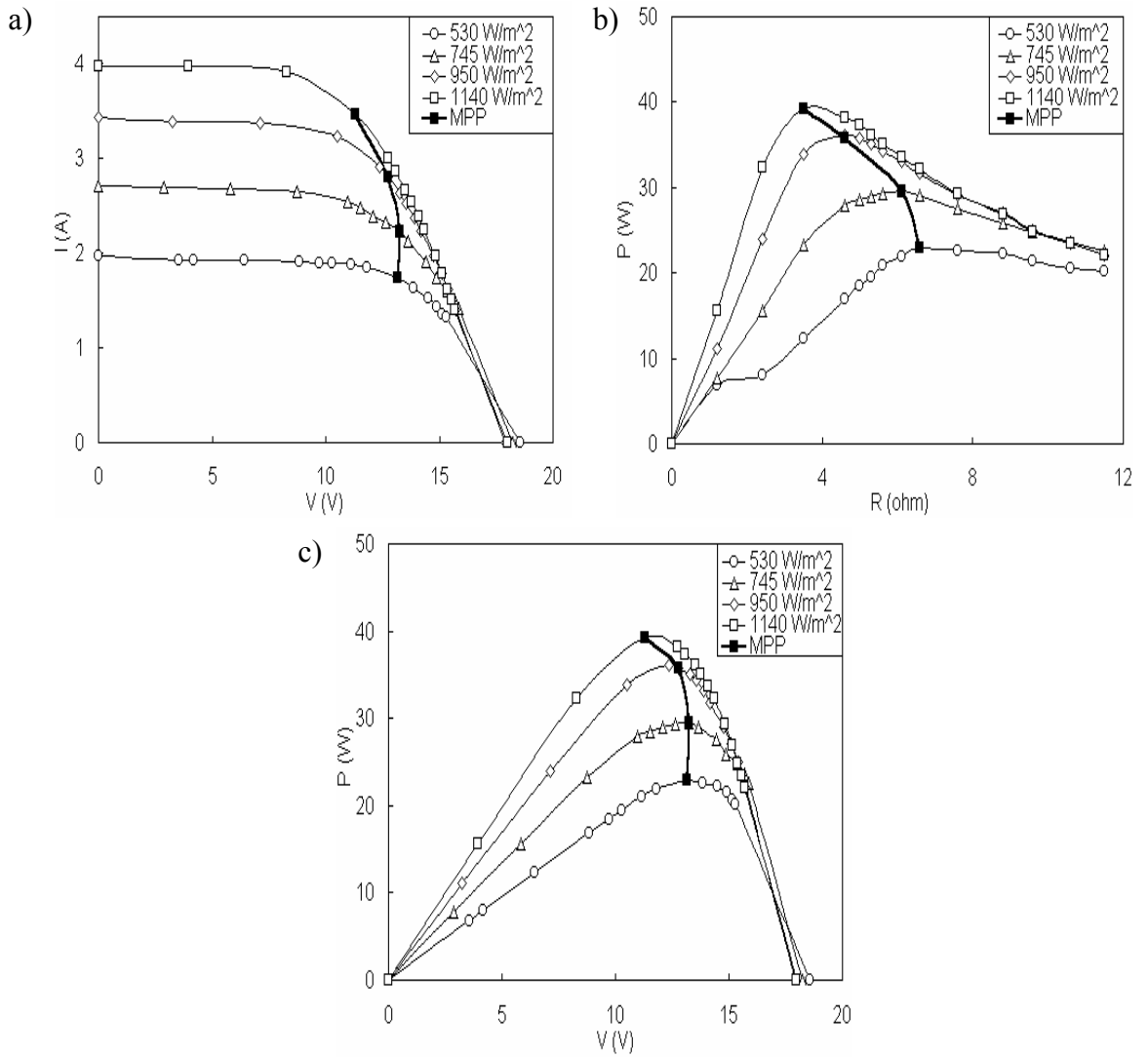
1. Tekli PV panel
2. 4 seri * 1 paralel konfigürasyonu
3. 2 seri * 2 paralel konfigürasyonu
4. 1 seri * 4 paralel konfigürasyonu

Fotovoltaiik panellerin bu 4 farklı kombinasyon için sabit ışınım şiddetindeki akım-gerilim ilişkilerini tespit etmek amacıyla, öncelikle panellerin yüksüz halde iken akım (I_{sc}) ve gerilim (V_{oc}) değerleri ölçülmüş ve ışınım şiddetinin sabit kabul edilebileceği kadar kısa bir süre içerisinde sürgülü reosta aracılığıyla farklı yükler uygulanarak, her bir yük değerindeki akım ve voltaj değerleri kaydedilmiştir.

Işınım şiddetinin yanında, sistem güç çıktısı üzerinde en büyük etkilerden birisine sahip olan sıcaklık değeri ise, panelin arka yüzeyine yapıştırılan K tipi ısı çifti ile tespit edilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı ışınım şiddetlerindeki sıcaklık değerleri $45^{\circ}C - 56^{\circ}C$ arasında değişim göstermektedir. Akım-gerilim karakteristik eğrileri çizilen ışınım şiddetleri içerisinde, düşük ışınım şiddetlerinde dahi sıcaklık değeri

oldukça yüksektir. Sabah saatlerinde ışımın çok hızlı bir şekilde artmasından dolayı, bu vakitlerde çizilen akım-gerilim eğrilerinde büyük miktarlarda sapmalar görülmektedir. Bu nedenle ışımın değişiminin nispeten daha yavaş olduğu öğleden sonraki vakitlerde düşük ışım seviyeleri için akım-gerilim eğrileri çizilmiştir.

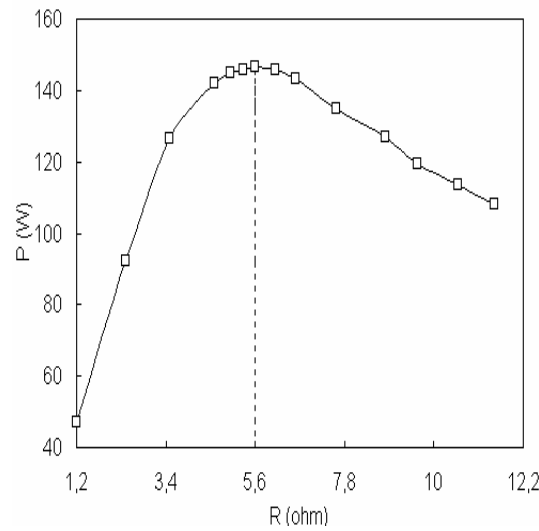
Tek PV panel kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler günün değişik saatlerinde olmak üzere 4 farklı ışım şiddeti değeri için 14 farklı yükte tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.1a, b ve c'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. a) 1 PV panele ait akım-gerilim (I-V) eğrisi, b) farklı ışım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri, c) farklı ışım şiddetlerinde elde edilen güç değerleri ve maksimum güç noktaları

Şekil 4.1’de her bir ışınım şiddeti için ulaşılan maksimum güce ait noktaların oluşturduğu eğri deneysel olarak tespit edilen MPP eğrisidir. Bu eğri beklenildiği üzere sabit bir direnç değerini temsil etmemektedir. Şekil 4.1b’de 530 W/m^2 değerinde görülen eğrilik ışınım şiddetinin değişiminden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.2’de gösterilen ve göz önüne alınan dört farklı ışınım şiddetinde farklı dirençler kullanılarak elde edilen toplam güç değerleri üzerinde yapılan analiz sonucu, söz konusu panel ve ölçülen meteorolojik koşullar için optimal yük direnci $R_{opt}=5,6 \Omega$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. Sistemin, dört farklı ışınım şiddetinde farklı dirençler kullanılarak elde edilen toplam güç değerleri (kesik çizgili düşey hat optimal direnci belirtmek için kullanılmıştır).

4.2. Çoklu PV Panel Konfigürasyonlarının Karakterizasyonu

Çoklu PV panel konfigürasyonlarında uygulanan yöntem, tekli PV panel için yapılan karakterizasyon metodu ile aynıdır. PV panel açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) direkt olarak fotovoltaiik panelin çıkış uçlarından ölçülmüştür. Tekli panel ve farklı çoklu PV panel kombinasyonlarını karakterize etmek için gerekli direnç aralığı, farklılık gösterdiğinden gerekli yük değerini sağlamak için bazı konfigürasyonlarda birden çok sayıda sürgülü reosta kullanılmıştır. Örneğin; sistemde bulunan 4 adet SX60U tipi PV panelin birbirine seri bağlandığı, bağlantı kombinasyonunda direnç değerleri, sürgülü reostanın 10Ω 'luk ölçüm aralığından daha büyük olduğu için birden çok sayıda sürgülü reosta birbirine seri bağlanarak bu sorun çözülmüştür.

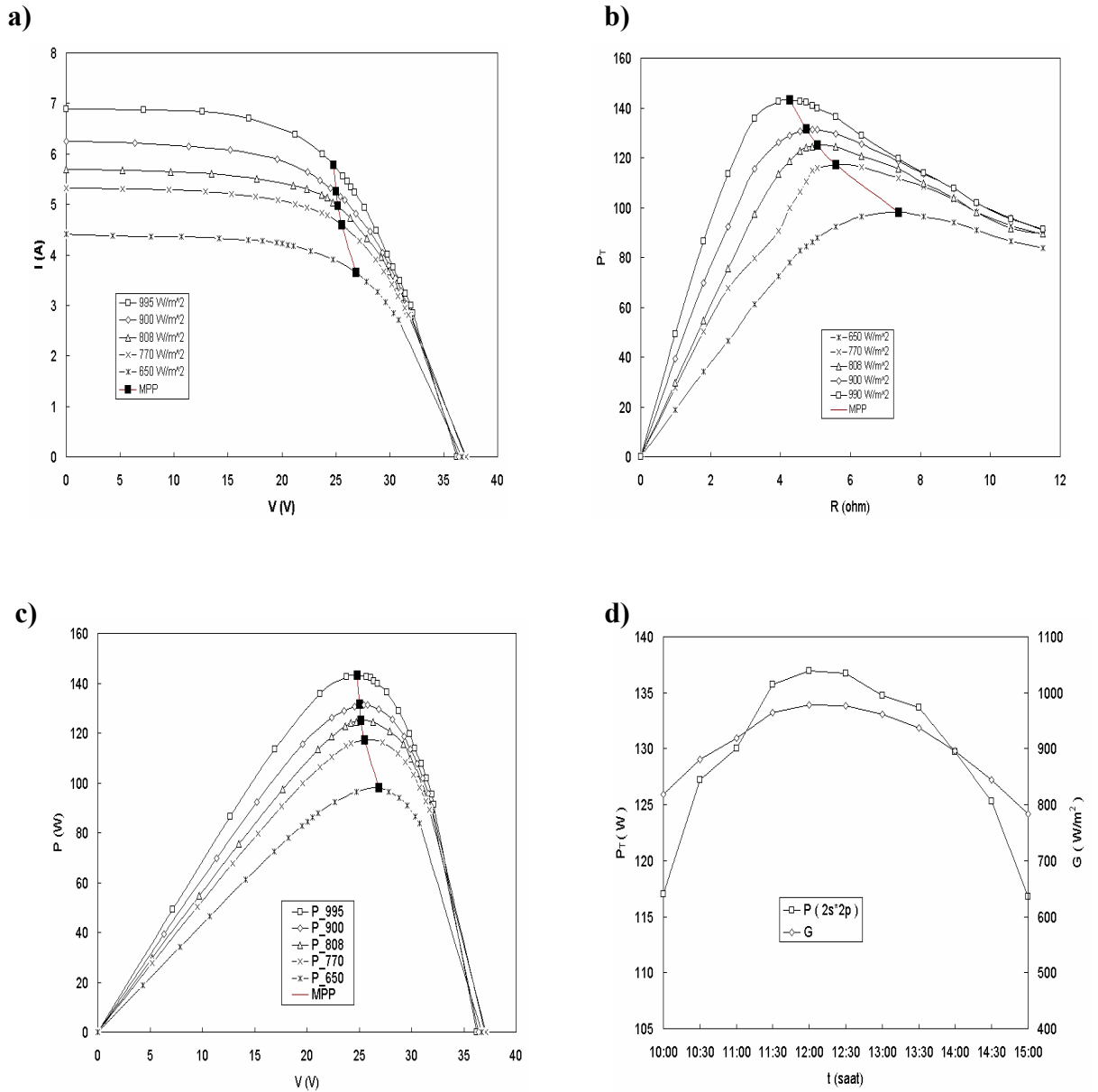
4.2.1. (2s*2p) PV panel konfigürasyonunun karakterizasyonu

(2s*2p) panel konfigürasyonu için yukarıda özetlenen çalışmalar neticesinde gerçekleştirilen karakterizasyon işleminin sonucunda, ölçümlerin yapıldığı Şanlıurfa ili şartlarında fotovoltaik panel katalog referans değeri olan 1000 W/m^2 ışınım şiddeti değerine en yakın olan 990 W/m^2 ışınım şiddetinde maksimum gücü veren direnç değerinin ≈ 4.72 ohm ve tüm ışınım şiddetlerinde en fazla gücü (tüm ışınımlardaki güçlerin toplamı) veren optimum direnç değerinin de $5,6$ ohm olduğu tespit edilmiştir.

Panel tarafından gerçek şartlarda üretilen gücün, panel katalog güç değeri olarak verilen $P_{nom}=60 \text{ W}$ 'a oranı olarak tanımlanan boyutsuz güç katsayısı, optimum direnç şartlarında 2s*2p konfigürasyonu için 0.60 değerini almaktadır.

Tekli ve diğer çoklu panel konfigürasyonlarında da olduğu gibi mevcut ölçüm sistemindeki ara bağlantı kablolarında meydana gelen bağlantı kaybı daha önce de açıklandığı gibi denklem 3.1 ile hesaplanabilmektedir.

Akım-gerilim eğrilerindeki akım değerleri incelendiğinde, ortaya çıkan bağlantı kaybının büyüklüğü daha iyi anlaşılacaktır. (2s*2p) kombinasyonu için yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar Şekil 4.3a, b ve c'de verilmiştir. Ayrıca PV panel katalog değerleri kullanılarak tespit edilmiş $R=4,72$ ohm değeri için bir gün boyunca ölçümler yapılmış ve gün boyunca ışınım şiddeti ve güç değerlerindeki değişimler Şekil 4.3d'de verilmiştir.

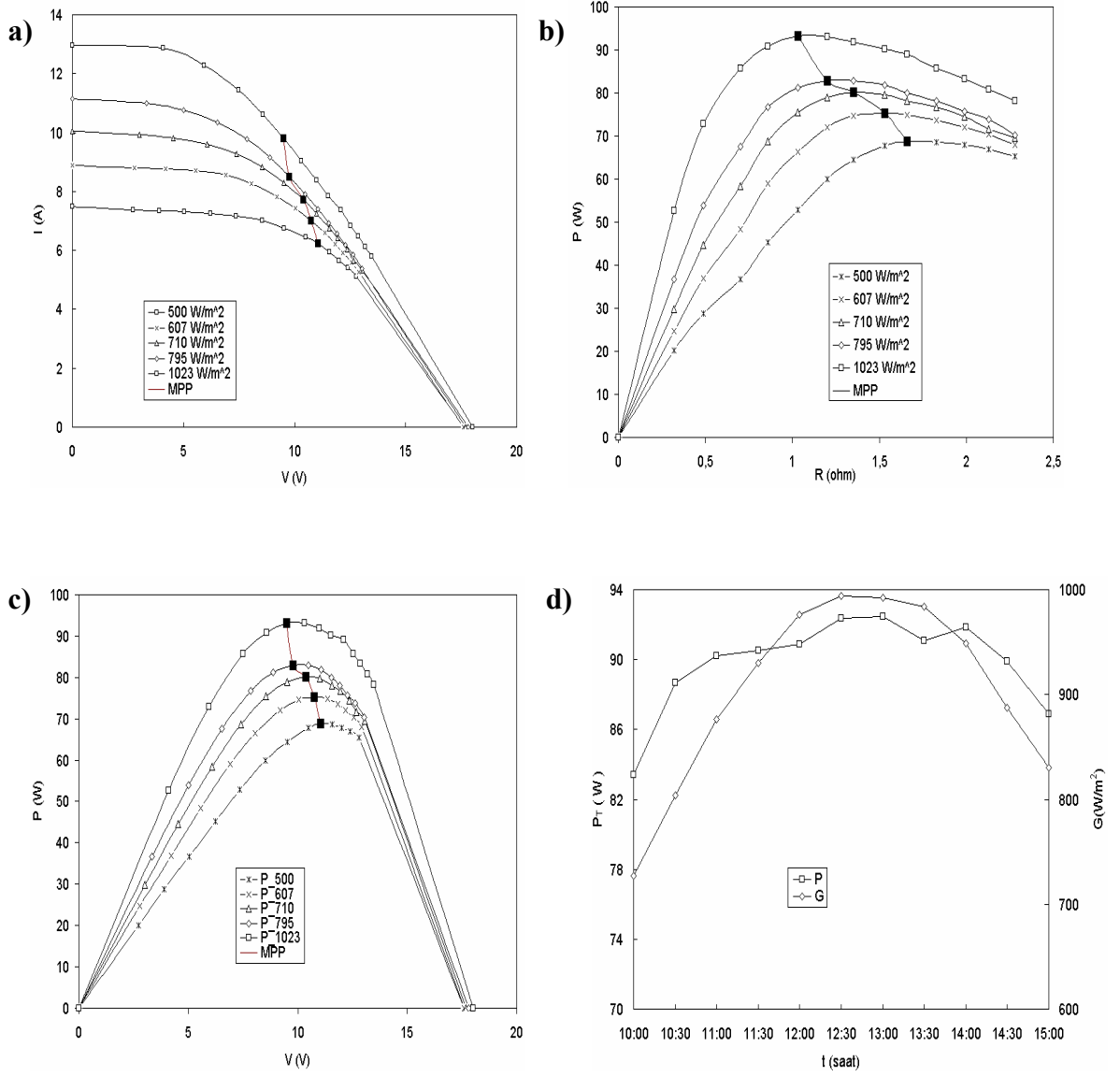


Şekil 4.3. a) (2s*2p) panel konfigürasyonu I-V eğrisi, b) farklı ışınım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri, c) farklı ışınım şiddetlerinde elde edilen güç değerleri ve maksimum güç noktaları, d) R=4,72 ohm ile elde edilen güç değerinin zamanla değişimi

4.2.2. (1s*4p) PV panel konfigürasyonunun karakterizasyonu

Aynı ölçüm metodu ve ölçüm sistemi kullanılarak (1s*4p) panel konfigürasyonu için de ölçümler gerçekleştirilmiş ve maksimum gücün elde edildiği optimum direncin ≈ 1.1 ohm olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4a, b ve c'de verilmiştir. Ayrıca R=1,2 ohm değeri için ışınım şiddeti-güç

parametrelerinde tarihinde gün boyunca meydana gelen değişim Şekil 4.4d'de verilmiştir.



Şekil 4.4. a) (1s*4p) panel konfigürasyonu I-V eğrisi, b) farklı ışınım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri, c) farklı ışınım şiddetlerinde elde edilen güç değerleri ve maksimum güç noktaları, d) (1s*4p) için R=1,2 ohm değeri ile elde edilen güç değerinin zamanla değişimi

4 panelin birbirine paralel bağlandığı panel kombinasyonunda, optimum direnç değeri çok küçüktür. Bu nedenle sürgülü reostadaki bir adımlık fark, güç çıktılarında çok büyük değişimlere sebebiyet vermektedir. Ayrıca optimum direnç değerleri araştırılan panel kombinasyonları içerisinde en az gücün elde edildiği panel kombinasyonunun (1s*4p) panel kombinasyonu olduğu tespit edilmiştir. Panel

tarafından gerçek şartlarda üretilen gücün, panel katalog güç değeri olarak verilen $P_{nom}=60$ W'a oranı olarak tanımlanan boyutsuz güç katsayısı, optimum direnç şartlarında (1s*4p) konfigürasyonu için 0.39 değerini almaktadır. Daha önce de vurgulandığı gibi özellikle yüksek akım değerlerinin elde edildiği bağlantı konfigürasyonlarda, ölçüm düzeneğine ait ara kablolarında ortaya çıkan bağlantı kaybı değerleri de akımın karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Bu şekilde düşük oranda güç üretilmesine neden olan bir diğer faktör de 50 °C ve üzerinde görülen çalışma sıcaklıklarından kaynaklanan kayıplardır.

4.2.3. (4s*1p) PV panel konfigürasyonunun karakterizasyonu

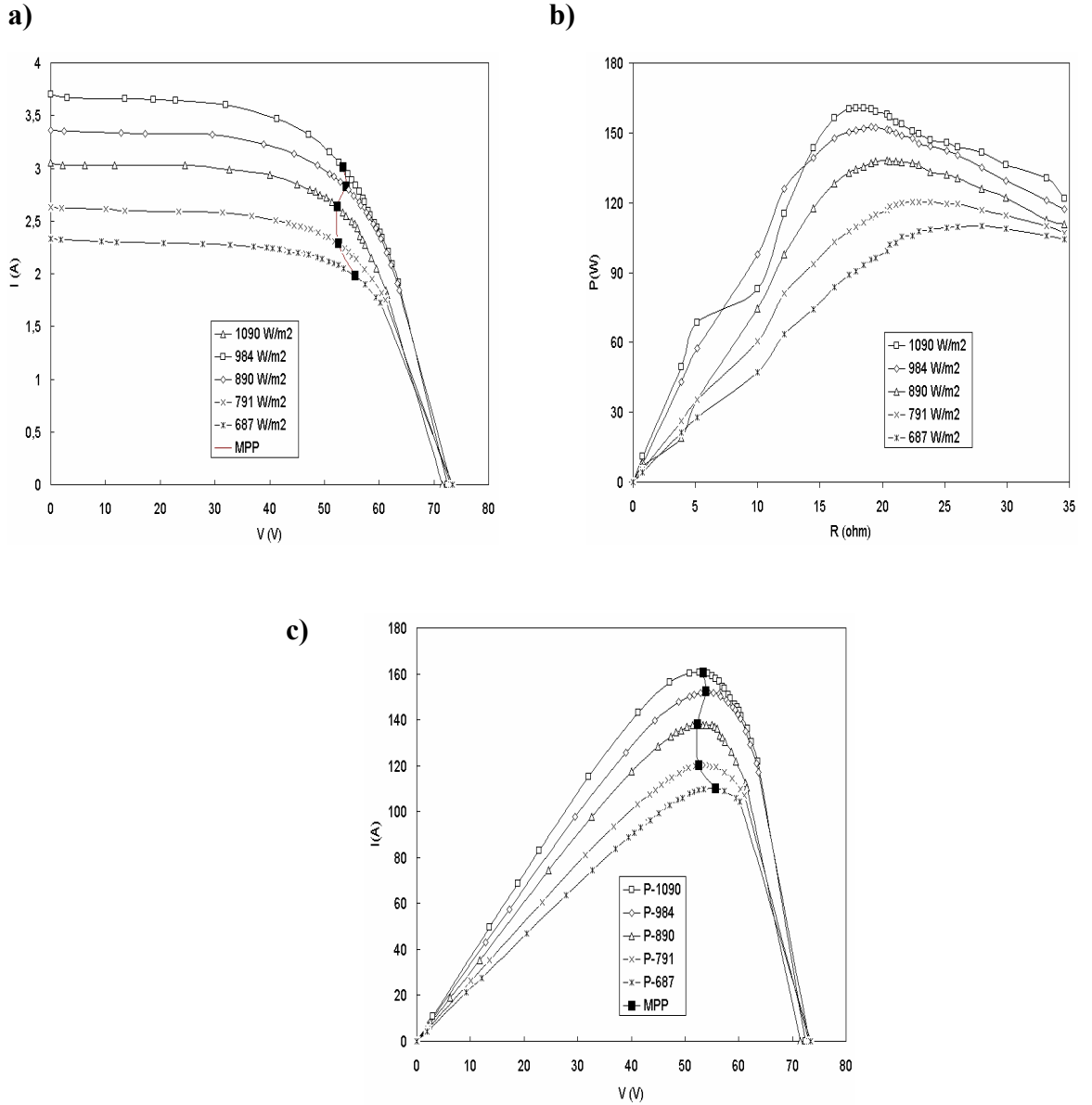
4 panelin seri bağlandığı kombinasyonda optimum direnç değeri çok büyük olduğundan, reostadaki kademeler arasındaki yük geçişinde çok büyük güç çıktısı farkları görülmemektedir. Ayrıca sürgülü reostalar birbirine seri bağlandığından ölçüm yapılabilecek direnç değeri sayısı da oldukça fazladır. Ölçümlerin yapıldığı gün içerisinde PV panel karakteristik eğrilerinin çizildiği 5 farklı ışınım şiddetinde elde edilen toplam güç çıktıları karşılaştırıldığında en fazla gücü veren direnç değerinin 20.50 ± 0.50 ohm olduğu tespit edilmiştir. Farklı panel konfigürasyonları karşılaştırıldığında paneller tarafından en fazla gücün elde edildiği konfigürasyonun (4s*1p) konfigürasyonu olduğu tespit edilmiştir. Panel tarafından gerçek şartlarda üretilen gücün, panel katalog güç değeri olarak verilen $P_{nom}=60$ W'a oranı olarak tanımlanan boyutsuz güç katsayısı, optimum direnç şartlarında (4s*1p) konfigürasyonu için 0.67 değerini almaktadır.

(1s*4p), (2s*2p) ve (4s*1p) bağlantı konfigürasyonları için karakterizasyon işlemi aynı gün içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle ölçümlerin yapıldığı gün içerisinde panellerin yüzey sıcaklığı 45 °C ile 53 °C arasında değişmektedir. Bu panel yüzey sıcaklığı değerleri, kış günlerinde dahi görülebilmekte olup, kuru ve sıcak bir iklim yapısına sahip Şanlıurfa ilinde özellikle yaz aylarında 65 °C'ye varan çalışma sıcaklıkları rahatlıkla görülebilmektedir.

Karakterizasyon işleminde karşılaşılan en büyük sıkıntı, havanın berrak ve bulutsuz olduğu bir günde işlemin yapılması gerekliliğidir. Bulutlu günlerde yapılacak karakterizasyonlar, ışınımın çok küçük zaman dilimlerinde dahi

değişebileceği göz önünde bulundurulduğunda, elde edilecek sonuçların doğruluktan uzak olacağı aşikardır. Bahar-Yaz günlerinde gerçekleştirilen ölçümlerde de görülen sıkıntı yüksek panel sıcaklığı değerleridir.

Yine aynı ölçüm metodu ve sistemi kullanılarak, (4s*1p) panel konfigürasyonu için elde edilen sonuçlar Şekil 4.5a, b ve c'de verilmiştir.



Şekil 4.5. a) (4s*1p) panel konfigürasyonu I-V eğrisi, b) farklı ışınım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri, c) farklı ışınım şiddetlerinde elde edilen güç değerleri ve maksimum güç noktaları

4.3. Fotovoltaik Panellerde Eğim Açısı Etkisinin Deneysel Olarak Saptanması

Bu deneysel çalışmada, fotovoltaik (PV) sistemlerin güç karakteristikleri üzerinde eğim açısının etkisi araştırılmıştır. Temel amaç, eğim açısı ayarlanabilir bir düzenek ile PV panel güç çıktısını arttırmaktır. Bu amaçla, eğim açısı ayarlanabilir bir düzenek dizayn edilmiş ve yıllık sabit eğim açısıyla yerleştirilmiş bir PV panel ile, aylık optimum eğim açısında yerleştirilmiş bir panelin güç karakteristikleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar, basit ve ekonomik bir düzenekle, ayda sadece bir kez eğim açısı ayarlanarak, daha yüksek güç çıktılarına ulaşılabileceğini göstermektedir.

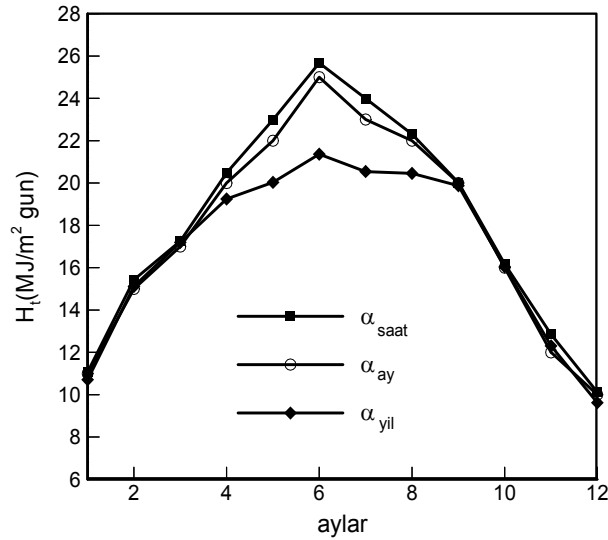
Fotovoltaik (PV) paneller, üretim maliyetlerinde son yıllarda sağlanan iyileştirmelere karşın, bir PV sistemi kullanıcısı için hala yeterince ucuz bir seçenek değildir. Bu nedenle, bir PV sisteminin tasarımı aşamasında istenilen amaca en az sayıda panel ile ulaşmak temel hedef olup, üretilen gücün artmasına yönelik her türlü termo-ekonomik çözümün değerlendirilmesi gereklidir (Fıratoglu ve Yeşilata, 2004; Kou ve ark., 1998). PV panellerde üretilen güç; ışınım şiddeti, çevre sıcaklığı, panele bağlı yükün elektriksel karakteristikleri, panel bağlantı (seri, paralel) konfigürasyonu gibi bir çok parametrenin fonksiyonu olup, panelin maksimum seviyede ışınım toplaması öncelikli hedeflerden biridir. Ancak, uygulamada PV panel sistemlerinin, yıl ya da sezon boyu sabit eğim açısı ile yerleştirilmelerinden dolayı, üretilen güçte önemli seviyede kayıplar oluşmaktadır (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003).

PV panel üzerine gelen güneş ışınımının maksimum olabilmesi için panel düzleminin ışınlara dik bir şekilde güneşi takip etmesi gerekir. Ancak, pratik uygulamalarda güneşi takip eden sistemlerin ilk yatırım maliyeti yüksek ve kullanımı zor olduğundan (Yeşilata ve ark., 1992), sabit eğim açılı yerleştirme uygulaması daha yaygındır.

Güneş ışınımının dünyanın yatay yüzeyine geliş açısı, gün ve yıl boyunca; deklinasyon açısına, bölgenin enlem derecesine ve güneş batış açısına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, uzun dönem ortalaması alınarak belirlenen sabit eğim açısının, sezonluk ya da yıllık kullanımında, elde edilebilir ışınım potansiyeli ile, kullanılabilir ışınım potansiyeli arasında sistem aleyhine olmak üzere, önemli farklar

oluşabilmektedir (Duffie ve Beckman, 1991). Birçok güneş enerjisi uygulaması için yıllık bazda eğim açısı optimizasyonu yeterli olabilmesine karşın, PV sistemlerde elektrik enerjisi çıktısını arttırabilmek için aylık bazda eğim açısı optimizasyonuna gereksinim söz konusudur.

Daha önceki çalışmalarda (Fıratoğlu veYeşilata, 2001; Fıratoğlu veYeşilata, 2003; Fıratoğlu ve Yeşilata 2004) bu konu teorik olarak araştırılmış olup, kıyaslama amacıyla; eğim açısı saatlik, aylık ve yıllık optimum değerlerde ayarlanabilir üç farklı yerleştirme pozisyonu seçilerek, panel yüzeyine gelen günlük toplam ışınım değerleri araştırılmıştır. Şanlıurfa ili uzun dönem meteorolojik koşulları göz önüne alınarak yapılan analizden elde edilen optimum eğim açısına göre panel yüzeyine gelen ışınım şiddeti miktarları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Saatlik-ortalama, aylık-ortalama ve yıllık-ortalama değerler doğrultusunda hesaplanan optimum eğim açılı (α_{saat} , α_{ay} ve α_{yil}) yüzeyler üzerine gelen günlük toplam ışınım miktarının aylara göre değişimi

Şekil 4.6'da gösterilen, saatlik eğim açısına göre güneş ışınımını almak için otomatik bir güneş takip mekanizması gerekmektedir. Eğim açısı aylık değiştirilebilir sistem, basit mekanik bir düzenek ile sistem eğim açısının, ayda sadece bir kez hesaplamalarla belirlenen optimum aylık ortalama eğim açısında ayarlanmasını öngörmektedir. Diğer sistem için ise, eğim açısı yıl boyunca, yıllık optimum eğim açısı olarak kabul edilen yöre enlem açısında sabit tutulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, PV panel eğim açısının ayda bir kez değiştirilmesinin termoekonomik açıdan en uygun çözüm olduğunu göstermektedir (Fıratoğlu ve Yeşilata, 2004).

Bu çalışmada benzer kıyaslama, deneysel yöntemle yapılmaktadır. Deneyleerin yapılabilmesi için öncelikle, panelin belirlenen açıda yerleştirilmesini temin eden, kullanımı basit, düşük maliyetli bir sehpa dizayn edilmiştir. Ölçümler; farklı eğim açılarında yerleştirilen, aynı teknik özelliklere sahip iki PV panel için, 2004-2005 yılları içerisinde ve aynı günde gerçekleştirilmiştir.

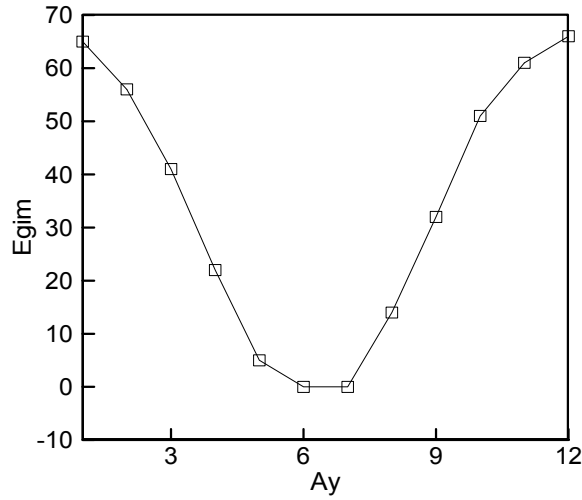
Türkiye genelinde güneş uygulamalarında panellerin eğim açılarının tespit edilmesinde ($\alpha_{yillik} = \text{Bölge enlemi} \times 0.9$) denklemleri önerilmektedir. Bu doğrultuda mevcut çalışmada; panellerden biri optimum aylık ortalama eğim açısı (α_{ay}) referans alınarak, diğeri ise optimum yıllık ortalama eğim açısı (α_{yillik}) referans alınarak yerleştirilmiş ve elde edilen panel güçleri kıyaslanmıştır.

Optimum açılarının saptanabilmesinin ilk koşulu eğimli yüzeylere gelen ışınımın hesaplanabilmesidir. Literatürdeki meteorolojik ölçüm verisi olan yatay yüzeye gelen ışınım verilerinden yararlanarak eğimli yüzeyler için geliştirilmiş birçok model bulunmaktadır (Duffie ve Beckman, 1991).

Literatürde mevcut ışınım şiddeti ile ilgili modeller yardımıyla, Fıratoğlu ve Yeşilata (Fıratoğlu ve Yeşilata, 2004) tarafından Şanlıurfa iline ait 16 yıllık (1985-2001) uzun dönem verileri kullanılarak; bulanıklık indisi, yayılı ve direkt ışınım şiddetleri hesaplanmıştır. Söz konusu çalışmada, kapsamlı meteorolojik veriye sahip olmanın avantajı kullanılarak, güneşe dönük yerleştirilmiş paneller için optimum aylık ortalama eğim açıları istatistiksel bir yöntemle hassas olarak belirlenmiştir.

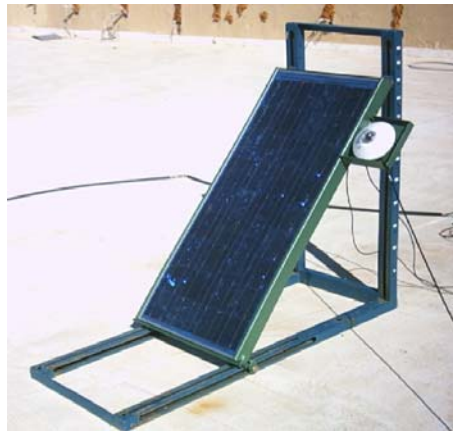
Lineer tarama yöntemi olarak isimlendirilen bu yaklaşımda; 0-90° eğim açıları arasında, 1°'lik artırımlarla panel yüzeyine ulaşan günlük toplam ışınım şiddetleri belirlenmiş ve yılın her bir ayı için bu değerler arasından maksimum ışınım toplayan eğim açıları tespit edilmiştir.

Kapsamlı bir algoritma kullanılarak elde edilen optimum aylık ortalama eğim açıları değerleri Şekil 4.7'de görülmektedir (Fıratoğlu ve Yeşilata, 2004).



Şekil 4.7. Şanlıurfa ili için uzun dönem verileri kullanılarak tespit edilen yüzey eğim açısının aylara göre değişimi

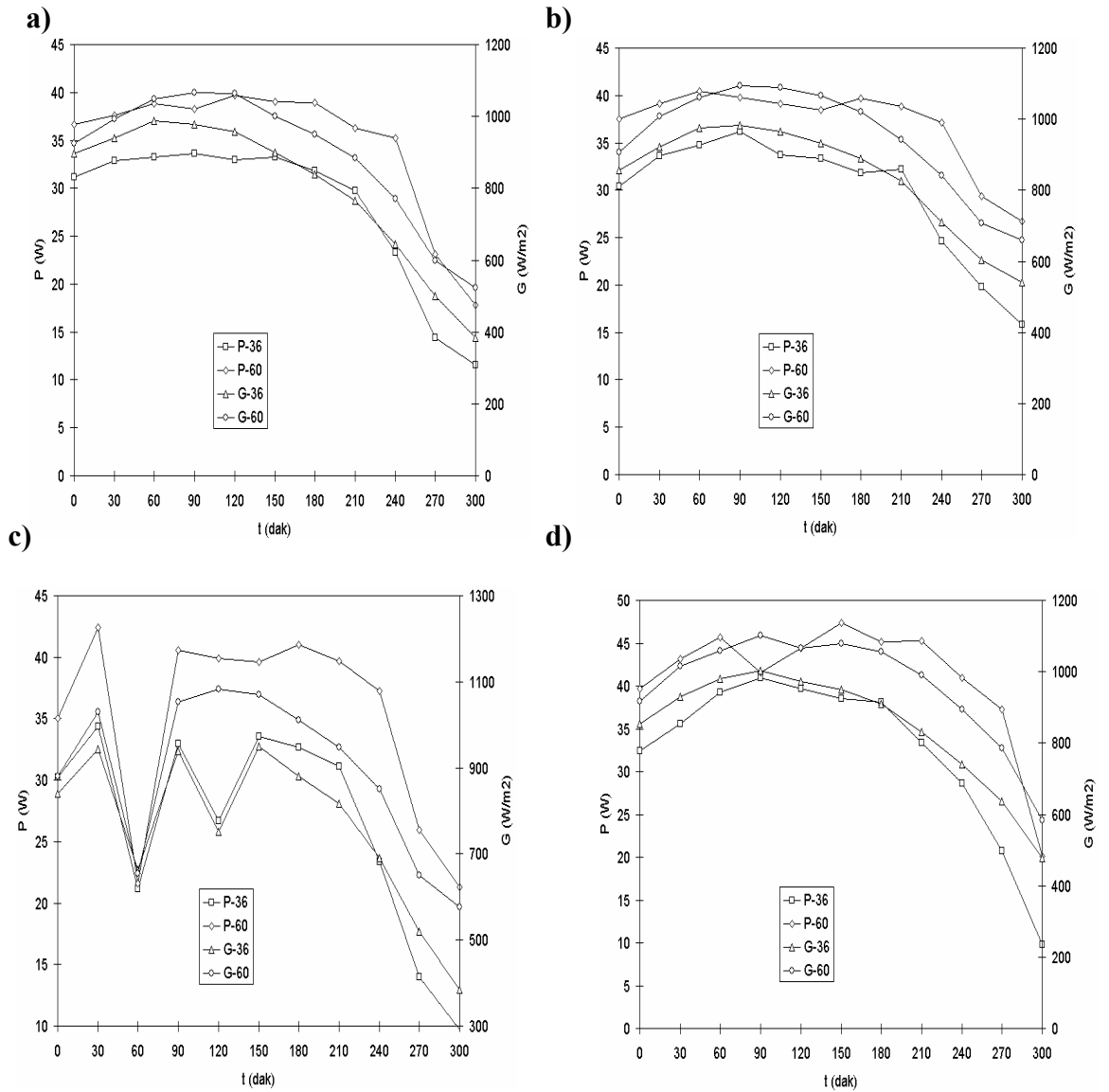
Bu deneysel çalışmada, eğim açısının panel tarafından üretilen güç üzerindeki etkisini araştırmak için, öncelikle panelin belirlenen açıda yerleştirilmesini temin eden, kullanımı basit, düşük maliyetli bir sehpa dizayn edilmiştir. Sehpa panel eğiminin 0-60° arasında 3°'er derece aralıklarla ayarlanabileceği hareketli bir çerçeveye ve panelle aynı açıda yerleştirilmesi gereken ışınım-ölçerin (piranometre) monte edilebileceği düzlemsel bir yüzeye sahiptir. Ölçümler, 2004-2005 yılları içerisinde farklı ay ve günlerde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler gün içerisinde genellikle saat 09:00 – 15:30 saatleri arasında ve 30'ar dakika aralıklarla alınmıştır. İki panele ait tek bir ölçü-kayıt sistemi kullanımı nedeniyle, iki panelin sıralı ölçümü, 1 dakikadan daha az bir zaman farkı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan eğim açısı ayarlanabilir PV sistem sehpası Şekil 4.8'de görülmektedir.



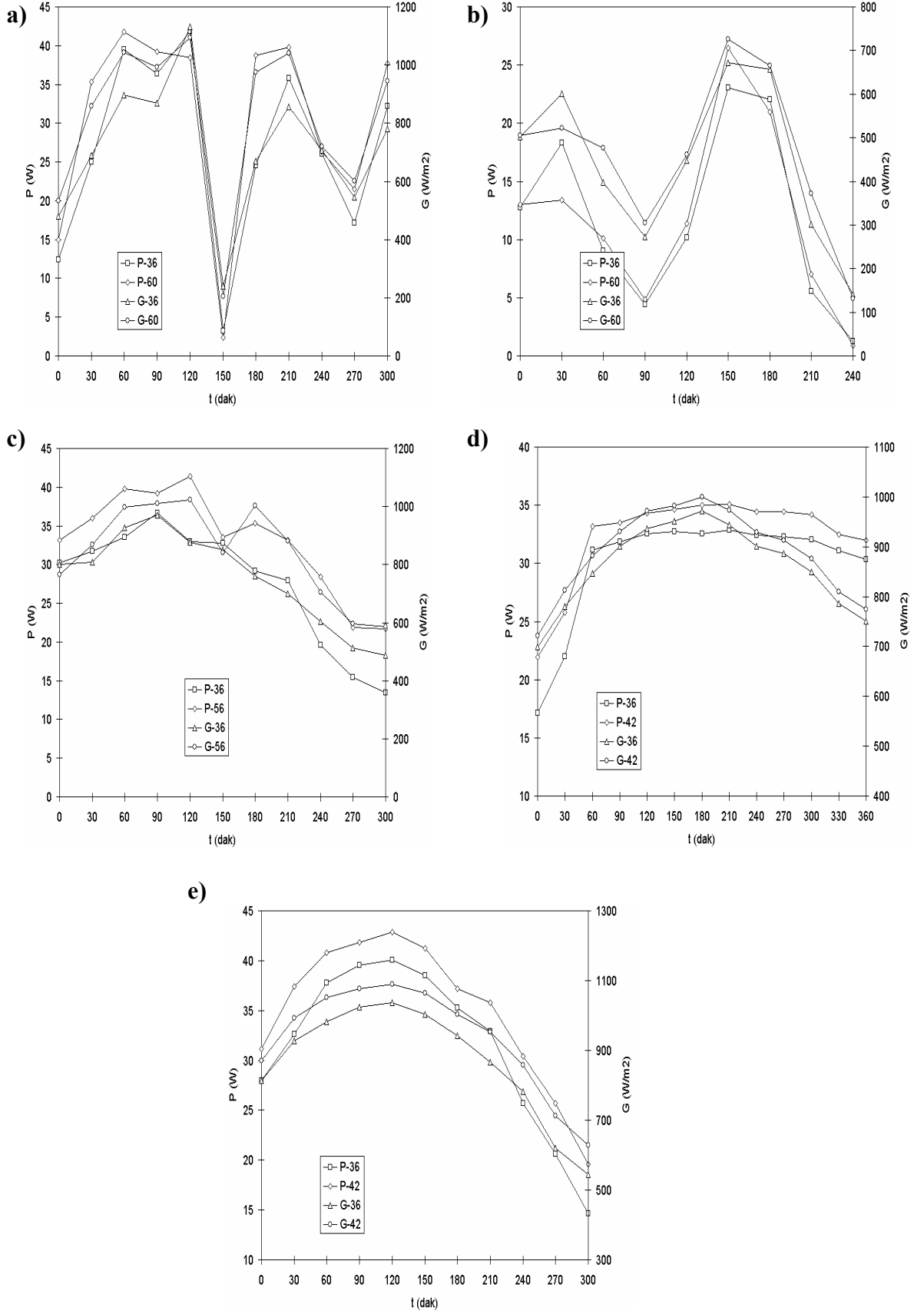
Şekil 4.8. Eğimi ayarlanabilen PV panel sehpası

Gerçekleştirilen tüm ölçümlerde PV panel tarafından üretilen güçte tahrik edilen cihazı temsil eden sürgülü reostadaki direnç değeri panelin standart test koşullarında maksimum güç ürettiği noktasal direnç değeri olan, $R = 4,72 \Omega$ değeri kullanılmıştır (Aydın ve Yeşilata, 2005).

2004 yılı içerisinde Kasım ve Aralık aylarında, 2005 yılında ise Ocak, Şubat ve Mart aylarında PV panellerde eğim açısı etkisinin deneysel tespitine yönelik yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'de yer almaktadır. Herhangi bir eğim açısında elde edilen güç ve ışınım şiddeti değerleri $P-\alpha$, $G-\alpha$ şeklinde ifade edilmiştir.



Şekil 4.9. a, b) Kasım 2004'te gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları, c, d) Aralık 2004'te gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları



Şekil 4.10. a, b) Ocak, c) Şubat ve d, e) Mart 2005 aylarında yapılan ölçümlerin sonuçları

Ölçüm yapılan tüm aylarda paralel sonuçlar görülmekle beraber, özellikle güneş ışınımına daha çok ihtiyaç duyulan kış aylarındaki sonuçlar incelendiğinde; aylık optimum eğim açısında yerleştirilen panelin yüzeyine gelen ışınım şiddetinin daha fazla olduğu ve bunun sonucunda panelden daha fazla güç elde edildiği Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'dan görülmektedir. Aylık optimum ve yıllık sabit eğim açısı karşılaştırmasının yapıldığı günlerin tamamında optimum eğim açısı ile yerleştirilen panelin daha fazla güç ürettiği görülmüştür. Karşılaştırmanın yapıldığı tüm aylar dikkate alındığında ölçüm alınan günlere göre değişmekle birlikte, optimum eğim açısında yerleştirilen panelin yüzeyine gelen ışınımın yıllık sabit eğim açısında yerleştirilen panele göre % 7-13, üretilen gücün ise % 4-10 daha fazla olduğu görülmektedir.

Elde edilen bu fark aylık olarak panel eğim açısının ayarlanmasının önemini ortaya koyması açısından oldukça önem taşımaktadır. Fotovoltaik sistemlerin ilk yatırım maliyetleri göz önüne alındığında optimum sistem tasarımı açısından düşünüldüğünde bu farkın önemi daha iyi anlaşılacaktır. Bu farkın oldukça ekonomik ve pratik bir düzenerle gerçekleştirilmesi ise olayı daha ilginç kılmaktadır.

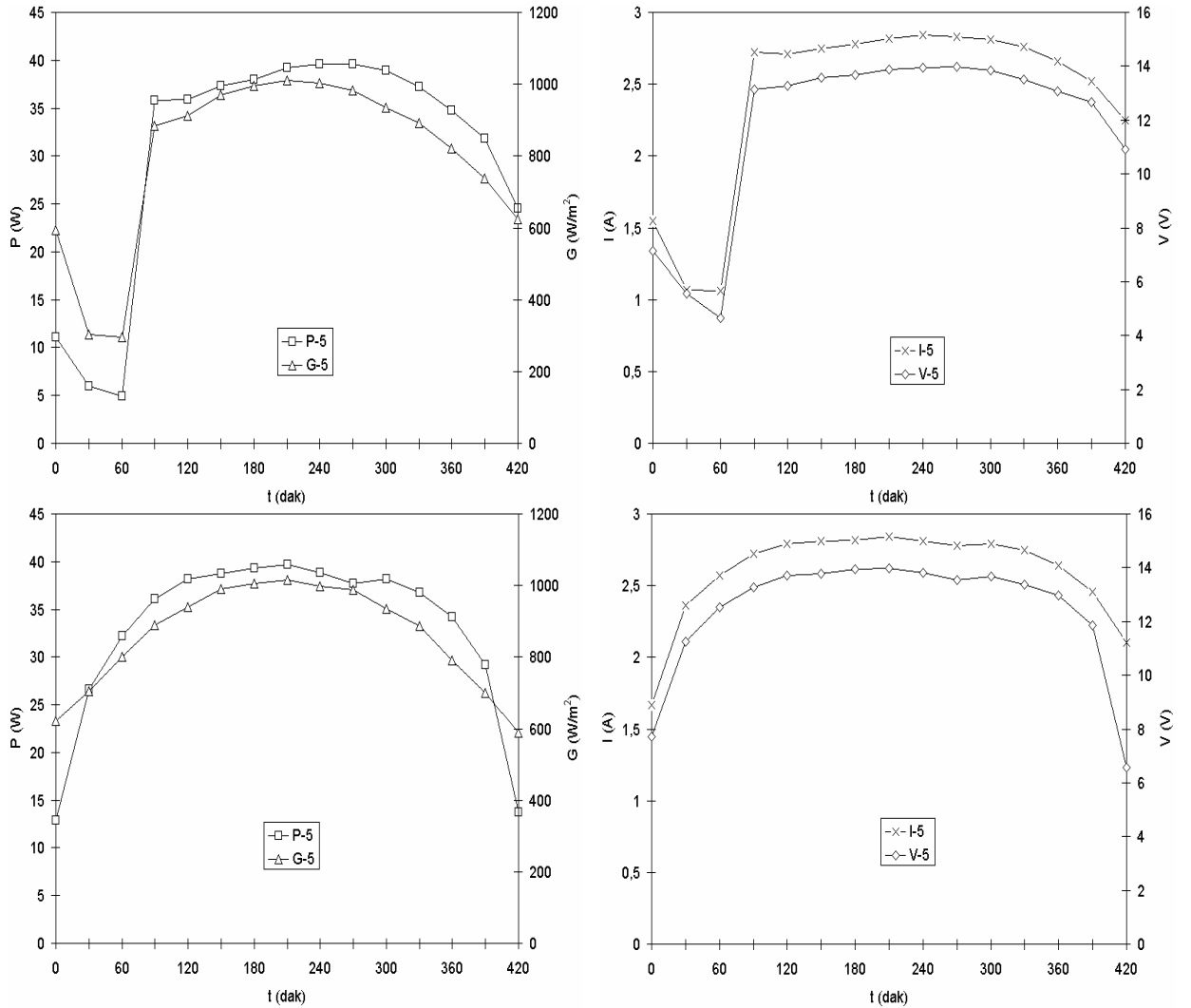
4.4. Oniki Aylık Ölçümlerde Güç Parametrelerinde Görülen Değişimler

Şanlıurfa ilinde Mayıs 2004–Nisan 2005 tarihleri arasında gerçekleştirilen ölçümlerde, ışınım şiddeti–güç ve akım–gerilim parametrelerinde gün boyunca görülen değişimler aşağıdaki şekillerde verilmektedir. Her bir ay için Çizelge 4.1’de yer alan 2 farklı günün dataları yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Farklı aylarda ölçüm yapılan günler

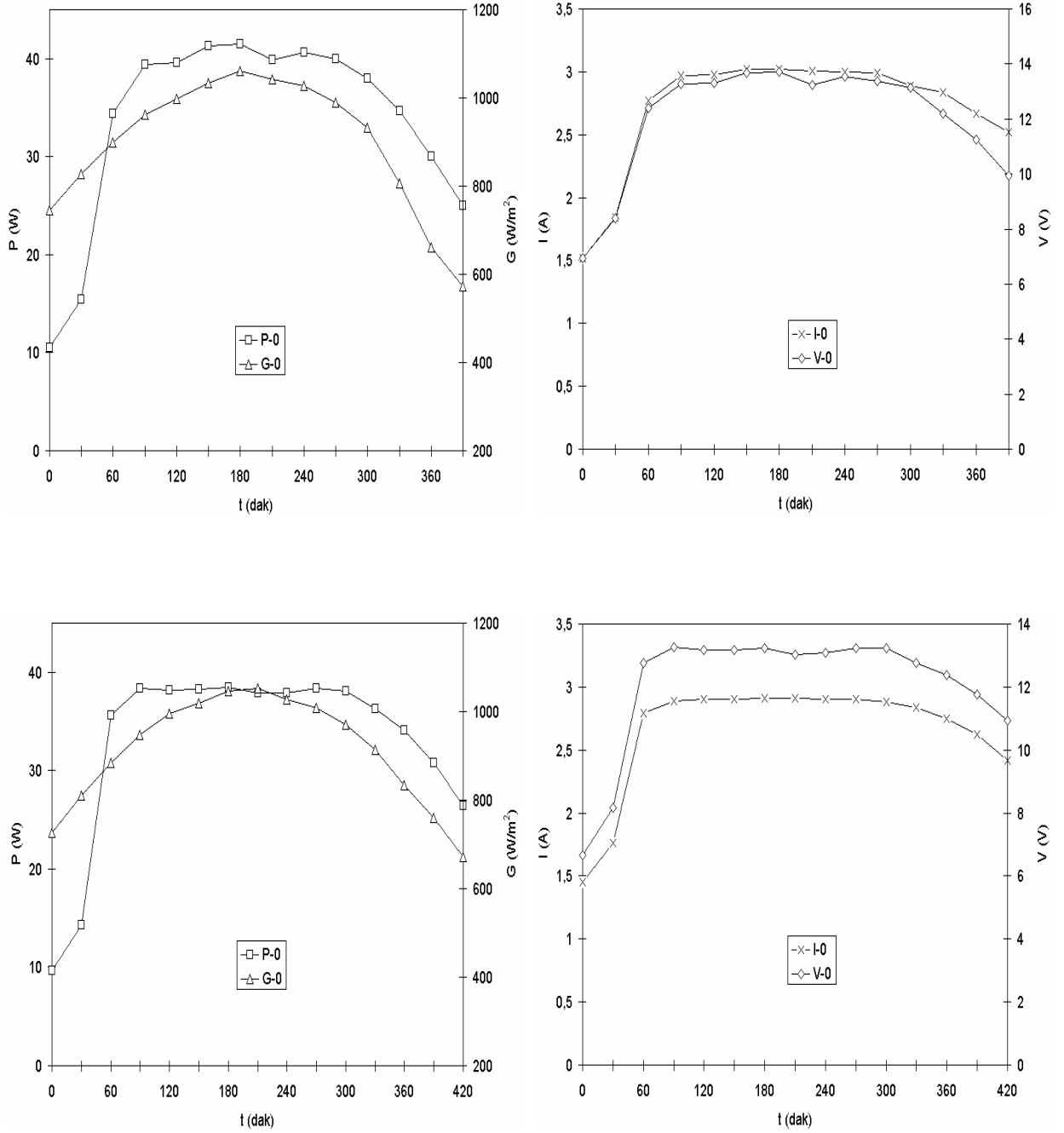
Yıl	2004								2005			
Ay	Mayıs	Haz.	Temmuz	Ağus.	Eylül	Ekim	Kasım	Ara.	Ocak	Şubat	Mart	Nisan
Gün	28/31	29/30	27/29	25/26	02	04/06	23/29	17/27	26/28	04/05	05/08	02/07

Şekil 4.11’de 2004 yılı Mayıs ayına ait ölçümlerin sonuçları yer almaktadır.



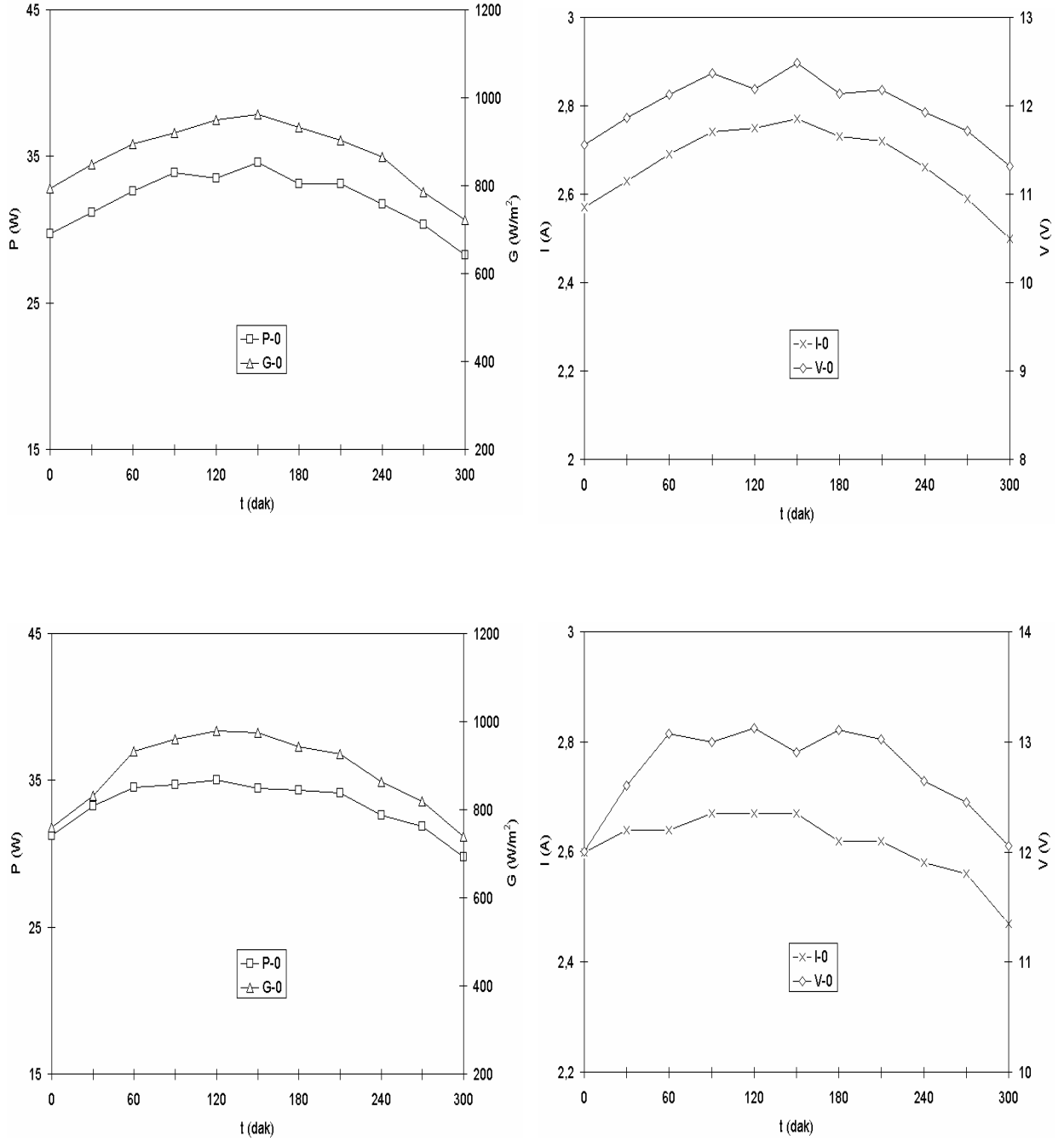
Şekil 4.11. 2004 yılı Mayıs ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.12'de 2004 yılı Haziran ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



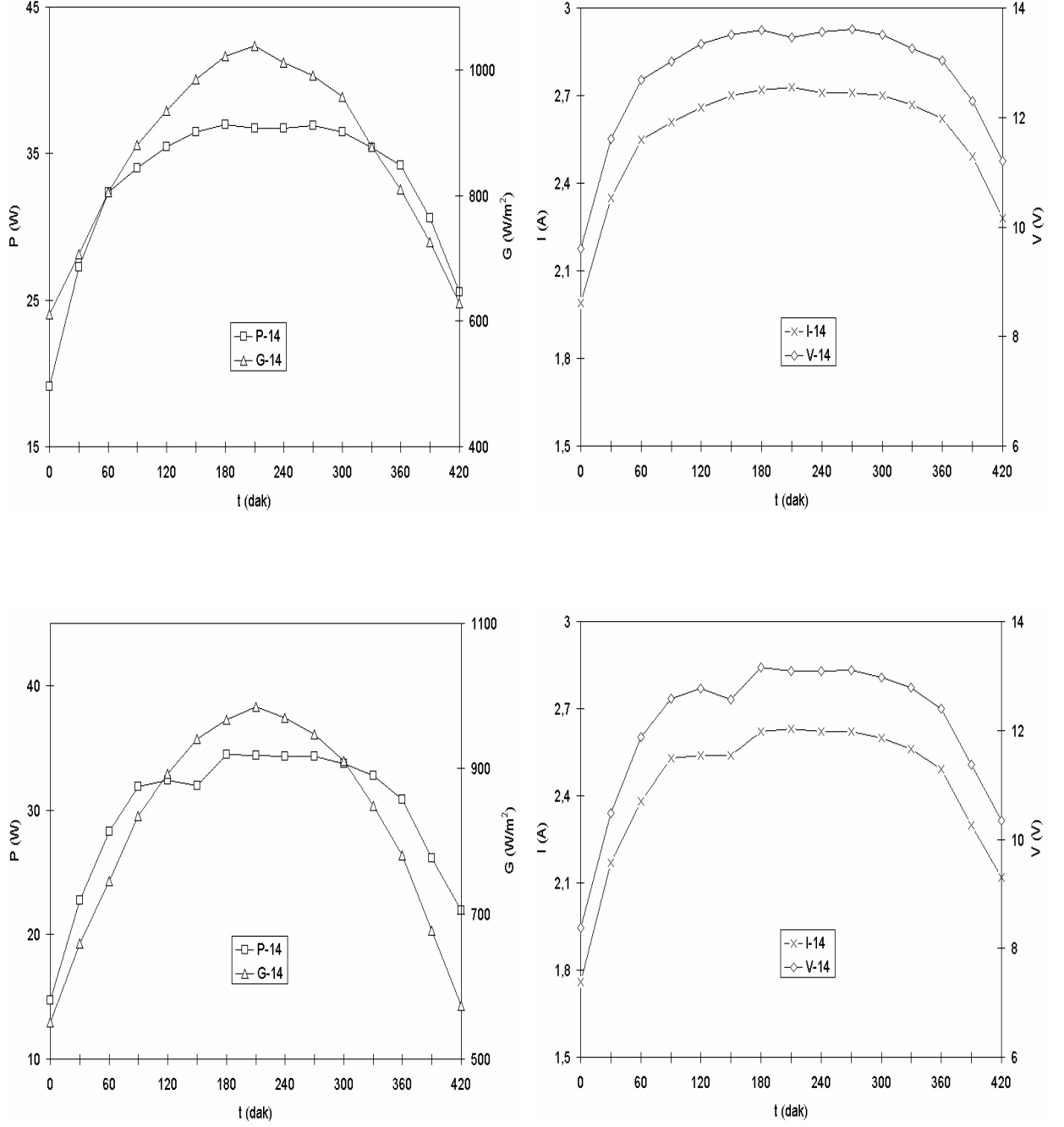
Şekil 4.12. 2004 yılı Haziran ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.13'te 2004 yılı Temmuz ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



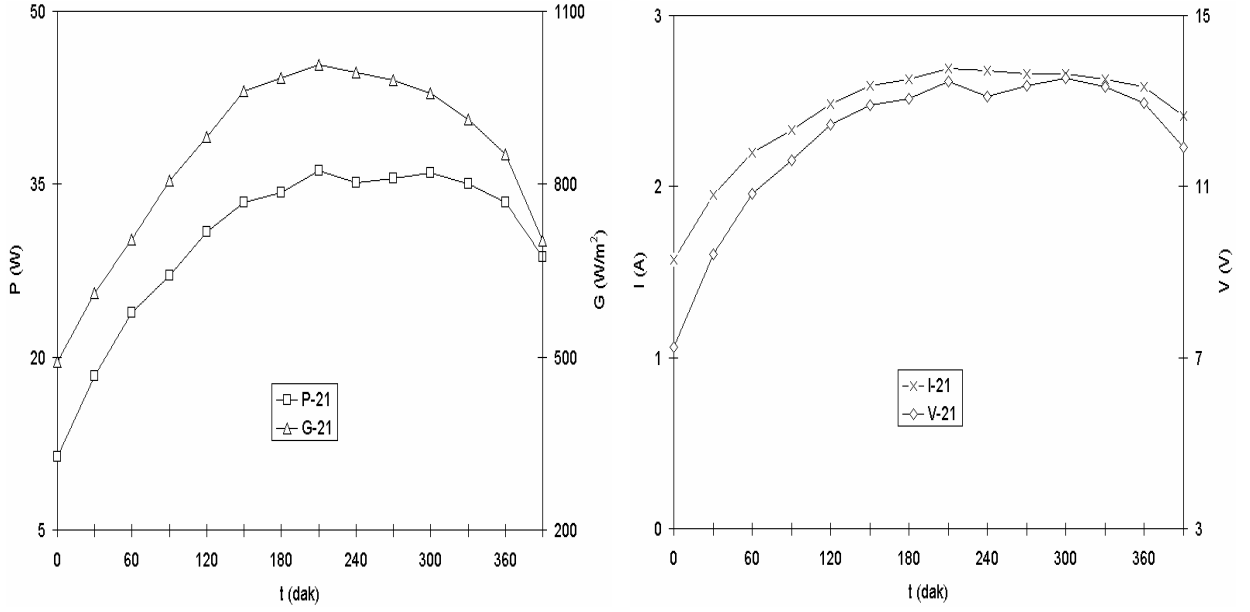
Şekil 4.13. 2004 yılı Temmuz ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.14'te 2004 yılı Ağustos ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



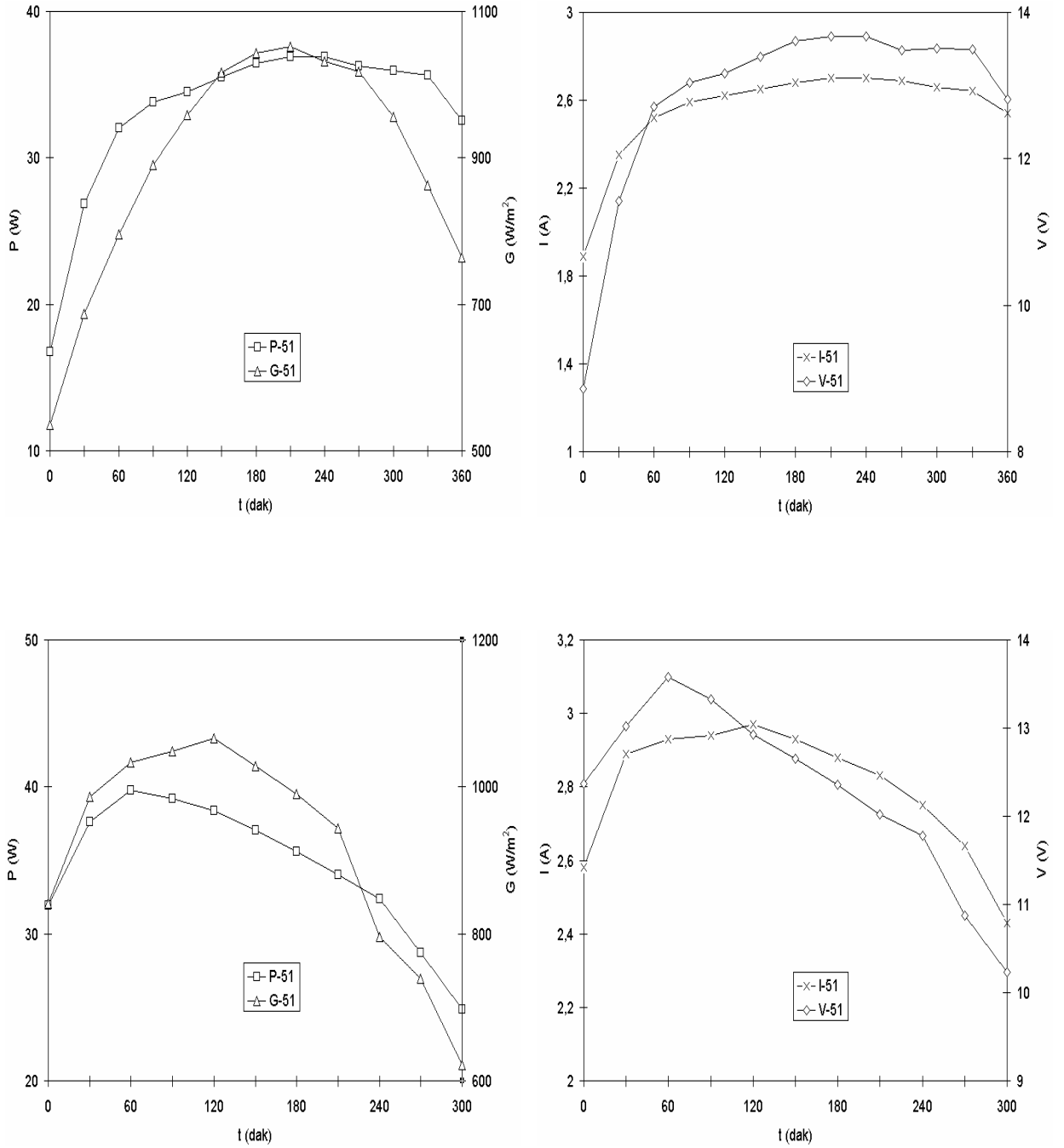
Şekil 4.14. 2004 yılı Ağustos ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.15'te 2004 yılı Eylül ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



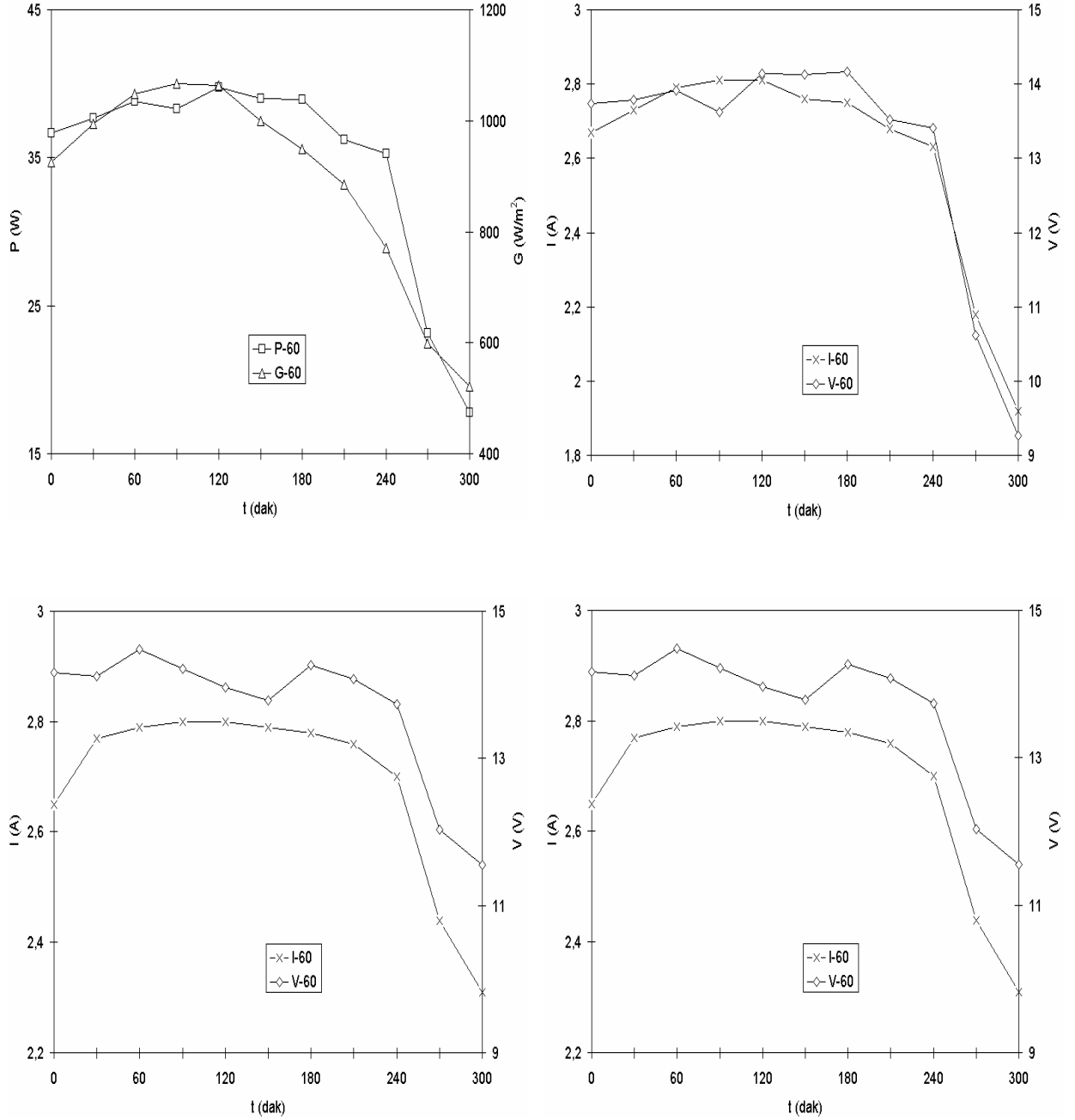
Şekil 4.15. 2004 yılı Eylül ayı içerisinde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.16'da 2004 yılı Ekim ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



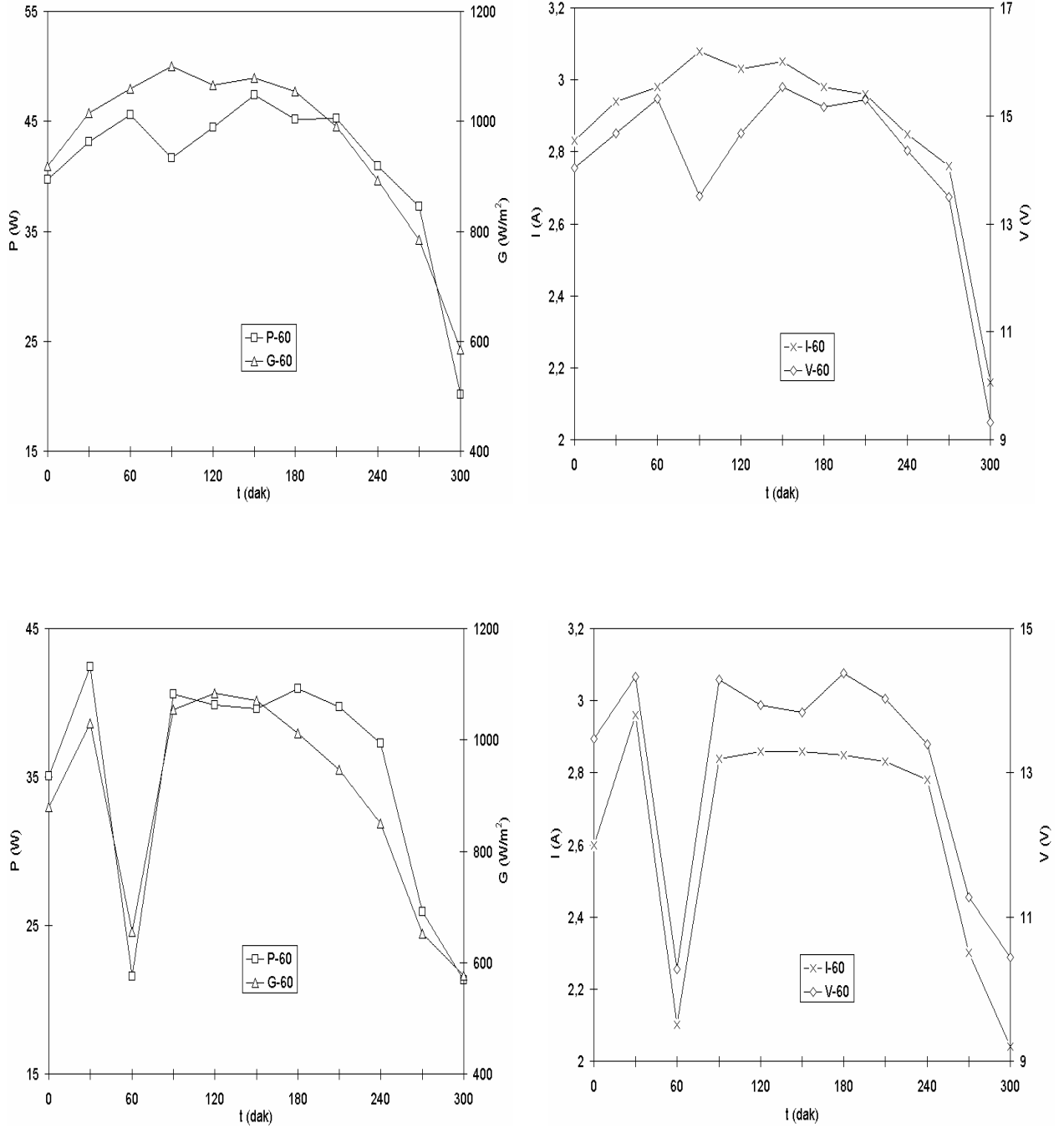
Şekil 4.16. 2004 yılı Ekim ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.17'de 2004 yılı Kasım ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



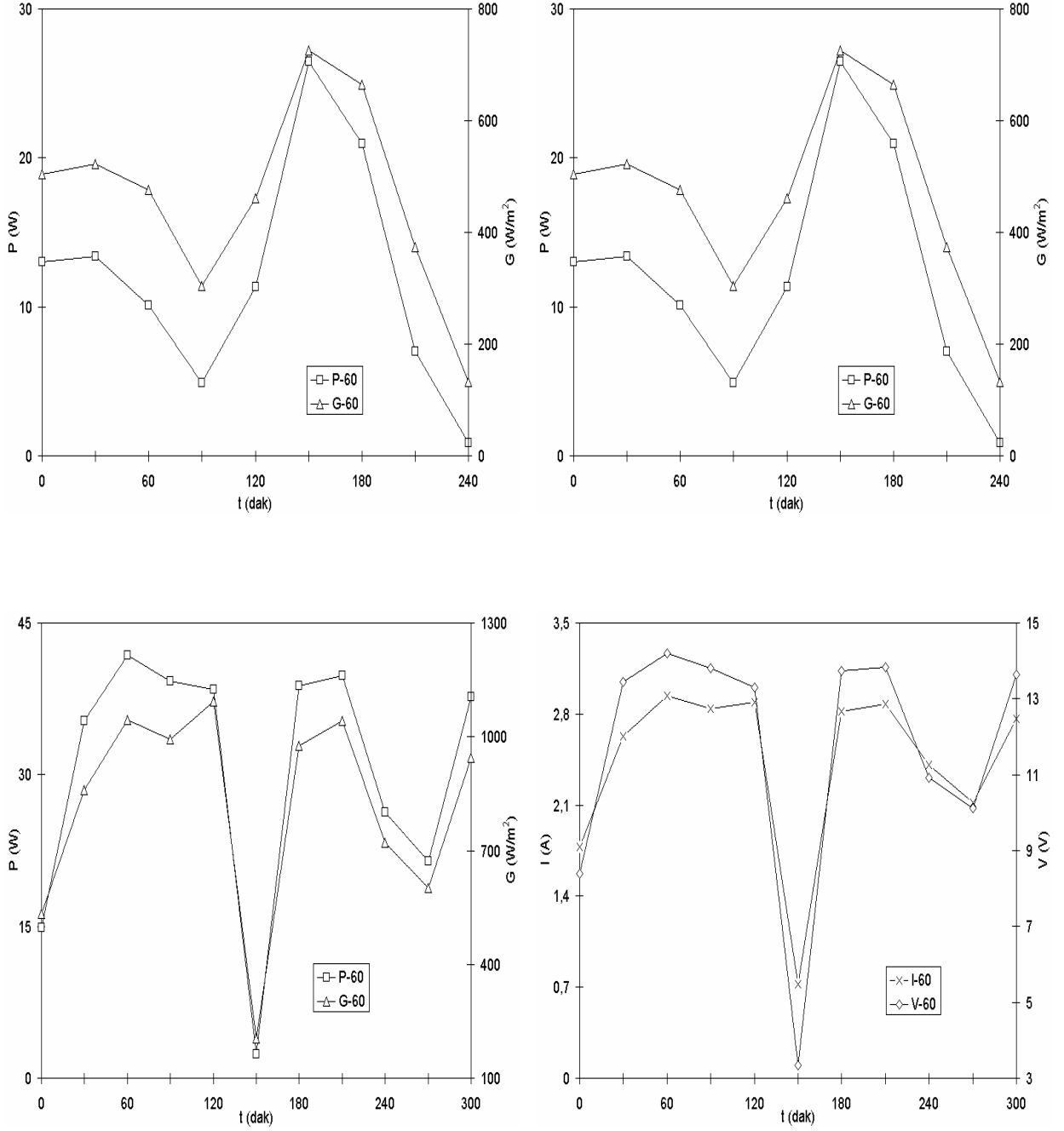
Şekil 4.17. 2004 yılı Kasım ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.18'de 2004 yılı Aralık ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



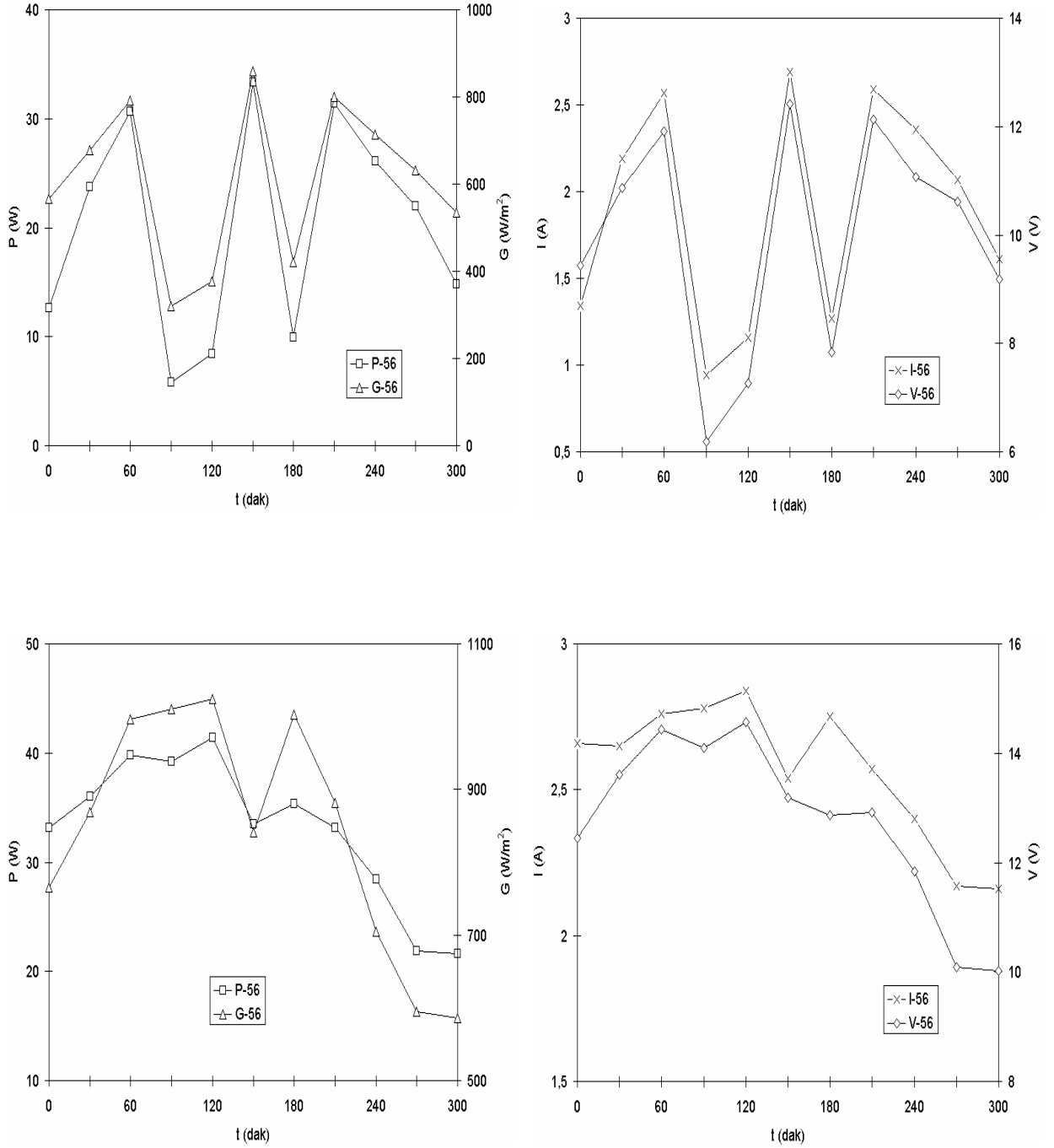
Şekil 4.18. 2004 yılı Aralık ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.19'da 2005 yılı Ocak ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



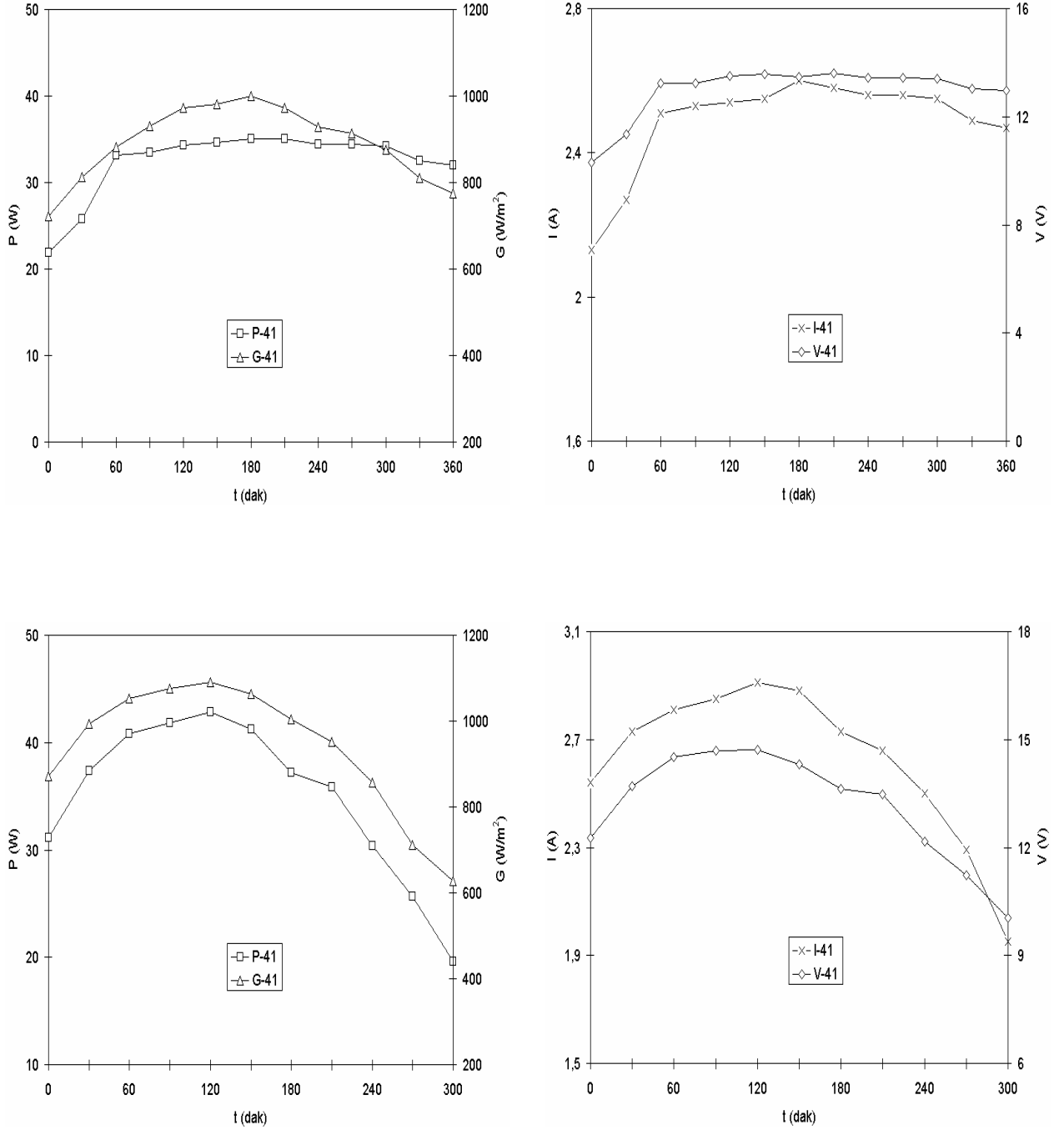
Şekil 4.19. 2005 yılı Ocak ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.20'da 2005 yılı Şubat ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



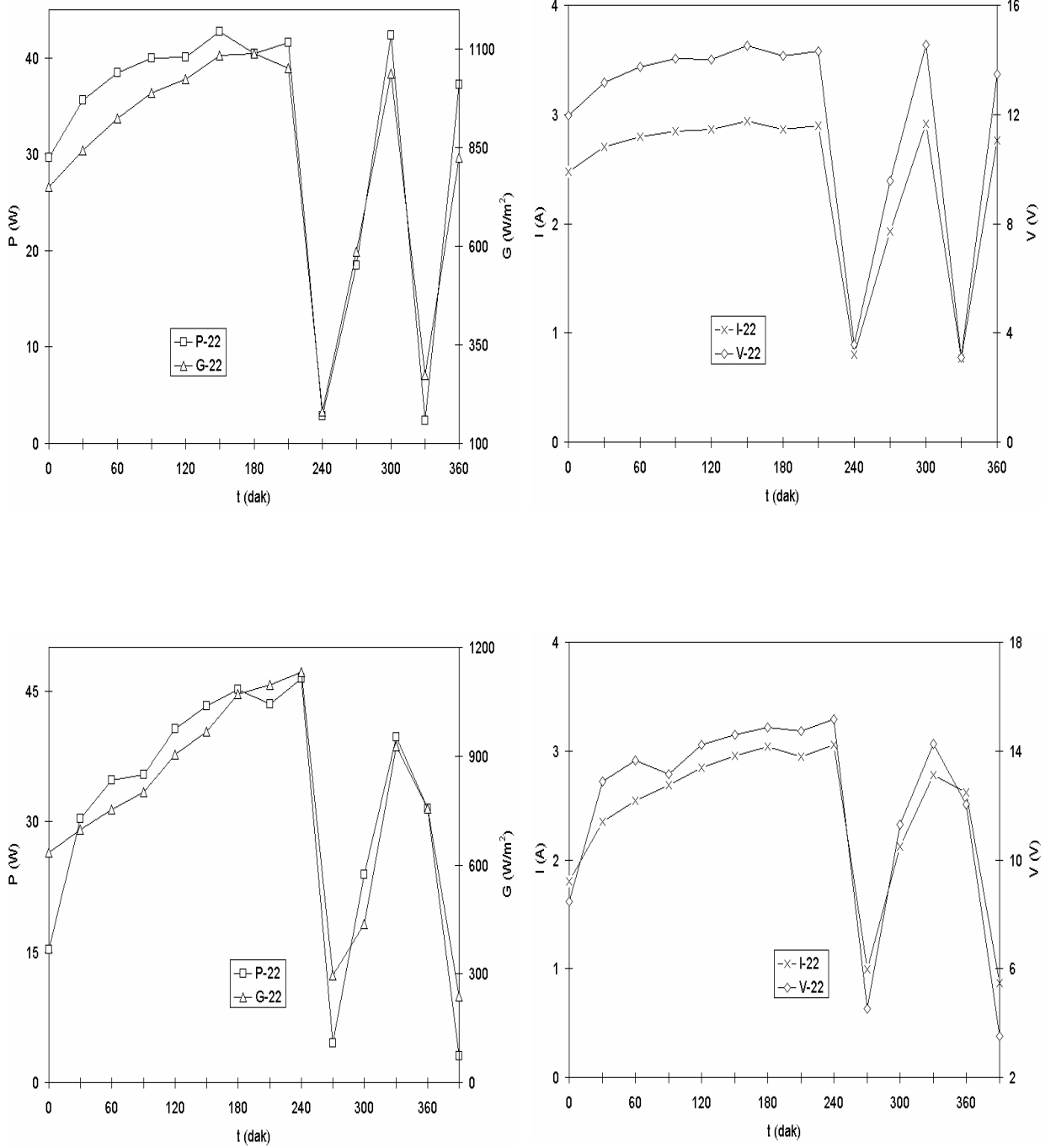
Şekil 4.20. 2005 yılı Şubat ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.21’de 2005 yılı Mart ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



Şekil 4.21. 2005 yılı Mart ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

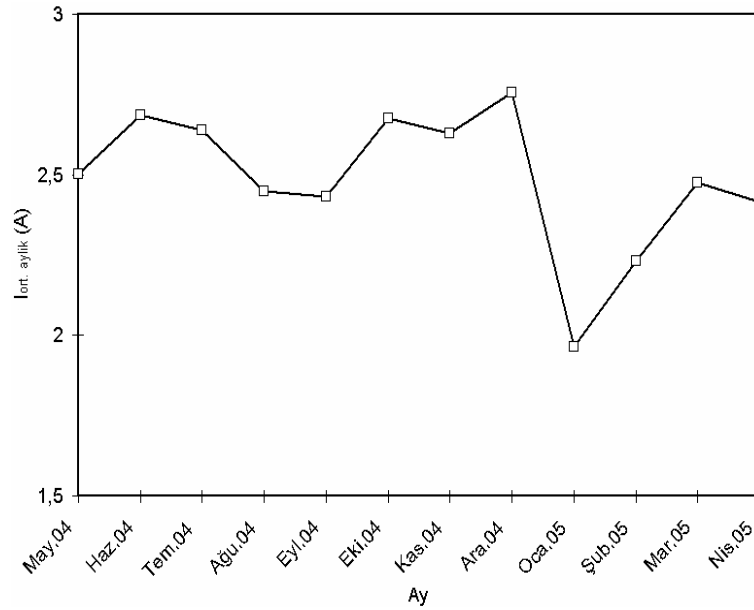
Şekil 4.22'de 2005 yılı Nisan ayı akım-gerilim-ışınım şiddeti ve güç parametrelerinde görülen değişimler yer almaktadır.



Şekil 4.22. 2005 yılı Nisan ayı içerisinde 2 farklı günde yapılan ölçümlerde güç-ışınım şiddeti ve akım-gerilim parametrelerinde meydana gelen değişimler

2004 ve 2005 yılları içerisinde farklı aylarda gerçekleştirilen 12 aylık ölçümlerde; akım, ışınım şiddeti, voltaj, güç ve çalışma sıcaklığı parametreleri için ayrı ayrı tespit edilen değişimler aylık ortalama datalar bazında incelendiğinde Şekil 4.23 – Şekil 4.28’de verilmiştir. Grafikler oluşturulurken her bir ay için öncelikle ölçüm alınan her gün için parametrelerin günlük ortalama değerleri hesaplanmış ve daha sonra bu 2 günlük dataların ortalamaları bulunmuştur.

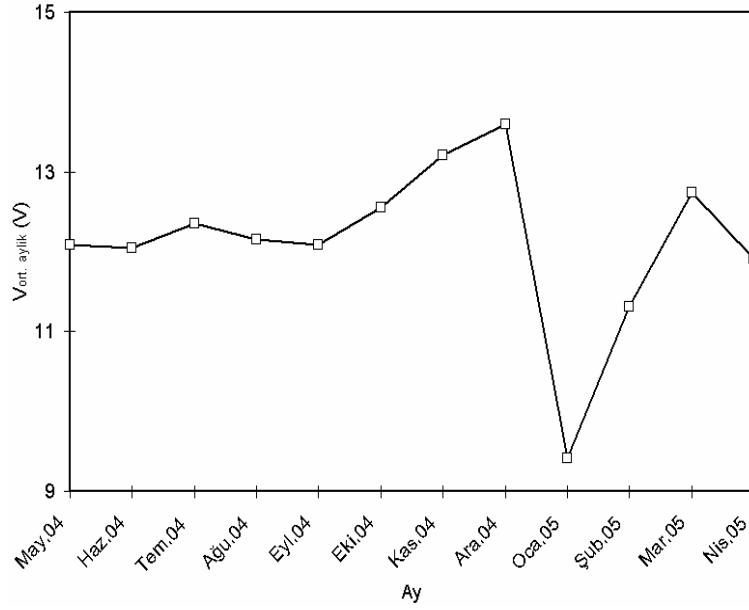
Akım parametresinde meydana gelen değişim Şekil 4.23’te görülmektedir.



Şekil 4.23. Akım parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki değişimler

Yapılan ölçümlerde ışınım şiddetine paralel bir değişim gösteren akım parametresi için yıl boyunca yapılan ölçümlerin ortalamaları referans alınarak oluşturulan Şekil 4.23 incelendiğinde yıllık ortalama akım değerinin 2,5 Amper olduğu görülmektedir. Akım değeri gün içerisinde yüzdesel olarak oldukça büyük değişimler göstermekle birlikte, akımın yıllık değişim grafiğine bakıldığında, aylık ortalama değerler referans alındığından yüzdesel olarak çok büyük değişimler görünmemektedir.

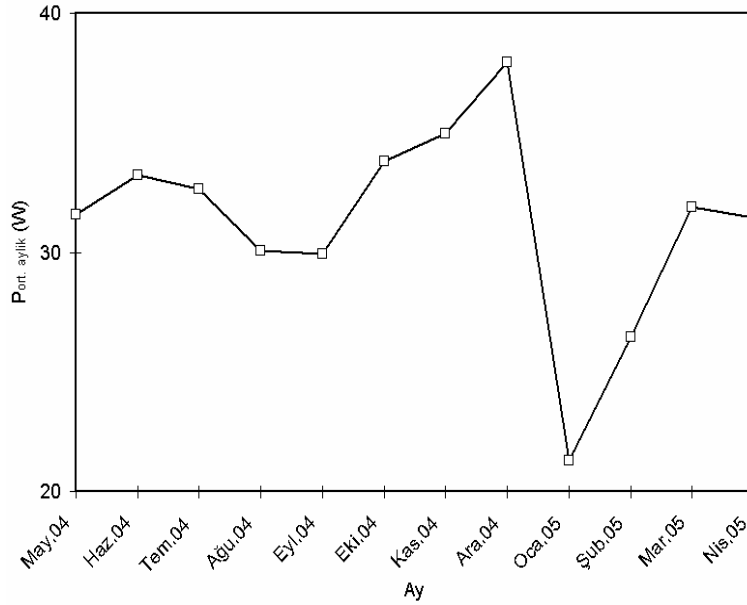
Voltaj parametresinde 12 ay süren görülen değişim Şekil 4.24'te görülmektedir.



Şekil 4.24. Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki voltaj değişimleri

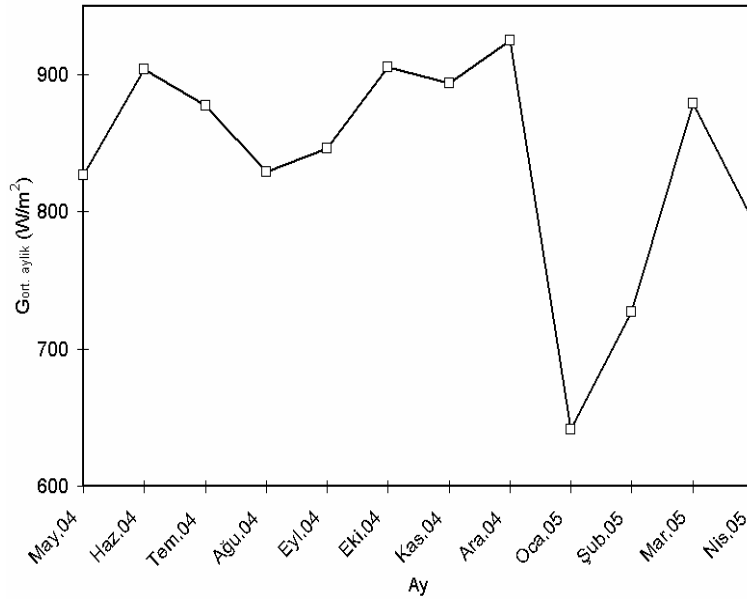
12 aylık ölçümlerdeki voltaj değişimleri incelendiğinde; Ocak ve Şubat 2005 ölçümlerinin dışındaki tüm aylarda voltajın neredeyse sabit denilebilecek bir seyir izlediği görülmektedir. Akım parametresinin aksine, voltaj parametresi gün içerisinde ışınım şiddetinin değişiminden çok etkilenmemekte, ancak çalışma sıcaklığının değişiminden etkilenmektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak gün içerisindeki bulutlanma olayları dışında ölçülen voltaj değerinde çok büyük dalgalanmalar yaşanmamaktadır. Yani fotovoltaik panelin gün içerisinde ürettiği güçteki değişim daha çok akım parametresindeki değişime bağlıdır.

Güç parametresinde 12 aylık ölçümler süresince görülen değişim Şekil 4.25'te görülmektedir.



Şekil 4.25. Güç parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylarda görülen değişimler

Işınım şiddeti parametresindeki değişim Şekil 4.26'da görülmektedir.



Şekil 4.26. Işınım şiddeti parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki değişimler

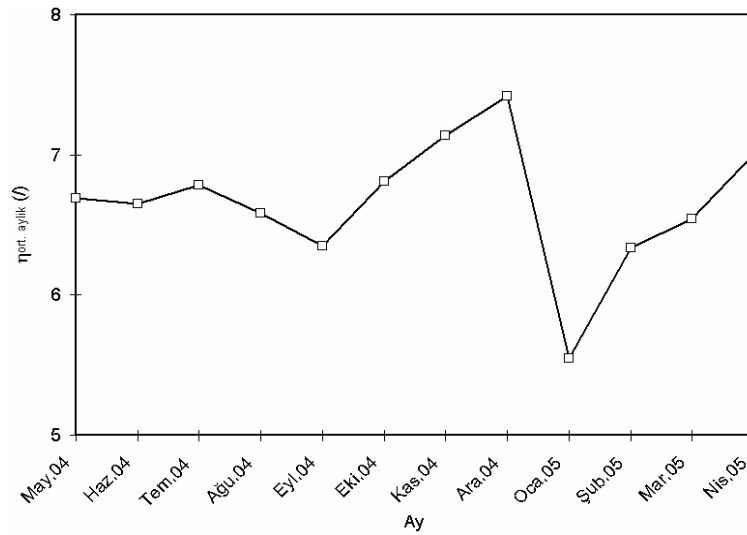
PV panel tarafından üretilen gücün 12 aylık değişim seyri incelendiğinde ağırlıklı güç üretim aralığının 30-40 Watt aralığı olduğu görülmektedir. Daha önce de ilgili bölümlerde vurgulandığı gibi bu seviyede güç üretiminde etkili olan parametreler;

- PV panel ve ölçüm düzeneği arasındaki bağlantıyı sağlayan elektriksel tesisattaki bağlantı kayıpları
- Gün içerisinde hemen hemen tüm aylarda görülen yüksek çalışma sıcaklıkları
- Tozlanma, yansıma ve cihazlar arası uyumsuzluk kayıpları

şeklinde sıralanmaktadır.

Işınım şiddetinin 12 aylık süreç içerisindeki değişim seyri incelendiğinde ise ağırlıklı ışınım şiddeti aralığının 800-950 W/m² ışınım aralığı olduğu görülmektedir. Ölçüm yapılan 12 aylık süreç içerisinde elde edilen bu sonuç, Şanlıurfa ilinin güneşlenme süresi açısından zenginliğini doğrular niteliktedir. Bu ayrıntı vurgulanırken, havanın yağmursuz olduğu günlerin ölçüm için tercih edildiği gerçeği göz önünde bulundurulması gereken bir noktadır.

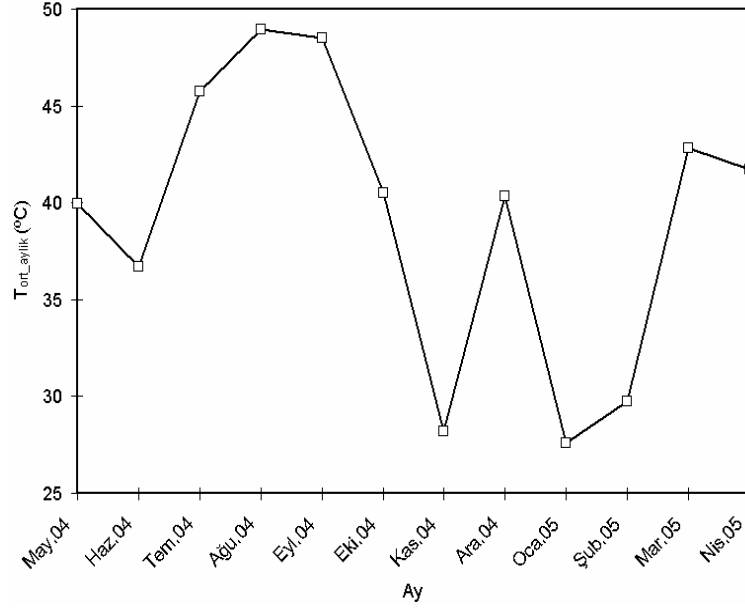
Verim parametresinde görülen değişim Şekil 4.27’de görülmektedir.



Şekil 4.27. Verim parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki değişimler

12 aylık panel verimi değerlerinin değişimi incelendiğinde yıllık ortalama verim değerinin % 7 seviyelerinde olduğu görülmektedir.

Çalışma sıcaklığı parametresinde görülen değişim Şekil 4.28’de görülmektedir.



Şekil 4.28. Çalışma sıcaklığı parametresinde Mayıs 2004-Nisan 2005 tarihleri arasında ölçüm yapılan aylardaki değişimler

Çalışma sıcaklığı değişimleri incelendiğinde yıllık ortalama çalışma sıcaklığı değerinin 40 °C olduğu görülmektedir. Ancak tüm yıl boyunca özellikle gün içerisinde, ışınlam şiddetinin en fazla görüldüğü öğle saatlerinde panel yüzey sıcaklıkları 65 °C’ye kadar çıkabilmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu deneysel tez çalışmasının ilk aşamasında fotovoltaik panellerin doğal atmosfer şartlarındaki performansının tespitine olanak sağlayan bilgisayar destekli bir ölçüm ve kayıt sistemi kurulmuştur. Bu amaçla öncelikli olarak ölçümlerde kullanılacak olan bilgisayar, multimetreler ve sürgülü reostanın birbirine bağlantısını sağlayan elektriksel tesisat düzenlenmiştir. Güneşi 2 ekseninde (yatay-düşey) takip eden 2 adet ve tek ekseninde (düşey) takip eden basit ve ekonomik sistem sehpaları Harran Üniversitesi Makine Fabrikası'nda üretilmiştir. Bu sehpa farklı eğim açılarında ölçüm yapılmasına olanak sağlamak ve 3-5'er derece aralıklarla eğimi ayarlanabilmektedir.

İkinci olarak ölçümlerde kullanılan fotovoltaik panellerin teorik modellemesi için literatürdeki matematiksel modeller incelenmiş ve panel katalog verilerinin modelleme için yeterli olduğu bir matematiksel model seçilmiştir. Bu matematiksel modelleme için Fortran ve C++ programlama dillerinde algoritmalar oluşturularak panel karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Aynı teorik çalışmada panelin birim sıcaklık değişimine karşı göstermiş olduğu tepki de tespit edilmiştir. Buna göre çevre sıcaklığında görülen 1 °C'lik değişime karşılık panel tarafından üretilen güçte yaklaşık 0,3 Wattlık bir düşüş söz konusudur.

Çalışmanın bir diğer aşamasında tek bir PV panelin maksimum gücü üretebileceği optimum yük değeri tespit edilmiştir. Şanlıurfa ili şartlarında fotovoltaik panel katalog referans değeri olan 1000 W/m² ışınım şiddeti değerine yakın ışınım şiddetlerinde maksimum gücü veren direnç değerinin ≈ 4.70 ohm ve tüm ışınım şiddetlerinde en fazla gücü (tüm ışınımlardaki güçlerin toplamı) veren optimum direnç değerinin de 5,6 ohm olduğu tespit edilmiştir. Sonraki aşamada oluşturulan ölçüm sistemi ve tek panel için tespit edilen optimum yük değeri olan 4,72 ohm ile Şanlıurfa ili meteorolojik şartlarında PV panellerin performansını tespit etmek için farklı aylar içerisinde ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Bir sonraki aşamada sistemde mevcut bulunan toplam 4 adet PV panelin birbirine farklı kombinasyonlarda bağlandığı panel konfigürasyonları için optimal yük direncinin tespit edilmesi sağlanmıştır.

(2s*2p) panel konfigürasyonu için yapılan çalışmalar neticesinde gerçekleştirilen karakterizasyon işleminin sonucunda, ölçümlerin yapıldığı Şanlıurfa ili şartlarında fotovoltaiik panel katalog referans değeri olan 1000 W/m^2 ışınım şiddeti değerine en yakın olan 990 W/m^2 ışınım şiddetinde maksimum gücü veren direnç değerinin ≈ 4.72 ohm ve tüm ışınım şiddetlerinde en fazla gücü (tüm ışınımlardaki güçlerin toplamı) veren optimum direnç değerinin de 5,6 ohm olduğu tespit edilmiştir. Panel tarafından gerçek şartlarda üretilen gücün, panel katalog güç değeri olarak verilen $P_{nom}=60 \text{ W}$ 'a oranı olarak tanımlanan boyutsuz güç katsayısı, optimum direnç şartlarında 2s*2p konfigürasyonu için 0.60 değerini almaktadır.

Aynı ölçüm metodu ve ölçüm sistemi kullanılarak (1s*4p) panel konfigürasyonu için de optimal yük değerinin tespitine yönelik olarak ölçümler gerçekleştirilmiş ve panel tarafından maksimum gücün elde edildiği optimum direncin ≈ 1.1 ohm olduğu görülmüştür. 4 panelin birbirine paralel bağlandığı panel kombinasyonunda, optimum direnç değeri çok küçüktür. Bu nedenle sürgülü reostadaki bir adımlık fark, güç çıktılarında çok büyük değişimlere sebebiyet vermektedir. Ayrıca optimum direnç değerleri araştırılan panel kombinasyonları içerisinde en az gücün elde edildiği panel kombinasyonunun (1s*4p) panel kombinasyonu olduğu tespit edilmiştir. Panel tarafından gerçek şartlarda üretilen gücün, panel katalog güç değeri olarak verilen $P_{nom}=60 \text{ W}$ 'a oranı olarak tanımlanan boyutsuz güç katsayısı, optimum direnç şartlarında (1s*4p) konfigürasyonu için 0.39 değerini almaktadır. Daha önce de vurgulandığı gibi özellikle yüksek akım değerlerinin elde edildiği bağlantı konfigürasyonlarında, ölçüm düzeneğine ait ara kablolarda ortaya çıkan bağlantı kaybı değerleri de akımın karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Bu seviyede düşük güç üretilmesine neden olan bir diğer faktör de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ve üzerinde görülen çalışma sıcaklıklarından kaynaklanan kayıplardır.

4 panelin birbirine seri bağlandığı (4s*1p) kombinasyonunda optimum direnç değeri çok büyük olduğundan, reostadaki kademeler arasındaki yük geçişinde çok büyük güç çıktısı farkları görülmemektedir. Ayrıca sürgülü reostalar birbirine seri bağlandığından ölçüm yapılabilecek direnç değeri sayısı da oldukça fazladır. Ölçümlerin yapıldığı gün içerisinde PV panel karakteristik eğrilerinin çizildiği 5 farklı ışınım şiddetinde elde edilen toplam güç çıktıları karşılaştırıldığında en fazla gücü veren direnç değerinin 20.50 ± 0.50 ohm olduğu tespit edilmiştir. Farklı panel konfigürasyonları karşılaştırıldığında paneller tarafından en fazla gücün elde edildiği konfigürasyonun (4s*1p) konfigürasyonu olduğu tespit edilmiştir. Panel tarafından gerçek şartlarda üretilen gücün, panel katalog güç değeri olarak verilen $P_{nom}=60$ W'a oranı olarak tanımlanan boyutsuz güç katsayısı, optimum direnç şartlarında 2s*2p konfigürasyonu için 0.67 değerini almaktadır.

Çalışmanın bir diğer aşamasında ise, birisi optimum eğim açılarında yerleştirilmiş diğeri ise yıllık sabit eğim açısında yerleştirilen 2 adet PV panel kullanılarak eğim açısının sistem güç çıktısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 2004 yılı içerisinde Kasım ve Aralık aylarında, 2005 yılında ise Ocak, Şubat ve Mart aylarında PV panellerde eğim açısı etkisinin deneysel tespitine yönelik ölçümler yapılmıştır. Ölçüm yapılan tüm aylarda paralel sonuçlar görülmekle beraber, özellikle güneş ışınımına daha çok ihtiyaç duyulan kış aylarındaki sonuçlar incelendiğinde; aylık optimum eğim açısında yerleştirilen panelin yüzeyine gelen ışınım şiddetinin daha fazla olduğu ve bunun sonucunda panelden daha fazla güç elde edildiği görülmektedir. Aylık optimum ve yıllık sabit eğim açısı karşılaştırmasının yapıldığı günlerin tamamında optimum eğim açısı ile yerleştirilen panelin daha fazla güç ürettiği görülmüştür. Karşılaştırmanın yapıldığı tüm aylar dikkate alındığında ölçüm alınan günlere göre değişmekle birlikte, optimum eğim açısında yerleştirilen panelin yüzeyine gelen ışınımın yıllık sabit eğim açısından yerleştirilen panele göre % 7-13, üretilen gücün ise % 4-10 daha fazla olduğu görülmektedir.

Ölçümlerde 3 ve 5'er derece aralıklarla eğimin ayarlanabildiği sehpa kullanıldığından ara derecelere en yakın eğim açısı değerlerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Yıl içerisinde farklı aylarda yapılan ölçümlerin sonuçları incelendiğinde, ağırlıklı ışınım şiddeti aralığının $700-1100 \text{ W/m}^2$ olduğu görülmektedir. Sonucun böyle çıkmasında etkili olan parametrelerin başında özellikle kış aylarında karlı, yağmurlu ve aşırı bulutlu günlerde ölçümlerin gerçekleştirilmemesi gelmektedir. Yine yıl içerisinde farklı aylarda yapılan ölçümlerin sonuçları incelendiğinde, PV panel tarafından üretilen güç aralığının $30-35 \text{ W}$ olduğu görülmektedir.

Yıl içerisinde farklı aylarda ölçüm yapılan gün sayısı 2 günden fazladır. Ancak birbirini takip eden günlerde parametrelerdeki değişimler arasında büyük benzerlikler görüldüğünden yalnızca 2'şer günlük ölçüm sonuçları verilmiştir. Yıl boyunca gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları incelendiğinde farklı aylardaki sistem performansları arasında büyük farklılıklar görülmekle birlikte tüm yıl bazında değerlendirme yapıldığında fotovoltaik sistemin kullanılabilirliğinin var olduğu görülmektedir.

Gün içerisinde voltaj parametresinde meydana gelen yüzdesel değişim ışınım şiddeti ve akım parametrelerine göre düşüktür. Birbirini izleyen bazı ölçüm noktaları arasında voltajda görülen ani değişimlerin altında yatan en büyük etkenler ışınım şiddeti ve panel yüzey sıcaklığında ortaya çıkan ani dalgalanmalardır.

Işınım değişimine paralel bir değişim göstermesi beklenen akım parametresi ölçüm alınan noktaların büyük bir kısmında paralelliği sağlarken, bazı noktalarda bu paralelliği göstermemektedir. Akım ve ışınım şiddetinin ölçümü arasında geçen bir dakikalık zaman farkı bu durumu ortaya çıkaran temel parametrelerdendir.

Yaz aylarında gerçekleştirilen ölçümlerde birbirini takip eden iki nokta arasında, ölçüm parametrelerinde büyük bir değişim görülmezken kış aylarında tersi bir durum söz konusudur. Sabah-öğle ve öğle-akşam zaman aralıklarında ölçülen parametrelerin seyri ise birbirine paralellik göstermektedir. Kış aylarında özellikle bulutlu günlerde birçok ölçüm noktasında bulutların etkisi görülmüştür. Işınım şiddeti, akım ve voltaj parametrelerinde ani değişimler görülürken sıcaklık değerlerinde daha yavaş bir değişim görülmüştür.

Bir sonraki aşamada ise başlangıçta kurulan ölçüm sisteminin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışma başlangıcında kurulan ve kullanılan ölçüm sisteminde voltaj parametresi sürekli, çalışma sıcaklığı, akım ve ışınım şiddeti parametreleri ise 30’ar dakikalık aralıklarla alınmıştır. Bu yöntem pratik olmadığı için sisteme bir veri kartının eklenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Elektrik-Elektronik Mühendisi M. Hadi Süzer’in çok büyük katkıları ile bir veri izleme ve kayıt kartı tasarlanmış ve üretilmiştir. Yıl boyunca gerçekleştirilen tüm ölçümlerde voltaj 1’er dakika, ışınım şiddeti ve akım ise 30’ar dakika aralıklarla alındığından, birbirini takip eden 2 ölçüm noktası arasındaki değişimler lineer kabul edilmiştir. Sisteme eklenen veri kartı kullanılarak ölçüm noktaları arasındaki zaman farkı minimize edilmiş ve akım-ışınım şiddeti parametrelerinin sürekli ölçümleri sağlanmış olduğundan, parametrelerdeki değişimler hassas olarak tespit edilebilmekte ve bu değişimlerin yorumlanması-değerlendirilmesi rahatlıkla yapılabilmektedir.

Sistemin geliştirilmesine yönelik olarak gerçekleştirilen bir diğer faaliyet ise sisteme inverter ilave edilmesidir. Sistemde kullanılmak üzere satın alınan Solarix 900 RI tip inverterin sistemde sürekli bir güç çıktısı vermesi için gerekli araştırmalar yapılmış ve sisteme 12 V – 200 Ah kapasitede 2 adet bataryanın eklenmesi gerektiği fikrine ulaşılmıştır. Anılan kapasitede 2 adet batarya sisteme eklenmiş ve inverter ile sürekli ve AC karakterli güç üretimi sağlanmıştır.

Bir diğer aşamada ise tez kapsamının dışında tutulmuş olmakla birlikte PV sistemlerin kullanımına yönelik örnek bir uygulama olarak “*PV destekli su pompalama*” işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada DC karakterli küçük güçlü bir su pompası kullanılmıştır. Aralarında yaklaşık 5 m’lik bir yükselti farkı bulunan 2 adet su toplama tankı arasına DC pompa ve bir debimetre yerleştirilmiş ve gün içerisinde farklı ışınım şiddetlerinde DC pompanın bastığı su debisi ölçülmüştür. Düşük güçlü bir pompa ile yapılan bu ölçüm, PV sistemlerin benzer evsel kullanımdaki performansını göstermesi açısından dikkat çekecek noktalara sahiptir.

5.2. Öneriler

Yeniden kurulacak bir sistemde, paneller tarafından üretilen güçle tahrik edilen elektriksel cihaz arasındaki mesafenin mümkün olduğunca kısa tutulması ve/veya cihaz ile panel arasındaki bağlantıyı sağlayan kabloların kesit alanları gibi bazı özelliklerinin, sistem tarafından üretilecek güce uygun seçilmesi uygun bir yöntem olacaktır. Bu şekilde hareket etmek, güç iletimi sırasında ortaya çıkacak bağlantı kaybının minimize edilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca yine aynı amaca yönelik olarak, klemens gibi kablo bağlantı noktalarının mümkün olduğunca az kullanılması ve bu noktalarda kablo uçlarının lehimlenmesi işleminin de unutulmaması uygun olacaktır.

Ölçümler süresince panel yüzey sıcaklıkları, panelin arka yüzeyine yapıştırılan K tipi bir ısıl çiftle ölçülmüştür. Eğim açısının 0° - 5° gibi düşük değerlerde olduğu yaz aylarında, sehpanın üzerine konulduğu beton yüzeyin sıcaklığından kaynaklanabilecek sıcaklık ölçüm hataları gözardı edilmemelidir. Bunun dışında sıcaklık ölçümünde görülen diğer bir sıkıntı da rüzgarın etkisi ile farklı yüzey sıcaklığı değerlerinin ölçülebilecek olmasıdır. Ev tipi uygulamalarda panellerin rüzgar alabilecek noktalara yerleştirilmesi panel sıcaklığının düşürülmesinde etkili olabileceği varsayılarak gerçekleştirilebilecek bir faaliyettir.

Özellikle Şanlıurfa ili gibi çok yüksek çevre sıcaklıklarının ve aşırı yüzey tozlanmasının görüldüğü bölgelerde sistem tasarımı yapılırken sistem gücünün % 10 daha fazla seçilmesi kurulum sonrasında ortaya çıkabilecek olası yetersizliklerin giderilmesi amacıyla uygun bir çözüm olacaktır.

Ayrıca çalışma ortamı sıcak olan bölgelerde sistem tasarımı yapılırken, literatürden yararlanarak bölgenin meteorolojik şartlarına en uygun panel tipinin seçilmesi ve/veya düşük sıcaklık katsayısına sahip panelin seçilmesi olası bir diğer çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tez çalışması kapsamında bir yıl boyunca gerçekleştirilen tüm ölçümlerde aynı malzemelerden yapılmış 4 farklı PV panel kullanılmıştır. Böylesi bir araştırma ve karşılaştırma farklı tip malzemeler kullanılarak üretilen paneller arasında

gerçekleştirilebilir. Panel tipi yelpazesinin geniş tutulması ile bölgeye en uygun panel tipinin seçilmesi bu araştırmada daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

Sistemde bulunan 4 adet PV panel ve bunlara ilave olarak eklenecek birkaç panel kullanılarak farklı tip, karakter ve güçte DC veya inverteri kullanarak AC karakterli cihazların çalışma performanslarının tespit edilmesi araştırma konusu olabilecektir.

KAYNAKLAR

- ABDALLAH, S., Temmuz 2004. The Effect Of Using Sun Tracking Systems on The Voltage–Current Characteristics and Power Generation of Flat Plate Photovoltaics, *Energy Conversion and Management*, 45 (11): 1671-1679.
- ABDALLAH, S. and NIJMEH, S., 2004. Two Axes Sun Tracking System With PLC Control. *Energy Conversion and Management*, 45: 1931–1939.
- ASL-SOLEİMANI, E., FARHANGI, S. ve ZABIHI, M.S., 2001. The Effect of Tilt Angle, Air Pollution on Performance of Photovoltaic Systems in Tehran. *Renewable Energy*, 24:459–468.
- AYDIN, M., SUZER, M. H., ve YEŞİLATA, B., 2005. Fotovoltaik Sistemlerde Anlık Çalışma Koşullarının Ölçümü İçin Özgün Bir Veri(DAQ) Kartı Tasarımı. 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 19-21 Ekim, Mersin, s.108-111.
- AYDIN, M. ve YEŞİLATA, B., 2005. Fotovoltaik Panellerde Deneysel Yöntemle Güç Optimizasyonu. ULIBTK'05 15. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı, 7-9 Eylül, Trabzon, s.368-373.
- AYDIN, M., ve YEŞİLATA, B., 2005. Eğim Açısı Ayarlanabilir Ekonomik PV Sistem Sehpa Tasarımı. 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 19-21 Ekim, Mersin, s.74-78.
- AYDIN, M. ve YEŞİLATA, B., 2004. Fotovoltaik Panellerde Eğim Açısı Etkisinin Deneysel Tespiti. *Termodinamik Dergisi*. 148:88-98.
- AYDIN, M. ve YEŞİLATA, B., 2005. Fotovoltaik Güç Karakteristiklerinin Deneysel Yöntemle Belirlenmesi. *TIBTD Dergisi*. 1:1-8.
- BLAESSER, G., 1997. PV System Measurements and Monitoring The European Experience. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47(1):167-176.
- CARSTENSEN, J., POPKIROV, G., BAHR, J. and FOLL, H., 2003. CELLO: An Advanced LBIC Measurement Technique For Solar Cell Local Characterization. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 76 (4): 599-611.
- DUFFIE, J. A. and BECKMAN, W. A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- DURISCH, W., TILLE, D., WORZ, A., and PLAPP, W., 2000. Characterisation of Photovoltaic Generators. *Applied Energy*, 65: 273-284.
- EIKELBOOM, J. A. and JANSEN, M.J., 2000. Characterisation of PV Modules of New Generations : Results of Tests and Simulations, ECN-C--00-067, 20s.
- FIRATOĞLU, Z.A., 2003. Fotovoltaik Destekli Su Pompalarının Analizi ve Optimizasyonu. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- FIRATOĞLU, Z.A. ve YEŞİLATA, B., 2003. Bataryalı ve Direkt Akupleli Fotovoltaik Pompa Sistemlerinin Çalışma Karakteristiklerinin Araştırılması, *Yıldız Teknik Üniversitesi Sigma Dergisi*, 2:1-11.
- FIRATOĞLU, Z., A., YEŞİLATA, B., Eylül 2001. Fotovoltaik Destekli Su Pompası Uygulamasının Dinamik Analizi, II Gap ve Sanayi Kongresi Bildiriler Kitabı,.Eylül 29-30, Diyarbakır, s.541-549

- FIRATOĞLU, Z. A., ve YEŞİLATA, B., 2001. Fotovoltaik Güç Destekli Dalgıç Pompa Sistemlerinde Optimum Dizayn Koşullarının Araştırılması, Tesisat Mühendisliği Dergisi, Nisan-Mart, s.59-66.
- FIRATOĞLU, Z. A., ve YEŞİLATA, B., 2003. Lineer Elektriksel Yüke Bağlı PV Panellerin Optimizasyonu ve Bölgesel Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Şubat, s.64-70.
- FIRATOĞLU, Z.A., ve YESILATA, B., 2004. New Approaches on The Optimization of Directly-Coupled Photovoltaic Water-Pumping Systems. Solar Energy, 77 (1): 81-93.
- GREEN, M. A., and EMERY, K., 1993. Solar Cell Efficiency Tables Progress in Photovoltaics: Research and Application, 1: 25-29.
- GXASHEKA, A.R., Van DYK, E.E. and MEYER, E.L., 2005. Evaluation of Performance Parameters of PV Modules Deployed Outdoors. Renewable Energy, 30 (4): 611-620.
- HIRATA, Y., INASAKA, T. and TANI, T., 1998. Output Variation of Photovoltaic Modules With Environmental Factors - II: Seasonal Variation. Solar Energy, 63: 85-189.
- HIRATA, Y. and TANI, T., 1995. Output Variation of Photovoltaic Modules With Environmental Factors -I. The Effect of Spectral Solar Radiation on Photovoltaic Module Output. Solar Energy, 55: 463-468.
- HSIEH, S.J., 1986. Solar Energy Engineering, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 250p.
- HUSSEIN, H.M.S. , AHMAD, G.E. and EL-GHETANY, H.H., 2004. Performance Evaluation of Photovoltaic Modules at Different Tilt Angles and Orientations. Energy Conversion and Management, 45:2441–2452.
- IKISAWA, M., NAKANO, A., IGARI, S. and TERASHIMA, H., 1998. Outdoor Exposure Tests of Photovoltaic Modules in Japan and Overseas. Renewable Energy, 14 (1): 95-100.
- ITOH, M., TAKAHASHI, H., FUJII, T., TAKAKURA, H., HAMAKAWA, Y., and MATSUMOTO, Y., Mart 2001. Evaluation of Electric Energy Performance by Democratic Module PV System Field Test, Solar Energy Materials and Solar Cells, 67(1): 435-440.
- KARIMOV, K. S., SAQIBB, M. A., AKHTERC, P., AHMEDD, M. M., CHATTHAD, J. A. and YOUSAFZAİD, S. A., 2005. A Simple Photovoltaic Tracking System. Solar Energy Materials & Solar Cells, 87: 49–59.
- KATTAKAYAM, T. A. ve SRINIVASAN, K., 1997. Experimental Investigation on a Series-Parallel Cluster of Photovoltaic Panels. Solar Energy, 61(4): 231-240.
- KHOUZAM, K. Y., KHOUZAM, L., and GROUMPOS, P.,1991. Optimum Matching Of Ohmic Loads To The Photovoltaic Array,” Solar Energy, 46(2): 101–108.
- KING, D. L., KRATOCHVIL, J. A., and BOYSON, W. E., 1997. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California.
- KOU, Q., 1996. A Method for Estimation the Long-Term Performance of Photovoltaic Pumping System. Master Thesis, The University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory.

- KOU, Q., KLEIN, A., and BECKMAN, W., 1998. A Method for Estimating The Long Term Performance of Direct-Coupled PV Pumping Systems. *Solar Energy*, 64: 33-40.
- KOUTROULIS, E., KALAITZAKIS, K. ve VOULGARIS, N.C., 2001. Development of a Microcontroller-Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, cilt 16, no.1, Ocak.
- LI, D. H. W., CHEUNG, G. H. W. and LAM, J. C., 2005. Analysis of The Operational Performance and Efficiency Characteristic for photovoltaic System in Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 46: 1107-1118.
- MARION, B., ADELSTEIN, J., BOYLE, K., HAYDEN, H., HAMMOND, B., FLETCHER, B., CANADA, B., NARANG, D., SHUGAR, D., WENGER, H., KIMBER, A., MITCHELL, L., RICH, G., and TOWNSEND, T. U., 2005. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, Lake Buena Vista, Florida.
- MERTEN, J. and ANDREU, J., 1998. Clear Separation of Seasonal Effects on The Performance of Amorphous Silicon Solar Modules by Outdoor I/V-Measurements. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 52: 11-25.
- MORGAN, M. J., JAKOVIDIS, G., and McLEOD, I., 1994. "An Experiment to Measure The I-V Characteristics of a Silicon Solar Cell *Phys. Educ.* 29: 252-254.
- MUNTASSER, M. A., BARA, M. F., QUADRI, H. A., EL-TARABELSI, R., and LA-AZEBI, I. F., 2000. Photovoltaic Marketing in Developing Countries. *Applied Energy*, 65(1):67-72.
- NISHIOKA, K., HATAYAMA, T., URAOKA, Y., FUYUKI, T., HAGIHARA R., and WATANABE, M., 2003. Field-test Analysis of PV System Output Characteristics Focusing on Module Temperature *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Feb., 5(3):665-671.
- NISHITANI, M., KOHARA, N., NEGAMI, T., WADA, T., IGARI, S., and SHIMOKAWA, R., Ocak 1998. Analysis of Temperature and Illumination Dependencies of CIS Cell Performance *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 50(1):63-70.
- SALAS, V., OLÍAS, E., LAZARO, A., and BARRADO, A., 2005. Evaluation Of A New Maximum Power Point Tracker (MPPT) Applied to The Photovoltaic Stand-Alone Systems. *Solar Energy Materials And Solar Cells*, May. 87(1):807-815.
- SHARIAH, A., AL-AKHRAS, M.A. and AL-OMARI, I.A., 2002. Optimizing The Tilt Angle Of Solar Collectors. *Renewable Energy*, 26:587-598.
- SÜZER, M. H., ve BEŞLİ, N., 2005. Kişisel Ölçüm-Görüşme Notları.
- TANG, R. and WU, T., 2004. Optimal Tilt-Angles For Solar Collectors Used in China. *Applied Energy*, 79: 239-248.
- TOWNSEND T. U., 1989. A Method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled Photovoltaic Systems. Wisconsin Üniversitesi, Master Tezi, 282p.

- Van DYK, E. E., GXASHEKA, A. R., MEYER, and E. L., 2005. "Monitoring Current-Voltage Characteristics And Energy Output Of Silicon Photovoltaic Modules, Renewable Energy, March., 30 (3): 399-411.
- WHITAKER, C. M., TOWNSEND, T. U., NEWMILLER, J. D., KING, D. L., BOYSON, W. E., KRATOCHVIL, J. A., COLLIER, D. E., and DONALD E., 1997. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California.
- YAKUP, M.A.H.M. and MALIK, A. Q., 2001. Optimum Tilt Angle And Orientation For Solar Collector İn Brunei Darussalam. Renewable Energy, 24: 223-234.
- YEŞİLATA, B., ve AKTACİR, A., 2001. Fotovoltaik Güç Sistemli Su Pompalarının Dizayn Esaslarının Araştırılması. Mühendis ve Makina Dergisi, 42 (493): 29-34.
- YEŞİLATA, B, PIHTILI, K. ve ATA, F., 1992. Yoğunlaştıran Güneş Kollektörleri İçin Güneş Hareketini İzleyen Sistemler ve Örnek Bir Uygulama. Mühendis ve Makine Dergisi, 35(390): 25-32.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Mardin ili Midyat ilçesine bağlı Bağlarbaşı Köyü'nde doğdu. İlkokul öğrenimini Midyat ve Hatay ili Dörtyol ilçesinde, Ortaokul ve Lise öğrenimini ise yine Dörtyol'da tamamladı. 1999 yılında ÖSYS sınavı ile Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü okumaya hak kazandı. Bölümü bölüm ikincisi olarak tamamladı. Mezuniyetinin hemen ardından Ortadoğu Şirketler Topluluğunda Makine Mühendisi olarak kısa bir süre çalıştı. Bu sırada Harran Üniversitesinde 50/d kapsamında açılan Araştırma Görevliliği sınavını kazandı. Bir buçuk yılı aşkın bir süre bu göreve devam etti. Bu göreve devam ederken İskenderun Demir-Çelik Fabrikaları (İSDEMİR) A.Ş.'nin gerçekleştirdiği sınavlarda başarılı olarak İSDEMİR A.Ş.'de Enerji Tesisleri Müdürlüğü Türbin Mekanik Bakım Mühendisi olarak çalışmaya hak kazandı. Halen aynı işyerinde çalışma hayatına devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

ÖZET

Bu deneysel tez çalışmasının ilk aşamasında fotovoltaik panellerin doğal atmosfer şartlarındaki performansının tespitine olanak sağlayan bilgisayar destekli bir ölçüm ve kayıt sistemi kurulmuştur. Güneşi 2 ekseninde (yatay-düşey) takip eden 2 adet ve tek ekseninde (düşey) takip eden basit ve ekonomik sistem sehpaları Harran Üniversitesi Makine Fabrikası'nda üretilmiştir. Bu sehpa farklı eğim açılarında ölçüm yapılmasına olanak sağlamak ve 3-5'er derece aralıklarla eğimi ayarlanabilmektedir.

İkinci olarak ölçümlerde kullanılan fotovoltaik panellerin teorik modellemesi için literatürdeki matematiksel modeller incelenmiş ve panel katalog verilerinin modelleme için yeterli olduğu bir matematiksel model seçilmiştir. Bu matematiksel modelleme için Fortran ve C++ programlama dillerinde algoritmalar oluşturularak panel karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bir diğer aşamasında tek bir PV panelin maksimum gücü üretebileceği optimum yük değeri deneysel olarak tespit edilmiştir. Tek panel için tespit edilen bu optimum yük değeri kullanılarak, Şanlıurfa ili meteorolojik şartlarında PV panellerin performansı yılın tüm ayları için ölçülmüştür. Ayrıca, birisi optimum aylık eğim açısında, diğeri ise yıllık sabit eğim açısında yerleştirilen 2 adet PV panel kullanılarak, eğim açısının sistem güç çıktısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bir sonraki aşamada sistemde mevcut bulunan toplam 4 adet PV panelin birbirine farklı kombinasyonlarda bağlandığı panel konfigürasyonları için optimal yük direncinin tespit edilmesi sağlanmıştır. Araştırılan panel konfigürasyonları 2s*2p (2 seri + 2 paralel), (1s*4p) ve (4s*1p) olmuştur.

Elde edilen sonuçlar, fotovoltaik sistemler üzerinde gerçek atmosferik koşullarda elde edilen güç değerlerinin, teorik beklentilerden farklı olduğunu göstermektedir. Deneysel olarak elde edilen sistem güç çıktısı üzerinde; elektriksel yük değeri, eğim açısı ve elektriksel bağlantı konfigürasyonu gibi parametrelerin etkisinin oldukça önemli olduğu gözlemlenmiştir.

SUMMARY

In the first phase of this experimental research, an experimental set-up along with a data acquisition system was designed to determine PV panels' performances under real atmospheric conditions. The electrical connections and arrangement of three devices, computer, multimeters and adjustable resistance aparat, were priorly met. The ergonomical PV racks with two-axis tracking and one-axis tracking systems were then constucted in Machinery Factory of Harran University. These racks provide slope-adjustmens for PV panels respectively with 5 and 3 degree intervals.

Second, the theoreticals models for characterization of PV panels were reviewed and an appropriate model for PV panel under investigation was selected. The theoretical characterization of the panel was made by writing our own codes in Fortran and C++ programming languages.

In the next step of the thesis, optimal electrical load to produce maximum PV power was experimentally determined for a single panel. The monthly performances of the panel by using optimal electrical load were measured during a year under Sanliurfa meteorological conditions. Besides, the influence of panel slope on power output was determined by using two panels: one of which had optimal monthly slope angle, the other had constant yearly slope angle. Finally, the optimal electrical loads were determined for multiple panels having different electrical configurations. The configurations investigated were $2s*2p$ (2 series + 2 parallels), $1s*4p$, and $4s*1p$.

EK 1. Ölçüm sistemine ilavesi yapılan Solarix 900RI tipi inverterin teknik özellikleri

Options

- types with 115 V / 60 Hz or 230 V / 60 Hz

Features

- sinewave inverter with 550 W or 900 W
- inverter with optional solar charge controller in one device
- high overload capabilities
- optimum protection of the battery
- automatic load detection in stand-by mode

Electronic Protections

- battery deep discharge protection
- battery over voltage shut down
- over temperature and over load protection
- short circuit protection
- reverse polarity protection by internal fuse

Displays

- operational status inverter by tricolour LED
- optional charge regulator shows operational status by additional tricolour LED and 16-digit LCD display



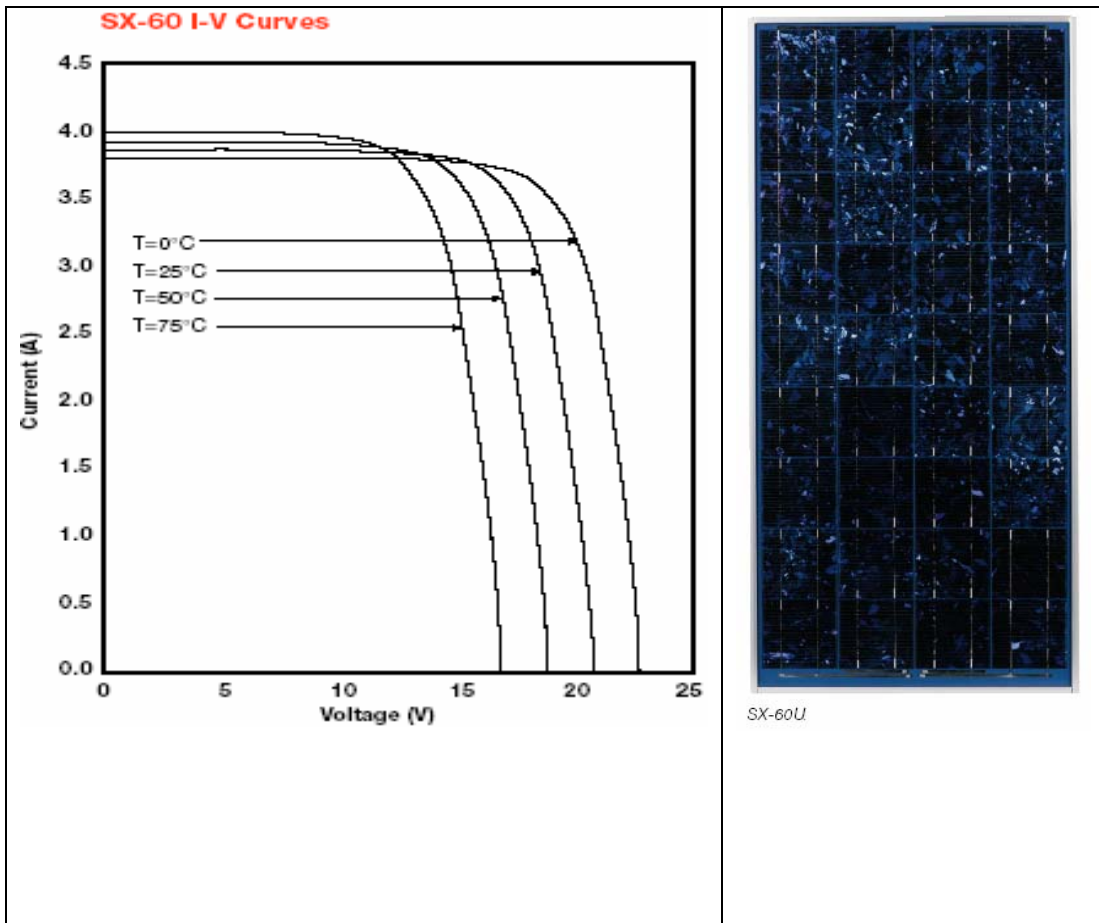
Inverter Solarix Sinus	550 I / 550 RI*	550 I-L60 / 550 RI-L60*	900 I / 900 RI*	900 I-L60
nominal input voltage	12 V		24 V	
input voltage range	10.5 - 16 V		21 - 32 V	
max. module short-circuit current*	25 A*			
max. DC load current*	15 A*			
output voltage	230 V +/-10 % (true sine wave)	115 V +/-10 % (true sine wave)	230 V +/-10 % (true sine wave)	230 V +/-10 % (true sine wave)
output frequency	50 Hz +/-0.5 % optional 60 Hz	60 Hz +/-1 %	50 Hz +/-0.5 % optional 60 Hz	60 Hz +/-1 %
continuous power	550 VA	500 VA	900 VA	900 VA
maximum efficiency	91.5 %	91 %	92 %	91.5 %
self consumption	430 mA / 50 mA / 15 mA (on / standby / off)			
connection DC / AC	integrated terminal block 16 mm ² / standard AC plug + cable included			
operating temperature	-15 °C to +45 °C			
protection class	IP 20			
weight	5.5 kg		7.5 kg	
dimensions l x w x h	312 x 245 x 114 mm			
* only by RI versions (with integrated solar charge regulator)				

Technical data at 25 °C / 77 °F

EK 2. Ölçümlerde kullanılan PV panellerin teknik özellikleri

Typical Electrical Characteristics⁽¹⁾

	SX-55	SX-60	SX-65
Maximum power (P_{max})	55W	60W	65W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	16.5V	16.8V	17.2V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.33A	3.56A	3.77A
Guaranteed minimum P_{max}	50W	55W	60W
Short-circuit current (I_{sc})	3.69A	3.87A	4.06A
Open-circuit voltage (V_{oc})	20.6V	21.0V	21.5V
Temperature coefficient of I_{sc}	----- $(0.065 \pm 0.015)\%/^{\circ}C$ -----		
Temperature coefficient of V_{oc}	----- $-(80 \pm 10)mV/^{\circ}C$ -----		
Temperature coefficient of power	----- $-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}C$ -----		
NOCT ²	----- $47^{\circ} \pm 2^{\circ}C$ -----		



EK 3. KEITHLEY 2000 Digital Multimeter (Model 2000 6-1/2-Digit DMM)



The Model 2000 6 1/2-digit Multimeter is part of Keithley s family of high performance DMMs. Based on the same high speed, low noise A/D converter technology as the Model 2001 and 2002, the 2000 is a fast, accurate, and highly stable instrument that s as easy to operate as it is to afford. It combines broad measurement ranges with superior accuracy specifications — DC voltage from 100nV to 1kV (with 0.002% 90-day basic accuracy) and DC resistance from 100 μ W to 100MW (with 0.008% 90-day basic accuracy). Optional switch cards enable multiplexing up to 20 different input signals for multipoint measurement applications.

Key Features and Benefits:

- 13 built-in measurement functions
- 2000 readings/second at 4 1/2 digits
- Optional scanner cards for multipoint measurements
- IEEE-488 and RS-232 interfaces

EK 4. CM11 Kipp & Zonen Secondary Standard Pyranometer

The Kipp & Zonen secondary standard pyranometer is suitable for the measurement of solar irradiance on a plane surface.



The CM11 sensor with FTS designed SDI-12 interface, incorporates a 100 thermocouple sensor, imprinted on a thick-film substrate housed under K5 glass domes. The sensor is rotationally symmetrical. A white screen prevents the body of the pyranometer from heating up. A drying cartridge keeps the interior free from humidity. All pyranometers are supplied with a calibration certificate which also shows the level of directional error. This sensor has ISO 9060 secondary standard classification.

- Unsurpassed nighttime zero offset specifications (non-ventilated)
- Unsurpassed long-term stability of sensitivity.
- Unsurpassed levelling accuracy.
- Unsurpassed directional response.
- Active temperature compensation.
- Zero Tilt Error.
- Fast response time.
- Near perfect linearity.

Recommended for performance testing of solar collectors by the International Energy Agency (IEA)

The interface provides conversion from low level sensor output to digital SDI-12 format. The SDI-12 digital signal is low power and yet far more resistant to data errors than a low power analog signal, greatly reducing the likelihood of corrupt data due to interference. Calibration information for the sensor is stored within the SDI interface case which eliminates the need to enter calibration values in the datalogger.

SDI-SR-CM11 Specifications :

Spectral range: (50% points) 305-2800 nm

Sensitivity: 4-6 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$

Impedance: 700-1500 ohm

Response time: (1/e) 4 s

Response time: (99%) 24 s

Non-linearity: (1000 W/m^2) < 0.6%

Tilt error: (1000 W/m^2) none

Operating temperature: -40°C to +80°C

Temperature dependence of sensitivity: $\pm 1\%$ (-10 to +40°C)

Maximum irradiance: 4000 W/m^2

Directional error: (at 1000 W/m^2) < $\pm 10 \text{ W}/\text{m}^2$

Weight: 0.85 kg

Cable length: 10 m

EK 5. Multimeter 32 Ranges - 3-1/2 Digit Model MY-64

This multi-function DMM has just about everything, including a low price. In addition to standard volt/current/res features, it also offers temperature, capacitance, frequency and diode/transistor testing.

- 30 x 60 mm LCD Display
- Temperature: -20 degrees C - 1,000 degrees C
- Auto Power Off +/- 4%
- Diode check, HFE 1 ~ 1,000
- Frequency
- AC/DC voltage, current, resistance
- Protective rubber boot included
- Continuity Buzzer
- Size: 91 x 189 x 31 mm

Specifications:

DC Volts: To 1,000V, 5 Ranges

AC Volts: To 700V, 4 Ranges

DC Current: To 10A, 4 Ranges

AC Current: To 10A, 4 Ranges

Resistance: To 200m, 7 Ranges

Capacitance: 5 Ranges to 20uF

Frequency: 20KHz +/- 1.5%

