



PV PANEL GÜÇ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

Metin AYDIN ve Bülent YEŞİLATA

Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa
aydinmetin@harran.edu.tr, byesilata@harran.edu.tr

(Geliş Tarihi: 02. 08. 2004)

Özet: Bu deneysel çalışmada bir fotovoltaik (PV) panel tarafından tahrik edilen eşdeğer direnci sabit bir lineer elektriksel yük (cihaz) dikkate alınmaktadır. Bu şartlarda bir elektriksel cihazın PV paneller ile birlikte kullanımı birçok uygulamayı (tüm elektrikli ev cihazları, su ısıtıcıları, aydınlatma araçları vs.) temsil etmektedir. Temel amaç; seçilmiş lineer bir yükte PV panel güç karakterizasyonu ve paneli maksimum çalışma noktalarına yaklaştıracak optimum direnç değerinin tespitidir. Yani; panel maksimum çalışma noktalarından geçen lineer olmayan I-V eğrisi ile yüke ait lineer I-V eğrisinin yakınsanma derecesinin minimum olduğu direnç değerinin deneysel yöntemle belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar, sabit dirençli bir elektriksel yüke (cihaza) bağlı PV panelin tüm ısıtım şiddetlerinde maksimum verimle çalışamayacağını, ancak yörenin meteorolojik koşullarına bağlı olarak tüm ısıtım güç eğrisine en yakın yük eğrisini verecek optimal bir direnç değerinin bulunduğunu doğrulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik (PV) panel karakterizasyonu, Lineer elektriksel yük, Maksimum verim, Optimal direnç

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF POWER CHARACTERISTICS OF A PV PANEL

Abstract: In this experimental study, a photovoltaic (PV) panel driving a linear electrical load (device) that has a constant-total-resistance is considered. This type of arrangement can be found in many applications, such as all electrical home appliances, water-heaters, and lightening devices. The main objects of the study are first to characterize PV panel at a selected linear load and then to determine optimal value of the resistance that provides PV panel to operate near to maximum power points. In other words, it is experimental determination of the resistance value that assure the minimum deviation between nonlinear I-V curve passing through from panel maximum power points and linear load I-V curve. Experimental results confirm that a PV panel coupled with a linear electrical load of constant resistance can not always operate with maximum efficiency; but an optimal resistance value depending on the site's meteorological conditions exist to reach the best possible operation efficiency.

Keywords: Photovoltaic (PV) panel characterization, Linear electrical load, Maximum efficiency, Optimum resistance

SEMBOLLER

H	Işıtım şiddeti (W/m^2)
H*	Boyutsuz ısıtım şiddeti
H _{STC}	Standart test koşullarındaki ısıtım
I _m	Maksimum güç noktasındaki akım değeri
MPP	Maksimum güç noktası
P	Güç (W)
P*	Boyutsuz güç
R	Elektriksel direnç (ohm)
t	Zaman
V _m	Maksimum güç noktasındaki voltaj değeri
η	PV panel verimi (%)
η^*	Boyutsuz verim
η_{mpp}	Maksimum güç noktasındaki verim

1. GİRİŞ

Yeryüzüne gelen güneş ısıtımından ısı ve elektrik üreten güneş enerjisi teknolojileri tasarım, uygulama alanı ve teknoloji düzeyi bakımından büyük çeşitlilik göstermekle birlikte güneş enerjisi uygulamaları esas olarak Termal Sistemler ve Fotovoltaik Sistemler olmak üzere 2'ye ayrılır (Hsieh, 1986). Fotovoltaik sistemler, yarı iletken malzemelerden oluşmuş hücrelerle güneş ısıtımını kullanarak doğru akım üreten cihazlardır (Duffie ve Beckman, 1991). Maliyet ve verim açısından en uygun PV hücresi silisyum hücreleridir. Silisyum hücrelerinin verimleri % 12 civarındadır (Green ve Emery, 1993). Pratik uygulamalarda kullanılan PV sistemler; sistemde kullanılan bileşenlerin ve kontrol sisteminin konumuna

bağlı olarak üç farklı kombinasyonda düzenlenebilir: sistem yükünün hiçbir ara düzenleyicisi olmadan direkt PV panellere bağlandığı direkt bağlantılı kombinasyonlar, sistem yükü ile PV paneller arasına bataryaların yerleştirildiği bataryalı kombinasyonlar ve son olarak; maksimum çalışma noktası izleyicili (maximum power-point tracking, MPPT) kombinasyonlar (Fıratoglu, 2003).

Direkt bağlı PV sistemlerde, panellerden ısıtım şiddetiyle değişen değerlerde çıkan gerilim ve akım, elektrik enerjisi kullanan cihaza direkt olarak verilir ve cihazın çalışması ancak ihtiyaç duyduğu gücü (sistem yükü) sağlayan gerilim ve akım değerlerinin temini ile mümkün olur (Fıratoglu ve Yeşilata, 2004). Bataryalı sistemlerde; panel ile cihaz arasındaki batarya sistemi güneş ısıtım şiddetindeki değişimleri direkt olarak cihaza yansıtmadan sabite yakın bir voltaj ile cihazı çalıştırır (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003a). Ancak cihaza ulaştırılan voltaj ve akım değerleri maksimum güce karşılık gelen akım ve voltaj değerlerinin altında seyreder. Söz konusu bu iki kombinasyona alternatif olarak ortaya çıkan maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) sistemlerin, PV panelin her zaman maksimum güç üretecek noktasında çalışmasını temin etmesinden dolayı çalışma performansları daha yüksektir (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003b). Sistemde; PV panelin ürettiği maksimum güce karşılık gelen voltaj, bir düzenleyici yardımıyla, cihazın ihtiyaç duyduğu voltaja dönüştürülür. Maksimum sistem verimliliği için önemli koşullardan biri, panel maksimum güç koşullarını sağlayan akım ve voltaj değerlerinin, yük (cihaz) I-V karakteristik eğrisinin üzerinde olmasıdır. Bu nedenle, MPPT içeren PV sistemlerin dizayn aşamasında en önemli unsurlardan biri uygulamadaki yük profilinin bilinmesidir. 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).

PV 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 problemi ve hedefe ulaşmada ilk yaklaşım sistemin maksimum güç noktalarında çalışmasının teminidir. Ancak, PV panel sisteminin kullanım yeri ve amacına uygun olarak optimizasyonunda çeşitli zorluklar söz konusudur. Öncelikle; PV sistem elektriksel güç çıkışı, diğer güneş enerjisi uygulamalarından farklı olarak, ısıtım şiddeti ve çevre sıcaklığı yanında, güç temin ettiği elektriksel cihazın (yükün) iç direncine bağlı olarak da 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 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 ısıtım seviyesi aralıklarının doğru belirlenmesidir. Bunun en önemli sebebi; PV sistemin akım ve gerilim karakteristikleri, dolayısıyla, güç çıktıları ısıtım 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 ısıtım şiddeti aralığı, PV panel ve yük elektriksel karakteristikleri üçgeni içerisinde yapılması gerekmektedir (Fıratoglu ve Yeşilata, 2004). 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. 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.

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, 2003c). İzlenen metotta temel prensip; panele bağlı elektriksel yükün akım ve gerilim değerleri arasındaki lineer ilişkiden yararlanarak panelin maksimum çalışma noktalarına en yakın (optimum) direnç değerinin tespitidir. Yani; panel maksimum çalışma noktalarından geçen lineer olmayan I-V eğrisi ile yüke ait lineer I-V eğrisinin yakınsanma derecesinin minimum olduğu direnç değerinin deneysel yöntemle belirlenmesidir. Bu durum daha önceki çalışmada teorik olarak irdelenmiştir (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003c).

Bu deneysel araştırmada çok sayıda parametrenin birlikte ölçümü gerektiğinden, bilgisayar destekli bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Düzenek yardımıyla panel eğimi, panele bağlı yük direnci, panel akımı ve voltajı, toplam güneş ısıtım şiddeti ve çevre sıcaklığı değerleri ölçülmüştür. Tek panelli bir PV sistemin akım (I)-gerilim (V) eğrileri farklı ısıtım şiddeti ve farklı elektriksel yük değerleri için tespit edilerek, PV panelin maksimum gücü üretebileceği yük direnci değerleri

TEORİK ESASLAR

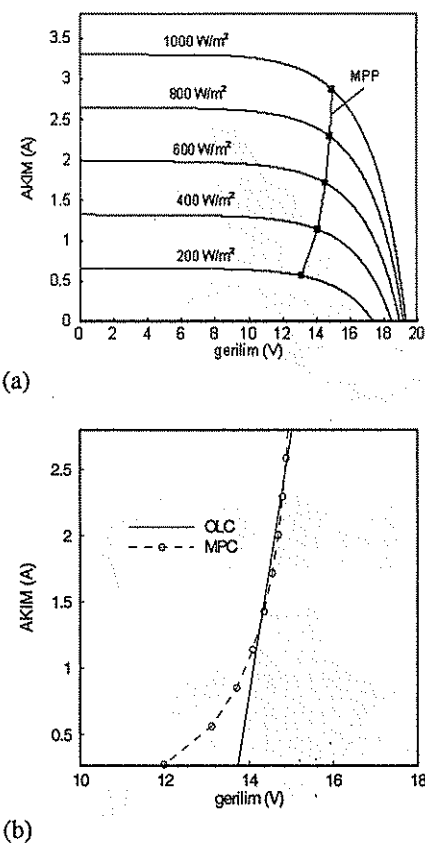
PV sistem çıktısının yüke bağlı olarak büyük bir oranda değişim gösterebilmesi, PV sistemlerin dizayn ve optimizasyon sürecinde yaşanan en önemli sorunlardan biridir. Bu sorun, PV sistemleri uygulama bazında diğer güneş enerjisi uygulamalarından farklı kılması dolayısıyla, sistem performansını direkt güneş ışı-
nımı ve çevre sıcaklığına bağımlı bir şekilde ifade edebilecek bir matematiksel model önermede büyük sıkıntıların yaşanmasına sebep olmaktadır (Appelbaum, 1981; Fıratoglu ve Yeşilata, 2001a). Bu sorunun çözümü için genellikle ilk aşamada panellerin karakteristik çalışma eğrileri tespit edilir, daha sonra sistem yükü çalışma eğrilerinin, panel karakteristikleriyle çıkışma noktalarının saptanması şeklinde bir grafiksel süreç izlenir (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003c). Bu çalışmada da benzer bir süreç izleyen deneysel bir yöntem önerilmektedir. Literatürde PV panel için I-V karakteristiklerini ifade eden çok sayıda matematiksel model bulunmakta olup bu modellerin ortak yanı genelde eksponansiyel birer fonksiyon olmalarıdır. Normal şartlar altında bir panelin akım-gerilim ilişkisini yüksek hassasiyetle tespit etmede gerekli parametre sayısı beş olmasına karşın, mükemmel şartlarda dizayn edilmiş hücreler için panelin şönt (paralel) direnci ihmal edilerek düzenlenen;

$$V = A * \left[\ln \left(\frac{I_L - I}{I_0} + 1 \right) \right] - I * R_s \quad (1)$$

denklemleri ile bu ilişki dört parametrenin bilinmesi suretiyle tespit edilebilir (Bknz: Kou vd., 1998). Denklemden yer alan parametrelerden I_L kısa devre akımı, I_0 karanlık akım, A sıcaklık katsayısı ve R_s seri direnç değerini göstermekte olup, bu dört parametre sıcaklığın ve ışı-
nım şiddetinin birer fonksiyonudurlar. Denklem (1), $V=f(I)$ şeklinde, analitik yolla çözümü mümkün olmayan bir denklem olmasına karşın, çözüm için gerekli dört parametre panel üreticileri tarafından hazırlanan katalog bilgilerinde mevcut standart test şartlarındaki (1000 W/m^2 ve 25°C panel sıcaklığı) akım ve voltaj verilerinden yararlanmak suretiyle hesaplanabilmekte ve daha sonra V-I değerleri nümerik yolla bulunabilmektedir.

Bu açıklamaya örnek olmak üzere bir PV panele ait farklı ışı-
nım şiddetlerinde elde edilen V-I karakteristik eğrileri Şekil 1a' da gösterilmektedir. Grafik üzerinde her eğri üzerinde panel çıkış gücünü maksimum yapan akım (I_m) ve gerilim (V_m) değerlerinin bulunduğu maksimum çalışma noktaları da (MPP) gösterilmiştir. MPP noktalarında elektrisel güç üretimi, sistemden maksimum ölçüde yararlanabilmek için kesinlikle

gereklidir. Ancak bu durumun gerçekleşmesi, panelin bağlı olduğu cihazın (yükün) I-V eğrilerinin bu noktalardan geçmesiyle mümkündür (Fıratoglu ve Yeşilata, 2001b). Pratikte bu amaçla kullanılan cihazların (maksimum güç noktası izleyicileri) ekonomik olmaması nedeniyle bu çözüm ancak çok büyük sistemler ve genellikle su pompası uygulamaları için kullanılmaktadır. Bunun yerine daha ekonomik ve güvenilir bir çözüm olarak, I-V çalışma eğrisi lineer olarak değişen elektrisel yükler için seçilen PV panel MPP noktalarından geçen eğriye en yakın olarak çalışabileceği bir optimum direnç değeri (R_{opt}) tespit etmektir. Bu çalışmanın temel amacı; daha önce teorik olarak irdelenen ve Şekil 1b'de gösterilen (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003c), optimize edilmiş yük eğrisi (OLC) ve panelin maksimum güç eğrisi (MPC) arasındaki farkın minimum olduğu çalışma koşullarını deneysel olarak belirlemektir.



Şekil 1. (a) PV panelin I-V karakteristikleri ve maksimum çalışma noktaları (MPP), (b) Optimize edilmiş yük eğrisi (OLC) ve panelin maksimum güç eğrisinin (MPC) gösterimi (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003c).

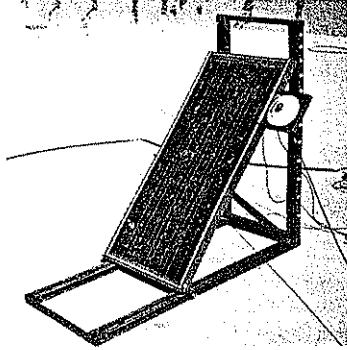
DENEYSEL DETAYLAR

PV Panel Sistem Şehpası

PV panel üzerine gelen güneş ışı-
nımının maksimum olabilmesi için panel düzleminin ışınlara dik bir şekilde güneşi takip etmesi gerekir. Ancak, pratik

uygulamalarda güneşi takip eden sistemlerin yapımı zor ve pahalı olduğundan, sabit yerleştirilmiş yüzeylerin uygulaması daha yaygındır. Bu tür yüzeylerin efektif bir şekilde çalışmaları için tespit edilen kullanım süreci ve sezonu bazında optimum bir eğim ve azimut açısıyla yerleştirmeleri gerekmektedir. Birçok güneş enerjisi sistemleri için yıllık bazda eğim açısı optimizasyonu yeterli olabilmesine karşın, PV sistemlerde elektrik enerjisi çıktısını arttırabilmek için aylık bazda eğim açısı optimizasyonuna ihtiyaç söz konusudur. Panel eğim açısı optimizasyonuna yönelik detaylı bilgiler daha önceki çalışmalarda (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003c) mevcut olup, bu deneysel çalışmada panel için düşük maliyetli bir sehpa dizaynı gerçekleştirilmiştir.

Tekli ve çoklu panel uygulamasına yönelik, sırasıyla 5 ve 3 derece aralıklarla eğimi ayarlanabilecek sehpa Şekil 2a ve b'de gösterilmiştir. Sehpa, paneller aynı açıda yerleştirilmesi gereken bir ışınlım-ölçerin monte edilebileceği bir düzlemsel yüzeye sahiptir.



(a)



(b)

Şekil 2. a) Eğimi 5'er derece aralıklarla ayarlanabilen tekli PV panel sehpa, (b) eğimi 3'er derece aralıklarla ayarlanabilen çoklu PV panel sehpa.

DENEYSEL YÖNTEM VE SONUÇLAR

Eşdeğer Direnci Sabit Bir Elektriksel Yükün Kullanılması

Elektriksel yük daha önce bahsedildiği üzere, PV panelin gerçek akım-voltaj çıktılarını alabilmek için devreye bağlanan ve üretilen elektrikle çalıştırılan cihazı temsil eden bir dirençtir. Kullanılacak direnç değerinin tespitinde panelin standart test koşullarında

maksimum güç üretmesini sağlayacak volt ve akım değerlerinden (Bknz: Ek-1) yararlanılmıştır. Bu değerler kullanılarak,

$$R = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (2)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanan direnç ($R=4,72 \Omega$) PV panele bağlanarak gün boyunca ölçümler yapılmıştır.

Veri Ölçüm ve Kayıt Sistemi

Fotovoltaik sistemin dış atmosfer şartlarındaki akım-gerilim değerlerini ölçmek amacıyla bir veri kayıt sistemi kurulmuştur. Kurulan sistem; multimetre, piranometre, ampermetre, bilgisayar ve üretilen elektrikle çalıştırılan cihazın iç direncini temsil eden bir sürgülü direnç (yük)'ten oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan ve teknik özellikleri Ek-1'de verilen 1 adet PV panel ve piranometre 20° eğim açısı ile PV sistem sehpaına yerleştirilmiştir. PV panel ve piranometrenin çıkış uçları, panel voltaj ve akımını ölçmek için hazırlanan devrenin giriş uçlarına bağlanmıştır. Şekil 3a'da şematik olarak gösterildiği üzere, voltaj ölçmek için kullanılan multimetrenin uçları devredeki yüke paralel, ampermetrenin uçları ise yüke seri olacak şekilde bağlanmıştır. Deneyler sırasında PV panelin voltaj değerleri 09:00-16:00 saatleri arasında sürekli olarak (1'er dakika aralıklarla); akım, güneş ışınlımı ve çevre/panel sıcaklığı değerleri ise 30'ar dakika aralıklarla kaydedilmiştir. Ölçüm ve kayıt sistemini oluşturan cihazların şematik bağlantısı Şekil 3b'de gösterilmektedir.

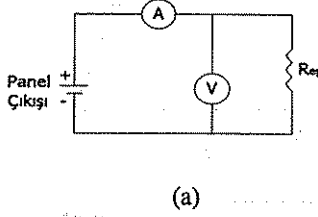
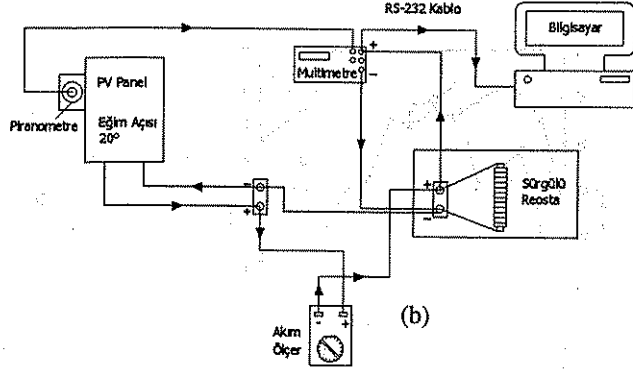
Farklı ay ve günlerde yapılan ölçümler sonucu, dış ortam hava koşullarındaki ani değişimlerin, PV panel gücünü önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Bu ölçümlere bir örnek olmak üzere, hava koşullarının değişken olduğu bir güne ait (26/05/2004) sonuçlar Şekil 4a ve 4b'de gösterilmektedir.

Şekil 4a'da gösterilen ve 1'er dakika aralıkla ölçülen anlık voltaj değerleri PV panelin dinamik hava koşullarına anlık tepkisini, ani voltaj düşümleri ile göstermektedir. Şekil 4b'de gösterilen ve 30 dakika aralıkla kaydedilen akım, gerilim ve ışınlım şiddeti değerleri sadece değer alınan anlara ait meteorolojik değişiklikleri yansıttığından, iki ölçüm noktası süresince PV panelden elde edilen güçteki dalgalanmalar hakkında bir fikir vermekten uzaktır. Bu nedenle, PV panelin gün boyunca ürettiği gücün hassas olarak tespiti için verilerin mümkün olduğu kadar kısa aralıklarla ölçümü gerekli gözükmektedir. Uzun dönem performans değerlerinin tespitinde ise, mevcut ölçümlerin aylık ya da mevsimlik bazda irdelenmesi daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

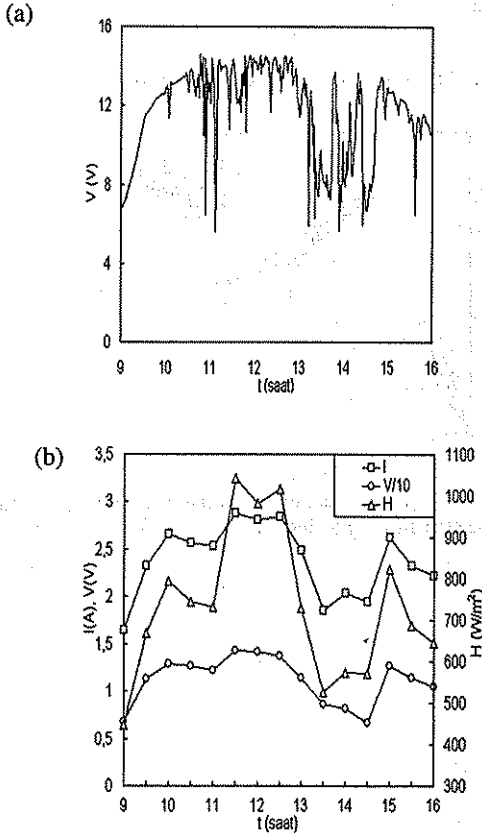
Deneylerden elde edilen voltaj ve akım değerlerinin çarpımı, PV panelden elde edilen güç değerini ($P=IV$) verir. Aynı şekilde panel verimi, panelden elde edilen

gücün panel yüzeyine gelen ışıma ile panel alanının çarpımına oranıdır ($\eta = P/HA$). Şekil 4b'deki ölçüm değerleri yardımıyla hesaplanan panel güç ve verim değerlerinin zamanla değişimi Şekil 5a'da ve bu değerlerin kullanılan PV panele ait standart test koşullarındaki değerlere oranını gösteren boyutsuz güç

($P^* = P/P_{mpp}$) ve verim ($\eta^* = \eta/\eta_{mpp}$) değerleri ile boyutsuz ışıma şiddeti değerleri ($H^* = H/H_{STC}$) ise Şekil 5(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) PV panel I-V ölçümü eşdeğer elektriksel devresi, (b) Veri ölçüm ve kayıt sistemini oluşturan bileşenler.



Şekil 4. (a) Anlık gerilim değerleri, (b) Akım-gerilim-ışıma değerlerinin zamana göre değişimi.

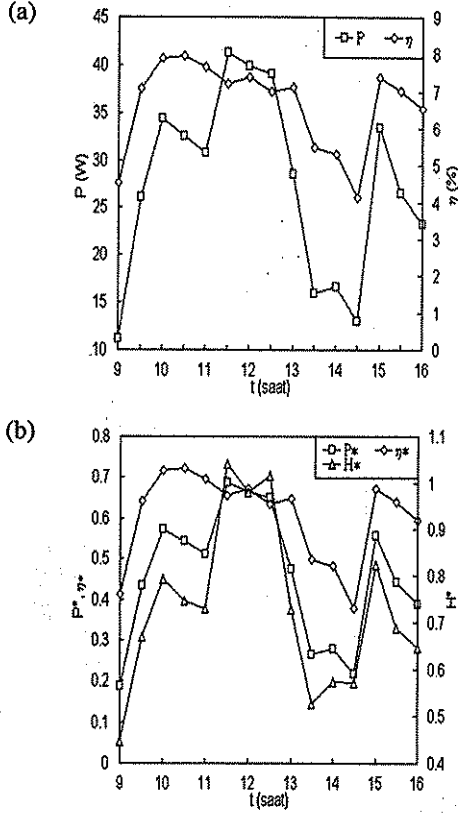
Boyutsuz değerler, PV panelden beklenen çalışma koşullarına ne kadar yaklaşıldığının belirlenebilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Şekil 5b'den görüleceği üzere $H^*=1$ şartları sağlandığı halde P^* ve

η^* için bu değerler yaklaşık 0.7 düzeyindedir. Bu kayıpların en önemli nedeni deneyler sırasında çevre dolayısıyla panel yüzey sıcaklığının yükseklidir. Çevre sıcaklığı 33-37°C arasında seyrettiğinden, panel yüzeyinin ortalama 50°C ve üzeri sıcaklıklarda çalışması söz konusudur. PV panelin 25°C için verilen güç değeri artan her 1°C sıcaklık için ortalama 0.4 W kayba yol açmaktadır. Diğer kayıp faktörleri olarak; laboratuvar şartlarında ölçümü yapılan ve güneş ışıma simülasyonu kullanılarak elde edilen katalog verileri ile gerçek atmosferik koşulların farklı olması, panel yüzeyine birikmesi önlenemeyen tozlanma ve sabit olarak seçilen elektriksel yük direncinin, bazı ışıma şiddeti değerlerinde, panel maksimum çalışma noktasından uzaklaşmasıdır. Şekil 1b'de sözü edilen bu durumu açık olarak görmek mümkündür. Sabit bir direnç değerine uygun olarak elde edilen çalışma eğrisi (OLC) ile, panel maksimum güç eğrisi (MPC), arasında grafiğin alt bölgelerinde bir ayrılma söz konusudur. Bu nedenle; yük optimizasyonu yapılırken, tüm ışıma şiddeti değerlerinde maksimum güç noktasına ulaşma hedefinden ziyade, sistemin uygulandığı bölgenin etkin ışıma şiddeti aralıklarında, iki eğri arasındaki farkın en aza indirilmesi hedeflenmelidir (Fıratoglu ve Yeşilata, 2004).

PV Panel İçin Optimal Elektriksel Yük Direncinin Belirlenmesi

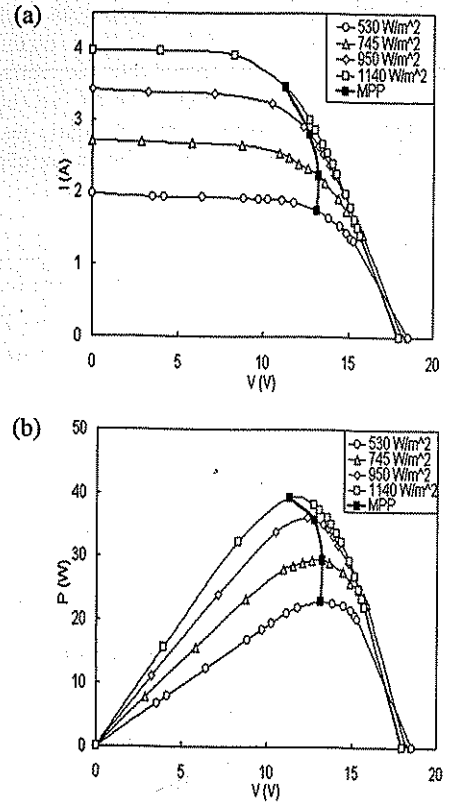
PV sistem çıktıları güç temin edilen elektriksel cihazın (yük) iç direncine bağlı olarak önemli ve lineer olmayan bir değişim gösterdiği için, kullanılan PV panelin sabit ışıma şiddetindeki akım-gerilim ve güç-direnç ilişkileri de araştırılmıştır. PV panelin sabit bir ışıma şiddetindeki I-V ilişkisini görmek için, öncelikle panelin yüksüz haldeki akım (I_{sc}) ve gerilim (V_{oc})

değerleri ölçülmüş ve hemen ardından ısıtım şiddetinin yaklaşık sabit kabul edilebileceği çok kısa bir süre içerisinde, PV panele farklı yükler uygulanarak her bir yük değerindeki akım ve gerilim değerleri kaydedilmiştir. Ölçümler günün değişik saatlerinde olmak üzere, 4 farklı ısıtım şiddeti değeri için 14 farklı yükte tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 6a ve 6b'de gösterilmiştir.

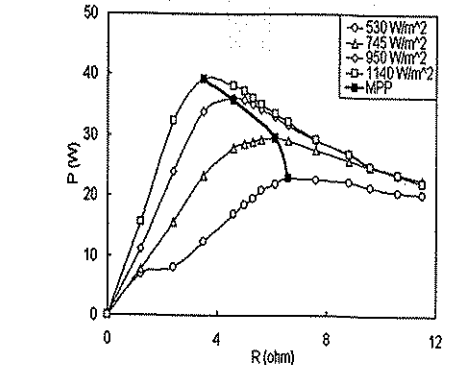


Şekil 5 (a) Güç ve verim değerlerinin gün boyunca değişimi (b) Boyutsuz güç, boyutsuz verim ve boyutsuz ısıtım değerlerinin gün boyunca değişimi.

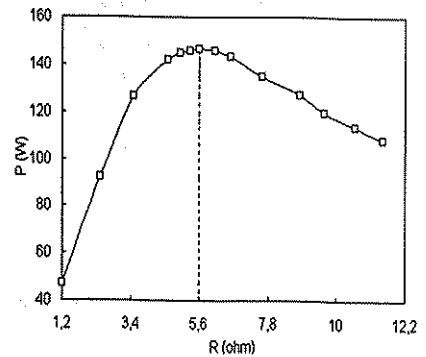
PV panelin karakteristik eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan dirençlerle, bu değerlere karşılık gelen panel gücü değerleri Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekilde, her bir ısıtım şiddeti için ulaşılan maksimum güce ait noktaların oluşturduğu eğri, deneysel olarak tespit edilen MPP eğrisidir. Bu eğri beklenildiği üzere sabit bir direnç değerini temsil etmemektedir. Optimum yük direncinin belirlenmesi amacıyla, yukarıda bahsedilen 14 farklı yük direncinin her biri için, panelin Şekil 7'de gösterilen 4 farklı ısıtım şiddetinde ürettiği güç toplamı hesaplanmıştır. Her bir yük direnci için elde edilen toplam PV panel güçleri Şekil 8'de gösterilmektedir. En yüksek gücün elde edildiği $R_{opt}=5,6 \Omega$ değeri, optimal yük direnci değerini temsil etmekte olup, grafikte bu nokta kesikli düşey çizgi ile belirtilmiştir.



Şekil 6. (a) Panel V-I eğrisi, (b) Panel V-P eğrisi.



Şekil 7. Farklı ısıtım şiddetlerinde kullanılan dirençler ve bu dirençlerle elde edilen güç değerleri.



Şekil 8. Panelin deneylerde kullanılan her bir direnç için dört farklı ısıtım şiddetinde ürettiği güçlerin toplamı (kesik çizgili düşey hat en yüksek güç çıktısının elde edildiği direnci belirtmek için kullanılmıştır).

SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Bu çalışmada, eşdeğer direnci sabit elektriksel yüke bağlı bir PV panelin (Solarex SX60U) I-V karakteristik eğrileri deneysel yöntemle belirlenmiştir. Sonuçlar, ışınım şiddetinin modül akımı üzerindeki etkisinin yüksek olduğunu göstermektedir. Işınım şiddetinin yükselmesi, oransal olarak aynı miktarda modül akımının da yükselmesini sağlamaktadır. Işınım şiddetinin, panel gerilim çıktısı üzerindeki etkisi daha azdır. PV panelden elde edilecek günlük elektriksel gücün doğru olarak tespiti için, anlık I-V değerlerinin sürekli ve kısa (1-2 dakika) aralıklarla kaydedilmesi gereklidir. Çünkü sistem ani hava değişimlerinden direkt etkilenmekte ve güç çıktısındaki bu değişimin sürekli izlenmemesi, günlük panel performansının yanlış değerlendirilmesine sebep olabilmektedir.

Ayrıca mükemmel laboratuvar (standart test koşulları) koşulları altında yapılan ölçümlerden yararlanılarak hazırlanan katalog verilerine dinamik ve gerçek meteorolojik şartlar altında ulaşılması mümkün gözükmemektedir. Kurulacak sistemin bileşenleri arasında oluşabilecek uyumsuzluklar, devrede oluşabilecek bağlantı kayıpları ve Şanlıurfa ili gibi sıcak yörelerde görülen çok yüksek çalışma sıcaklığı parametreleri de göz önüne alındığında kullanıcı bu verilerin en az % 10 eksikliği ile projelendirme yapmalı ve sistemi kullanım sırasında toz ve gölge faktöründen korumalıdır. Çalışmanın diğer bir aşaması olan optimal elektriksel yük profilinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler; tüm ışınım şiddeti değerlerinde maksimum güç temin eden panel I-V değerlerine ulaşmanın mümkün olamayacağını göstermektedir. Panelin tüm ışınım şiddeti değerlerinde maksimum güç noktalarında çalışmasını sağlamak için panel ile yük arasına, bir maksimum güç noktası izleyicisi olarak da bilinen elektronik bir kontrol devresinin eklenmesi gerekli olup, bu çözüm maliyetin yükselmesine neden olacaktır. Bunun yerine; yöresel ışınım potansiyeli ve sistemin uygulanacağı dönem göz önüne alınarak, sınırlı bir ışınım şiddeti aralığı için optimal yük değerinin belirlenmesi daha ekonomik bir çözüm olarak tercih edilmelidir. Sistem kullanıcısının bu nedenle ilgili dönem için kullanılabilirlik düzeyi en yüksek kritik ışınım şiddeti aralığını doğru tespiti gereklidir. Bu kritik değer aralığı, daha önceki teorik çalışmada (Fıratoglu ve Yeşilata, 2003c), Şanlıurfa ili ve yıl boyunca kullanım için 500-900 W/m² olarak tespit edilmiştir. Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ise; aynı il, fakat yaz döneminde kullanım için efektif ışınım şiddeti aralığının 850-1150 W/m² olduğunu göstermektedir.

Ek-1: Solarex SX60U PV Panelin Standart Test Koşullarındaki* Teknik Özellikleri

Nominal Gücü	60 W
Açık devre gerilimi	21 V
Maksimum noktada panel gerilim çıktısı	16,8 V
Kısa devre akımı	3,87 A
Maksimum noktada panel akım çıktısı	3,56 A
Panel verimi	% 10,8
Panel boyutları (mm)	1110x502x50
Standart test koşulları: H=1000 W/m ² , T=25 °C	

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya maddi destek veren Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonuna (HÜBAK Proje No: 457) teşekkürü bir borç biliriz. Ayrıca, bu deneysel çalışmalarına çeşitli seviyelerdeki katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Hüsamettin Bulut, Mak.Müh. M.Selim Üçgül ve Elektrik-Elektronik Mühendisi Hadi Süzer'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Appelbaum, J., "Performance Analysis of DC Motor-Photovoltaic Converter System-II", *Solar Energy*, 27, 421-431, 1981.

Duffie, J. A. and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.

Fıratoglu, Z. A., Fotovoltaik Destekli Su Pompalarının Analizi ve Optimizasyonu", *Y. Lisans Tezi*, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2003.

Fıratoglu, Z. A., Yeşilata B. " New approaches on the optimization of directly-coupled photovoltaic water-pumping systems " *Solar Energy*, 77, 1, 81-93, 2004.

Fıratoglu, Z. A., Yeşilata B., "Bataryalı ve Direkt Akupleli Fotovoltaik Pompa Sistemlerinin Çalışma Karakteristiklerinin Araştırılması", *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 2, 1-11, 2003a.

Fıratoglu, Z. A., Yeşilata B., "Maksimum Güç Noktası İzleyicili Fotovoltaik Sistemlerin Optimum Dizaynı ve Çalışma Koşullarının Araştırılması", *Dokuz Eylül Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5, 1, 2003b.

Fıratoglu Z. A., Yeşilata B., "Lineer Elektriksel Yüke Bağlı PV Panellerin Optimizasyonu ve Bölgesel Uygulanabilirliğinin Araştırılması", *Havacılık ve Uzak Teknolojileri Dergisi*, 64-70, Şubat-2003c.

Fıratoglu, Z. A., Yeşilata, B., "Fotovoltaik Destekli Su Pompası Uygulamasının Dinamik Analizi", *II. Gap ve Sanayi Kongresi Bildiriler Kitabı*, 541-549, 29-30, Eylül 2001a.

Fıratoglu, Z. A., Yeşilata, B., "Fotovoltaik Güç Destekli Dalgıç Pompa Sistemlerinde Optimum Dizayn Koşullarının Araştırılması", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 59-66, Nisan-Mart 2001b.

Green, M. A. and Emery, K. "Solar Cell Efficiency Tables" *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, 1, 25-29, 1993.

Hsieh S. J., *Solar Energy Engineering*, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.

Kou, Q., Klein, A., Beckman, W., "A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct-Coupled PV Pumping Systems", *Solar Energy*, 64, 33-40, 1998.

Yeşilata B, Aktacir A., "Fotovoltaik Güç Sistemli Su Pompalarının Dizayn Esaslarının Araştırılması" *Mühendis ve Makina Dergisi*, 42, 493, 29-34, 2001.

The first part of the study is devoted to the design of the PV pumping system. The design of the PV pumping system is based on the design of the PV array, the design of the pump, and the design of the control system. The design of the PV array is based on the design of the PV module, the design of the PV inverter, and the design of the PV controller. The design of the pump is based on the design of the pump motor, the design of the pump housing, and the design of the pump impeller. The design of the control system is based on the design of the control unit, the design of the control circuit, and the design of the control software. The design of the PV array is based on the design of the PV module, the design of the PV inverter, and the design of the PV controller. The design of the pump is based on the design of the pump motor, the design of the pump housing, and the design of the pump impeller. The design of the control system is based on the design of the control unit, the design of the control circuit, and the design of the control software.