

Su Soğutmalı Fotovoltaik Sistemin Performans Analizi

Halil Erol^{1*}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Karacaoğlan Yerleşkesi, 80000, Osmaniye

¹<https://orcid.org/0000-0001-6171-0362>

*Sorumlu yazar: halilerol@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 9 Kasım 2020

Kabul tarihi: 1 Nisan 2021

Online Yayınlanma: 1 Haziran 2021

Anahtar Kelimeler:

Elektriksel verimlilik

Maksimum güç

FV panel

FV su soğutma

Termal verimlilik

ÖZET

Bu çalışma ile fotovoltaik (FV) panellerin çalışma sıcaklıklarını harici soğutma düzenekleri ile azaltmak suretiyle verimliliklerinin artırılması Osmaniye yöresi için gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisinden elektrik üretirken panelin sıcaklığı artmakta ve bu da panel verimini azaltmaktadır. FV panelin ısısı, panelin arka yüzeyine yerleştirilen bakır plaka üzerine yerleştirilmiş bakır boru sistemi ile panel ısısının düşürülmesi böylelikle verimliliğin artırılması sağlanmıştır. Ayrıca, soğutmalı ve soğutmasız panel ısı ve elektriksel verimliliklerinin Osmaniye bölgesi şartlarında karşılaştırılması yapılmıştır. Her iki panel için aynı anda güneş ışınımı, hava/FV panel sıcaklığı, güç, akım ve gerilim gibi FV panel karakteristik değerleri ölçülmüştür. FV panellerin termal ve elektriksel enerji performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Genel verim için, su soğutmalı FV sisteminin %5,9 ile soğutmasız FV panelinden daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Performance Analysis of Water Cooled Photovoltaic Power Systems

Research Article

Article History:

Received: 9 November 2020

Accepted: 1 April 2021

Published online: 1 June 2021

Keywords:

Electrical efficiency

Maximum power

PV panel

PV water cooling

Thermal efficiency

ABSTRACT

The aim of this study consists of two stages. The first purpose is to increase the efficiency of photovoltaic (PV) panels by reducing their operating temperatures with external cooling devices to generate electricity from solar energy. The temperature of the photovoltaic panel (PV) is lowered by circulating water through the copper pipe system placed on the copper plate which is mounted on the rear surface of the panel, thus increasing the efficiency of the panel. The second objective is to compare the thermal and electrical efficiency of the refrigerated and normal panels under Osmaniye region conditions. PV panel characteristic values such as solar radiation, air/PV panel temperature, power, current and voltage were measured for both panels simultaneously. The thermal and electrical energy performance of PV panels was analyzed comparatively. For overall efficiency, it was observed that the water-cooled PV system was better than the normal PV panel with 5,9%.

To Cite: Erol H. Su Soğutmalı Fotovoltaik Sistemin Performans Analizi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 4(2): 142-148.

1. Giriş

Güneş enerjisinden elektrik üretmek için genel olarak ya direk dönüşüm yapan sistemler, yani FV panel kullanan sistemler veya dolaylı dönüşüm yapan sistemler, yani önce suyu ısıtarak buharından elektrik enerjisi üreten sistemler kullanılmaktadır. Bazı güneş sistemleri güneş enerjisini termal enerjiye dönüştürür. Ondan sonra bu termal enerjiyi elektrik üretmek için kullanırlar.

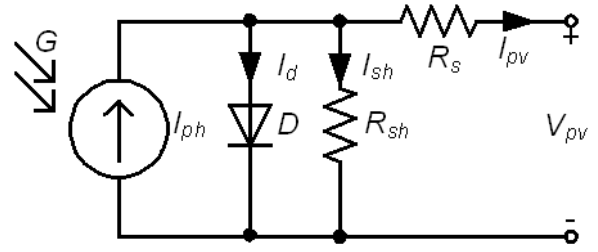
Bu sistemler genellikle büyük ölçekli sistemlerdir [1, 2]. Solar FV sistemlerinin ilk yatırım bedeli, FV verimliliğini artırarak azaltılabilir, böylece aynı FV modülü ile daha fazla güç üretilebilir. FV modülünün çıkış gücü, FV hücrelerine özgü özelliklere göre, FV modülüne düşen absorbe edilmiş güneş ışınımını artırarak artırılabilir. Güneş ışınımı dağılımı, mevsim şartlarına bağlı olarak bir gün veya ay boyunca değişebileceğinden

kontrol edebileceğimiz bir parametre değildir. Güneş pozisyonu mevsimden mevsime değişmektedir ve radyasyon seviyesi yıl boyunca değişmektedir. Ayrıca, tüm güneş radyasyonu günümüz teknolojisi ile elektrige dönüştürülemez. Güncel olan FV hücreleri güneş ışığının sadece %20'si civarında bir dönüşüm sağlamaktalar [3]. Enerjinin diğer kısmı ısıya dönüştürülebilir [4, 5]. FV modülünün çalışma sıcaklığı arttığında, modülün elektrik verimliliği düşecektir [6, 7]. Bu yüzden elektrik enerjisi üretimini arttırmak için “FV soğutma” konsepti bu kadar gerekli hale gelmektedir. FV modülü tarafından üretilen ve elektrik enerjisine dönüştürülemeyen atık ısı enerjisi yakalanmalıdır [8]. Yakalanan enerji, mümkünse, verimli bir şekilde kullanılmalıdır. Bu fazla enerjiyi başka amaçlar için kullanmak da mümkündür. Örneğin, evler, konaklama ve spor tesisleri için sıcak su kaynağı olarak kullanılabilir [9].

FV hücreli elektrik üretim tesisinde, genel olarak bütçenin büyük kısmı FV modülüne harcanmaktadır. Ticari kullanım için, FV maliyeti genel sistem maliyetine hâkimdir. Bu nedenle, FV modülünün verimliliği ve ömrü daha önemlidir. FV modülü soğutulmamışsa, elektrik güç kaybı yüzde 15 ila 20 arasında değişebilir [10-12]. Monokristal ve polikristal silikon güneş pilleri için, sıcaklıktaki her bir derecelik artış için, verim yaklaşık %0,45 oranında azalır [13]. Amorf silikon hücrelerinin ısı etkileşimi çok kristalli güneş pillerinden daha azdır. Amorf silikon hücreleri, modül tasarımına bağlı olarak bazı verimlilik özelliklerine sahiptir. Bu hücrelerin verimi, sıcaklıktaki derece artışı başına yaklaşık %0,25 azalır [14]. Fotovoltaik hücre sıcaklığı, örneğin bir su, yağ veya hava gibi bir soğutucunun zorunlu veya doğal bir sirkülasyonu kullanılarak ısı emilimi ile kontrol edilebilir. Amorf silikon, diğer FV tiplerinden daha uygundur. Buna ek olarak, amorf silisyum, diğer teknolojilerden çok daha düşük termal katsayıya sahiptir. Diğer bir ısı kazanım yöntemi olan termal kojenerasyon uygulamaları daha yüksek çalışma sıcaklığına ihtiyaç duyduğundan, bu tür termal uygulamalar yüksek sıcaklıkların sağlanabildiği alanlar için uygundur [15-17].

2. Bir FV Modülün Matematiksel Modeli

FV modülleri, bir diyot ve iki diyot modeli olan iki farklı yöntemle modellenmektedir. Bu makalede tek diyot modeli kullanılmıştır.



Şekil 1. Bir FV hücresi eşdeğer modeli

Burada önerilen model, aşağıdaki ilişki kullanılarak elde edilebilecek sabit bir güneş ışınımı ve sıcaklığında V-I özelliklerine sahiptir.

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{(V_D - R_s I_{pv})}{nV_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

Burada, $V_T = kT/q$ şeklinde ifade edilir.

p-n bağlantı kaçak akımı, güneş hücresinde R_{sh} ilavesi ile tasarım olarak modellenmiştir. Yarı iletken tabakalar arasında metal bir taban vardır. Bu metal taban temas direncine sahiptir. Bu direnç, R_s varlığı ile tasarımda modellenmiştir. D diyotunun, Denklem (1) 'de gösterildiği gibi Shockley diyot modelinin I-V karakteristiğine sahip olduğu varsayılmıştır. Burada I_0 , diyotun ışına yok iken ters sızıntı akımıdır, I_D diyot D akımıdır, n , diyot idealite faktörüdür, V_D diyot D voltajıdır, k Boltzmann sabitidir ($1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K), termal voltaj V_T ile temsil edilir. Hücrelerin Kelvin derecesinde çalışma sıcaklığı T ile temsil edilirken, elektron yükü ($1,60217646 \times 10^{-19}$ C) q ile temsil edilmiştir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sh} \left(e^{\frac{q(V_{pv} - R_s I_{pv})}{nKT}} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} - R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (2)$$

Burada, I_{ph} güneş hücresi tarafından üretilen ana akım, I_{FV} güneş hücresi terminal akımı, güneş hücresi terminal voltajı V_{FV} ile sembolize edilmiştir. Eşdeğer paralel direnç R_{sh} ile temsil edilirken, eşdeğer seri direnç R_s ile temsil edilmiştir. (2) denklemindeki R_s ve R_{sh} dirençleri yineleme ile hesaplanabilir. Yinelemede, modelden elde edilen maksimum gücün MPP'deki veri sayfasından en yüksek güçle çakışması gerektiği kısıtı uygulanmıştır.

FV modülün sıcaklık bağımlılığı, maksimum güç noktası verimliliğini oldukça fazla etkiler. FV modül verimliliği büyük ölçüde modülün sıcaklığına bağlıdır ve aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$P_{\max} = V_{oc} I_{sc} FF \quad (3)$$

Burada V_{oc} açık devre voltajıdır, I_{sc} kısa devre akımıdır, FF doldurma faktörüdür. Açık devre voltajı panel sıcaklığının bir fonksiyonudur, bu ilerleyen paragraflarda açıklanacaktır.

Bir güneş pilinin verimliliği, elektriğe dönüştürülen gücün, gelen güce oranı olarak belirlenir ve şöyle tanımlanır:

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (4)$$

Burada P_{in} panelin giriş gücünü ifade etmektedir. Verimlilik hesaplamaları için giriş gücü 1 kW/m^2 veya 100 mW/cm^2 'dir. Böylece $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 'lik bir hücre için giriş gücü 10 W ve $156 \times 156 \text{ mm}^2$ 'lik bir hücre için giriş gücü $24,3 \text{ W}$ 'tır.

Açık devre gerilimi, I_0 sıcaklığına bağlı olması nedeniyle sıcaklıkla birlikte düşer. Karanlık doyum akımı I_0 , ışısız ortamda diyottan akan sızıntı akım değeridir. Bir p-n bağlantısının bir tarafındaki I_0 denklemi;

$$I_0 = qA \frac{D}{LN_D} BT^3 e^{-\frac{E_{G0}}{kT}} \cong B'T^{\gamma} e^{-\frac{E_{G0}}{kT}} \quad (5)$$

Burada, q elektronik yüküdür, A alandır, D dopingin bir fonksiyonu olarak silikon için verilen azınlık taşıyıcısının yaygınlığıdır, L azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu, N_D doping ve T sıcaklıktır, E_{G0} mutlak sifira doğrusal olarak hesaplanan bant aralığıdır ve B' sıcaklıktan bağımsız bir sabittir. Diğer malzeme parametrelerinin olası sıcaklık bağımlılıklarını birleştirmek için 3 sayısı yerine bir sabit γ kullanılır. Oda sıcaklığına yakın silikon güneş pilleri için, I_0 , sıcaklıktaki her 10°C artış için yaklaşık iki katına çıkar.

I_0 'ın açık devre gerilimi üzerindeki etkisi, I_0 denklemini V_{oc} denklemine aşağıda gösterildiği gibi konulmasıyla hesaplanabilir;

$$\begin{aligned} V_{oc} &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) = \frac{kT}{q} [\ln I_{sc} - \ln I_0] \\ &= \frac{kT}{q} \ln I_{sc} - \frac{kT}{q} \ln [B'T^{\gamma} e^{-\frac{qV_{G0}}{kT}}] \\ V_{oc} &= \frac{kT}{q} \{ \ln I_{sc} - \ln B' - \gamma \ln T + \frac{qV_{G0}}{kT} \} \quad (6) \end{aligned}$$

Burada, $E_{G0} = qV_{G0}$ dir. dV_{oc}/dT nin, dI_{sc}/dT 'den bağımsız olduğu varsayılırsa dV_{oc}/dT şöyle elde edilir;

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{V_{oc} - V_{G0}}{T} - \gamma \frac{k}{q} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklem, bir güneş pilinin sıcaklık hassasiyetinin, güneş pilinin açık devre voltajına bağlı olduğunu ifade etmektedir. Bu nedenle FV hücre çıkış gerilimi ne kadar yüksek tasarlanabilirse, güneş pilleri sıcaklıktan o kadar daha az etkileneceğini göstermektedir. Silisyum için E_{G0} $1,2 \text{ V}$ 'dir ve $3,3 \text{ V}$ olarak kullanıldığında açık devre voltajında yaklaşık $2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ azalma olmaktadır. Bu nedenle, FV panel yüzey ısısının kontrolü, panel verimliliği açısından önem arz etmektedir [18].

3. Materyal-Metot (DeneySEL Çalışmalar)

Bu çalışmada su soğutmanın FV verimliliği üzerindeki etkisini analiz etmek için deneysel bir kurulum gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla iki panel kullanılmıştır. Bir soğutmasız panel, bir diğeri ise modifiye edilmiş paneldir. Panel olarak, Tommatech polikristal FV panel kullanılmış ve verileri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tommatech polikristal FV panel etiket değerleri

Panel etiketi	Değer
Maksimum Gücü (W)	10
Maksimum Güçteki gerilim (V)	17,3
Maksimum Güçteki akımı (A)	0,57
Anma açık uç gerilimi (V)	21,5
Kısa devre Akımı (A)	0,71
Tolerans (%)	± 3

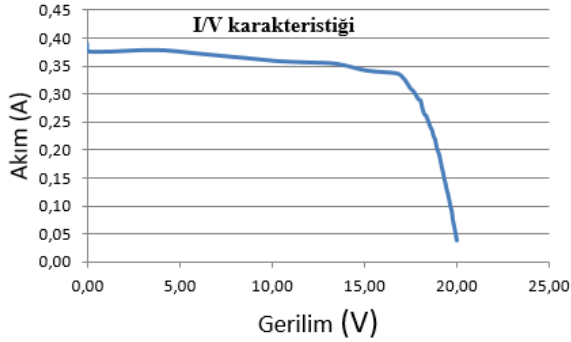
Soğutma sistemi aşağıdaki şekilde (Şekil 2) tasarlanmıştır.



Şekil 2. Panel deney düzeneği. Sol taraftaki panel tabanı bakır boru sistemli, sağ taraftaki soğutmasız panel.

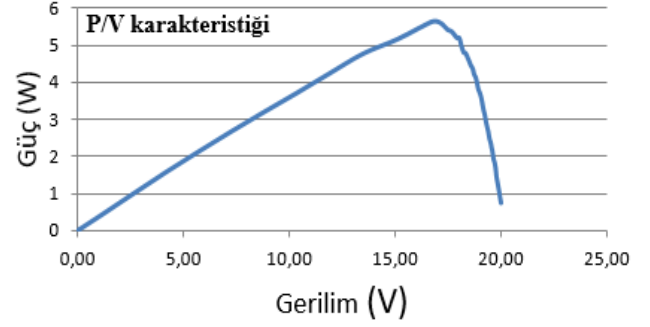
Önce, güneş panelinin altını kaplayacak şekilde bir bakır levha ayarlanmıştır. Sonra bu levha üzerine, su dolaşımını sağlamak için bakır boru S şeklinde dolaştırılarak kaynatılmıştır. Böylece ısının panel yüzeyinden düzgün dağılımlı bir şekilde soğurulması hedeflenmiştir. FV panel ile levha arasındaki ısı geçişini artırmak için bilgisayarlardaki işlemcilerin soğutucularını işlemci üzerine yapıştırmada kullanılan jel kullanılmıştır. Böylece ısı geçişinin en yüksek seviyede tutulması hedeflenmiştir.

Su soğutma sisteminin etkisi, gün boyu ve çevresindeki sıcaklıkta farklı güneş radyasyonu seviyeleri için incelenmiştir. Panelin yüklenmesi elektronik yük üzerinden yapılmıştır. Elektronik yük ile panel istenilen değerlerde yüklenmesi sağlanmıştır. FV panel sıcaklığını önceden tanımlanmış aralıklarda tutabilmek için su boruları bakır borulardan yapılmıştır. FV panelin güç çıkışı, güneş ışınımının, hava sıcaklığının, FV panel sıcaklığının, gerilimin ve panelin akım değerlerinin ölçülmesi gün boyunca gözlemlendi. Deneysel çalışmamızda aktif bir soğutma sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 3. Soğutmasız sistem için akım-gerilim karakteristik eğrisi

Tasarımda soğutma mekanizması olarak su dolaşımının doğal dolaşımı kullanılmaktadır. Su dağıtılmış ısı enerjisinin bir kısmını soğuracak ve böylece panelin soğumasına neden olacaktır. Su soğutma mekanizması panelin sıcaklığını düşürür, böylece FV modülün çıkış gücünün verimini artırır. Su sirkülasyon kapasitesi artırılırsa, FV hücre soğutma verimliliği ve genel ısı transferi artacaktır.



Şekil 4. Soğutmasız sistem için gerilim - güç karakteristik eğrisi

Fakat, soğutmada kullanılan su tüketiminin artırılması, enerji üretim maliyetini artıracaktır. Bu, genel sistem verimliliğini azaltacaktır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 2'de gösterilmektedir. Bakır borular, FV modülünün arkasına yapıştırılmış, 0,5 mm kalınlığında bir bakır levha üzerine tutturulmuştur. FV modül kullanımında iken arka yönden çekilmiş normal ve termal kamera ile çekilmiş görüntüleri Şekil 5'de verilmiştir. Termal kamera görüntüsünde sağ aşağı tarafa doğru gözükken kısım, havanın görüntüsüdür. Isı renk dağılımı sıcak-soğuk aralığı için kırmızı-mavi aralığındadır. Havaya göre baktığımızda FV panelin ısı daha yüksek olmakla beraber, soğutma borularının ısı daha düşük gözükmektedir.



Şekil 5. Panel deney düzeneği arka yüzü, normal ve termal kamera görüntüleri

Deneyler 27 Nisan 2019 tarihinde yapılmıştır. Sonuçlar, 5 farklı ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

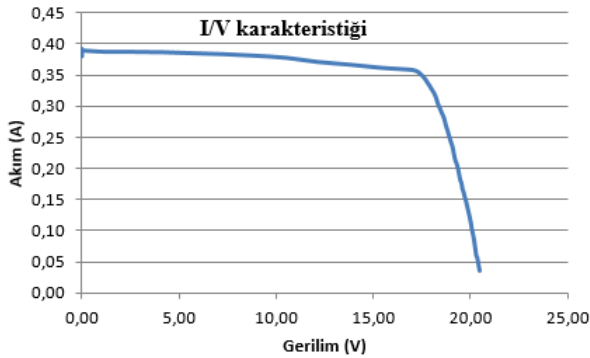
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi çatısında iki farklı FV panelinin verimlilik analizi deneyi yapıldı. Deney düzeneğinde iki adet FV modülü kullanılmıştır. Biri soğutmasız paneldir ve diğeri bakır levha

üzerine monte edilmiş bakır borularla desteklenmiş olan paneldir.

Levha, yüksek ısı geçirgenlik katsayılı yapıştırıcı kullanılarak FV panelinin arka tarafına tutturulmuştur. Bu tip yapıştırıcılar FV panelinden bakır tabakaya ısıyı neredeyse mükemmel bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. Borularda su dolaşımı doğal akıyla sağlanmıştır. FV panelinden su soğutmalı ve soğutmasız verileri aynı anda toplanmıştır.

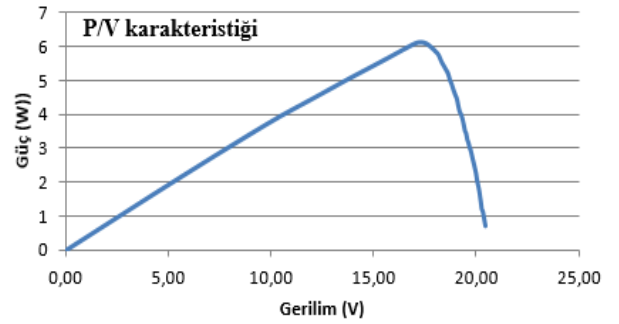
Tablo 2. Su soğutmalı/masız FV panel ve çevresi sıcaklık değerleri

FV modül	Soğutmalı	Soğutmasız	Çevre
Min sıcaklık, °C	34,8	50	31,2
Max sıcaklık, °C	45,2	62	44,8
Ortalama sıcaklık, °C	40,5	55	38,0

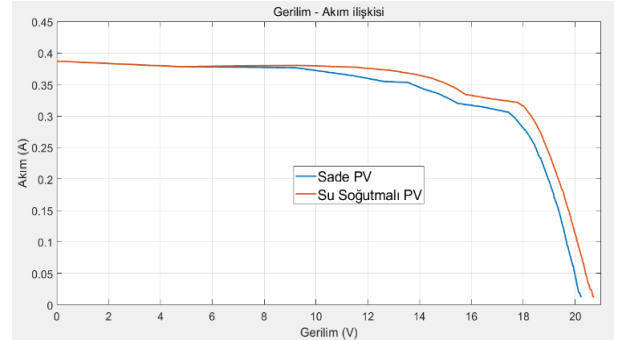


Şekil 6. Sulu sistem için akım-gerilim karakteristik eğrisi

Deneyel çalışmalar sonucunda bir doğal akışlı soğutma sisteminin kullanımının nispeten ucuz ve verimli olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, bir güneş FV sisteminin çıkış gücünün etkin bir şekilde artırıldığı da gözlenmektedir. Gerçek zamanlı termal kızılötesi görüntüler, maksimum ortam sıcaklığında toplandı. Şekil 5'te gösterilen termal görüntü, öğle vaktinde doğal dolaşım ile su soğutmalı bir güneş panelinin 41°C ortam sıcaklığında ölçülen panel ısı dağılımı fotoğraflarıdır.



Şekil 7. Sulu sistem için gerilim-güç karakteristik eğrisi

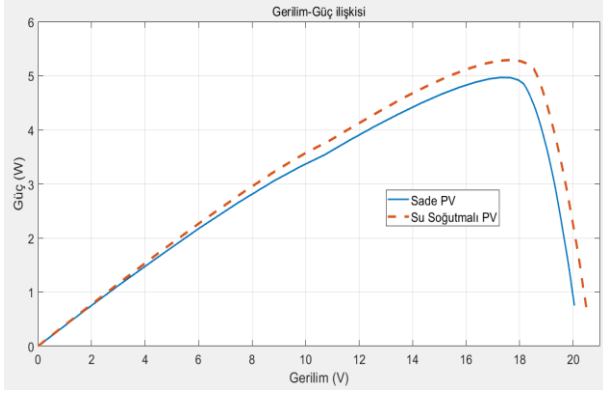


Şekil 8. FV modülün akım-gerilim karakteristik eğrisi

Ölçümler süresince panel ve ortamın sıcaklık değişim sınırları Tablo 2'de belirtilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi ortam sıcaklığı 45,2°C ile 44,8°C arasında değişmektedir. Doğal dolaşım ile soğutulan FV panelin sıcaklığı ise 34,8°C ile 45,2°C arasında değişmiştir. Aynı şartlarda, herhangi bir soğutma sistemi olmayan soğutmasız panel için yapılan ölçümlerde, ortam sıcaklığı 30°C iken, FV panel sıcaklığı 44°C civarında seyretmiştir. Aynı şartlar altında, her iki panele de yükleme yapılarak akım-gerilim ve gerilim- güç karakteristikleri elde edilmiştir.

FV panelinin su soğutmalı elektrik verimliliği soğutmasız FV panel ile karşılaştırılmıştır. Umut verici bir verimlilik sonucu elde edilmiştir.

Soğutmanın bir sonucu olarak, panelin sıcaklığı hafifçe düşmektedir. Bu durumun sonucu olarak Denklem (7) de ifade edildiği gibi, FV panelin açık devre gerilimi (V_{oc}), %2,5 artar iken, kısa devre akımı (I_{sc}), %1 azalmaktadır.



Şekil 9. FV modülün güç-gerilim karakteristik eğrisi.

FV panellerin karşılaştırmalı akım –gerilim grafikleri Şekil 8’de ve gerilim –güç grafikleri Şekil 9’da gösterilmiştir. Soğutmasız FV panel ile su soğutmalı FV panelin verimlilik farkı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \eta = \frac{P_{\max s} - P_{\max s z}}{P_{\max s z}} \times 100 \quad (8)$$

Burada, $P_{\max s}$ soğutmalı sistemden alınan en yüksek gücü, $P_{\max s z}$ ise soğutmasız sistemden alınan en yüksek gücü ifade etmektedir.

Genel verimliliğe bakarsak, su soğutmalı FV sistemi %5,9 oranında soğutmasız FV panelinden daha iyidir. FV panellerin Gerilim Akım ve Gerilim-Güç karakteristikleri sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9’daki gibi elde edilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacının Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- [1] Bahaidarah HMS., Gandhidasan P., Mahmood M. Performance evaluation of six configurations of a photovoltaic (PV) string with an integrated non-imaging concentrator and water cooling system, 2016 Ieee 43rd Photovoltaic Specialists Conference (Pvsc), 2016, p:844-846.
- [2] Ali AHH. Performance-cost and global warming assessments of two residential scale solar cooling systems versus a conventional one in hot arid areas, Sustainable Energy Technologies and Assessments 2017; 20: 1-8.
- [3] Fiducia TAM., Budhika GM., Kexue L., Chris RMG, Amit HM., Kurt B., Walajabad SS., Lewis DW., Ali A., Jake WB., John MW. Understanding the role of selenium in defect passivation for highly efficient selenium-alloyed cadmium telluride solar cells, Nature Energy 2019; 4(6): 504-511.
- [4] Bianchini A., Guzzini A., Pellegrini M., Saccani C. Photovoltaic/thermal (PV/T) solar system: Experimental measurements, performance analysis and economic assessment, Renewable Energy 2017; 111: 543-555.
- [5] Kumar P., Kumar A., Sudhakar SK., Mamat R. Experimental exergy analysis of water-cooled PV module, International Journal of Exergy 2017; 23(3): 197-209.
- [6] Uçman M., Fotovoltaik termal (FV/T) ve bina entegreli FV/T (BIPV/T) sistemlerde akışkan kullanımının elektriksel karakteristik üzerine etkisinin incelenmesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı 2017; 111.
- [7] Erol H., Uçman M., Kesilmiş Z. Water cooled PV panel efficiency in Osmaniye environment, International Advanced Researches and Engineering Journal 2021; 5(1): 8-13.
- [8] Al-Nimr MA., Bukhari M., Mansour M. A combined CPV/T and ORC solar power generation system integrated with geothermal cooling and electrolyser/fuel cell storage unit, Energy 2017; 133: 513-524.
- [9] Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions, Energy 2013; 59: 445-453.
- [10] Baljit SSS., Chan HY., Sopian K. Review of building integrated applications of photovoltaic and solar thermal systems, Journal of Cleaner Production 2016; 137: 677-689.
- [11] Colt G. Performance evaluation of a PV panel by rear surface water active cooling. 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (Icate). 2016.

- [12] Matias CA., Santos LM., Alves AJ., Wesley PC. Electrical performance evaluation of PV panel through water cooling technique. 2016 Ieee 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (Eeeic). 2016.
- [13] Rajput UJ., Yang J. Comparison of heat sink and water type PV/T collector for polycrystalline photovoltaic panel cooling, *Renewable Energy* 2018; 116: 479-491.
- [14] Bai A., Popp J., Balogh P., Gabnai Z., Palyi B., Farkas I., Pinter G., Zsiborács H. Technical and economic effects of cooling of monocrystalline photovoltaic modules under Hungarian conditions, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2016; 60: 1086-1099.
- [15] Abdel-Mesih BSA., Abdelrehim AA., Khobeiz AMH. Comparative analysis between water and nanofluids as working fluids in photovoltaic thermal collectors. *Asme International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2014.
- [16] Ahmadi P., Dincer I., Rosen MA. Transient thermal performance assessment of a hybrid solar-fuel cell system in Toronto, Canada, *International Journal of Hydrogen Energy* 2015; 40(24): 7846-7854.
- [17] Aldossary A., Mahmoud S., Al-Dadah R. Technical feasibility study of passive and active cooling for concentrator PV in harsh environment, *Applied Thermal Engineering* 2016; 100: 490-500.
- [18] Kesilmiş Z., Erol H., Uçman M. Power optimization in partially shaded photovoltaic systems, *Tehnički Glasnik* 2018; 12: 34-38.