



## Performance analysis of a photovoltaic panel cooled by thermoelectric effect

Ahmet Yilanci\*

Solar Energy Institute, Ege University, Bornova/Izmir, 35100, Turkey

### Highlights:

- Temperature effect on performance of a photovoltaic panel
- Investigation on integration of a thermoelectric cooler
- Obtaining performance parameters via experimental study and thermodynamic modelling

### Keywords:

- Photovoltaic
- Temperature effect
- Thermoelectric cooler
- Thermodynamic modelling
- Energy efficiency
- Performance output

### Article Info:

Research Article  
Received: 10.12.2018  
Accepted: 15.08.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.494485

### Acknowledgement:

This work was supported by Ege University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: 15-GEE-004.

### Correspondence:

Author: Ahmet Yilanci  
e-mail:  
ahmet.yilanci@ege.edu.tr  
phone: +90 232 311 12 26

### Graphical/Tabular Abstract

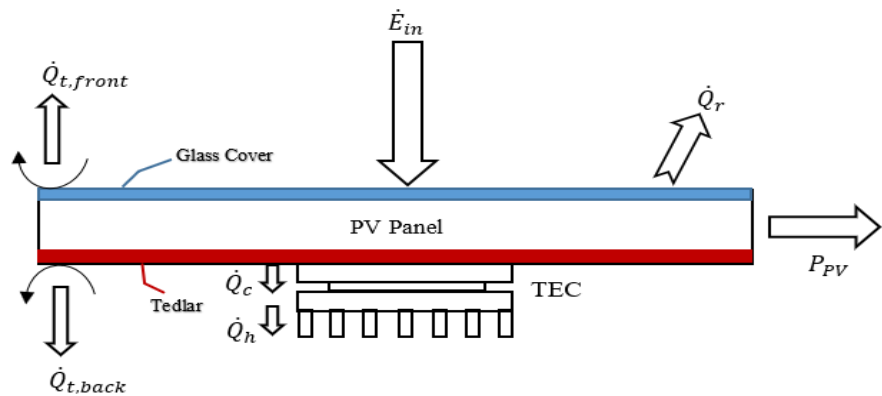


Figure A. Thermodynamic modelling of a photovoltaic panel with a thermoelectric cooler

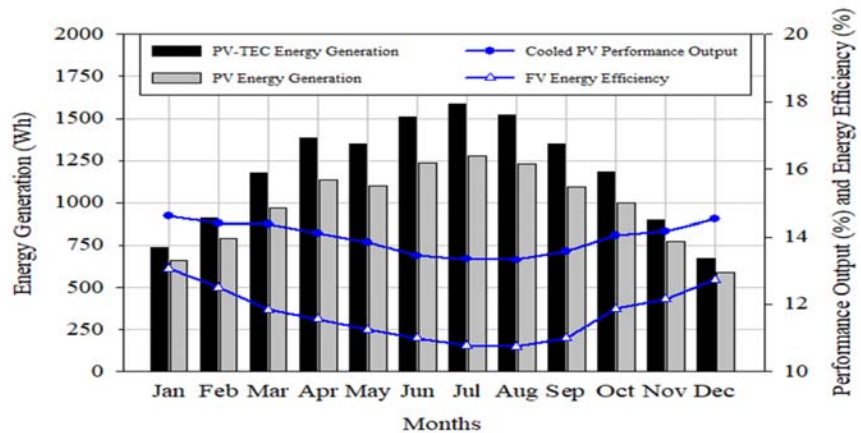


Figure B. Comparison of monthly energy generations and energy efficiencies

**Purpose:** A photovoltaic panel is cooled by a thermoelectric cooler, and effect of decrease in surface temperature with the result of this cooling on performance is investigated.

### Theory and Methods:

Two experimental setups consisting of the identical photovoltaic panels were installed. A thermoelectric cooler was integrated to the back of a photovoltaic panel in one of the setups. The photovoltaic panel with thermoelectric cooler was modelled thermodynamically. Measured data and results of the developed model were compared, and the study was extended by using typical meteorological year data.

### Results and Conclusion:

Average temperature decreases are obtained to be 3.1°C and 4.9°C for two different days. Also, increases in energy and power generation with the rates of 7.3% and 6.7% are occurred. In this way, average rates of power increase for unit temperature drop are found to be 2.3% and 1.2%. In addition, average rates of performance increase for unit temperature drop are around 1.99% and 1.07%. Modelling is extended by using hourly typical meteorological year data. In conclusion, it is said that using a thermoelectric cooler on a photovoltaic panel may increase its energy generation and performance monthly with the average of 19.63%.



## Termoelektrik etki ile soğutulan bir fotovoltaik panelin performansının analizi

Ahmet Yılcıncı\*

Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, 35100 Bornova İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Fotovoltaik panelin performansına sıcaklığın etkisi
- Termoelektrik soğutucu entegrasyonunun incelenmesi
- Deneysel çalışma ve termodinamik modelleme ile performans parametrelerinin eldesi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 10.12.2018  
Kabul: 15.08.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.494485

### Anahtar Kelimeler:

Fotovoltaik, sıcaklık etkisi, termoelektrik soğutucu, termodinamik modelleme, enerji verimi, performans çıktısı

### ÖZET

Fotovoltaik panellerin üreteceği elektrik miktarı, yüzey sıcaklıklarının artması ile azalmaktadır. Bu nedenle fotovoltaik panellerin yüzey sıcaklıklarını düşürmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Son yıllarda, bu yöntemlerden biri olarak termoelektrik soğutucuların kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, bir fotovoltaik panel termoelektrik soğutucu yardımıyla soğutulmuş ve bu soğutma sonucu gerçekleşen yüzey sıcaklığı azalmasının performansa etkisi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler iki farklı gün yapılmıştır ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Termoelektrik soğutucu kullanımı ile iki farklı günde ortalama 3,1°C ve 4,9°C'lik sıcaklık düşüşü sağlanmıştır. Enerji ve güç üretiminde, %7,3 ve %6,7 artış gerçekleşmiştir. Bu sayede, 1°C'lik sıcaklık düşüşü için ortalama %2,3 ve %1,2 güç artışı olmuştur. Aynı zamanda, 1°C'lik sıcaklık düşüşü ile elde edilen ortalama performans çıktısındaki artış %2,0 ve %1,1 düzeyinde olmuştur. Termodinamik modelleme yapılan termoelektrik soğutuculu fotovoltaik panelin teorik yüzey sıcaklık ve güç üretim değerleri ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Modelleme çalışması saatlik tipik meteorolojik yıl verileri ile genişletilmiştir. Panel yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın Temmuz ayında 12,7°C'ye kadar ulaştığı görülmüştür. Referans fotovoltaik panelden yıllık 11854,82 Wh enerji üretimi gerçekleşirken, termoelektrik soğutuculu fotovoltaik panelden %20,5'lik artışla yıllık 14285,74 Wh enerji üretimi meydana gelmiştir. Sonuç olarak, termoelektrik soğutucu kullanımının fotovoltaik panelde aylık ortalama %19,6'lük bir enerji üretimi ve performans çıktısında artışa olanak sağlayabildiği ifade edilebilir.

## Performance analysis of a photovoltaic panel cooled by thermoelectric effect

### H I G H L I G H T S

- Temperature effect on performance of a photovoltaic panel
- Investigation on integration of a thermoelectric cooler
- Obtaining performance parameters via experimental study and thermodynamic modelling

### Article Info

Research Article  
Received: 10.12.2018  
Accepted: 15.08.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.494485

### Keywords:

Photovoltaic, temperature effect, thermoelectric cooler, thermodynamic modelling, energy efficiency, performance output

### ABSTRACT

Electricity amount generated by photovoltaic panels decreases with increase in their surface temperatures. Therefore, various methods are used to decrease the surface temperatures of photovoltaic panels. In recent years, as one of these methods, there are some studies on using thermoelectric coolers. In this study, a photovoltaic panel is cooled by a thermoelectric cooler, and effect of decrease in surface temperature with the result of this cooling on performance is investigated theoretically and experimentally. Experiments are conducted for two different days and their results are compared with each other. By using the thermoelectric cooler, average temperature decreases are obtained to be 3.1°C and 4.9°C for two different days. Also, increases in energy and power generation with the rates of 7.3% and 6.7% are occurred. In this way, average rates of power increase for unit temperature drop are found to be 2.3% and 1.2%. In addition, average rates of performance increasement for unit temperature drop are around 2.0% and 1.1%. Theoretical surface temperature and power generation values obtained from photovoltaic panel with a thermoelectric cooler that was modelled thermodynamically are compared with measured data, and consentient results are achieved. Modelling is extended by using hourly typical meteorological data. It is seen that the difference between surface temperatures of the panels reaches up to 12.7°C in July. While annual energy generation from the reference photovoltaic panel is 11854.82 Wh, annual energy generation from the photovoltaic panel with a thermoelectric cooler is 14285.74 Wh with the increase of 20.5%. In conclusion, it is said that using a thermoelectric cooler on a photovoltaic panel may increase its energy generation and performance monthly with the average of 19.6%.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ahmet.yilanci@ege.edu.tr / Tel: +90 232 311 12 26

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, insanoğlunun dünyada daha rahat yaşayabilmesinde ve doğada karşılaştığı zorlukları aşabilmesinde temel kaynaklardan biridir. Enerji bu yönüyle, toplum ve doğa arasındaki etkileşimde vazgeçilemeyecek bir elemandır. Dünyada nüfusun artmasıyla, refah seviyesinin yükselmesiyle ve teknolojinin gelişmesiyle enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır [1, 2]. Günümüzde enerji ihtiyacının yaklaşık %85'lik gibi büyük bir kısmı tükenebilir doğaya sahip fosil enerji kaynakları ile karşılanırsa da bu durumun sürdürülebilir olmadığı açıktır [3, 4]. Ayrıca, fosil enerji kaynaklarının üretilmesi, taşınması ve kullanımı, sağladığı avantajların yanı sıra yerel ve küresel ölçekte her geçen gün daha açık görülebilen çevre ve sağlık sorunlarına yol açmaktadır [5]. Son zamanlarda giderek artan bu problemler, insanlığı yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya itmektedir. Son birkaç yıldır küresel düzeyde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı yıllık yaklaşık %1,5 oranında artış göstermektedir [6]. Bu sayede son 40 yıldır artan karbon emisyonu ilk defa 2014 yılında küresel çapta sabit kalmıştır [4, 7]. Ayrıca dünya çapında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı bu alanda farkındalığı artırmış, ülkeleri iklim değişikliği konusundaki önlemlere yönlendirmiş, yeni iş kaynakları oluşturmuş ve enerjinin enerji kaynaklarından uzak kalan milyonlarca insana ulaşmasını sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri güneş enerjisidir. Günümüzde, güneş enerjisinin farklı uygulamalarda kullanılması konusunda çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Güneş enerjisinden ısı (kurutma, soğutma, mekân ısıtma, sıcak su, buhar üretimi vb.) ve elektrik enerjisi elde edilmesinde yararlanılmaktadır. Güneş ışığını direkt olarak elektrik enerjisine çevirebilen fotovoltaik (FV) dönüştürücülerin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır [8]. FV dönüştürücülerin en küçük hali olan hücreler birleştirilerek panelleri oluşturmaktadır. Farklı malzemeler ve üretim teknolojileri FV panellerin elde edilmesinde kullanılmasına rağmen, günümüzde ticari olarak satılanların yaklaşık %95'i silisyumdan imal edilen kristal yapıdaki (tek veya çok kristalli) yarı-iletken malzeme temellidir [9]. Bu tip yarı-iletkenlerin bir özelliği olarak, FV panellerin yüzey sıcaklıklarının 25°C üzerinde olması durumunda elektrik üretimlerinde ve enerji verimlerinde azalma meydana gelmektedir. Fotovoltaik panellerin üreteceği elektrik miktarı güneş ışınımıyla doğru orantılı, ancak yüzey sıcaklığı ile ters orantılıdır ve güneş ışınımının artması ile panel yüzey sıcaklığı artmaktadır. Yüzey üzerine gelen güneş ışınımına bağlı olarak bir FV panelin yüzey sıcaklığı çevre sıcaklığının 40°C üzerine kadar çıkabilmektedir ve bu durum önemli üretim düşüşlerine neden olabilmektedir [10, 11]. Ayrıca yüksek sıcaklık FV panel ömrünü azaltan bir etkidir [11, 12]. Fotovoltaik panel üreticileri, paneli oluşturan güneş hücreleri için sıcaklığın etkisini (açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve güç değerlerine) "sıcaklık katsayısı" olarak belirli bir güneş ışınımı değeri için flaş testlerle verebilmektedir. Ancak, dinamik koşullarda (meteorolojik veriler, FV panel malzeme tipi-kasa yapısı, kurulum şekli ve yeri vb.) sıcaklığın etkisi

bu katsayılardan farklı olabilmektedir ve gerçek koşullar altında araştırılması gerekmektedir. FV panellerin yüzey sıcaklıklarını düşürmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. En sık yöntemlerden biri panel ön veya arka yüzeyinden akışkan (sıvı veya gaz, çoğunlukla hava) geçirilerek ısının yüzeyden uzaklaştırılmasıdır. Akışkan hareketinin sağlanmasına göre bu sistemler zorlanmış veya doğal taşınımlı olarak tasarlanmaktadır. Isı borusu, faz değişim malzemesi (FDM) veya termoelektrik cihaz kullanarak yapılan ısı kontrol uygulamalarına ise son yıllarda rastlanmaktadır.

Termoelektrik modüller (TEM), termoelektrik etkiye dayalı olarak ısı veya elektrik üretimi yapabilen dönüştürücülerdir [13]. FV hücrelere benzer olarak yarı-iletken malzemelerden üretilmektedir. Bu cihazlar, Peltier veya Seebeck etkisi ortaya çıkarabilecek şekilde çalıştırılmaktadır [14]. Peltier etkisi için termoelektrik cihazın bağlantı uçlarına gerilim uygulanırsa yüzeylerden biri ısınırken diğeri soğumaktadır, bu tip cihazlar genellikle Termoelektrik Soğutucu (TES) olarak adlandırılmaktadır. İstenilen amaca göre soğutma veya ısıtma etkisinden farklı ısı kontrol uygulamalarında yararlanılabilmektedir. Günümüzde termoelektrik soğutucular, elektronik ekipmanların soğutulması, tıbbi malzemelerin uygun sıcaklıklarda taşınması, mini buzdolapları, mini termoslar, ısıtma-iklimlendirme gibi alanlarda kullanılmaktadır. Etkinlik katsayılarının (COP) 0,1-0,6 aralığı gibi düşük olması ve yüksek sıcaklıklı yüzeylerinden ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılmasının zor olması gibi benzeri sorunlarına rağmen, ömürlerinin uzun olması, hareketli parçalarının olmaması, buna bağlı olarak bakım gerektirmemeleri, hızlı cevap vermeleri, boyutlarının küçük olması gibi avantajları sayesinde termoelektrik soğutucular üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları gittikçe artmaktadır [15, 16]. Seebeck etkisinde, yüzeyler arasındaki sıcaklık farkından dolayı gerilim üretilmektedir ve bu cihazlar Termoelektrik Jeneratör (TEJ) olarak adlandırılmaktadır. Termoelektrik jeneratörlerin enerji verimleri düşük, %4-8 civarındadır; fakat atık ısının değerlendirilmesinde ve farklı enerji teknolojileriyle hibrid enerji üretiminde kullanım olanağı bulmaktadır [17].

Fotovoltaik paneller, TEM'ler ile birlikte farklı şekillerde kullanılabilmektedir. Literatürde, (i) FV panellerin hibrid enerji üretiminde TEJ'lerle birlikte kullanıldığı, (ii) TES'lerin enerji ihtiyacının FV panellerden karşılanarak ısıtma-soğutma-iklimlendirme uygulamalarının yapıldığı ve (iii) FV panellerin yüzey sıcaklıklarının kontrolünde TES'lerin kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmanın kapsamına benzer olan ve sınırlı sayıda yapılan (iii) nolu çalışmalarda [18-24], TES, FV panelin (veya hücrenin) arka yüzeyine bir ısı iletkenliği yüksek alüminyum/bakır gibi levhalarla temas edecek bir şekilde monte edilerek soğutma etkisinden daha fazla yararlanılmaktadır ve fotovoltaik panelin yüzey sıcaklığı kontrol edilmektedir. Bu çalışmaların bazılarında, soğutulan FV panel/hücre tarafından TES'in elektrik enerjisi ihtiyacını

karşlanmaktadır, ancak ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi miktarı bazen net üretimden fazla olabilmektedir ve sıcaklık düşüşü ile artan elektrik üretimi yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, net elektrik üretimini arttırmak amacıyla çeşitli kontrol algoritmaları ile yüzey sıcaklığı belirli bir düzeyde tutularak, TES'in elektrik akım değerinin optimumunda tutulmasına çalışılmaktadır. Bu çalışmanın kapsamına benzer olarak FV panellerin yüzey sıcaklıklarının kontrolünde TES'lerin kullanıldığı (iii) grubundaki çalışmalardan [18-24] elde edilen ana bulgular/sonuçlar şu şekilde özetlenebilmektedir. Choi vd. [18], yaptıkları çalışmada bir Binaya Entegre Fotovoltaik Panel (BEFV) ile TES kullanarak performansın artırılmasını deneysel olarak ele almışlardır. TES'in akım ayarı, bir mikro denetleyici ile sağlanarak sağlanan soğutma ile FV panel sıcaklığı 25°C standart sıcaklıkta tutulmaya çalışılmıştır, böylece TES yüksek sıcaklığın görüldüğü anlarda devreye girerek ek bir elektrik üretimini sağlamıştır. Deneysel çalışmalarda, 33,31°C olan ortalama panel yüzey sıcaklığının TES kullanımı ile 24,48°C'ye düşürüldüğü belirtilmektedir. Kane ve Verm [19] benzer bir çalışma ile BEFV ve TES sistemi için dinamik bir model geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, TES kullanımının panel yüzey sıcaklığında 10°C civarında düşme sağlayarak performansı (verim ve güç çıkışı) arttırdığı gözlemlenmiştir. Najafi ve Woodbury [20] ise FV panelin TES ile soğutulmasını teorik olarak modellemişlerdir. Model, sistemdeki sıcaklıkların, TES'in elektrik ihtiyacının ve FV panel tarafından üretilen ek elektrik enerjisi miktarının tahmininde kullanılmıştır. Ek elektrik üretiminin TES elektrik ihtiyacından farkı ile elde edilen net elektrik üretim miktarı, optimum TES akım değerine dayalı olarak genetik algoritma ile hesaplanmıştır. Ancak, sıcaklık düşüşünün 8°C'den fazla edilememesi nedeniyle elde edilen performans artışının ihmal edilebilecek düzeyde çok küçük olduğu ve bu durumun kullanılan TES'in yapısına bağlı olduğu belirtilmiştir. Ahadi vd. [21] çalışmalarında bir simülasyon yazılımı kullanılarak TES bağlı bir FV panelin enerji veriminin %6,8'den %10,92'ye yükseldiği ifade edilmiştir. Oda sıcaklığından 100°C panel yüzey sıcaklığına ulaşılması durumunda enerji veriminde %25 azalma meydana geldiği görülmüştür. Borkar vd. [22] tarafından yapılan diğer bir çalışmada TES kullanımının FV panelin enerji verimini %8,5-11,46 düzeylerinden %12,26-13,27 düzeylerine çıkardığı belirtilmiştir. Kumar vd. [23], ANSYS ile modelledikleri TES bağlı FV panelin simülasyon sonuçlarını açık gökyüzü koşullarında yaptıkları günlük deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır ve simülasyon sonuçlarıyla uyumlu değerler elde etmişlerdir. Panelin maksimum yüzey sıcaklığını TES kullanmadan 68,1°C olarak bulduklarını, aynı koşullarda TES kullanımını ile maksimum yüzey sıcaklığının 52,2°C elde edildiğini, simülasyon sonuçlarında ise bu değer 43°C olduğunu ifade etmişlerdir. Bu durumda TES kullanmadan FV panelin enerji verimi %10,2 iken TES kullanımı ile performans çıktısı %11,6'ya ulaşmıştır. Benghanem vd. [24], sıcak iklim koşullarında, Medine-Suudi Arabistan'da yaptıkları çalışmada FV panel sıcaklığının 83°C civarına ulaştığını, TES ile soğutma yapıldığında bu değer 65°C'ye düşürülebildiğini belirtmişlerdir. Performans çıktısında,

1°C'lik sıcaklık azalmasına karşılık ortalama %0,55 artış meydana geldiğini deneysel olarak elde etmişlerdir.

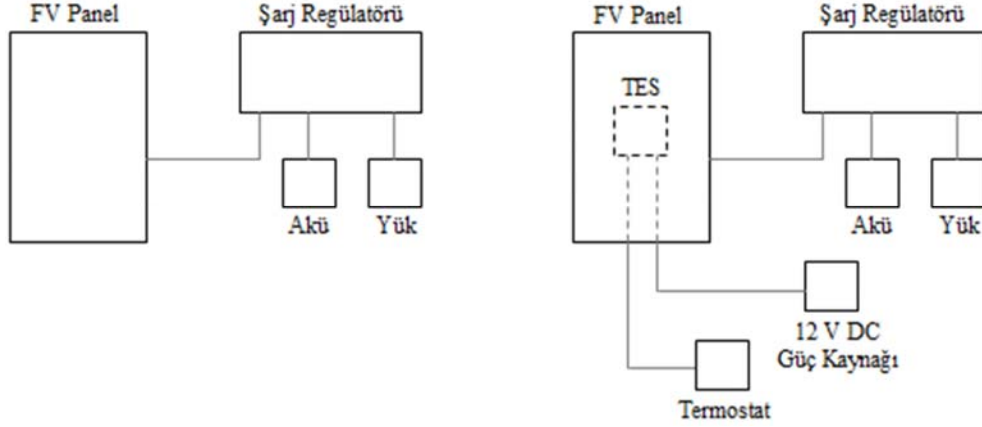
Bu çalışmada, bir fotovoltaik panel, termoelektrik soğutucu yardımıyla soğutulmuş ve bu soğutma sonucu gerçekleşen yüzey sıcaklığı azalmasının performansa etkisi incelenmiştir. Küçük nominal güç çıkışına sahip (10 Wp), çok kristalli silisyum (poli c-Si) iki eşdeğer fotovoltaik panelin yer aldığı iki ayrı düzenek tasarlanmıştır. Fotovoltaik panellerden birine termoelektrik soğutucu yerleştirilerek İzmir ili için deneysel çalışma yapılmıştır. Termoelektrik soğutucunun entegre edildiği bir fotovoltaik panel termodinamik olarak modellenmiştir. Teorik ve deneysel olarak elde edilen panel yüzey sıcaklıkları, güç ve enerji üretimleri ile performans çıktılarına ait değerler karşılaştırılmıştır ve modelleme çalışması yıllık meteorolojik verilerle genişletilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE YÖNTEM (EXPERIMENTAL STUDY AND METHOD)

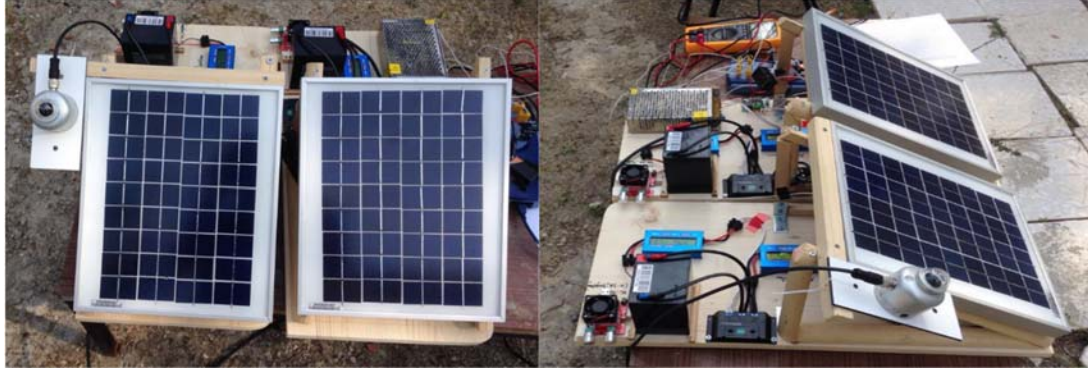
### 2.1. Deneysel Düzenekinin Tanıtımı (Description of the Experimental Setup)

Çalışma kapsamında iki eşdeğer FV panelden oluşan termoelektrik soğutuculu (FV-TES) ve termoelektrik soğutucusuz (Referans FV) iki ayrı düzenek kurulmuştur. TES'in soğuk yüzeyi FV panelin arkasına sabitlenmiş ve bir bakır levha yardımıyla soğutma etkisinin tüm panele aktarılması sağlanmıştır. Düzeneklerdeki paneller, güney doğrultusunda, yıllık optimum açı olan 38°'lik eşit açı ile yerleştirilmiştir. Bu iki düzenek Şekil 1'de şematik olarak görülmektedir. Şekil 2'de ise iki düzeneğin fotoğrafı yer almaktadır.

Deneysel düzeneklerindeki bileşenlerin ve ölçüm aletlerinin özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Deneysel düzeneğinde kullanılan iki eşdeğer FV panellerin teknik özellikleri Tablo 2'de bulunmaktadır. Sıcaklık ölçümleri K tipi termokupullar ile yapılarak, Pico TC-08 veri kaydedici ile kaydedilmiştir ve bu veri kaydediciye ait bir yazılım ile bilgisayara aktarılmıştır. Panel yüzey sıcaklıkları panel arka yüzeyinden ölçülmüştür. TES entegreli FV panel yüzey sıcaklığının 25°C üzerinde olmasına göre TES'in çalışmasını denetleyecek bir termostatla TES'in kontrolü sağlanmıştır. Aynı zamanda, TES için soğuk ve sıcak yüzeylerden ölçüm alınmıştır. Çevre sıcaklığı da kaydedilen ölçümlerde yer almıştır. Rüzgâr hızı ölçümleri ise panel yüzeylerine paralel konumlandırılan el tipi USB arayüzlü (Benetech BGM8902) ile yapılarak, bilgisayara kendi yazılımı aracılığı ile aktarılmıştır. FV panellerin yüzeyine gelen güneş ışınımı (global) için FV panellerle eşit açıya yerleştirilen Hukseflux LP02 modelinde ikinci sınıf bir piranometre ile ölçülmüştür. FV panellerin çalışmasını sağlamak için akü ve güç tüketen akım ayarlı dirençli yük devresi kurulmuştur. Böylelikle FV panellerden üretilen akım-gerilim ve güç değerleri elde edilmiştir. Bu elektriksel parametrelerin ölçümünde kullanılan DC güç ölçerler (WHDZ Wattmeter) ile FV panel çıkışında ve yük girişinde akım, gerilim ve güç ölçümleri yapılmıştır. FV panellerden birine TEC1-12706 model bir



Şekil 1. Eşdeğer FV panellerden oluşan iki düzeneğin ve bileşenlerinin şematik gösterimi  
(Schematic of two experimental setups consisting of the equivalent PV panels and their components)



Şekil 2. İki ayrı düzeneğe ait fotoğraflar (Photographs of two separate experimental setups)

TES entegre edilmiştir. Bu TES'in performans özellikleri olarak belirtilen katalog değerleri Tablo 3'te yer almaktadır.

## 2.2. Termoelektrik Soğutuculu Fotovoltaik Panelin Termodinamik Modellenmesi

(Thermodynamic Modelling of a Photovoltaic Panel with a Thermoelectric Cooler)

Şekil 3'de termoelektrik soğutucunun bir fotovoltaik panele bağlanması durumunda, panel üzerinde gerçekleşecek olan enerji dengesi şematik olarak gösterilmiştir.

Termodinamiğin birinci yasasına göre, bir sistem için enerjinin korunumu denklemi Eş. 1'deki gibi ifade edilmektedir:

$$\dot{E}_g - \dot{E}_c = d\dot{E}_{sistem} \quad (1)$$

Aşağıdaki kabuller yapılarak, enerji denklemi basitleştirilebilir:

- Rüzgâr, FV panel yüzeyine paralel akmaktadır.
- Yan yüzeylerden gerçekleşen ısı transferi ihmal edilebilir düzeydedir.

- TES'deki Thomson etkisi, Peltier etkisinin yanında ihmal edilebilir düzeydedir.
- FV panel ve TES arasındaki bakır levhanın mevcudiyeti enerji denkleminde dikkate alınmamıştır.
- Arka yüzeyden gerçekleşen ısı ışınımının etkisi dikkate alınmamıştır.
- FV panel arka yüzeyindeki sıcaklığın, tüm FV hücrelerde eşit ve aynı olduğu varsayılmıştır.

Sonuç olarak, TES entegreli FV paneldeki enerji dengesine göre Eş. 1 düzenlenirse aşağıdaki Eş. 2 elde edilmektedir:

$$\dot{E}_g - P_{FV} - \dot{Q}_{t,\text{ön}} - \dot{Q}_{t,\text{arka}} - \dot{Q}_r - \dot{Q}_c = \dot{Q}_{sistem} \quad (2)$$

Burada,  $\dot{E}_g$ , FV panel üzerine gelen toplam güneş ışınımını (W);  $P_{FV}$ , FV panel tarafından üretilen gücü (W);  $\dot{Q}_{t,\text{ön}}$  ve  $\dot{Q}_{t,\text{arka}}$  sırasıyla FV panelin ön ve arka yüzeylerinden gerçekleşen ısı taşınımını (W);  $\dot{Q}_r$ , FV panel ön yüzeyinde gerçekleşen ışınım ile ısı transferini (W);  $\dot{Q}_c$ , termoelektrik soğutucu tarafından sağlanan soğutma yükünü (W) ve  $\dot{Q}_{sistem}$  ise FV panel içerisinde kalan ısı miktarını (W) göstermektedir. FV panel üzerine gelen toplam güneş ışınımı, panel yüzey alanı,  $A_{FV}$  (m<sup>2</sup>), ve birim yüzey alana

**Tablo 1.** Düzenekleri oluşturan bileşenlerin ve ölçüm aletlerinin ana özellikleri  
(Main specifications of the measurement devices and the components composing the setups)

Deney Düzenegi Bileşenleri	FV Panel	Model	Tera Solar TRP-D10B
		Güç	10 Wp
		Tipi	Çok kristalli Silisyum (poli c-Si) Panel
		Boyut (mm)	330x280x25
	Şarj Regülatörü	Model	SShine03
		Akım	3A
		Gerilim	12 V
	Akü	Model	Tec Kuru Bakımsız Akü
		Gerilim	12 V
	Yük	Kapasite	4,5 Ah
Model		DROK Micro Load	
Akım		0 - 3A Değişken Akımlı	
Ölçüm Aletleri	Termoelektrik Soğutucu	Gerilim	12 V
		Model	TEC1 - 12706
	Güç Kaynağı	Model	S-Link SL-KA143
		Gerilim	12V DC
	Termostat (Sıcaklık kontrolcüsü)	Akım	10A
		Model	WH7016E
	Sıcaklık Ölçüm Cihazı	Model	Pico TC-08, 8 kanallı termokupl veri kaydedici
	Akım-Gerilim Ölçüm Cihazı	Model	WHDZ Wattmeter
		Aralık	0-60 VDC ve 0-100A
	FV Panel Test ve Ölçüm Cihazı-1	Model	Metrel EurotestPV Lite MI 3109
Model		Metrel PV Remote Unit A 1378	
Piranometre	Model	Hukseflux LP02	
Anemometre	Model	Benetech BGM8902	

**Tablo 2.** Standart test koşulları altında FV panellerin teknik özellikleri  
(Technical specifications of the PV panels under the standard test conditions)

Panel Tipi	Çok kristalli Si (poli c-Si)
Efektif Alan ( $A_{FV}$ ) ( $m^2$ )	0,07
Maksimum Güç ( $P_{FV, maks}$ ) (W)	10
Maksimum Gerilim ( $V_{maks}$ ) (V)	18,2
Maksimum Akım ( $I_{maks}$ ) (A)	0,55
Açık Devre Gerilimi ( $V_{OC}$ ) (V)	22,1
Kısa Devre Akımı ( $I_{SC}$ ) (A)	0,57
Sıcaklık Akım Kayıp Katsayısı ( $\alpha$ ) (mA/K)	2,84
Sıcaklık Gerilim Kayıp Katsayısı ( $\gamma$ ) (V/K)	0,126
Sıcaklık Verim Kayıp Katsayısı ( $\beta$ ) (1/K)	0,0048
Elektrik Direnci (R) ( $\Omega$ )	0,40

**Tablo 3.** Termoelektrik soğutucunun performans özellikleri [25] (Performance specifications of the thermoelectric cooler)

Sıcak Yüzey Sıcaklığı ( $T_h$ ) (K)	298	323
Maksimum Soğutma Yüğü ( $\dot{Q}_c$ ) (W)	50	57
Maksimum Sıcaklık Farkı ( $\Delta T_{maks}$ ) (K)	66	75
Maksimum Akım İhtiyacı ( $I_{TES, maks}$ ) (A)	6,4	6,4
Maksimum Gerilim İhtiyacı ( $V_{TES, maks}$ ) (V)	14,4	16,4

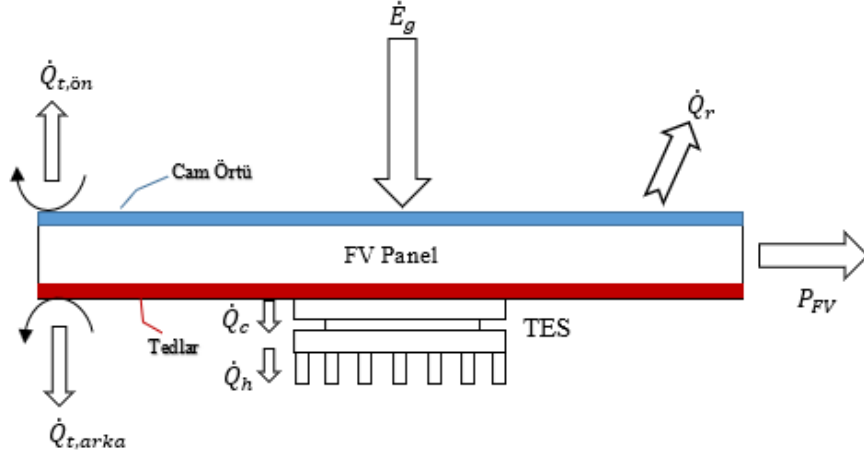
gelen güneş ışınımı miktarından,  $G$  ( $W/m^2$ ), hesaplanabilir:  
(Eş. 3)

$$\dot{E}_g = A_{FV} G \quad (3)$$

Bir FV panelin enerji verimi ifadesi Eş. 4'deki gibi olmaktadır:

$$\eta_{FV} = \frac{P_{FV}}{E_g} \quad (4)$$

FV panel tarafından üretilen güç, Eş. 5 ile tanımlanan Evans-Florschuetz korelasyonu [26] ve Eş. 4'de belirtilen enerji verimi ifadesi birleştirilerek Eş. 5'deki gibi sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplanabilir: (Eş. 6)



**Şekil 3.** Termoelektrik soğutucunun bir fotovoltaik panele bağlanması durumunda enerji dengesi  
(Energy balance for the case of a thermoelectric cooler integrated to a photovoltaic panel)

$$\eta_{FV} = \eta_{std}[1 - \beta(T_{FV} - T_{std})] \quad (5)$$

$$P_{FV} = \dot{E}_g \eta_{std}[1 - \beta(T_{FV} - T_{std})] \quad (6)$$

Burada,  $\eta_{FV}$ , FV panelin enerji verimi (-);  $\eta_{std}$ , standart test koşulları altında ( $1000 \text{ W/m}^2$  güneş ışınımı,  $25^\circ\text{C}$  panel yüzey sıcaklığı, AM1,5 hava kütleli) elde edilen enerji verimi (0,145);  $\beta$ , sıcaklık verim kayıp katsayısı (1/K),  $T_{FV}$ , FV panel yüzey sıcaklığı (K) ve  $T_{std}$ , standart koşullarda FV panel yüzey sıcaklığı ( $298 \text{ K}$ ) olmaktadır.

Ön ve arka yüzeylerinden gerçekleşen ısı taşınımı ise aşağıdaki Eş. 7 ve Eş. 8 bulunabilir:

$$\dot{Q}_{t,\text{ön}} = hA_{FV}(T_{FV} - T_a) \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{t,\text{arka}} = h(A_{FV} - A_{TES})(T_{FV} - T_a) \quad (8)$$

Burada,  $h$ , doğal taşınım katsayısı ( $\text{W/m}^2\text{K}$ );  $T_a$ , çevre sıcaklığını (K) ve  $A_{TES}$  ise TES yüzey alanını ( $\text{m}^2$ ) ifade etmektedir. Doğal taşınım katsayısının elde edilmesinde aşağıdaki Eş. 9 kullanılmıştır [27]:

$$h = 5,7 + 3,8V_{rüzgar} \quad (9)$$

Burada,  $V_{rüzgar}$ , rüzgâr hızını (m/s) göstermektedir. Işınım ile gerçekleşen ısı transferi miktarı ise aşağıdaki Eş. 10'dan elde edilebilir:

$$\dot{Q}_r = \varepsilon\sigma A_{FV}(T_{FV}^4 - T_{sky}^4) \quad (10)$$

Burada,  $\varepsilon$ , FV panelin yayma katsayısı (0,85);  $\sigma$ , Stephan-Boltzman sabitini ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) ve  $T_{sky}$ , gökyüzü sıcaklığını (K) ifade etmektedir.  $T_{sky}$ , gökyüzü sıcaklığı, çevre sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki Eş. 11'den tahmin edilebilir [28]:

$$T_{sky} = 0,0552T_a^{1,5} \quad (11)$$

TES tarafından sağlanan soğutma yükü Eş. 12'deki gibi hesaplanabilir [20, 29]:

$$\dot{Q}_c = SI_{TES}T_c - K_{TES}(T_h - T_c) - \frac{1}{2}I_{TES}^2R \quad (12)$$

Burada,  $S$ , TES'in Seebeck katsayısı (V/K);  $I_{TES}$ , TES'in akım değeri (A);  $T_c$ , TES'in soğuk yüzeyinin sıcaklığı (K);  $K_{TES}$ , TES'in ısı iletkenliği (W/K);  $T_h$ , TES'in sıcak yüzeyinin sıcaklığı (K) ve  $R$ , TES'in elektrik direncini ( $\Omega$ ) olmaktadır.  $S$ ,  $K_{TES}$  ve  $R$ , TES'in katalog değerleri olarak belirtilen  $\Delta T_{maks} = (T_h - T_c)_{maks}$ ,  $V_{TES,maks}$  ve  $I_{TES,maks}$  ve çevre sıcaklığına bağlı olarak elde edilebilir [23]: (Eş. 13-Eş. 15)

$$S = \frac{V_{TES,maks}}{T_a} \quad (13)$$

$$K_{TES} = \frac{0,5(T_a - \Delta T_{maks})V_{TES,maks}I_{TES,maks}}{T_a \Delta T_{maks}} \quad (14)$$

$$R = \frac{(T_a - \Delta T_{maks})V_{TES,maks}}{T_a I_{TES,maks}} \quad (15)$$

FV panel içerisinde kalan ısı miktarı için aşağıdaki Eş. 16 ve Eş. 17 kullanılabilir [30]:

$$\dot{Q}_{sistem} = \frac{dT_{FV}}{dt} C_{FV} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{sistem} = \frac{dT_{PV}}{dt} (\rho_{si}c_{si}A_{FV}d_{si} + \rho_t c_t A_{FV}d_t + \rho_c c_c A_{FV}d_c) \quad (17)$$

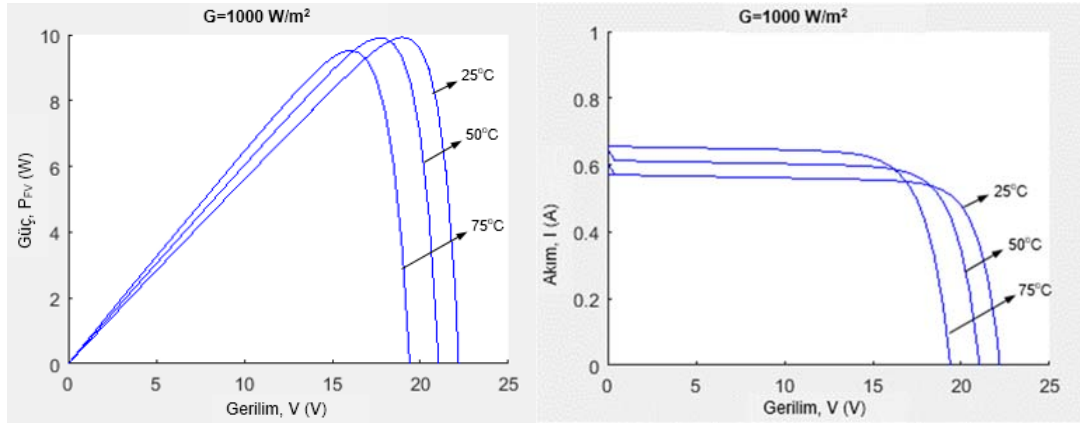
Burada,  $C_{FV}$ , FV panelin ısı sığası (J/K) olmaktadır ve FV paneli oluşturan malzemelerin özelliklerine göre Eş. 17'deki parantez içi ifadeye dönüştürülebilir.  $\rho_{si}$ , silisyum hücrenin yoğunluğunu ( $2330 \text{ kg/m}^3$ );  $c_{si}$ , silisyum hücrenin özgül ısısını ( $677 \text{ J/kgK}$ );  $d_{si}$ , silisyum hücrenin kalınlığını ( $0,0003 \text{ m}$ );  $\rho_t$ , arka yüzey malzemesi Tedlar'ın yoğunluğunu ( $1200 \text{ kg/m}^3$ );  $c_t$ , Tedlar'ın özgül ısısını ( $1250$

J/kgK);  $d_t$ , Tedlar'ın kalınlığını (0,0005 m);  $\rho_c$ , FV panel saydam örtüsü camın yoğunluğunu ( $3000 \text{ kg/m}^3$ );  $c_c$ , FV panel saydam örtüsü camın özgül ısısını ( $500 \text{ J/kgK}$ ) ve  $d_c$ , FV panel saydam örtüsü camın kalınlığını (0,003 m) göstermektedir [30].

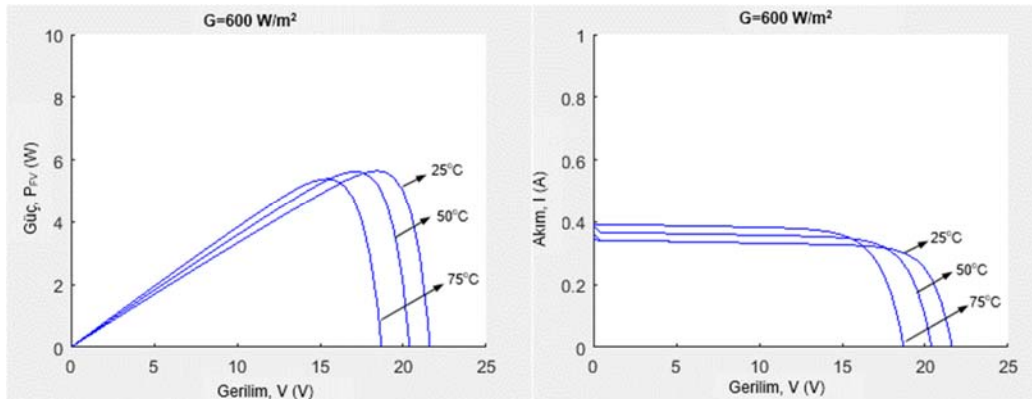
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Deney düzeneklerinde yer alan fotovoltaik panellerin farklı yüzey sıcaklık değerlerinin ( $25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  ve  $75^\circ\text{C}$ )  $P_{FV}$ -V ve I-V eğrileri üzerine etkileri sabit ışınım değerleri ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $600 \text{ W/m}^2$  ve  $200 \text{ W/m}^2$ ) için incelenmiştir, bu ölçümlerde I-V izleyicisi olarak Metrel Eurotest PV Lite MI 3109 ve Metrel PV Remote Unit A 1378 FV panel test cihazları kullanılmıştır. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da yüzey sıcaklığının karakteristik eğrilere etkisi görülmektedir. Akım, gerilim ve güç değerleri yüzey sıcaklığının artması ile azalmaktadır. Özellikle bu etki açık devre gerilimi üzerinde daha etkili olmaktadır. Güçteki azalma değeri standart koşullara göre yüksek yüzey sıcaklıklarında %10 değerini bulmaktadır. Yüksek güçteki FV paneller için bu azalma oldukça önemli bir düzeydedir. Bu nedenle FV panellerin yüzey sıcaklıklarının farklı soğutma yöntemleri ile standart

koşullardaki sıcaklık değerlerine yakın optimum bir sıcaklık değerine düşürülmesinin performanslarını arttıracığı açıktır. Ölçümler,  $38^\circ27'49''\text{K}$  ve  $27^\circ14'20''\text{D}$  koordinatlarında bulunan Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü yerleşkesinde, farklı günlerde, güneş ışığının en yoğun olduğu saatlerde, 5 dakika aralıklarla alınmıştır. Bu çalışmada Nisan ayındaki iki farklı güne ait sonuçlar verilmektedir. Bu günler açık gökyüzü ve bulutlu gökyüzü koşullarına örnek olması açısından iki tipik gün olarak seçilmiştir. Açık gökyüzü koşulunu ifade etmek için Gün-1, bulutlu gökyüzü koşulunu ifade etmek için Gün-2 kısaltmaları kullanılmıştır. Bu iki farklı gün için yapılan deneyler sonucu elde edilen, panel üzerine gelen güneş ışınımı, çevre sıcaklığı ve rüzgâr hızı değerleri Şekil 7'de yer almaktadır. Sabah saatlerinde düşük olan güneş ışınımı, öğle saatlerinde en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Gün-1 için ortalama güneş ışınımı  $666,98 \text{ W/m}^2$  ve maksimum güneş ışınımı  $929,81 \text{ W/m}^2$  ölçülmüştür. Bu güne ait ortalama çevre sıcaklığı  $23,7^\circ\text{C}$  ve maksimum çevre sıcaklığı  $27,4^\circ\text{C}$  olmaktadır. Aynı zamanda, ortalama rüzgâr hızı  $2,62 \text{ m/s}$  olarak gerçekleşmektedir. Gün-2 için ortalama güneş ışınımı  $564,64 \text{ W/m}^2$  ve maksimum güneş ışınımı  $982,28 \text{ W/m}^2$  ölçülmüştür. Deney gününe ait ortalama çevre sıcaklığı  $25,5^\circ\text{C}$  ve maksimum çevre sıcaklığı  $31,2^\circ\text{C}$  olmaktadır.



Şekil 4.  $1000 \text{ W/m}^2$  güneş ışınımı altında FV panele ait farklı sıcaklıklardaki karakteristik eğriler (Characteristic curves for PV panel with different temperatures under solar radiation of  $1000 \text{ W/m}^2$ )



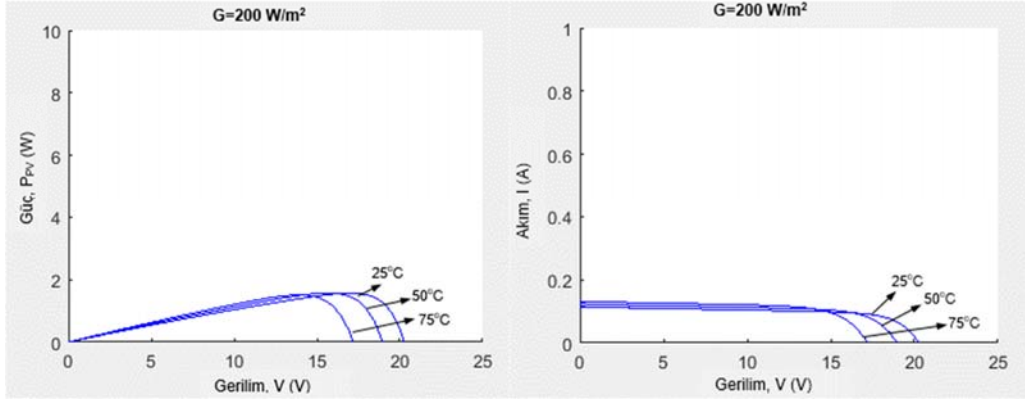
Şekil 5.  $600 \text{ W/m}^2$  güneş ışınımı altında FV panele ait farklı sıcaklıklardaki karakteristik eğriler (Characteristic curves for PV panel with different temperatures under solar radiation of  $600 \text{ W/m}^2$ )



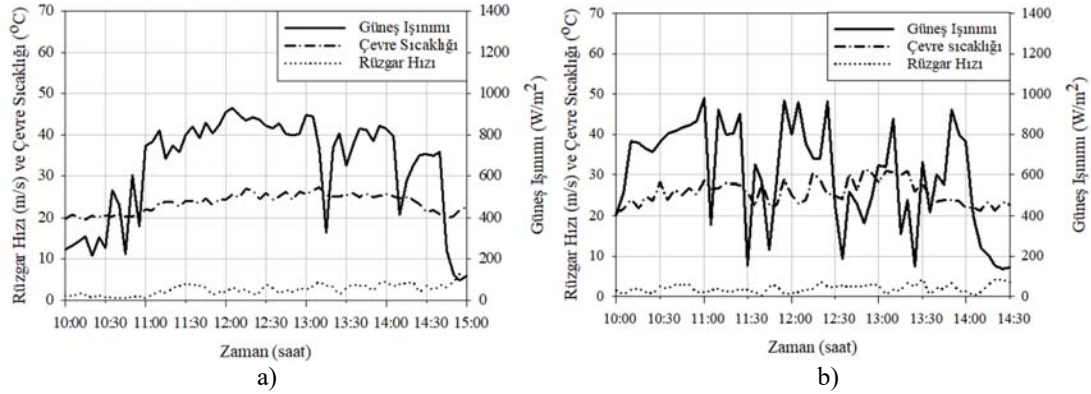
Ayrıca, ortalama rüzgâr hızı 2,12 m/s'dir. Şekil 8'de referans FV panel yüzey sıcaklıkları ve termoelektrik soğutuculu FV panel yüzey sıcaklıklarının ölçüm verileri görülmektedir.

Şekil 8'de görüldüğü gibi artan güneş ışınımı miktarına bağlı olarak, öğle saatlerinde yüzey sıcaklıkları en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Gün-1 için, saat 12:05'de referans FV yüzey sıcaklığı 41,8°C düzeyine kadar ulaşmaktadır. Bu

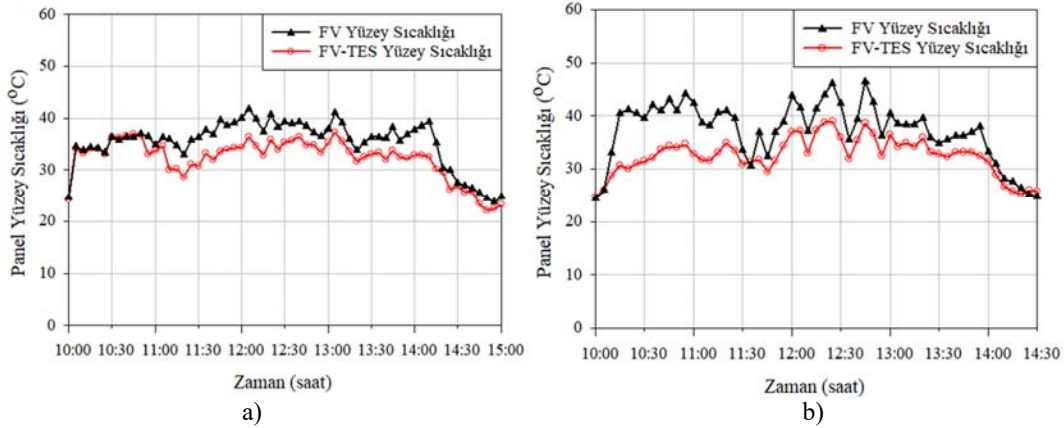
anda çevre sıcaklığı 25,6°C, FV-TES yüzey sıcaklığı ise 36,4°C elde edilmiştir. Bu deney gününde, referans FV ile FV-TES yüzey sıcaklıkları arasında ortalama 3,1°C'lik bir fark oluşmuştur, maksimum fark ise 6,8°C olmaktadır. Gün-2 için, saat 12:45'de referans FV yüzey sıcaklığı 46,5°C düzeyine kadar ulaşmaktadır. Bu anda çevre sıcaklığı 26,3°C, FV-TES yüzey sıcaklığı ise 38,6°C elde edilmiştir. Bu deney gününde, Referans FV ile FV-TES yüzey



Şekil 6. 200 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımı altında FV panele ait farklı sıcaklıklardaki karakteristik eğriler (Characteristic curves for PV panel with different temperatures under solar radiation of 200 W/m<sup>2</sup>)



Şekil 7. Güneş ışınımı, çevre sıcaklığı ve rüzgâr hızının değişimi a) Gün-1 b) Gün-2 için (Variations of solar radiation, ambient temperature and wind speed for a) Day-1 b) Day-2)

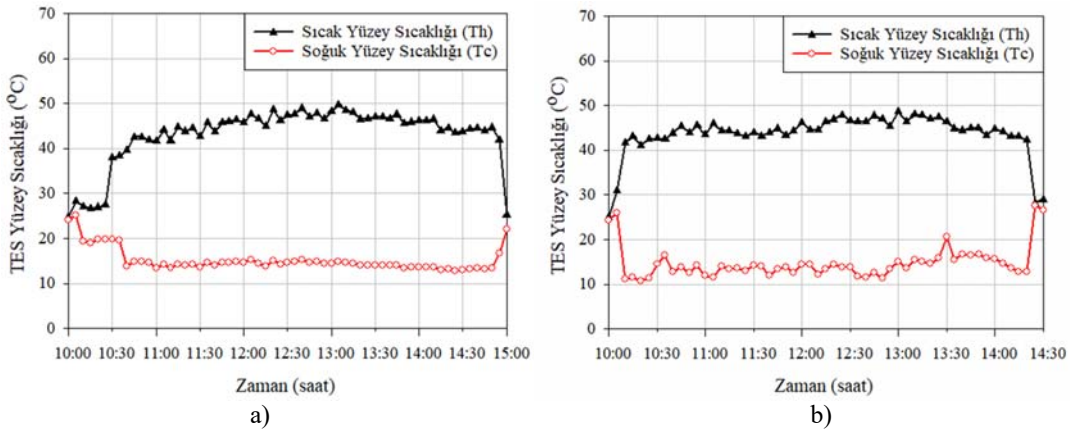


Şekil 8. Referans FV panel ve termoelektrik soğutuculu FV panel yüzey sıcaklıklarının değişimi a) Gün-1 b) Gün-2 için (Variations of surface temperatures of reference PV panel and PV panel with thermoelectric cooler for a) Day-1 b) Day-2)

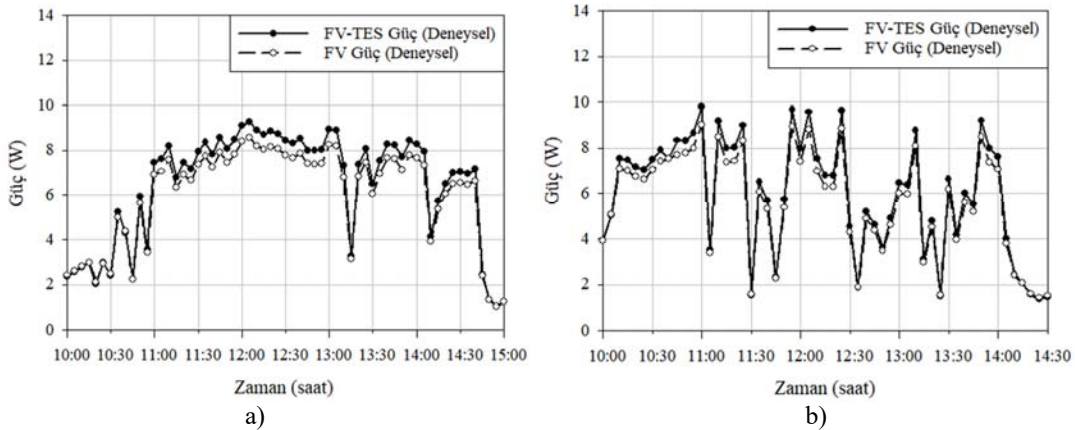
sıcaklıkları arasında ortalama  $4,9^{\circ}\text{C}$ 'lik bir fark oluşmuştur, maksimum fark ise  $9,9^{\circ}\text{C}$  olmaktadır. Şekil 9'da ise FV-TES düzeneğinde yer alan TES'e ait sıcak ve soğuk yüzeylerindeki sıcaklıkların değişimi görülmektedir. Gün-1 için, TES'in sıcak yüzeyindeki sıcaklığın maksimum değeri  $49,7^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür, TES'in soğuk yüzeyinin sıcaklığı ise minimum  $12,8^{\circ}\text{C}$ 'ye inebilmektedir. Yüzeyler arası sıcaklık farkı TES'ler için önemli bir parametredir ve bu farkın yüksek olması TES performansını arttırmaktadır. Bu değer deney zaman aralığı süresince ortalama  $29,1^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Gün-2 için, TES'in sıcak yüzeyindeki sıcaklık maksimum  $48,6^{\circ}\text{C}$  düzeyine kadar ulaşmaktadır, TES'in soğuk yüzeyinde ise sıcaklık minimum  $10,7^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmektedir. Yüzeyler arası sıcaklık farkı deney zaman aralığı süresince ortalama  $28,9^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür.

FV panel yüzey sıcaklığının güç üretimindeki etkisi Şekil 10'da gözlemlenmektedir. Termoelektrik soğutuculu FV panel tarafından üretilen güç üretim miktarı, referans FV panele göre daha fazla gerçekleşmektedir. Güneş ışınımının en yüksek olduğu anlarda her iki düzenekte de maksimum güç üretimi gerçekleşmektedir. Gün-1 için, saat 12:05'de, FV-TES'in güç üretimi maksimum değerine ulaşarak, standart koşullardaki değeri olan  $10\text{ W}$ 'a yaklaşmış ve değeri

$9,3\text{ W}$  olarak ölçülmüştür. Bu andaki referans FV panel güç üretim değeri  $8,6\text{ W}$  olmaktadır ve yaklaşık  $0,7\text{ W}$ 'lık sıcaklık düşüşünden kaynaklı bir performans artışı olduğu görülmektedir. Termoelektrik soğutucu kullanımı ile elde edilen sıcaklık düşüşünün güç üretimine katkısı ortalama  $0,45\text{ W}$  civarındadır. Gün-1 süresince ortalama güç artışı  $\%7,3$  olarak hesaplanmıştır ve  $1^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık düşüşü için ortalama  $\%2,3$  civarında güç artışının gerçekleştiği görülmüştür. Enerji üretiminde, termoelektrik soğutuculu FV panel,  $33,38\text{ Wh}$ ; referans FV panel ise  $31,01\text{ Wh}$ 'lık üretim sağlamıştır. Ancak, TES'e dışarıdan sağlanan enerji ihtiyacı  $13,5\text{ Wh}$  olarak gözönünde bulundurulduğunda termoelektrik soğutuculu FV panel sisteminin enerji üretiminin daha az olduğu ( $19,88\text{ Wh}$ ) gözlemlenmiştir. Gün-2 için, FV-TES'in maksimum güç üretim değeri standart koşullardaki değeri olan  $10\text{ W}$ 'a saat 11:00'de yaklaşmış ve  $9,8\text{ W}$  olarak ölçülmüştür. Bu andaki referans FV panel güç üretim değeri  $9\text{ W}$  olmaktadır ve yaklaşık  $0,8\text{ W}$ 'lık sıcaklık düşüşünden kaynaklı bir performans artışı olduğu görülmektedir. Termoelektrik soğutucu kullanımı ile elde edilen sıcaklık düşüşünün güç üretimine katkısı ortalama  $0,38\text{ W}$  civarındadır. Gün-2 süresince ortalama güç artışı  $\%6,7$  olarak hesaplanmıştır. Böylece, bu deneyde  $1^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık düşüşü için ortalama  $\%1,37$  civarında güç



Şekil 9. Termoelektrik soğutucu yüzeylerinde ölçülen sıcaklıkların değişimi a) Gün-1 b) Gün-2 için (Variations of temperatures measured on the surfaces of the thermoelectric cooler for a) Day-1 b) Day-2)



Şekil 10. Termoelektrik soğutuculu FV panel ve referans FV panel güç üretim değerlerinin değişimi a) Gün-1 b) Gün-2 için (Variations of power generations of PV panel with thermoelectric cooler and reference PV panel for a) Day-1 b) Day-2)

artışının gerçekleştiği ifade edilebilir. Termoelektrik soğutuculu FV panel 27,11 Wh, referans FV panel ise 25,40 Wh enerji üretimi sağlamıştır. Fakat, TES'e dışarıdan sağlanan enerji ihtiyacı 11,25 Wh olarak gözönünde bulundurulduğunda termoelektrik soğutuculu FV panel sisteminin enerji üretiminin daha az (15,86 Wh) olduğu görülmüştür.

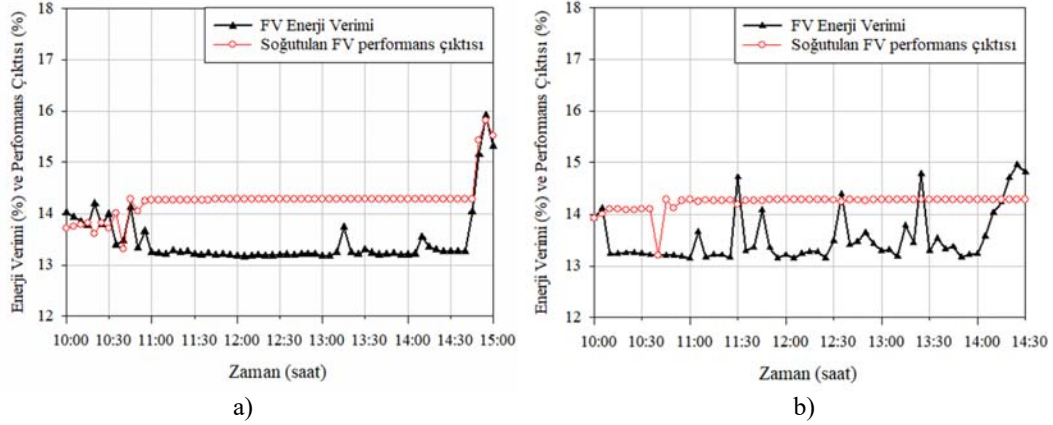
Şekil 11'de termoelektrik soğutuculu FV panelin performans çıktısı, referans FV panel enerji verimi ile karşılaştırılmıştır. Termoelektrik soğutucu kullanımı ile elde edilen sıcaklık düşüşünün performansa da olumlu etkisi burada görülmektedir. Gün-1 için ortalama performans çıktısındaki artış %6,22 civarında hesaplanmıştır. 1°C'lik sıcaklık düşüşü ile elde edilen ortalama performans çıktısındaki artış %1,99 düzeyinde gerçekleşmiştir. Deney 2 için ise ortalama performans çıktısındaki artış %4,64 civarında hesaplanmıştır. 1°C'lik sıcaklık düşüşü ile elde edilen ortalama performans çıktısındaki artış %1,07 düzeyinde olmuştur.

Bir önceki bölümde termodinamik modellemesi elde edilen termoelektrik soğutuculu FV panelin modelleme sonuçları

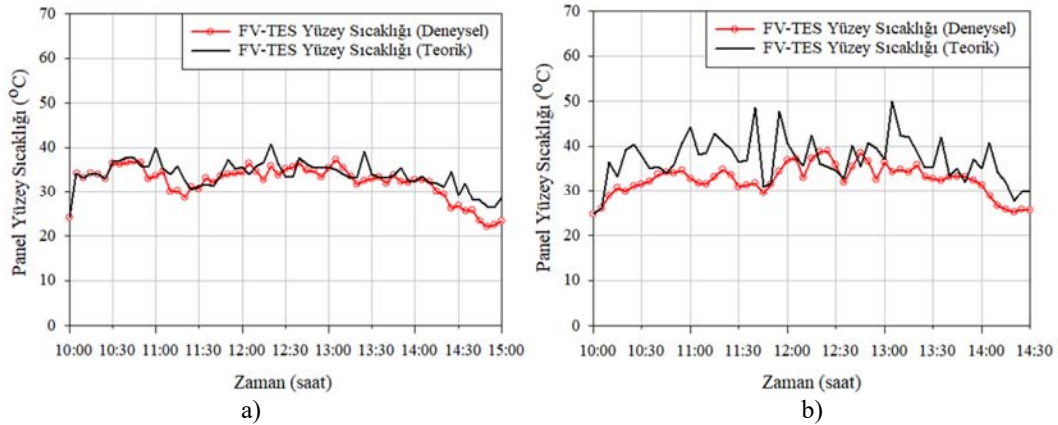
ile elde edilen yüzey sıcaklık ve teorik güç üretim değerleri ölçüm verileriyle Şekil 12 ve Şekil 13'de karşılaştırılmıştır. Modelleme ile elde edilen yüzey sıcaklıkları ve güç üretim değerlerinin ölçüm verileri ile uyumlu ve birbirlerine yakın olarak elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, modellemenin farklı meteorolojik parametrelerle, panel yüzey sıcaklığının ve dolayısıyla güç üretimindeki artışın tahmininde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu amaçla, termodinamik modellemede, aynı koordinatlar için 2007-2016 yılı arasındaki saatlik tipik meteorolojik yıla (TMY) [31] ait güneş ışınımı, çevre sıcaklığı ve rüzgâr hızı verileri kullanılarak çalışma genişletilmiştir. Şekil 14'te tipik meteorolojik yıla ait panel üzerine gelen güneş ışınımı ve çevre sıcaklığı verilerinin seçilen aylara ait günlük (Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim) ve yıllık ortalama değerleri yer almaktadır.

Termodinamik modelleme ile termoelektrik soğutuculu FV panele ve Referans FV panele ait yüzey sıcaklıkları ve güç üretim değerleri saatlik olarak elde edilmiştir. Standart test koşullarındaki panel yüzey sıcaklığı olan 25°C üzerindeki değerlerde TES ile soğutma işlemi yapılmıştır. Bu verilere



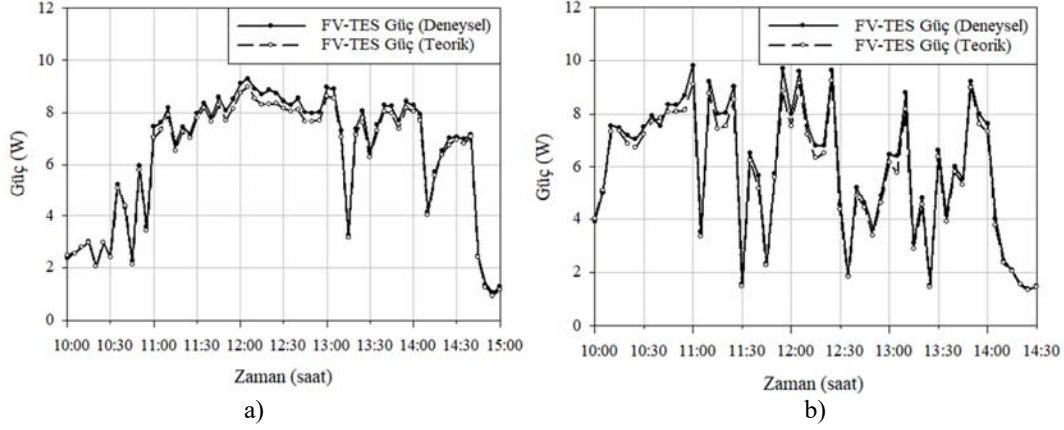
Şekil 11. Referans FV panelin enerji verimi ve soğutulan FV panelin performans çıktılarının karşılaştırılması a) Gün-1 b) Gün-2 için (Comparison of energy efficiencies of PV panel with thermoelectric cooler and reference PV panel for a) Day-1 b) Day-2)



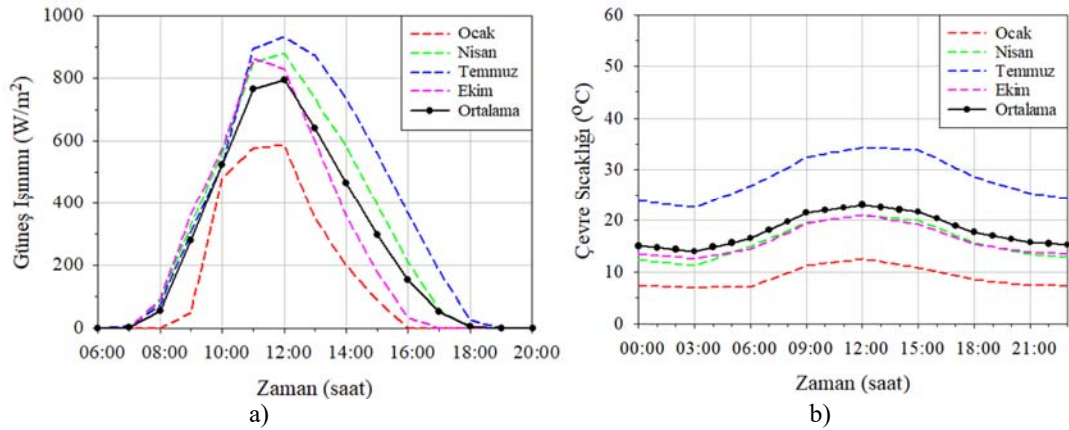
Şekil 12. Deneysel ve teorik olarak soğutuculu FV panelin yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması a) Gün-1 b) Gün-2 için (Comparison of surface temperatures of PV panel with thermoelectric cooler theoretically and experimentally for a) Day-1 b) Day-2)

göre, aylık ve yıllık ortalama yüzey sıcaklık değerleri Şekil 15'de verilmektedir. Özellikle güneş ışınımı ve çevre sıcaklığının arttığı aylarda yüzey sıcaklıklarının arttığı görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına dayalı, Referans FV ve termoelektrik soğutuculu FV panelin Ocak, Nisan,

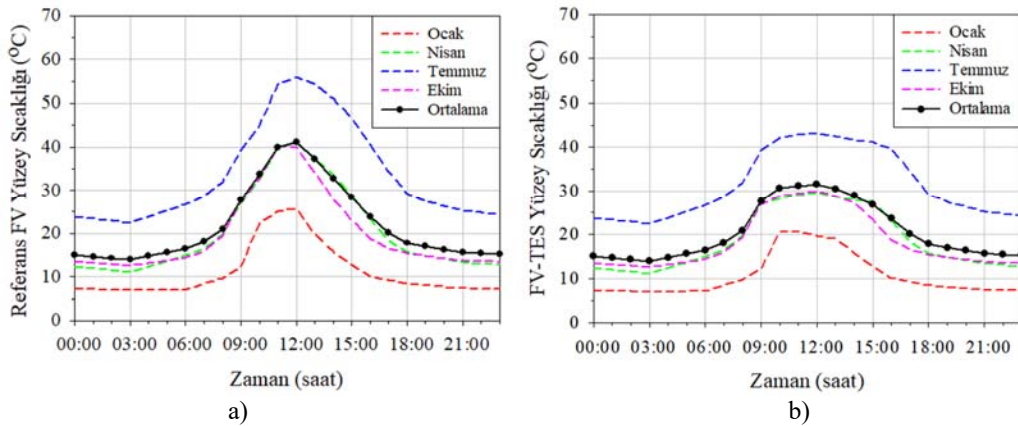
Temmuz ve Ekim aylarındaki ve yıllık ortalama güç üretim değerleri Şekil 16'da bulunmaktadır. Panel yüzey sıcaklıklarının TES kullanımı ile azaltılmasıyla, referans panel yüzey sıcaklıklarının yüksek olduğu aylara göre termoelektrik soğutuculu FV panelin güç miktarında artış



Şekil 13. Deneyel ve teorik olarak termoelektrik soğutuculu FV panelin güç üretimlerinin karşılaştırılması a) Gün-1 b) Gün-2 için (Comparison of power generations of PV panel with thermoelectric cooler theoretically and experimentally for a) Day-1 b) Day-2)



Şekil 14. Aylık ve yıllık meteorolojik verilerin ortalama değerlerinin saatlik değişimi a) güneş ışınımı b) çevre sıcaklığı (Hourly variations of monthly and annual data of meteorological average values a) solar radiation b) ambient temperature)

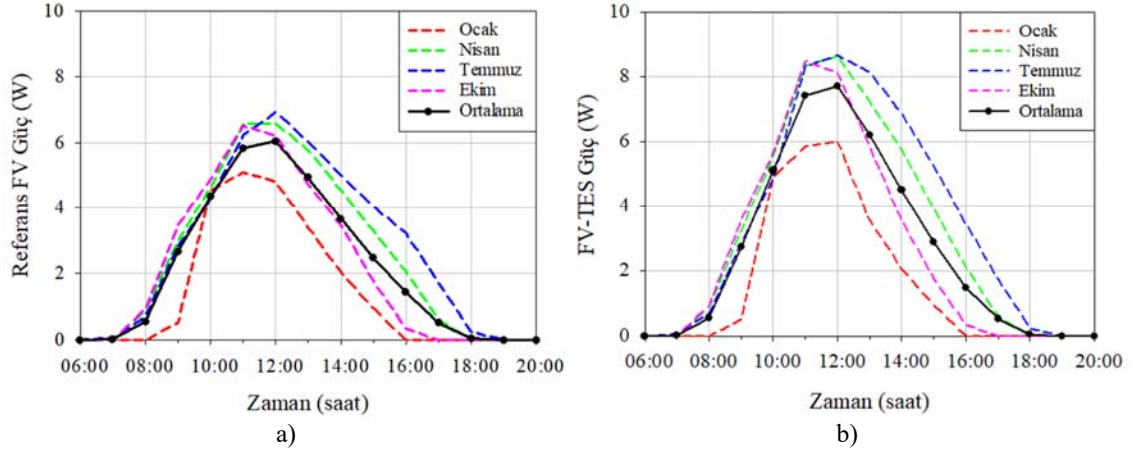


Şekil 15. Aylık ve yıllık ortalama yüzey sıcaklıklarının saatlik değişimi; a) referans FV panel, b) termoelektrik soğutuculu FV panel için

(Hourly variations of monthly and annual average surface temperatures; for a) reference PV panel, b) PV panel with thermoelectric cooler)

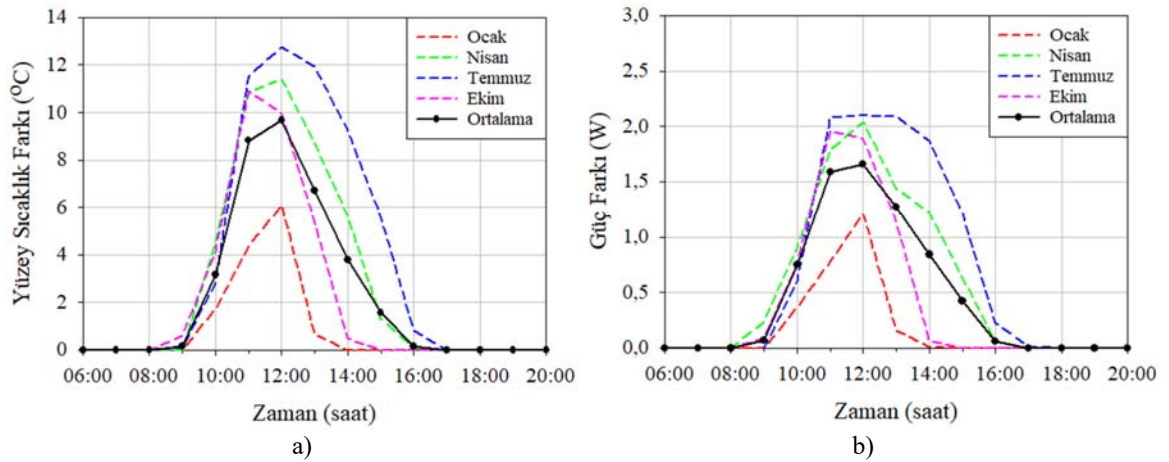
meydana gelmesi beklenmektedir. Saat 12:00 civarında referans FV paneldeki yıllık ortalama güç çıkışı 6,03 W iken termoelektrik soğutuculu FV paneldeki güç %27,5'lük artış ile 7,69 W olarak elde edilebileceği görülmektedir. Kış aylarında güç miktarlarındaki değişimin daha az (örneğin Ocak ayı için maksimum %20 dolayında) olabileceği görülmektedir. Referans FV ve termoelektrik soğutuculu FV panele ait yüzey sıcaklıkları ve güç üretim miktarları arasındaki fark Şekil 17'de daha açık görülebilir. Simülasyon sonuçlarına bağlı olarak, Şekil 17'de görüldüğü gibi panel yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın, Temmuz ayında 12,7°C'ye kadar ulaşabileceği ortaya çıkmaktadır. Kış aylarında ise aradaki farkın maksimum 6,1°C civarında olabileceği anlaşılmaktadır. Buna göre, yıllık ortalama yüzey sıcaklık farkı maksimum 9,6°C gerçekleşebilecektir. Özellikle Nisan-Eylül ayları arasındaki dönemde yüzey sıcaklık farkı yıllık ortalama değerlerden daha fazla olduğu için termoelektrik soğutucu kullanımı güç üretimine,

dolayısıyla performansa daha fazla katkı sunmaktadır. Yıllık ortalama güç üretimleri arasındaki maksimum fark 1,66 W değerine çıkabilmektedir. Maksimum güç farkı Temmuz ayında 2,1 W, Ocak ayında ise 1,21 W düzeyinde beklenmektedir. Referans FV panel ve termoelektrik soğutuculu FV panelin aylık enerji üretimleri, verim ve performans çıktılarına Şekil 18'de yer verilmektedir. Aynı zamanda ortalama günlük güneş ışınımı miktarları da şekilde yer almaktadır. Şekil 18'de görüldüğü gibi referans FV panelden yıllık 11854,82 Wh, termoelektrik soğutuculu FV panelden %20,51'lik artışla yıllık 14285,74 Wh enerji üretiminin gerçekleşmesi beklenmektedir. Maksimum aylık enerji üretiminin ve performans artışının %23,96 ile Ağustos ayında olabileceği görülmektedir. Minimum aylık enerji üretim ve performans artışının ise %11,89 ile Ocak ayında olabileceği ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, TES kullanımı FV panelde aylık ortalama %19,63'lük bir enerji ve performans artışına olanak sağlayabileceği ifade edilebilir.



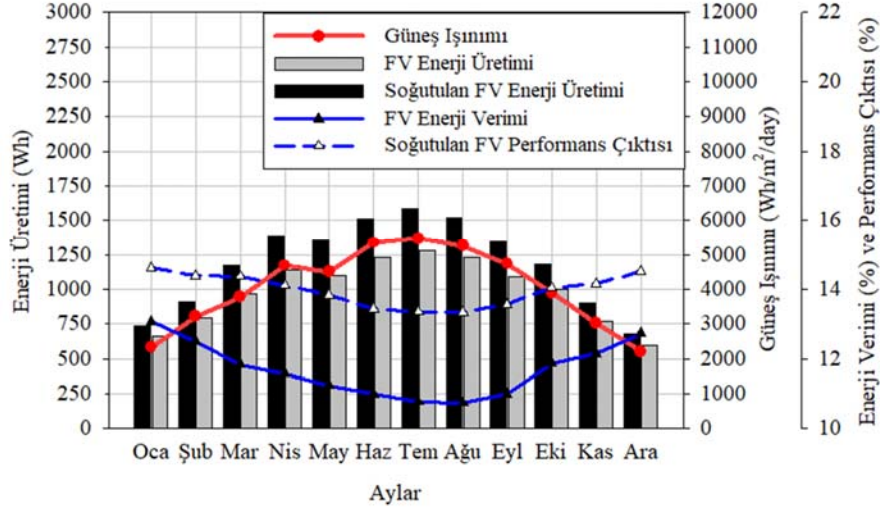
**Şekil 16.** Aylık ve yıllık ortalama güç üretim değerlerinin saatlik değişimi; a) referans FV panel, b) termoelektrik soğutuculu FV panel için

(Hourly variations of monthly and annual average power generations for a) reference PV panel, b) PV panel with thermoelectric cooler)



**Şekil 17.** Referans FV panel ile termoelektrik soğutuculu FV panel arasındaki aylık ve yıllık ortalama değerlerin saatlik değişimi; a) ortalama yüzey sıcaklıkları ve b) güç farkları

(Hourly variations of differences for monthly and annual average values between reference PV panel and PV panel with thermoelectric cooler a) surface temperature values b) power differences)



**Şekil 18.** Ortalama günlük güneş ışınımı miktarının aylık değişimi ve termoelektrik soğutuculu FV ile Referans FV panelin aylık enerji üretimlerinin ve performanslarının karşılaştırılması  
(Monthly variation of daily average solar radiation values and comparison of monthly power generations and performances of reference PV panel and PV panel with thermoelectric cooler)

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

##### 4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

BEFV	: Binaya Entegre Fotovoltaik Panel
FV	: Fotovoltaik
TEJ	: Termoelektrik Jeneratör
TEM	: Termoelektrik Modül
TES	: Termoelektrik Soğutucu

##### 4.2. Semboller ve Birimler (Symbols and Units)

$A_{FV}$	: Panelin efektif yüzey alanı ( $m^2$ )
$A_{TES}$	: TES yüzey alanı ( $m^2$ )
$c_c$	: FV panel saydam örtüsü camın özgül ısısı ( $J/kgK$ )
$C_{FV}$	: FV panelin ısı sığası ( $J/K$ )
$c_{si}$	: Silisyum hücrenin özgül ısısı ( $J/kgK$ )
$c_t$	: Tedlar'ın özgül ısısı ( $J/kgK$ )
$d_c$	: FV panel saydam örtüsü camın kalınlığını ( $m$ )
$d_t$	: Tedlar'ın kalınlığını ( $m$ )
$d_{si}$	: Silisyum hücrenin kalınlığı ( $m$ )
$\dot{E}_g$	: FV panel üzerine gelen toplam güneş ışınımı ( $W$ )
$G$	: Birim yüzey alana gelen güneş ışınımı miktarı ( $W/m^2$ )
$H$	: Doğal taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ )
$I_{TES}$	: TES'in akım değeri ( $A$ )
$K_{TES}$	: TES'in ısı iletkenliği ( $W/K$ )
$P_{FV}$	: FV panel tarafından üretilen güç ( $W$ )
$\dot{Q}_{t,\text{ön}}$	: FV panelin ön yüzeyinden gerçekleşen ısı taşınım miktarı ( $W$ )
$\dot{Q}_{t,\text{arka}}$	: FV panelin arka yüzeyinden gerçekleşen ısı taşınım miktarı ( $W$ )
$\dot{Q}_r$	: FV panel ön yüzeyinde gerçekleşen ışınlama ısı transferi miktarı ( $W$ )

$\dot{Q}_c$	: Termoelektrik soğutucu tarafından sağlanan soğutma yükü ( $W$ )
$\dot{Q}_{sistem}$	: FV panel içerisinde kalan ısı miktarını ( $W$ )
$R$	: TES'in elektrik direnci ( $\Omega$ ).
$S$	: TES'in Seebeck katsayısı ( $V/K$ )
$T_{FV}$	: FV panel yüzey sıcaklığı ( $K$ )
$T_c$	: TES'in soğuk yüzeyinin sıcaklığı ( $K$ )
$T_h$	: TES'in sıcak yüzeyinin sıcaklığı ( $K$ )
$T_{sky}$	: Gökyüzü sıcaklığı ( $K$ )
$T_{std}$	: Standart koşullardaki FV panel yüzey sıcaklığı ( $298 K$ )
$T_a$	: Çevre sıcaklığı ( $K$ )
$V_{rüzgar}$	: Rüzgâr hızı ( $m/s$ )

##### 4.3. Yunan Harfleri (Greek letters)

$\beta$	: Sıcaklık verim kayıp katsayısı ( $1/K$ )
$\rho_t$	: Arka yüzey malzemesi Tedlar'ın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$\rho_c$	: FV panel saydam örtüsü camın yoğunluğunu ( $kg/m^3$ )
$\rho_{si}$	: Silisyum hücrenin yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$\varepsilon$	: FV panelin yama katsayısı (-)
$\sigma$	: Stephan-Boltzman sabiti ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ )
$\eta_{FV}$	: FV panelin enerji verimi (-)
$\eta_{std}$	: Standart test koşulları altında ( $1000 W/m^2$ güneş ışınımı, $25^\circ C$ panel yüzey sıcaklığı, AM1,5 hava kütlesi) elde edilen enerji verimi (-)

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Günümüzde, verimleri yüksek olmayan FV sistemlerden maksimum gücün elde edilmesine yönelik çalışmalar önem kazanmaktadır. Bu nedenle güneş ışınım şiddeti veya sıcaklık gibi çevre koşulları ile verimleri değişen FV

sistemlerin üreteceği maksimum gücün tespiti ve bu güçte çalıştırılmaları gerekliliği giderek artmaktadır. Özellikle büyük sistemlerde, panel yüzey sıcaklığının düşüşü ile elde edilecek güç ve verim artışları önem kazanacağından bu yönde araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, diğer çevresel koşullara göre kontrol edilebilir bir parametre olan yüzey sıcaklığının bir termoelektrik soğutucu ile düşürülmesi ve performansına etkisi incelenmiştir. Deneyler iki farklı gün için gerçekleştirilmiştir. Termoelektrik soğutucu kullanımı ile iki farklı günde ortalama 3,1°C ve 4,9°C'lik sıcaklık düşüşü sağlanmıştır. Bu sayede, 1°C'lik sıcaklık düşüşü için ortalama %2,3 ve %1,2 güç artışı gerçekleşmiştir. Aynı zamanda, 1°C'lik sıcaklık düşüşü ile elde edilen ortalama performans artışı %1,99 ve %1,07 düzeyinde olmuştur. Enerji üretiminde ise %7,3 ve %6,7 artış sağlamıştır. Termodinamik modellemesi yapılan termoelektrik soğutuculu FV panelin sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve model ile deneysel verilerin uyumlu olduğu görülmüştür. Bir yıla ait saatlik meteorolojik veriler, tipik bir meteorolojik yıl dikkate alınarak modelleme genişletilmiştir. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre, termoelektrik soğutuculu FV panelden yıllık %20,51'lik enerji üretimi artışının olanaklı olduğu ortaya konulmuştur. Maksimum aylık enerji üretiminin ve performans artışının Ağustos ayında meydana gelmesi beklenmektedir. Minimum aylık enerji üretim ve performans artışının ise Ocak ayında olabileceği ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, TES kullanımının FV panelde enerji ve performans artışı sağlayabileceği görülmektedir. Ancak, literatürdeki çalışmalarda ve bu çalışmada, termoelektrik soğutucuların fotovoltaik panellerin soğutulmasında kullanılmalarına ve belirli güç artışı sağlamalarına rağmen yeterli miktarda performans artırımına yol açmaları zor görünmektedir. Çalışmada kullanılan TES'in elektrik enerjisi ihtiyacı dış bir elektrik kaynağından sağlanmıştır, fotovoltaik panelden bu enerjinin karşılanması durumunda termoelektrik soğutucuların performanslarının oldukça düşük olmasından dolayı güç artışı gerçekleştirilememektedir. Yapılan çalışmada, TES'e dışarıdan sağlanan enerji ihtiyacı deneylerin gerçekleştirildiği iki farklı günde (Gün-1 ve Gün-2) sırasıyla 13,5 Wh ve 11,25 Wh olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, termoelektrik soğutuculu FV panel sisteminin enerji üretimi, referans FV panele göre daha az gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak, TES kullanımı FV panellerin belirli sıcaklık koşullarında tutulması (ısıtılması/soğutulması) ve bu koşullarda karakteristik eğrilerinin (akım-gerilim, gerilim-güç gibi) elde edilmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda, TES maliyeti ve performansının önemli olmadığı uygulamalar için düşünülebilir. Örneğin, bir FV panelin çeşitli güneş ışınımı değerlerinde, 25°C, 50°C ve 100°C gibi farklı sıcaklıklarda karakteristik eğrilerinin oluşturulması için yüzeyinin ısıtılması veya soğutulması gerekmektedir ve bu TES'ler ile sağlanabilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. (Proje Numarası: 15-GEE-004).

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Daş M., Balpetek N., Akpınar E.K., Akpınar S., Investigation of wind energy potential of different provinces found in Turkey and establishment of predictive model using support vector machine regression with the obtained results, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 2203-2213, 2019.
2. Akpınar E.K. ve Balpetek N., Statistical analysis of wind energy potential of Elazığ province according to Weibull and Rayleigh distributions, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (1), 569-580, 2019.
3. BP, Statistical Review of World Energy, British Petroleum (BP), June 2018.
4. IEA, Key World Energy Statistics 2018, International Energy Agency (IEA), France, 2018.
5. Karaçavuş B., Optimization of solar domestic hot water system for certain climate zones of Turkey, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (3), 843-853, 2017.
6. IRENA, Renewable Capacity Statistics 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, UAE, 2018.
7. REN21, Renewables Global Status Report 2018, Renewable Energy Policy Network (REN21), Paris, France, 2019.
8. Yıldırım E. ve Aktacir M.A., Investigation of azimuth and tilt angle effects on building integrated photovoltaic systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 609-619, 2019.
9. ISE, Photovoltaics Report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Freiburg, Germany, 27 August 2018.
10. Ezan M.A., Yüksel C., Alptekin E., Yılancı A., Importance of natural convection on numerical modelling of the building integrated PVP/PCM systems, Solar Energy, 159, 616-627, 2018.
11. Makki A., Omer S., Sabir H., Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 658-684, 2015.
12. Du B., Hub E., Kolheç M., Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system, Renewable Sustainable Energy Reviews, 16, 6732-6736, 2012.
13. Ahıska R. ve Ahıska K., Flexible two phase thermoelectric CPU cooler, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (2), 347-351, 2007.
14. Ahıska R., New method for study dynamic exit properties of thermoelectric modules, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (4), 709-716, 2007.
15. Sarbu I. ve Dorca A., A comprehensive review of solar thermoelectric cooling systems, International Journal of Energy Research, 42, 395-415, 2018.

16. Dođdu M.F., Termoelektrik soğutucuların performansına doğrudan temaslı ısı değiştiricilerin etkilerinin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2013.
17. Chen J., Li K., Liu C., Li M., Lv Y., Jia L., Jiang S., Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures, *Energies*, 10 (9), 13-29, 2017.
18. Choi J.S., Ko J.S., Chung D.H., Development of a thermoelectric cooling system for a high efficiency BIPV module, *Journal of Power Electronics*, 10 (2), 187-193, 2010.
19. Kane A. ve Verm V., Performance enhancement of building integrated photovoltaic module using thermoelectric cooling, *International Journal of Renewable Energy Research*, 3 (2), 320-324, 2013.
20. Najafi H. ve Woodbury K.A., Optimization of a cooling system based on peltier effect for photovoltaic cells, *Solar Energy*, 91, 152-160, 2013.
21. Ahadi S., Hosein H.R., Faez R., Using of thermoelectric devices in photovoltaic cells in order to increase efficiency, *Indian Journal of Scientific Research*, 2 (1), 20-26, 2014.
22. Borkar D.S., Prayagi S.V., Gotmare J., Performance evaluation of photovoltaic solar panel using thermoelectric cooling, *International Journal of Engineering Research*, 3 (9), 536-539, 2014.
23. Kumar R.S., Priyadharshini N.P., Natarajan E., Experimental and numerical analysis of photovoltaic solar panel using thermoelectric cooling, *Indian Journal of Science and Technology*, 8 (36), 1-9, 2015.
24. Benganem M., Al-Mashraqi A.A., Daffallah K.O., Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites, *Renewable Energy*, 89, 51-59, 2016.
25. Hebei I.T. (Shanghai). Thermoelectric cooler TEC1-12706. <http://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>, Eriřim tarihi Ekim 9, 2018.
26. Evans, D. L. ve Florschuetz, L. W., Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration, *Solar Energy*, 19 (3), 255-262, 1977.
27. Luo Y., Zhang L., Liu Z., Wang Y., Meng F., Wu J., Thermal performance evaluation of an active building integrated photovoltaic thermoelectric wall system, *Applied Energy*, 177, 25-39, 2016.
28. Wong L.T. ve Chow W.K., Solar radiation model, *Applied Energy*, 69, 191-224, 2001.
29. Zhang, H.Y., A General approach in evaluating and optimizing thermoelectric coolers, *International Journal of Refrigeration*, 33, 1187-1196, 2010.
30. Jones A.D. ve Underwood C.P., A thermal model for photovoltaic systems, *Solar Energy*, 70 (4), 349-359, 2001.
31. European Commission. Photovoltaic geographical information system. [http://re.mjrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.mjrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html). Eriřim tarihi Ekim 10, 2018.