

## Hava ve su ile soğutulan PV-T'nin dört farklı koşul için enerji ve ekserji analizi

### Energy and exergy analysis of PV-T cooled with air and water for four different conditions

Ayhan ATIZI\* 

<sup>1</sup>Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.  
aatiz@cu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 11.02.2022  
Kabul Tarihi/Accepted: 03.06.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 25.05.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.63872  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada bir PV-T hava ve su ile soğutulmuş enerji ve ekserji analizi dört farklı çalışma şartları altında numerik olarak incelendi ve sonuçlar karşılaştırıldı. 1. Durum değişen güneş ışınımı şartları, 2. durum için gerçek günlük iklim koşulları, 3. durum için sabit güneş ışınımı ve 4. durum değişen soğutma kütlesi için analizler yapıldı. Analizler Mühendislik Denklem Çözücü (EES) kullanılarak yapıldı. Kullanılan PV-T 0.54 m<sup>2</sup> alana sahiptir ve PV-T'yi soğutmak için kullanılan kütle akışı hem hava hem de su için  $\dot{m} = 0.003$  kg/s'dir ilk üç koşul için. Sonuç olarak, PV-T'nin en yüksek günlük enerji verimliliği su ve hava için sırasıyla %58.01 ve %38.74'e ulaşırken ekserji verimliliği ise en yüksek %17.23 ve %16.26'ya ulaştı. Güneş radyasyonun 100 W/m<sup>2</sup>'den 1000 W/m<sup>2</sup>'ye değiştiğinde PV-T'nin en yüksek enerji verimi su ve hava için sırasıyla %58.96 ve %41.76'ya ulaşırken en yüksek ekserji verimi ise %18.34 ve %16.20'ye ulaştı. Çevre sıcaklığı 0 °C'den 30 °C'ye artırılarak sabit 500 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu için PV-T'nin en yüksek enerji verimi su ve hava için sırasıyla %59.64 ve %35.55'e ulaşırken en yüksek ekserji verimi ise %18.90 ve %16.09'a ulaştı. Ayrıca PV-T'nin günlük elektrik üretiminin su ile soğutulduğunda havaya göre %8.91 daha fazla olduğu bulundu. Ayrıca soğutma kütle debisi 0.001 kg/s'den 0.01 kg/s değiştiğinde su ile soğutulan PV-T'nin hava ile soğutulan PV-T'ye göre daha fazla elektrik ürettiği bulundu. Böylece, hemen hemen tüm şartlar altında PV-T su ile soğutulduğunda havaya göre daha iyi performans gösterdiği ve elektrik üretiminin de daha fazla olduğu bulundu.

**Anahtar kelimeler:** Güneş enerjisi ve ekserji, PV-T, Elektrik üretimi, Enerji ve ekserji verimliliği.

#### Abstract

In this study, the energy and exergy analysis of a PV-T cooling with water and air were analyzed numerically under four different operating conditions and the results were compared. Analyses were made to change solar radiation conditions for Case 1, real daily climatic conditions for Case 2, constant solar irradiance for Case 3, and the changing cooling mass flow rate for Case 4. Analyses of the system were performed using the Engineering Equation Solver (EES). The PV-T has an area of 0.54 m<sup>2</sup> and the mass flow rate of the PV-T is 0.003 kg/s for both air and water under the first three conditions. As a result, PV-T's highest daily energy efficiencies reached 58.01% and 38.74% for water and air, while the highest exergy efficiencies reached 17.23% and 16.26%, respectively. When solar radiation changes from 100 W/m<sup>2</sup> to 1000 W/m<sup>2</sup>, PV-T's highest energy efficiencies reached 58.96% and 41.76% for water and air, while the highest exergy efficiencies are 18.34% and 16.20%, respectively. By increasing the ambient temperature from 0 °C to 30 °C under 500 W/m<sup>2</sup> of constant solar radiation, the highest energy efficiencies of PV-T reached 59.64% and 35.55% for water and air, while the highest exergy efficiencies are 18.90% and 16.09%, respectively. In addition, it was found that the daily electricity production of PV-T was 8.91% higher when cooled with water than with air. It was also found that when the cooling mass flow rate changes from 0.001 kg/s to 0.01 kg/s, the water-cooled PV-T produces more electricity than the air-cooled PV-T. Thus, PV-T is cooled by water, it performs better almost under all conditions than air and it produces more electricity.

**Keywords:** Solar energy and exergy, PV-T, Electricity production, Energy and exergy efficiencies.

## 1 Giriş

Günümüzde sanayileşme, nüfus artışı ve hızlı kentleşme geçmişe oranla daha fazla enerji kullanımına neden olmaktadır. Bu yüzden son zamanlarda dünyanın enerji talebi geçmişe göre daha yüksek seviyeye ulaştı. Bu nedenle insanlık enerji üretimi için farklı kaynaklardan yararlanmaya başlamıştır.

Güneş enerjisi günümüz dünyasında büyük bir potansiyele sahiptir çünkü sadece sürdürülebilir değil, aynı zamanda çevre dostu, uygulanabilir, pratik ve düşük işletme maliyetlerine sahip yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisi, farklı amaçlarla kullanılabilir. Örneğin termal ve elektrik enerjisi üretmek, damıtma ve ısıtma yapmak gibi [1] önemli güneş teknolojilerinden biri de elektrik üretmek için dünyada oldukça popüler hale gelen fotovoltaik güneş pili (PV) teknolojisidir [2]. Güneş pili doğrudan güneş enerjisinden

elektrik üretebildiği için uzun zamandan beri araştırmacılar bu teknoloji üzerinde çalışmaktadır [3],[4]. PV'nin performansı bulutlu havalardan, yüksek çevre sıcaklığından ve gölgeleme gibi koşullardan da olumsuz etkilenmektedir. Bununla beraber güneş pilleri, güneş enerjisi altında elektrik üretirler ancak bu işlem sırasında ısınmaya başladıklarından elektrik üretim performansları düşmeye başlar. Eğer bu fazla ısı enerjisi, hava veya su kullanılarak güneş pillerinden alındığında, güneş pilinin elektrik üretim verimliliği artar [5]. Böylece, güneş pilleri, fotovoltaik termal sistemler (PV-T) olarak adlandırılan bir sistemde güneş enerjisi yoluyla hem elektrik hem de termal enerji üretir. Hava veya su yardımıyla ısı eşanjörü kullanılarak üretilen fazla ısı faydalı bir forma dönüştürülebilir. Birçok araştırmacı, güneş pillerinin performanslarını iyileştirmek için PV-T tasarımı ve analizi üzerinde araştırma yaptı [6],[7]. Örneğin, aynı akışkan kullanarak PV-T'nin soğutulması için

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

aynı iklim koşullarında iki farklı malzeme PV-T’de kullanıldı. He iki farklı tasarımıda havanın PV-T’nin performansını arttırdığı bulundu [8]. Bununla beraber tasarımın yanında PV’nin performansını önemli derecede artıran etkenlerden biri de onun soğutulmasıdır. Eğer PV soğutulursa elektriksel üretiminin de arttığı bulundu [9]. Ayrıca PV’nin çalıştığı en uygun sıcaklık değerinden sonra her 1 °C artış için performansının azaldığı bulundu [10]. Bu yüzden PV-T’nin soğutulması kendisi için en uygun çalışma sıcaklığına getirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden bir PV-T herhangi bir akışkan ile soğutulduğunda onun performansı son derece olumlu yönde etkilenmektedir [11].

Soğutma için kullanılan önemli akışkanlardan birisi de sudur. Su kullanılarak soğutulan PV-T’ler literatürde yeterince incelenmiştir. Fudholi ve diğ. [12] tarafından yapılan bir çalışmada, PV-T’nin elektriksel ve termal enerji üretimi, 500-800 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımı altında 0.011 kg/s’den 0.041 kg/s’ye değişen farklı kütle akış hızında su kullanılarak PV-T’nin performansı incelenmiştir. PV-T’nin en iyi performansı, 0.041 kg/s kütle akış hızı ile 800 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında gösterdiği bulundu. Preet ve diğ. [13] deneysel olarak üç farklı koşul için PV-T test edildi. Kütle akış hızlarının elektriksel ve ısı verimi nasıl etkilediğini araştırmak için farklı akış hızlarında su (0.013, 0.023 ve 0.031 kg/s) kullanıldı ve bunun sonucunda suyun soğuttuğu PV-T’nin termal ve elektriksel veriminin arttığı ve ayrıca debi arttıkça da PV-T veriminin arttığı bulundu. Moharram ve diğ. [14] PV panel sıcaklığını düşürmek için üzerine su serpştirerek soğutma yapmışlardır. PV’nin sıcaklığının 10 °C azaldığı ve elektrik üretiminin arttığı bulundu. Rosa-Clot ve diğ. [15] PV hücrelerinin su ile etkinleştirerek soğutulması yapıldığında PV veriminin soğutulma yapılmayan bir PV’ye göre daha yüksek verimde olduğunu buldular. Odeh ve Behnia [16] güneş panelinin üst yüzeyine su püskürtmek için su damlatma mekanizmasının kullanıldığında sistemin güç çıkışında oldukça iyi bir iyileşme sağladığını buldular. Kolhe ve diğ. [17] PV’ye su ile soğutulduğunda soğutma yapılmayan bir PV’ye göre daha yüksek oranda elektrik gücü ürettiğini gösterdiler. Abdolzadeh ve Ameri [18] PV hücrelerini su püskürtme tekniği ile soğutulan bir fotovoltaik su pompalama sisteminin performansını arttırdığı buldular. Sudhakar ve diğ. [19] su ile soğutulan bir PV’nin elektriksel ve ekserji veriminin arttığı buldular.

Soğutma için kullanılan önemli akışkanlardan bir diğeri de havadır. Arslan ve diğ. [20] deneysel ve teorik olarak hava kullanılarak soğutulan PV-T’nin enerji ve ekserji verimi araştırıldılar. Bunun için farklı kütlelerde hava debisi kullanıldı. Yüksek kütle debisinde PV-T’nin termal enerji ve elektriksel veriminde artış olduğu bulundu. Ayrıca bu çalışmada PV-T’nin elektriksel veriminin hava kullanılmadan çalışan PV’ye göre %0.42 daha fazla arttığı bulundu. Ceylan ve diğ. [21] deneysel olarak ısı değiştirici kullanılarak hava ile soğutulan bir PV’nin elektriksel veriminin soğutulmayan PV’ye göre %3’e kadar daha fazla arttığını buldular. Elminshawy ve diğ. [22] PV panel sıcaklığını kontrol etmek için jeotermal hava soğutma sistemini kullandılar. Panel sıcaklığında 13 °C’lik bir azalma ve elektriksel verimde %22.98’lik bir artış gösterdiği bulundu. Böylece soğutma sayesinde enerji maliyetlerinin %12 azalmasıyla beraber yaz sezonu için 13896 gram CO<sub>2</sub>’nin atmosfere gitmesi engellendi. Ozgen ve diğ. [23] hava ile soğutulan bir PV-T’nin performansının arttığını buldular. Soğutulmak için kullanılan havanın debisi arttıkça PV-T’nin performansının arttığı görüldü. Nethra ve Kalidasan [24] PV panel soğutması için topraktan havaya ısı değiştirici sistemi kurdular. PV-T’ye girerek ısınan

havanın tekrardan toprağa girmesiyle soğutulması sağlandı. Böylece PV-T toprak döngüsü sayesinde sürekli bir soğuk hava girişi PV-T’ye sağlanarak performans artışı sağlandı. Marinić-Kragić ve diğ. [25] 5 m/s’ye kadar rüzgâr hızları için PV panel yüzeyindeki soğutma oranını artırmak için çeşitli yarık düzenlemelerinin analizini yaptılar ve optimize edilmiş yarık düzenlemesi için PV’de 3 °C’lik bir düşüşün mümkün olduğu buldular. Böylece soğutma sayesinde PV’nin performansı arttığı bulundu.

Ayrıca, su havadan daha yüksek ısı kapasitesine olduğundan son PV-T teknolojilerinde havanın yerine su kullanılmaya başlandı. Ayrıca, akışkan olarak PV-T’yi soğutmak için hava yerine su kullanılarak yapılan farklı tasarımların büyük çoğunluğunda PV-T’nin su kullanıldığında havaya göre daha yüksek bir enerji verime ulaştığı görüldü [26].

Sonuç olarak yapılan çalışmalar gösteriyor ki silikon tabanlı PV-T’leri farklı teknikte hava ve su ile soğutulduğunda onların elektrik üretimlerini, enerjistik ve ekserjistik verimlerini iyi oranda iyileştirmektedir.

Bu çalışmada silikon tabanlı PV-T kullanılması en büyük nedeni silisyum yeryüzünde en çok bulunan elementlerden birisidir. Bu element en çok kum ve kuvarsta bulunmaktadır. Kumun silisyum saflık derecesi kuvarsa göre çok düşük olduğundan silisyum üretmek için kuvars kullanılmaktadır. Bu çalışmada doğada bu kadar çok olan element olan silikon PV-T iki farklı akışkan ile soğutulmuş elektrik üretimi ve enerji ve ekserji analizi araştırıldı.

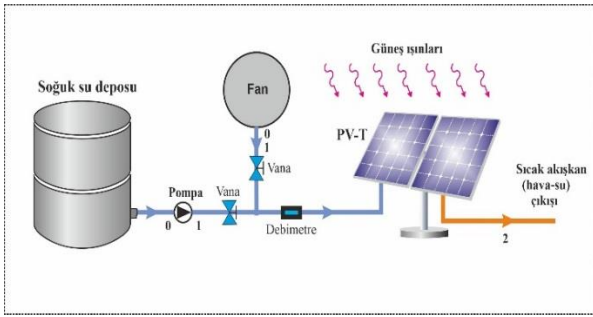
Bir diğeri sebep ise soğutulan silikon güneş pillerinin enerji ve ekserji veriminin ve elektrik üretiminin ciddi şekilde arttığı bulundu [27]. Bu yüzden bu çalışmada silikon güneş pili kullanıldı. Yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde PV-T’nin su ve hava ile soğutulmuş enerji ve ekserji verimi ve elektrik üretiminin ciddi şekilde arttığı görüldü. Ancak şimdiye kadar su ve hava ile soğutulan bir silikon PV-T için enerji ve ekserji verimi ve elektrik üretimini üzerine bu çalışmadaki gibi dört farklı şart altında yapılmadı. Bu şartlar 100-1000 W güneş enerjisi altında yıllık ortalama sıcaklık olan 19.6 °C çevre sıcaklığında, güneşli bir gün Temmuzdan seçilerek sabah saat 7<sup>00</sup>’den akşam 18<sup>00</sup>’e kadar ve 0-30 °C değişen çevre sıcaklığı ile 500 W/m<sup>2</sup> güneş enerjisi altında ve 0.0.

0.1 kg/s’den 0.01 kg/s’ye değişen soğutma kütle akışkanı ile elektrik üretimi için PV-T’nin analizleri Mühendislik Denklem Çözücü (EES) kullanılarak yapıldı. Ayrıca bu çalışma mahallî bir yer olan Adana şehri için analizleri de kapsamaktadır. Bu çalışmanın amacı PV-T’nin hem enerjistik hem de ekserjistik performansı ve elektrik üretimi üzerine yıl boyunca olabilecek tüm şartlar için testi yapıldı. Böylece şimdiye kadar su ve hava kullanılarak soğutulan bir PV-T üzerinde mümkün olduğunda kapsamlı son derece geniş bir analiz yapmayı amaçladık. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre toplam enerji ve ekserji verimi ve elektrik üretmek için PV-T ile ilgili gelecekteki yenilenebilir enerji üzerindeki çalışmalarla ilgili PV-T kaynaklarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2 Materyal ve metod

Sistem Şekil 1’de görülmektedir ve bir pompa, bir PV-T ve bir depolama tankından oluşmaktadır. Bu sistemin hedef çıktuları bir PV-T’den elektrik enerjisi ve termal enerji üretmektedir. Sistem Temmuz ayı için günlük ve 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş enerjisi altında ve 0-30 °C değişen çevre sıcaklığı ile sabit 500 W/m<sup>2</sup> güneş enerjisi altında  $\dot{m} = 0.003$  kg/s için ve 0.001 kg/s’den 0.01 kg/s’ye kadar değişen soğutma kütle debisi

için test edildi. Birleşik sistemdeki PV-T'nin ana amacı, ısı değiştirici yardımıyla soğutulan PV-T'den bu dört koşul altında ayrı ayrı sıcak su ve hava ve elektrik üretmektir. Sistem güneş enerjisi kullanılarak giren akışkanı yüksek dereceli sıcaklığa ulaştırarak PV-T'nin soğutulması yapılması amaçlanmaktadır. Böylece soğuyan PV-T'nin performansının artması beklenilmektedir. Ayrıca, sistemdeki PV-T tarafından içindeki fazla ısı alındığından elektrik üretiminin de artırılması beklenmektedir. Bu sistemin çalışma prensibi aşağıdaki gibi verilmiştir. Bunun için, düşük sıcaklıktaki su ve hava yardımıyla PV-T'deki atık ısı enerjisi ısı değiştirici aracılığıyla yüksek dereceli sıcaklığa ulaşmak için 1 noktasından PV-T'ye aktarılır. PV-T'de ısınan akışkan 2 noktasından daha yüksek bir dereceye ulaşarak PV-T'den çıkar. Bununla beraber analizi yapılan PV-T'nin su ve hava için ortak teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir



Şekil 1. Elektrik ve sıcak akışkan (hava-su) üreten bütünleşmiş sistem.

Figure 1. Integrated system producing electricity and hot fluid (air-water).

Tablo 1. PV-T'nin teknik özellikleri.

Table 1. Technical properties of the PV-T.

Parametre	Değer
L	1.2 m
w	0.45 m
$\beta_c$	0.83
$\eta_0$	0.15
$\tau_g$	0.95
$U_b$	0.62 W/m <sup>2</sup> K
$U_T$	66 W/m <sup>2</sup> K
$\alpha_c$	0.90
$\alpha_T$	0.50

Burada, L PV-T'nin uzunluğu, w PV-T'nin genişliği,  $\alpha_c$  güneş pilinin emiciliği,  $\alpha_T$  siyah yüzeyin emiciliği,  $\beta_c$  güneş pilinin tampon faktörü,  $U_b$  alttan çevreye toplam ısı transfer katsayısı,  $U_T$  tedlerden güneş pilinden akışkana geçen ısı katsayısıdır ve  $\tau_g$  camın geçirgenliğidir.

### 3 PV-T'nin enerji ve ekserji analizi

Sistemi termodinamik açıdan değerlendirmek için analizler yapıldı. Bu amaçla sistem bileşenlerinin enerji ve ekserji denklemleri yazıldı. Sistem çalışırken bazı kabullenmeler yapıldı ve aşağıdaki gibi sıralandı:

Hava basıncı 101.3 kPa.

- Temmuz ayı ortalama çevre sıcaklığı 28.2 °C'dir,
- Yıl boyunca ortalama sıcaklık 19.2 °C'dir,
- Günlük güneş enerjisi için PV-T'nin eğim açısı 10°'dir,
- Bağlantı borularındaki ısı kayıpları önemsizdir,

e) Rüzgâr hızının etkisi yok sayıldı.

PV-T teknolojisi, güneş enerjisinden termal enerji ve elektrik üreten bir sistemdir. PV-T güneş enerjisini elektrige dönüştürürken aynı zamanda atık ısı enerjisi üretir. Atık ısı, ısı değiştirici yardımıyla alındığında, PV-T'nin toplam verimliliği. fotovoltaik (PV) güneş pillerinden daha verimli hale gelir. PV-T'nin toplam enerji verimliliği (%) olarak aşağıdaki şekilde elde edilir [28]:

$$\eta_{PV-T} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (1)$$

Burada,  $\eta_{el}$  ve  $\eta_{th}$  are PV-T'nin elektriksel ve termal verimleridir ve aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$\eta_{el} = \frac{\dot{E}_{el}}{\dot{E}_{PV-T}} * 100 \quad (2)$$

Burada,  $\dot{E}_{el}$  PV-T tarafından üretilen net elektrik enerjisidir ve  $\dot{E}_{PV-T}$  PV-T hücresine ulaşan toplam güneş ışımasıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{E}_{PV-T} = \dot{E}_{APV-T} \quad (3)$$

Burada,  $A_{PV-T}=0.54$  m<sup>2</sup> PV-T'nin toplam alanıdır ve  $\dot{E}$  metrekare başına PV-T'ye ulaşan güneş radyasyonudur ve aşağıdaki gibi bulunur [29].

$$\dot{E} = \dot{I}_{dr} + \dot{I}_{df} + \dot{I}_{re} \quad (4)$$

$$\dot{I}_{dr} = \dot{I}_b R_b \quad (5)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (6)$$

Burada  $\theta$  geliş açısıdır ve  $\theta_z$  PV-T için zenit açısıdır. Böylece, kuzey yarımküre için aşağıdaki gibi hesaplanır [29]:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos w \quad (7)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos w \quad (8)$$

$$\dot{I}_{df} = \frac{1}{2} \dot{I}_d (1 + \cos \beta) \quad (9)$$

$$\dot{I}_{re} = \frac{1}{2} \rho \dot{I} (1 - \cos \beta) \quad (10)$$

Burada,  $\varphi$  enlem açısıdır ve Adana için 37°'dir,  $\beta = 10^\circ$  kolektör eğim açısıdır,  $\delta$  denklasyon açısıdır ve Adana için seçilen günde değeri=20.82°'dir,  $\dot{I}_{dr}$  doğrudan güneş ışımıdır,  $\dot{I}_{df}$  dağınık güneş ışımasıdır,  $\dot{I}_{re}$  çevreden PV-T'ye yansıyan ışıltıdır,  $\dot{I}_b$  doğrudan güneş ışımasıdır,  $\dot{I}_d$  yatay için dağınık güneş ışımasıdır yüzeyler ve  $R_b$  doğrudan ışımaya katsayısıdır. Ayrıca, dünyaya ulaşan güneş enerjisi çevrenin sıcaklığını ( $T_0$ ) doğrudan etkiler. Saatlik  $T_0$  aşağıdaki denklem aracılığıyla bulunabilir [30]:

$$T_0(t) = T_{ort} + 0.489\Delta T \cos(15 * (t - 15.050)) + 0.062\Delta T \cos(30 * (t - 1.17)) \quad (11)$$

Burada, t herhangi bir andaki saattir,  $T_{ort} = 28.2$  °C Adana için Temmuz ayı ortalama sıcaklık değeridir ve Türkiye Meteoroloji İstasyonundan alındı ve  $\Delta T$  bir günlük maksimum ve minimum sıcaklık farkıdır. Bununla beraber PV-T'nin ürettiği elektrik aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{E}_{el} = FF(V_{oc}I_{sc}) \quad (12)$$

Ayrıca, PV-T'nin elektrik verimi de güneş pilinin sıcaklığına bağlıdır ve şu şekilde yazılır [5]:

$$\eta_{el} = \eta_0 [1 - \beta_{PV}(T_{PV} - T_r)] \quad (13)$$

Burada,  $\eta_0$  güneş pilinin referans sıcaklıktaki verimi,  $T_r=25^\circ\text{C}$  referans çevre sıcaklığı ve  $\beta_{PV}=0.0045$  hücre sıcaklık katsayısıdır. Ek olarak PV-T'nin ısıl verimi de şu şekilde bulunabilir:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{E}_{th}}{\dot{E}_{PV-T}} * 100 \quad (14)$$

Burada,  $\dot{E}_{th}$ , PV-T'nin üretilen faydalı termal enerjisidir ve PV-T'nin giriş ve çıkış suyu sıcaklığına bağlıdır ve aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_{th} = \dot{m}_w C_w (T_{out,PV-T} - T_{in,PV-T}) \quad (15)$$

Burada,  $\dot{m}_w$  PV-T'nin giriş kütle akış hızıdır,  $C_w$  akışkanın özgül ısıdır,  $T_{in,PV-T}$  PV-T'nin giriş akışkan sıcaklığıdır ve  $T_{out,PV-T}$  PV-T'nin çıkış akışkan sıcaklığıdır. PV-T'ye giren soğuk akışkan sayesinde  $T_{PV}$  düşmeye başlayarak elektrik üretimini artırır ve PV-T'nin performansı iyileştirilir. Ayrıca sistemin ürettiği net elektrik miktarı su için denkle 16'da ve hava için denkle 17'de aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\dot{E}_{Net} = \dot{E}_{el} - \dot{E}_{pompa} \quad (16)$$

$$\dot{E}_{Net} = \dot{E}_{el} - \dot{E}_{Fan} \quad (17)$$

Burada,  $\dot{E}_{pompa}$  ve  $\dot{E}_{Fan}$  pompa ve fanın tükettiği elektrik miktarıdır. Bununla beraber PV-T için ekserji verimi elektrik ve termal ekserjinin toplamıdır ve aşağıdaki gibi elde edilir [31]:

$$\psi_{PV-T} = \psi_{el} + \psi_{th} \quad (18)$$

$$\psi_{PV-T} = \frac{FF(V_{oc}I_{sc}) + \left(1 - \frac{T_0}{T_{PV}}\right) \dot{E}_{th}}{\left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0 + 273}{T_s}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0 + 273}{T_s}\right)^4\right] \dot{E}_{PV-T}} \quad (19)$$

Burada,  $T_s$  güneşin yüzey sıcaklığıdır ( $T_s = 6000 \text{ K}$ ) ve birimi Kelvin'dir. Bununla beraber herhangi bir yüzeye ulaşan güneş ekserjisi aşağıdaki gibi bulunur [32].

$$\dot{E}_{x_{tot}} = \dot{E}_{tot} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0 + 273}{T_s}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0 + 273}{T_s}\right)^4\right] \quad (20)$$

Burada,  $\dot{E}_{tot}$  seçilen yüzeydeki toplam güneş enerjisidir. PV-T'deki silikon güneş pili hücrelerinin özellikleri  $25^\circ\text{C}$  referans sıcaklığında aşağıdaki gibidir [8]:

- Dolu çarpanı (FF) = 0.72,
- Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) = 4.8 A,
- Açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) = 21.7 V,
- Tek güneş pili alanı ( $A_c$ ) = 0.0139 m<sup>2</sup>,
- Modülün verimliliği ( $\eta_0$ ) = 15%,
- Hücre sayısı=36.

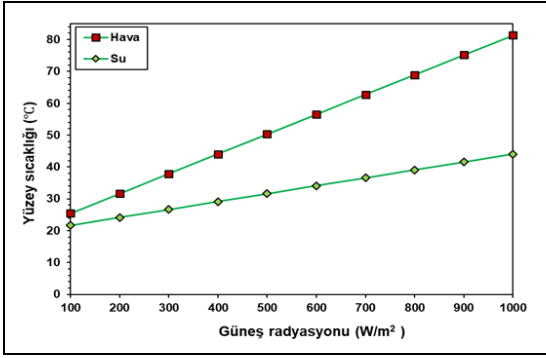
PV-T'nin elektriks verimi denkle 13 ve  $25^\circ\text{C}$ 'de referans sıcaklığındaki parametreler kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\eta_{el} = 15 * [1 - 0.0045(T_{PV} - 25)] \quad (21)$$

## 4 Bulgular ve tartışma

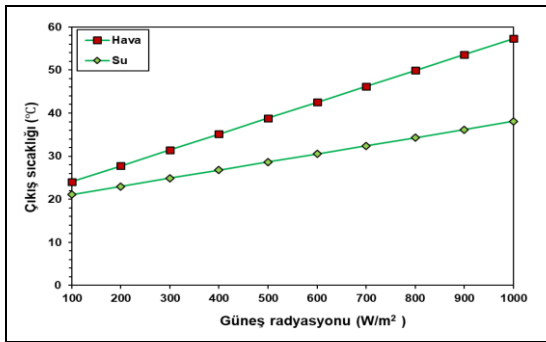
Bu çalışmada, dört koşul altında PV-T hava ve su ile soğutularak enerji, ekserji ve elektrik üretim analizi yapıldı. Birincisi. PV-T 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş enerjisi altında ortalama  $19.2^\circ\text{C}$  çevre sıcaklığında. İkincisi 1 Temmuz için günlük güneş enerjisi altında Adana iklim koşullarında ve üçüncüsü  $0^\circ\text{C}$ 'den  $30^\circ\text{C}$ 'ye değişen çevre sıcaklığında sabit 500 W/m<sup>2</sup> güneş enerjisi altında sistemin üç farklı benzetimi yapıldı. Tüm koşullarda PV-T'yi soğutmak için  $\dot{m} = 0.003 \text{ kg/s}$  kütle debisi kullanıldı. Dördüncüsü soğutma kütle debisi 0.001 kg/s'den 0.01 kg/s'ye çıkarılarak PV-T'nin elektrik üretimi incelendi. PV-T'yi soğutmak için su ve hava ayrı ayrı kullanılarak enerji ve ekserji analizleri yapıldı. Böylece hangi akışkanın PV-T'nin performansını ne derece etkilediği bulundu. Yıl boyunca mümkün olabilecek tüm şartlarda PV-T test edildi ve su ve hava soğutmasının hangisinin PV-T'nin performansına ne kadar etki ettiği bulundu ve karşılaştırması yapıldı. PV-T kendisine gelen akışkan (su ve hava) toplam 0.54 m<sup>2</sup> toplam alanı ile güneş enerjisini kullanarak sıcaklıklarını yükseltti. Daha sonra bu akışkanlar daha sonra kullanılmak üzere kullanılabilir. Yapılan çalışmada üç şart için PV-T'nin yüzeyine gelen güneş enerjisi ve ekserji, PV-T'nin yüzey sıcaklığı, akışkanın çıkış sıcaklığı, enerji ve ekserji verimliliği ve ürettiği elektrik bulunurken dördüncü şart için sadece elektrik üretimi su ve hava için ayrı bulundu. Böylece PV-T için yıl boyunca oluşabilecek tüm şartlar için kapsamlı bir analiz bu çalışmada yapıldı. Bu çalışmada yıllık ortalama çevre sıcaklığı Türkiye Meteoroloji İstasyonundan Adana için  $19.2^\circ\text{C}$  olarak alınmıştır. Bununla beraber PV-T giren akışkanın sıcaklığı her şartta çevre sıcaklığından sadece  $0.01^\circ\text{C}$  daha fazladır. Bu sıcaklık artışının pompanın ve fanın etkisiyle arttığı kabul edildi. Şekil 2 PV-T'nin yüzey sıcaklığını hava ve su için 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında  $19.2^\circ\text{C}$  ortalama çevre sıcaklığında  $\dot{m} = 0.003 \text{ kg/s}$  için değişimini göstermektedir. Şekil 2 incelendiğinde PV-T'nin yüzey sıcaklığı güneş enerjisinin en düşük ve en yüksek olduğu saatlerde hem hava hem de su için minimum ve maksimum sıcaklığa ulaşmıştır. Hava kullanıldığında PV-T'nin minimum ve maksimum yüzey sıcaklığı  $100 \text{ W/m}^2$  ve  $1000 \text{ W/m}^2$  arasında  $25.42^\circ\text{C}$  ve  $81.36^\circ\text{C}$ 'ye ulaşırken su kullanıldığında PV-T'nin yüzey sıcaklığı aynı güneş radyasyonlarında  $21.69^\circ\text{C}$  ve  $44.01^\circ\text{C}$ 'ye çıkmıştır. Tüm güneş radyasyonları incelendiğinde PV-T'yi soğutmak için hava kullanıldığında PV-T'nin yüzey sıcaklığı su kullanılmasına göre çok daha yüksek olmuştur. PV-T'nin elektrik performansı yüzey sıcaklığına bağlıdır. PV-T'nin yüzey sıcaklığı yüksek sıcaklıklara çıktıkça PV-T'nin elektrik üretim performansı da olumsuz etkilenir.

Şekil 3 PV-T'nin çıkış sıcaklığını hava ve su için 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ve  $19.2^\circ\text{C}$  ortalama çevre sıcaklığında  $\dot{m} = 0.003 \text{ kg/s}$  için çıkış sıcaklığını göstermektedir. Şekil 3 incelendiğinde PV-T'nin çıkış sıcaklığı da artan güneş enerjisinden ciddi oranda etkilenmektedir. PV-T hava için minimum ve maksimum çıkış sıcaklığına  $100 \text{ W/m}^2$  ve  $1000 \text{ W/m}^2$  arasında  $24.07^\circ\text{C}$  ve  $57.28^\circ\text{C}$ 'ye çıkarken su için çıkış sıcaklığı aynı güneş radyasyonlarında  $21.09^\circ\text{C}$  ve  $38.07^\circ\text{C}$ 'ye çıkmıştır. Tüm güneş radyasyonları incelendiğinde PV-T'yi soğutmak için hava kullanıldığında suya göre PV-T'nin çıkış sıcaklığı daha yüksek olmuştur. Yüzeye gelen güneş enerjisi arttıkça havanın çıkış sıcaklığı ile suyun çıkış sıcaklığı arasındaki fark artmaktadır. Bununla beraber PV-T'nin yüzeyine gelen güneş enerjisi arttıkça hem su hem de hava için çıkış sıcaklığı ciddi oranda artmaktadır.



Şekil 2. PV-T'nin giren akışkana (hava-su) göre PV-T'nin yüzey sıcaklığı.

Figure 2. The surface temperature of the PV-T relative to the entering fluid (air-water) of the PV-T.



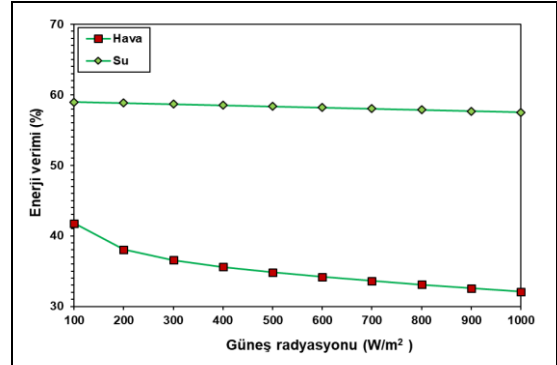
Şekil 3. PV-T'ye giren akışkanın (hava-su) güneş radyasyonu altında çıkış sıcaklığı.

Figure 3. The fluid (air-water) outlet temperature entering the PV-T under solar radiation.

PV-T'nin termodinamik açıdan performansın değerlendirmek için önemli iki parametre olan enerji ve ekserji veriminin bulunması son derece önemlidir. Şekil 4 ve 5 hava ve su kullanılarak soğutulan PV-T'nin toplam enerji ve ekserji verimini göstermektedir. PV-T toplam enerji ve ekserji verimi elektriksel ve termal veriminin toplamını içermektedir. Bu verim denklem 1 ve 18'den yararlanılarak bulundu. Şekil 4'e bakıldığında su ve hava kullanılarak PV-T soğutulduğunda maksimum enerji verimine %58.96 ve %41.76 ile 100 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ulaştığı bulundu. Su ve hava kullanılarak PV-T soğutulduğunda minimum enerji verimine %57.52 ve %32.08 ile 1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ulaştığı bulundu. Sonuç olarak PV-T'nin toplam enerji verimi su ve hava kullanılarak 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında soğutulduğunda PV-T farklı enerji verimine ulaştığı bulundu. Her iki akışkan ile soğutulma yaptığında PV-T'nin maksimum ve minimum değerlere ulaşması aynı güneş radyasyonu altında olduğu bulundu. Bununla beraber PV-T'nin enerji veriminin su kullanıldığında havaya göre tüm güneş radyasyonları altında çok daha yüksek değerlere ulaştığı bulundu.

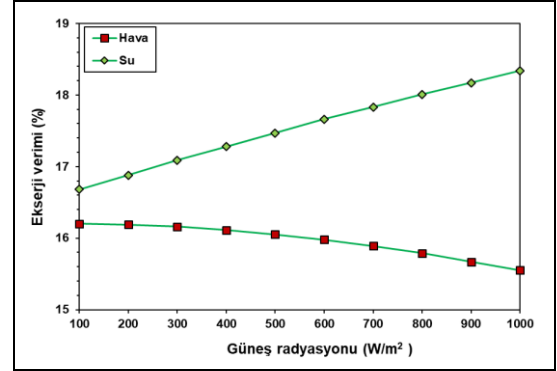
Şekil 5 incelendiğinde su kullanılarak PV-T soğutulduğunda maksimum ekserji verime %18.34 ile 1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ulaşırken hava kullanıldığında %16.20 ile 100 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ulaştığı görülmektedir. Su kullanılarak PV-T soğutulduğunda minimum ekserji verime %16.68 ile 100 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ulaşırken hava kullanıldığında %15.55 ile 1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ulaştığı bulundu. PV-T'nin ekserji verimi bu şartlar altında su ve hava kullanılarak 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ters değişimler gösterdiği bulundu.

Bununla birlikte PV-T'nin hem enerji hem de ekserji verimi incelendiğinde su kullanılarak soğutulan PV-T'nin performansı tüm güneş radyasyonu altında havaya göre daha iyi olduğu bulundu.



Şekil 4. PV-T'nin 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında toplam enerji verimi.

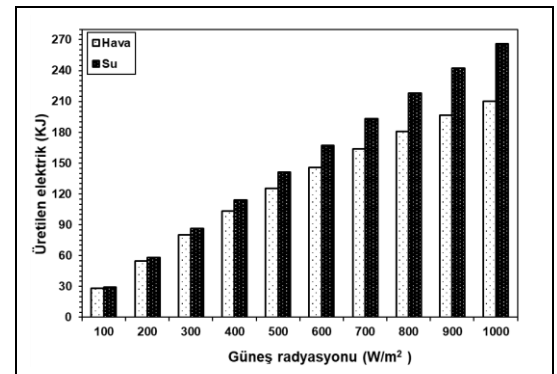
Figure 4. The total energy efficiency of PV-T under 100-1000 W/m<sup>2</sup> solar radiation.



Şekil 5. PV-T'nin 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında toplam ekserji verimi.

Figure 5. Total exergy efficiency of PV-T under 100-1000 W/m<sup>2</sup> solar radiation.

Şekil 6 hava ve su kullanarak PV-T'nin soğutulmasıyla toplam elektrik üretim dağılımını 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında 19.2 °C ortalama çevre sıcaklığı ve  $\dot{m} = 0.003$  kg/s için değişimini göstermektedir.



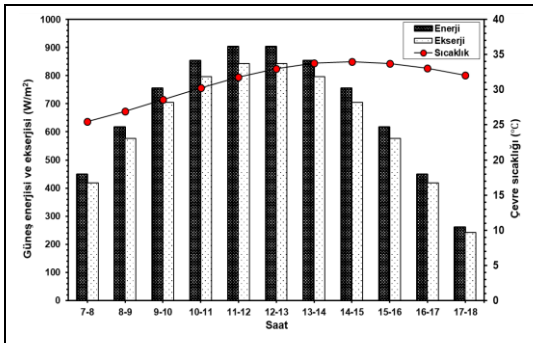
Şekil 6. PV-T'nin 100-1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında ürettiği elektrik.

Figure 6. Electricity produced by PV-T under 100-1000 W/m<sup>2</sup> solar radiation.

Bu koşulda PV-T'nin elektrik üretimi anlık olarak 100 W/m<sup>2</sup>'den 1000 W/m<sup>2</sup>'ye değişen her güneş radyasyonu için 1 saat boyunca ürettiği elektrik bulundu. Su ile soğutulan PV-T'nin 1 saat boyunca minimum ve maksimum ürettiği elektrik miktarı 29.14 KJ ve 266.2 KJ ile 100 W/m<sup>2</sup> ve 1000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında gerçekleşti. PV-T hava ile soğutulduğunda aynı güneş radyasyonu altında maksimum ve minimum üretilen elektrik miktarı 28.24 KJ ve 209.9 KJ olarak gerçekleşti. Hem su hem de hava için yüzeye gelen güneş enerjisi arttıkça üretilen elektrik miktarı da ciddi oranda artmıştır. Ayrıca, PV-T su kullanılarak soğutulduğunda tüm güneş radyasyonu altında hava kullanılmasına göre daha iyi elektrik ürettiği görülmektedir.

İkinci olarak PV-T'nin enerjistik ve ekserjistik performansı ve ürettiği elektrik miktarı yıl içinden seçilen bir gün için bulundu. Gün boyunca yüzeye ulaşan güneş enerjisi ve ekserjisi farklı olduğundan çevre sıcaklığı da değişmektedir.

Şekil 7'de eğimli bir yüzeye gelen ortalama toplam güneş enerjisi ve ekserjisi ve gün içindeki değişen çevre sıcaklığını saat 7<sup>00</sup>'den 18<sup>00</sup>'ye kadar 1 Temmuz için Adana iklim koşullarındaki değişimi göstermektedir. Adana için yaz aylarında gelen güneş enerjisi kolektörün eğim açısı düştükçe artmaktadır. Kolektörün eğimi 5-15 arasında iken Adana için yaz aylarında en yüksek gelen güneş enerjisine ulaşılmaktadır [33]. Bu yüzden bu çalışmada da Temmuz ayında güneş pilleri için en uygun eğimlerden biri olan 10° eğim açısı seçilmiştir. Yüzeye ulaşan güneş enerjisi ve ekserjisi maksimum değerine 11<sup>00</sup>-13<sup>00</sup> saatlerinde ulaşırken çevre sıcaklığı 14<sup>00</sup>-15<sup>00</sup> arasında ulaşmıştır. Bununla beraber yüzeye ulaşan en düşük enerji ve ekserji saat 17<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında ulaştı. Ayrıca çevre sıcaklığı en düşük değerine sabah saat 7<sup>00</sup>-8<sup>00</sup> arasında ulaşmıştır. Artan güneş enerjisinden dolayı çevre sıcaklığı saat 15<sup>00</sup>'e kadar sürekli artmıştır. Ancak, bu saatten sonra çevre sıcaklığının da azaldığı görülmektedir.

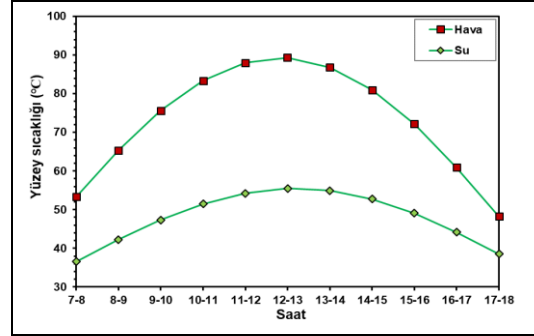


Şekil 7. Ortalama güneş enerjisi ve ekserjisi ve çevre sıcaklığı.

Figure 7. Average solar energy and exergy and ambient temperature.

PV-T'nin yüzey ve çıkış sıcaklığı, güneş radyasyonu, ortam sıcaklığı, PV-T'ye giren kütlenin sıcaklığından ve miktarından ve PV-T'nin şekline etkilenir. Bu çalışmada günlük olarak gelen güneş radyasyonu altında ve çevre sıcaklığından etkilenen PV-T'nin yüzey ve çıkış sıcaklığı bulundu. Şekil 8 hava ve su kullanılarak soğutulan PV-T'nin yüzey sıcaklığını  $\dot{m} = 0.003$  kg/s için günlük olarak göstermektedir. Şekil 8 incelendiğinde PV-T'nin yüzey sıcaklığı çevre sıcaklığının en az ve güneş enerjisinin en düşük ve en yüksek olduğu saatlerde minimum ve maksimum sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. PV-T en yüksek yüzey sıcaklığına hava için gelen güneş enerjisinin en yüksek olduğu ve çevre sıcaklığının neredeyse maksimuma

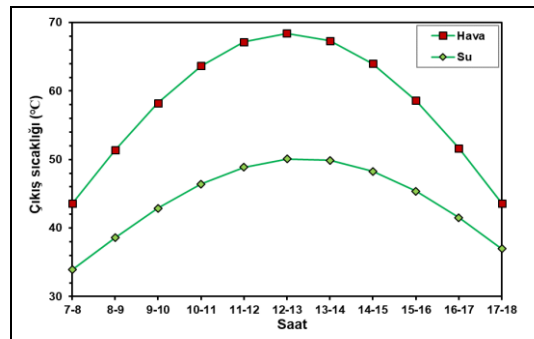
ulaştığı saat 12<sup>00</sup>-13<sup>00</sup> arasında 89.24 °C'ye ulaşırken su için en yüksek yüzey sıcaklığına aynı saatler için 55.46 °C ulaştığı görülmektedir. PV-T en düşük yüzey sıcaklığına su ve hava için ise gelen güneş enerjisinin düşük olduğu saat 7<sup>00</sup>-8<sup>00</sup> ve 17<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında ulaşmıştır. PV-T su ve hava ile soğutulduğunda bu saatler arasında minimum yüzey sıcaklığı 36.57 °C ve 48.22 °C'dir. Günün tüm saatleri incelendiğinde PV-T'de soğutma için hava kullanıldığında PV-T'nin yüzey sıcaklığının suya göre çok daha yüksek olduğu bulundu.



Şekil 8. PV-T'nin giren akışkana (hava-su) göre günlük PV-T'nin yüzey sıcaklığı.

Figure 8. Daily the surface temperature of the PV-T relative to the entering fluid (air-water) of the PV-T.

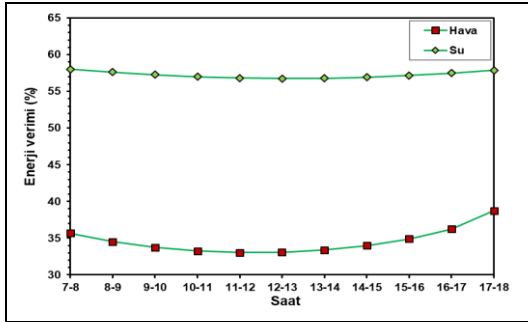
Şekil 9 hava ve su kullanılarak soğutulan PV-T'nin çıkış suyu sıcaklığını  $\dot{m} = 0.003$  kg/s için günlük olarak göstermektedir. Şekil 9 incelendiğinde PV-T'nin çıkış sıcaklığı çevre sıcaklığının ve güneş enerjisinin en düşük ve en yüksek olduğu saatlerde en kötü ve en iyi çıkış sıcaklığına ulaştığı bulundu. PV-T en yüksek çıkış sıcaklığına hava ve su için gelen güneş enerjisinin en yüksek olduğu ve çevre sıcaklığının neredeyse maksimuma ulaştığı saat 12<sup>00</sup>-13<sup>00</sup> arasında ulaştığı görüldü. PV-T en düşük çıkış sıcaklığına hem hava hem de su için gelen güneş enerjisinin ve çevre sıcaklığının düşük olduğu saat 7<sup>00</sup>-8<sup>00</sup> arasında ulaşmıştır. PV-T'de soğutma için hava kullanıldığında maksimum ve minimum çıkış sıcaklığı 68.42 °C ve 43.56 °C olurken su için çıkış sıcaklığı 50.09 °C ve 33.91 °C olmuştur. Günün tüm saatleri incelendiğinde PV-T'de soğutma için hava kullanıldığında PV-T'nin çıkış sıcaklığı suya göre daha yüksek olduğu bulundu. Gün içerisinde çıkış sıcaklığının hem çevre sıcaklığından hem de gelen güneş enerjisinden ciddi oranda etkilendiği bulundu.



Şekil 9. PV-T'ye giren akışkanın (hava-su) günlük ortalama çıkış sıcaklığı.

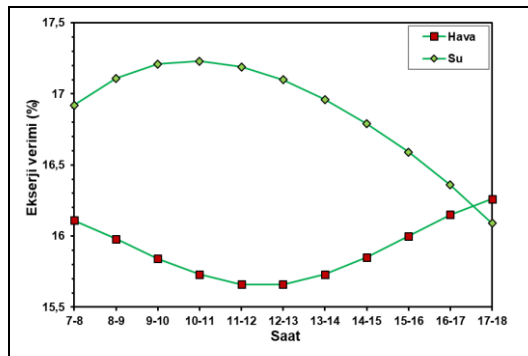
Figure 9. The average daily outlet temperature of the fluid (air-water) entering the PV-T.

PV-T'nin günlük termodinamik performansının değerlendirmek için toplam enerji ve ekserji veriminin bulunması önemli ve iyi bir yöntemdir. Şekil 10 hava ve su kullanılarak soğutulan PV-T'nin toplam enerji verimini saat 7<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında  $\dot{m} = 0.003$  kg/s için değişimini göstermektedir. PV-T toplam enerji verimi elektriksel ve termal veriminin toplamını içermektedir. Şekil 10 incelendiğinde hem hava hem su için toplam enerji verimi küçük değişimler gösterdiği bulundu. Soğutulan PV-T'nin en yüksek enerji verimi saat 17<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> ve 7<sup>00</sup>-8<sup>00</sup> arasında sırasıyla hava ve su için %38.74 ve %58.01'e çıkmıştır. PV-T en düşük enerji verime ise saat 12<sup>00</sup>-13<sup>00</sup> arasında hava ve su için %33.07 ve %56.74'e ulaştığı bulundu.



Şekil 10. PV-T'nin gün boyunca hava-su için enerji verimi.  
Figure 10. Energy efficiency of PV-T for air-water during the day.

Şekil 11 PV-T'nin toplam ekserji verimini hava ve su kullanılarak saat 7<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında  $\dot{m} = 0.003$  kg/s için değişimini göstermektedir. PV-T toplam ekserji verimi de tıpkı enerji verimi gibi elektriksel ve termal ekserji veriminin toplamını içermektedir. Şekil 11 incelendiğinde günlük olarak hem hava hem su için toplam ekserji verimi tıpkı enerji verimi gibi küçük değişimler göstermektedir. Su kullanılarak PV-T soğutulduğunda maksimum ve minimum ekserji verimi %17.23 ve %16.09'e saat 10<sup>00</sup>-11<sup>00</sup> ve 17<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında ulaştığı bulundu. Soğutma için hava kullanıldığında ise PV-T maksimum ve minimum ekserji verimine %16.26 ve %15.66'e saat 17<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> ve 11<sup>00</sup>-13<sup>00</sup> arasında ulaştığı bulundu.

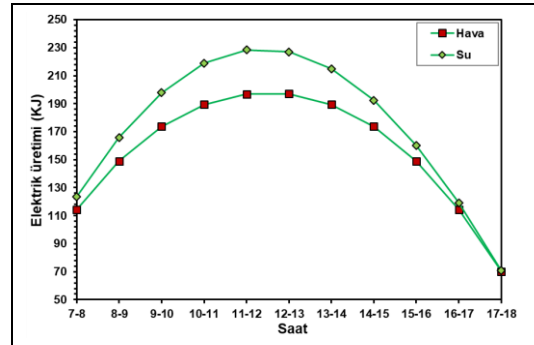


Şekil 11. PV-T'nin gün boyunca hava-su için ekserji verimi.  
Figure 11. Exergy efficiency of PV-T for air-water during the day.

Günün neredeyse tüm saatleri incelendiğinde PV-T'de su kullanılarak soğutulduğunda havaya göre PV-T'nin hem enerji veriminin yüksek olduğu bulundu. Ekserji verimi için ise sadece saat 17<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında hava suya göre bir miktar daha iyidir. Geri kalan tüm saatlerde su ile soğutulan PV-T havaya göre daha iyi ekserjistik performans gösterdi. Bununla beraber enerji

verimi hem su için hem de hava için günün tüm saatlerinde benzer dağılım gösterirken ekserji verimi su ve hava için ters dağılım gösterdiği bulundu. Su için maksimum ekserji verime öğlen ulaşırken hava için sabah ulaştığı bulundu. Bu değişimin ana sebebi suyun havaya göre daha iyi termal ekserji performansı göstermesidir. Enerji verimlerine bakılırsa suyun PV-T'de havaya göre çok daha iyi termal performans gösterdiği görülmektedir. Bunun sonucunda suyun termal ekserji performansı da artmıştır.

Şekil 12 hava ve su kullanılarak PV-T'nin soğutulmasıyla toplam elektrik üretim dağılımını saat 7<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında  $\dot{m} = 0.003$  kg/s için değişimini göstermektedir. Burada gün boyunca her saat için gelen anlık güneş radyasyonuna göre PV-T'nin saatlik elektrik üretimi bulundu. Su kullanılarak PV-T soğutulduğunda maksimum ve minimum elektrik üretimi 228.5 KJ ve 70.83 KJ enerji olarak saat 11<sup>00</sup>-12<sup>00</sup> ve 17<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında gerçekleşmektedir. Soğutma için hava kullanıldığında ise PV-T'nin maksimum enerji üretimi 196.9 KJ ile öğlen 11<sup>00</sup>-13<sup>00</sup> ve minimum enerji üretimi 70.26 KJ ile saat 17<sup>00</sup>-18<sup>00</sup> arasında gerçekleşmektedir. PV-T'nin günlük toplam elektrik üretimi su ve hava için sırasıyla 1647 KJ ve 1848.8 KJ olarak gerçekleşti. Su kullanılarak soğutulan PV-T'nin günlük elektrik üretimi havaya göre %8.91 daha fazla olduğu bulundu. Hem su hem hava kullanıldığında PV-T gün boyunca benzer dağılım gösterdiği bulundu. Ancak günün tüm saatlerinde PV-T su ile soğutulduğunda havaya göre daha fazla elektrik ürettiği görülmektedir.

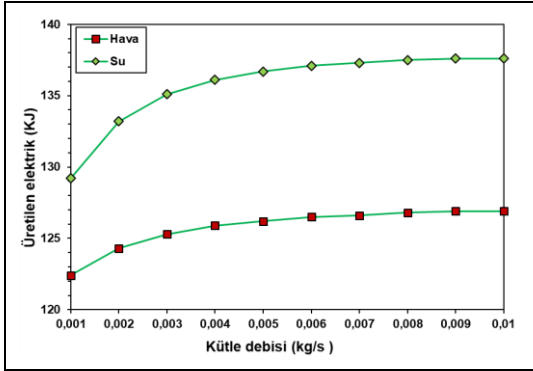


Şekil 12. Hava ve su ile soğutulan PV-T'nin her saatte ürettiği elektrik miktarı.

Figure 12. The PV-T's amount of electricity produced per hour is cooled by air and water.

Şekil 13 hem hava hem de suyun kütle debisi 0.001 kg/s'den 0.01 kg/s'ye çıkarılarak 500 W/m<sup>2</sup> sabit güneş radyasyonu ve 28.2 °C çevre sıcaklığı için PV-T'nin hava ve su ile soğutularak ürettiği elektriği her kütlede bir saat için göstermektedir. Soğutma kütle debisi arttıkça PV-T'nin hem hava için hem de su için ürettiği elektrik miktarı da artmaktadır. Ancak bu artış miktarı kütle debisi yükseldikçe hızı azalmaktadır. Bununla beraber PV-T için tüm kütle debilerinde su kullanılarak soğutulduğunda havaya göre daha iyi elektrik ürettiği bulundu.

PV-T'nin dördüncü performans değerlendirilmesi sabit güneş radyasyonu altında değişen çevre sıcaklığına göre bulundu. Tablo 2'de hava ile soğutulan PV-T'nin performansı gösterirken Tablo 3 su ile soğutulan PV-T'nin performansını göstermektedir. Her iki tabloda PV-T sabit 500 W/m<sup>2</sup> güneş enerjisi için 0 °C'den 30 °C'ye değişen ortam sıcaklığına göre PV-T'nin performansı bulundu. Burada üretilen elektrik miktarı anlık olarak gelen güneş enerjisi altında her saat için çevre sıcaklığına göre bulundu.



Şekil 13. Hava ve su ile soğutulan PV-T'nin değişen kütle debisi için bir saatte ürettiği elektrik miktarı.

Figure 13. The amount of electricity produced by PV-T is cooled by air and water for one hour for varying mass flow.

Her iki tablo incelendiğinde değişen çevre sıcaklığı ve 500 W/m<sup>2</sup> radyasyonu altında PV-T'nin yüzey sıcaklığının su kullanıldığında havaya göre daha düşük olduğu görülmektedir. PV-T'nin çıkış sıcaklığı incelendiğinde ise suyun havaya göre daha düşük çıktığı da görülmektedir. Ayrıca, PV-T su ile soğutulduğunda enerji ve ekserji verimi ve ürettiği elektrik havaya göre daha iyi yüksek olduğu bulundu. PV-T'yi su kullanılarak soğutulduğunda sabit 500 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında enerji ve ekserji verimi ve ürettiği elektrik çevre sıcaklığı yükselirken düştüğü görülmektedir. PV-T'yi hava kullanılarak soğutulduğunda aynı şartlar altında çalıştırıldığında enerji ve ekserji verimi yükselirken ürettiği elektriğin çevre sıcaklığı artıkça düştüğü bulundu. Çevre

sıcaklığı arttığında PV-T su ile soğutulduğunda havaya göre daha iyi performans gösterdiği bulundu.

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada su ve hava ile ayrı ayrı soğutulan PV-T'nin enerji ve ekserji verimi ve elektrik üretimi dört farklı koşul altında incelendi ve karşılaştırıldı. Bu çalışmada ulaşılmak istenen amaç mümkün olduğunca tüm yıl boyunca olabilecek birçok şart altında su ve hava kullanılarak PV-T'nin soğutulmasıyla performansı belirlenmeye çalışıldı. PV-T'nin en yüksek günlük enerji verimliliği su ve hava için sırasıyla %58.01 ve %38.74'e ulaşıırken ekserji verimliliği en yüksek %17.23 ve %16.26'ya ulaştı. Güneş radyasyonu 100 W/m<sup>2</sup>den 1000 W/m<sup>2</sup>'ye artırıldığında PV-T'nin en yüksek enerji su ve hava için sırasıyla %58.96 ve %41.76'ya ulaşıırken en yüksek ekserji verimi ise %18.34 ve %16.20'ye ulaştı. Çevre sıcaklığı 0 °C'den 30 °C'ye artırılarak sabit 500 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altında PV-T'nin en yüksek enerji verimi su ve hava için sırasıyla %59.64 ve %35.55'e ulaşıırken en yüksek ekserji verimi ise %18.90 ve %16.09'a ulaştı. Soğutma debisi 0.001 kg/s'den 0.01 kg/s'ye yükseldiğinde su ile soğutulan PV-T'nin havaya göre daha iyi elektrik ürettiği bulundu. Bununla beraber tüm şartlar altında PV-T hava ile soğutulduğunda suya göre daha yüksek yüzey ve çıkış sıcaklığına ulaştığı bulundu. Sonuç olarak PV-T'nin enerji ve ekserji verimi ve elektrik üretimi incelendiğinde PV-T ile su ile soğutulduğunda havayla soğutulmasına göre neredeyse tüm şartlarda daha iyi olduğu bulundu. Eğer böyle bir PV-T'den daha fazla elektrik üretimi yapılacaksa hava yerine mutlaka su kullanılmalıdır.

Tablo 2. Hava ile soğutulan PV-T'nin değişen çevre sıcaklığında performansı.

Table 2. Performance of air-cooled PV-T at varying ambient temperature.

Çevre Sıcaklığı (°C)	Enerji Verimi (%)	Ekserji Verimi (%)	Yüzey Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Üretilen Elektrik (KJ)
0	35.20	17.77	31.08	18.45	141.7
3	35.21	17.57	34.08	21.64	139.7
6	35.21	17.37	37.08	24.82	137.8
9	35.21	17.17	40.08	28.00	135.8
12	35.22	16.96	43.08	31.19	133.8
15	35.22	16.76	46.08	34.37	131.9
18	35.22	16.55	49.08	37.56	129.9
21	35.23	16.35	52.08	40.74	127.9
24	35.23	16.14	55.08	43.92	126.0
27	35.23	15.94	58.08	47.11	124.0
30	35.24	15.73	61.08	50.29	122.0

Tablo 3. Su ile soğutulan PV-T'nin değişen çevre sıcaklığında performansı.

Table 3. Performance of water-cooled PV-T at varying ambient temperature.

Çevre Sıcaklığı (°C)	Enerji Verimi (%)	Ekserji Verimi (%)	Yüzey Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Üretilen Elektrik (KJ)
0	59.64	18.90	12.41	9.439	153.6
3	59.44	18.68	15.41	12.44	151.6
6	59.24	18.45	18.41	15.44	149.7
9	59.03	18.23	21.41	18.44	147.7
12	58.83	18.01	24.41	21.44	145.7
15	58.63	17.78	27.41	24.44	143.8
18	58.43	17.56	30.41	27.44	141.8
21	58.22	17.34	33.41	30.44	139.8
24	58.02	17.12	36.41	33.44	137.9
27	57.82	16.89	39.41	36.44	135.9
30	57.62	16.67	42.41	39.44	133.9



Çünkü su havadan daha farklı fiziksel özelliklere sahip bir akışkandır. Suyun öz ısısı havanınkinden dört kat daha fazladır. Hem su hem de hava ile soğutma yapılırken su kullanıldığında PV-T'nin yüzey sıcaklığının havaya göre daha iyi düştüğü bulundu. Yüzey sıcaklığı düşük olan PV-T sıcak bir günde iyi soğutulmayan PV-T'ye göre daha iyi elektrik üretir. Bu yüzden su ile soğutulan PV-T havaya göre daha çoğunlukla daha iyi performansı gösterdiği bulundu. Ancak, eğer PV-T'den yüksek sıcaklıkta akışkan elde etmek isteniyorsa su yerine hava kullanılması daha uygun olacaktır. Sonuç olarak bu çalışmada güneş enerjisinden yararlanarak elektrik ve sıcak akışkan üretimi yapıldı. Böylece çevreye zarar vermeyen temiz bir sistemden elektrik ve ısı elde edildi. Böylece bu çalışmanın PV-T üzerinde gelecekte yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Böylelikle bu tür temiz enerji üreten sistemlerin gelecekte oluşabilecek herhangi bir enerji krizi ile ilgili sorunların çözümüne katkı sağlayacağı da düşünülmektedir.

## 6 Conclusions

In this study, the energy and exergy efficiency and electricity generation performance of PV-T, which is cooled separately by water and air were examined and compared under four different conditions. The aim to be achieved of this study was to determine the performance of the PV-T by cooling it using water and air under as many conditions as possible throughout the year. When the solar radiation is increased from 100 W/m<sup>2</sup> to 1000 W/m<sup>2</sup>, the highest energy of PV-T reaches 58.96% and 41.76% for water and air while the highest exergy efficiency reached 18.34% and 16.20%, respectively. By increasing the ambient temperature from 0 °C to 30 °C, under constant 500 W/m<sup>2</sup> solar radiation, the highest energy efficiency of PV-T for water and air reached 59.64% and 35.55% while the highest exergy efficiency reached 18.90% and 16.09%. It was found that when the cooling rate increased from 0.001 kg/s to 0.01 kg/s, the water-cooled PV-T produced better electricity than air. However, under all conditions, it was found that when PV-T was cooled with air, it reached a higher surface and outlet temperature than water. As a result, when the energy and exergy efficiency and electricity production of PV-T were examined, it was found that when PV-T was cooled with water, it was better than air cooling in almost all conditions. If more electricity is to be produced from such PV-T water must be used instead of air. Because water is fluid with different physical properties than air. The specific heat of water is four times higher than air. It was found that when cooling with both water and air, water lowers the surface temperature of the PV-T better than air. A PV-T with a low surface temperature produces better electricity on a hot day than a PV-T that is not well cooled. Therefore, it was found that PV-T cooled by water showed better performance than air. However, if it is desired to obtain high-temperature fluid from PV-T, it would be more appropriate to use air instead of water. As a result, in this study, electricity and hot fluids were produced by using solar energy. Thus electricity and heat were obtained from a clean system that does not harm the environment. Thus it is thought that this study will contribute to future studies on PV-T. Thus, it is thought that such clean energy-generating systems will contribute to the solution of problems related to any energy crisis that may occur in the future.

## 7 Yazar katkı beyanı

Çalışmada Ayhan ATIZ fikrin oluşması, simülasyonun yapılması ve literatür taraması başlıklarında, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, sonuçların incelenmesi ve yorumlanması başlıklarında ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

## 8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 9 Kaynaklar

- [1] Yıllanc A, Atalay Ö, Koçar G, Eryaşar A. "Dinamik test metodu ile bir güneş kollektörünün ısı performansının belirlenmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 417-422, 2019
- [2] Çubukçu M, Metin Çolak M. "Gökçeada'da şebekeden bağımsız bir fotovoltaik güç sistemi benzetimi ve karşılaştırmalı gerçek performans incelemesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(5), 201-208, 2013.
- [3] Zengin S, Deveci F, Boztepe M. "Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemler için flyback mikro-evirici tasarımı". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 30-36, 2015.
- [4] Çetin E, Sazak BS. "Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılabilecek bir seri rezonans invertör devresinin incelenmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(3), 339-346, 2004.
- [5] Zondag HA, de Vries DW, van Helden WGJ, van Zolingen RJC, van Steenhoven AA. "The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector". *Solar Energy*, 72(2), 113-128, 2002.
- [6] Liang R, Zhang J, Ma L, Li Y. "Performance evaluation of new type hybrid photovoltaic/thermal solar collector by experimental study". *Applied Thermal Engineering*, 75, 487-492, 2015.
- [7] Zondag HA, de Vries DW, van Helden WGJ, van Zolingen RJC, van Steenhoven AA. "The yield of different combined PV-thermal collector designs". *Solar Energy*, 74, 253-269, 2003.
- [8] Joshi AS, Tiwari AK, Tiwari G, Dincer I, Reddy BV. "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system". *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 154-164, 2009.
- [9] Muneeshwaran M, Sajjad U, Ahmed T, Amer M, Ali HM, Wang CC. "Performance improvement of photovoltaic modules via temperature homogeneity improvement". *Energy*, 203, 1-13, 2020.
- [10] Radziemska E. "The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells". *Renewable Energy*, 28 (1), 1-12, 2003.
- [11] Elbreki AM, Alghoul MA, Al-Shamani AN, Ammar AA, Yegani B, Aboghrara AM, Ruslan MH, Sopian K. "The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: A critical review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 602-647, 2016.
- [12] Fudholi A, Sopian K, Yazdi MH, Ruslan MH, Ibrahim A, Kazem HA. "Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors". *Energy Conversion and Management*, 78, 641-651, 2014.

- [13] Preet S, Bhushan B, Mahajan T. "Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM)". *Solar Energy*, 155, 1104-1120, 2017.
- [14] Moharram KA, Abd-Elhady MS, Kandil HA, El-Sherif H. "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling". *Ain Shams Engineering Journal Volume*, 4(4), 869-877, 2013.
- [15] Rosa-Clot M, Rosa-Clot P, Tina GM, Scandura PF. "Submerged photovoltaic solar panel: SP2". *Renewable Energy*, 35(8), 1862-1865, 2010.
- [16] Odeh S, Behnia M. "Improving photovoltaic module efficiency using water cooling". *Heat Transfer Engineering* 30(6), 499-505, 2009.
- [17] Kolhe M, Bin D, Hu E. "Water cooled concentrated photovoltaic system". *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2, 2-6, 2012.
- [18] Abdolzadeh M, Ameri M. "Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells". *Renewable Energy*, 34(1), 91-96, 2009.
- [19] Sudhakar P, Santosh R, Asthalakshmi B, Kumaresan G, Velraj R. "Performance augmentation of solar photovoltaic panel through PCM integrated natural water circulation cooling technique". *Renewable Energy*, 172, 1433-1488, 2021.
- [20] Arslan E, Aktas M, Can OM. "Experimental and numerical investigation of a novel photovoltaic thermal (PV/T) collector with the energy and exergy analysis". *Journal of Cleaner Production*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123255>
- [21] Ceylan I, Gürel AE, Demircan H, Aksu B. "Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector". *Energy and Buildings*, 72, 96-101, 2014.
- [22] Elminshawy NAS, Mohamed AMI, Morad K, Elhenawy Y, Alrobaian AA. "Performance of PV panel coupled with geothermal air cooling system subjected to hot climatic". *Applied Thermal Engineering*, 148, 1-9, 2019.
- [23] Ozgen F, Esen M, Esen H. "Experimental investigation of thermal performance of a double-flow solar air heater having aluminum cans". *Renewable Energy*, 34(11), 2391-2398, 2009.
- [24] Nethra M, Kalidasan B. "Earth tube heat exchanger design for efficiency enhancement of PV panel". *Materials Today: Proceedings*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.387>.
- [25] Marinić-Kragić I, Nižetić S, Grubišić-Čabo F, Čoko D. "Analysis and optimization of passive cooling approach for free-standing photovoltaic panel: Introduction of slits". *Energy Conversion and Management*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112277>
- [26] Ibrahim A, Othman MY, Ruslan MH, Mat S, Sopian K. "Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (1), 352-365, 2011.
- [27] Zimmermann S, Helmers H, Tiwari MK, Paredes S, Michel B, Wiesenfarth M, Bett AW, Poulidakos D. "A high-efficiency hybrid high-concentration photovoltaic system". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 514-521, 2015.
- [28] Joshi AS, Dincer I, Reddy BV. "Performance analysis of photovoltaic systems: a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1884-1897, 2009.
- [29] Duffie JA, Beckman WA. *Solar Engineering of Thermal Process*. 4<sup>th</sup> ed. New York, USA, Wiley Interscience, 2013.
- [30] Wang H, Zou J, Cortina JL, Kizito J. "Experimental and theoretical study on temperature distribution of adding coal cinder to bottom of salt gradient solar pond". *Solar Energy*, 110, 756-767, 2014.
- [31] Cilogullari M, Erden M, Karakilcik M, Dincer I. "Investigation of hydrogen production performance of a photovoltaic and thermal system". *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 2547-2552, 2017.
- [32] Petela R. "Exergy of undiluted thermal radiations". *Solar Energy*, 74, 469-488, 2003.
- [33] Bulut H. "Adana ilinde eğik yüzeylere gelen güneş ışınım miktarının belirlenmesi". *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi 30. Yıl Sempozyumu*, Adana, Türkiye, 16-17 Ekim 2008.