



## Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi

### Energy and Exergy Analysis of A Photovoltaic Solar Power Plant

Selçuk Özel <sup>1</sup>, Ünal Çamdalı <sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: unalcamdali@gmail.com

#### Öz

Ekserji analizi, enerji kalitesinin ve tersinmezliklere bağlı olarak bir sistemde oluşan kayıpların belirlenmesi noktasında önemlidir. Ekserji iş üretebilme kabiliyetidir. Başlangıç halinden ölü hale ulaşmaya kadar, sistemden elde edilebilecek maksimum teorik yararlı iş olarak tanımlanabilir. Enerjiyi dönüştüren tüm sistemler için ekserji analizi gerçekleştirmek mümkündür. Zira ekserji miktarla beraber niteliğin de bir ölçüsüdür. Fotovoltaik sistemlerde güneş paneli tarafından üretilen (dönüştürülen) elektrik, sistemin ürettiği ekserji değerini vermektedir. Elektrik üretimi sırasında ısı da oluşmaktadır. Oluşan ısı, tersinmezliklerden kaynaklı olarak ekserji kayıplarını oluşturmaktadır. Bu çalışmada pik gücü 1,21 MW olan ve Kayseri’de kurulan fotovoltaik güneş santralinin gerçek üretim değerleri kullanılarak güneş enerjisinin yoğun olduğu, Haziran-Ağustos dönemlerindeki (2017 yılı), enerji ve ekserji verimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Değerler aylık olarak 5’er günlük test günlerindeki 08:00-20:00 zaman diliminde elde edilmiştir. Elde edilen gerçek değerler: tesisin ürettiği elektrik (gücü), güneş ışınımı ve ortalama çevre sıcaklığıdır. Sonrasında bunlara bağlı olarak tesisin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Enerji verimi Haziran ve Temmuz aylarında %25’in üzerine olduğu halde aynı aylardaki ekserji verim değerleri en yüksek % 27,7 ve % 28,7, Ağustos ayında ise en yüksek % 25,7 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla fotovoltaik sistemlerdeki tersinmezliklerden dolayı oluşan kayıpların, ekserji veriminin en yüksek olduğu sabah saatlerinde bile % 70’ in üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, fotovoltaik sistemler, enerji analizi, ekserji analizi

#### Abstract

Exergy analysis is important in determining the quality of energy and losses in a system based on irreversibility. Exergy is the ability to produce work. It can be defined as the maximum theoretical useful work that can be obtained from the system between the initial state and the dead state. It is possible to perform exergy analysis for all energy conversion systems because it is a measure of quality as well as quantity. In photovoltaic systems, the electricity produced (converted) by the solar panel gives the exergy value produced by the system. Heat is also generated during electricity production. The heat generated creates exergy losses due to irreversibility. In this study, the energy and exergy efficiencies of the photovoltaic solar power plant located in Kayseri, Türkiye with a peak power of 1.21 MW, were tried to be determined by using the actual production values in the June-August periods (in 2017), when solar energy is intense. Values were obtained monthly between 08:00 AM-20:00 PM on a five-day test. The actual production values obtained are: the electrical power produced by the facility, solar radiation and average environment temperature. Afterwards, energy and exergy analysis of the facility was performed based on the obtained values. Although the energy efficiency was above 25% in June and July, the highest exergy efficiency values in the same months were 27.7% and 28.7% respectively, and the highest was 25.7% in August. Therefore, it has been determined that losses due to irreversibility in photovoltaic systems are over 70% even in the morning hours when exergy efficiency is highest.

**Keywords:** Solar energy, photovoltaic systems, energy analysis, exergy analysis

#### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Limited fossil resources and developing environmental awareness are important factors for the widespread use of renewable energy resources for sustainable development. Solar energy, considering its potential and suitability based on location and climate zone, emerges as one of the leading renewable resources. Despite the increase in the number of installed solar power plants in recent years, solar energy remains underutilized. As of the end of October 2023, Turkey’s electrical power capacity stands at approximately 107,000 MW. Breaking down the sources of installed power, 29.8% is hydraulic energy, 23.9% is

natural gas, 20.6% is coal, 11% is wind, approximately 10.5% (or 11 thousand MW) is solar, 1.6% is geothermal, and 2.6% is from other sources. Furthermore, the number of electric power generation plants increased to 12,868 (including unlicensed power plants) by the end of October 2023. Among these, 754 units are hydroelectric, 68 units are coal, 363 units are wind, 63 units are geothermal, 344 units are natural gas, 10,784 units are solar, and 492 units are from other power sources [1].

Türkiye has sufficient potential in terms of solar energy. During the June-August period, the monthly average sunshine duration is over ten hours. In the same period, the monthly average values

of solar radiation are 5.8–6.57 kWh/m<sup>2</sup>day. Determining how much of this solar radiation coming to the unit surface area can be converted into useful work is important in terms of designing photovoltaic solar energy systems and making cost analysis more precisely. In this respect, exergy analyzes must be performed along with energy analyzes in photovoltaic systems.

## Materials and Methods

### Energy Analysis

By using the first law of thermodynamics, the general form of the energy balance equation for a system can be written as:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{ex} + \left(\frac{\Delta E}{\Delta t}\right)_{sys} \quad (1)$$

Energy efficiency in photovoltaic panels refers to the ratio of the electricity produced by the solar panel to the sunlight falling on the solar panel. The efficiency of the panels can be defined by the equation given below.

$$\eta_e = \frac{P_e}{A.G} \quad (1a)$$

The power obtained from the panel and the performance of solar panels are related to environmental factors such as ambient temperature, panel temperature and dust. Ndiaye et al. [3], in their study, showed the effect of dust on the panel on the performance of the panel. Joshi et al. [18] stated that the energy efficiency of the solar panel is as in Eq. (2).

$$\eta_e = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{A.G} \quad (2)$$

In Eq. (3), the product of the current and voltage values produced by the solar panel under an electrical load gives the amount of electricity produced. The power value obtained from the solar panel at the maximum level is expressed by the equation given in Eq. (4).

$$P_e = VI \quad (3)$$

$$P_{max} = V_{OC} I_{SC} FF = V_{mp} I_{mp} \quad (4)$$

### Exergy Analysis

Exergy is work or the ability to produce work. Exergy is a measure of quality as well as quantity. It is defined as the maximum theoretical useful work that can be obtained from the system between the initial state and the dead state [6,7]. This value shows the useful work potential or opportunity to do work and is called availability (exergy). While energy can always be conserved in a process, exergy is consumed due to irreversibility in real processes, except for reversible processes. Irreversibility is the work potential lost during a process. Exergy consumption during a process is proportional to the entropy generated due to irreversibilities associated with the process.

The exergy equation of the solar panel is expressed as in Equation (5).

$$\dot{E}_{XG} = \dot{E}_{XC} + \dot{E}_{XI} + \dot{E}_{XK} \quad (5)$$

### Experimental Study

The energy and exergy efficiencies of the solar power plant with an installed capacity of 1.21 MW, established in Kayseri, Türkiye were examined. A total of 4692 solar panels, each with a power of 260 W, were used in the power plant. Additionally, 17 inverters were used, each providing 60 W electrical output. In the study, ambient temperature, solar radiation value and the amount of electricity produced by the solar panels in the power plant were measured. Ambient temperature and solar radiation value were measured by a meteorological station. Since the solar panels in the power plant are arranged with a 25° placement angle, the irradiance matter is also positioned with a 25° placement angle. The amount of electrical energy generated by the solar panels and entering the inverters was obtained through the electronic interface in the inverters (Fig. 1). The wind speed is taken as 1 m/sec, which is the nominal operating condition stipulated by the manufacturers. The module temperature was found via Eq. (15). The surface area used in the calculations was found by multiplying the total number of solar panels by the area of the solar panel. The coefficients used in the calculations are stated in Table 1. Clear weather days were designated as test days. In addition, in determining the test days, care was taken to ensure that the solar panels were dust-free and clean. 15 days of performance data in total, 5 days each month, were used in the 3-month period between June and August in 2017.

### Results and Discussion

Fig. 2 illustrates the variation in module temperature, energy, and exergy efficiency. As the ambient temperature rises, the module temperature increases accordingly. This elevation in module temperature results in a decrease in both exergy and energy efficiency. Comparable trends are observable in July and August as depicted in Figures 3 and 4. The peak exergy efficiencies were recorded at 27.7% and 28.7% in June and July, respectively. Energy efficiency likewise surpassed 25% during these months. The average highest ambient temperature in June is 31.7 °C.

### Conclusion

The results obtained from the study indicate that the exergy and energy efficiency of photovoltaic solar panels are low. The most significant exergy loss occurs due to irreversibility during the electricity production of the solar panel. As the module temperature increases, irreversibility also increases. Consequently, the morning hours exhibit the highest exergy efficiency, as ambient and module temperatures are lower during this time compared to other hours of the day. Further research is needed to enhance solar panel efficiency and operational conditions. Additionally, the solar radiation value is a crucial factor that enhances exergy efficiency.

## 1. Giriş

Fosil kaynakların sınırlı olması ile birlikte son yıllarda gelişen çevre bilinci, sürdürülebilir bir kalkınma için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşmasını elzem hale getirmiştir. Ülkemizin konumu ve iklim kuşağı göz önüne alındığında, sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli, yenilenebilir kaynakları açısından önem ifade etmektedir. Son yıllarda kurulu

güneş enerjisi santrallerinin sayılarının artmasına rağmen güneş enerjisinden yeteri kadar faydalanılmadığı da bir gerçektir.

2023 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla ülkemizin elektrik kurulu gücü, yaklaşık 107.000 MW'dır. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılım ise %29,8'i hidrolik enerji, %23,9'u doğal gaz, %20,6'sı kömür, %11'i rüzgâr, %10,5'i (yaklaşık 11 bin MW) güneş, %1,6'sı jeotermal ve %2,6'sı diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca ülkemizdeki elektrik üretim santrallerinin sayısı, 2023 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla 12.868'e (lisanssız santraller dâhil)

yükselmiştir. Mevcut santrallerin 754 adedi hidroelektrik, 68 adedi kömür, 363 adedi rüzgâr, 63 adedi jeotermal, 344 adedi doğal gaz, 10.784 adedi güneş, 492 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir. Yukarıda da ifade edildiği gibi Türkiye güneş enerjisi bakımından yeterli potansiyele sahiptir. Haziran-Ağustos döneminde, aylık ortalama güneşlenme süreleri on saatin üzerindedir. Yine aynı dönemde güneş ışınımı aylık ortalama değerleri 5,8–6,7 kWh/m<sup>2</sup>gün'dür [1].

Birim yüzey alana gelen güneş radyasyonunun ne kadarının faydalı işe dönüştürülebileceğinin tespiti, fotovoltaik güneş enerjili sistemlerin tasarlanması ve maliyet analizlerinin daha sağlıklı yapılabilmesi açısından önemlidir. Bu açıdan fotovoltaik sistemlerde enerji analizleriyle beraber ekserji analizlerinin de yapılması faydalı olacaktır.

Enerji analizinde, sistemdeki kurulu güneş paneli üzerine düşen ışınım miktarı ile sistemin ürettiği enerji miktarı karşılaştırılır. Enerji analizi, termodinamiğin birinci yasasına göre yapılmaktadır. Enerji analizinde; sisteme giren enerji, sistemden çıkan enerji ile sistemin enerji değişim miktarı, göz önünde bulundurulur.

Ekserji bir sistemin referans çevre ile denge durumuna geldiğinde, üretebileceği maksimum teorik yararlı iş miktarıdır [2]. Tersinmez işlemlerde belli miktardaki entropi artışıyla birlikte iş kaybı oluşmasına karşın, en fazla iş sadece tersinir süreçlerde elde edilir. Ekserji tersinir süreçler dışında, enerji gibi korunan bir büyüklük değildir. Bu yüzden termodinamiğin birinci (enerjinin korunumu) yasasına göre değil ikinci yasasına göre açıklanmaktadır.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Enerji Analizi

Termodinamiğin birinci yasasına göre bir sistemin enerji dengesi, aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\dot{E}_g = \dot{E}_c + \left(\frac{\Delta E}{\Delta t}\right)_{sis} \quad (1)$$

Fotovoltaik sistemlerde enerji verimi; Eşitlik (1a)'da verildiği gibi güneş paneli tarafından üretilen elektriğin (güç olarak), üzerine düşen güneş ışınımına oranı olarak tanımlanabilir.

$$\eta_e = \frac{P_e}{A.G} \quad (1a)$$

Elde edilen güç ve panellerinin performansı; çevre (ortam) sıcaklığı, panel sıcaklığı, toz gibi çevresel etmenlerle ilişkilidir. Ndiaye ve arkadaşları, panel üzerindeki tozun, panelin performansına olan etkisini göstermiştir [3]. Şahin ve diğerleri ise güneş panelinin enerji verimini, Eşitlik (2)'deki gibi belirtmiştir [4].

$$\eta_e = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{A.G} \quad (2)$$

Eşitlik (3)'te görüldüğü gibi üretilen elektriksel güç, güneş paneli tarafından üretilen akım ve gerilim değerinin çarpımı olarak verilir. Güneş panelinden maksimum seviyede elde edilen güç ise Eşitlik (4)'te verilen bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$P_e = VI \quad (3)$$

$$P_{max} = V_{oc} I_{sc} FF = V_{mp} I_{mp} \quad (4)$$

### 2.2. Ekserji Analizi

Ekserji iş üretebilme kabiliyetidir. Ekserji, miktarla beraber niteliğin de ölçüsüdür. Yukarıda da ifade edildiği gibi başlangıç halinden ölü hale ulaşıncaya kadar sistemden elde edilebilecek en fazla teorik yararlı iş olarak tanımlanmaktadır [5, 6]. Bu değer

yararlı iş potansiyelini veya iş yapma kabiliyetini göstermekte ve enerjinin kullanılabilirliği olarak da tanımlanmaktadır.

Enerji bir süreçte korunurken, ekserji tersinir süreçlerin dışında, gerçek süreçlerde tersinmezlikler nedeni ile tüketilmekte veya yok edilmektedir. Tersinmezlik, bir süreç sırasında kaybedilen iş potansiyelidir. Bir süreç boyunca ekserji tüketimi, süreçle ilişkili tersinmezlikler nedeni ile ortaya çıkan (üretilen) entropi ile orantılıdır. Enerjinin kalitesindeki (kullanılabilirliğindeki) azalma, ekserji kaybı olarak ifade edilebilir.

Güneş panelinin ekserji dengesi, Eşitlik (5)'teki gibi verilebilir [7,8].

$$\dot{E}_{XG} = \dot{E}_{XC} + \dot{E}_{XI} + \dot{E}_{XK} \quad (5)$$

Güneş panelleri emilen güneş ışınımını, elektrik ve ısıya dönüştürür. Güneş panelleri tarafından üretilen (dönüştürülen) elektrik ise kullanılabilir enerjidir ve sistemin ekserjisi olarak kabul edilebilir [9]. Ancak oluşan ısı genellikle kullanılamamakta ve çevreye transfer edilmektedir. Çevreye transfer edilen ısının bir kısmı, sistem için ekserji kaybı olarak ifade edilebilir [10].

Güneş paneli için ekserji verimi, güneş panelinden elde edilen ekserjinin, güneş ışınımının sahip olduğu ekserjiye oranı şeklinde tanımlanabilir [11].

$$\eta_{EX} = \frac{\dot{E}_{Xe}}{\dot{E}_{XG}} \quad (6)$$

Fotovoltaik güneş enerjisi sistemlerinde, sisteme giren ekserji, güneş ışınımının sahip olduğu ekserji değeridir. Bu değer aşağıdaki eşitlik ile verilir [11,12].

$$\dot{E}_{XG} = A.G \left[ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)^4 \right] \quad (7)$$

Fotovoltaik sistem için sistemde elde edilen ekserji ise üretilen elektriksel değere (güce) eşittir [9].

$$\dot{E}_{Xe} = \dot{E}_{XC} \quad (8)$$

Yukarıda da ifade edildiği gibi güneş panellerindeki elektrik üretimi sırasındaki oluşan ısı, ışınım ve taşınım ile çevreye yayılmaktadır. Isının ekserjisi Eşitlik (9a)'da belirtilmiştir [13]. Eşitlikten de görüleceği üzere ısının ekserjisi, sistemden çevreye transfer olan ısı, çevre sıcaklığı ve modül (parça) sıcaklığı ile ilişkilidir. Ekserji yıkımı (kayıbı) ise Eşitlik (9b) ile ifade edilir.

$$\dot{E}_{XI} = \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_a}{T_m} \right) \quad (9a)$$

$$\dot{E}_{XK} = T_a \frac{\Delta S_{top}}{\Delta t} \quad (9b)$$

Çevreye yayılan ısı, Eşitlik (10)'da gösterildiği gibi toplam ısı transfer katsayısı, toplam güneş paneli yüzey alanı ve modül sıcaklığı ile çevre sıcaklığının farkı ile ilişkilidir.

$$\dot{Q} = UA (T_m - T_a) \quad (10)$$

Toplam ısı transfer katsayısı, ışınım ve taşınım ısı transfer katsayılarının toplamı şeklindedir [14].

$$U = h_t + h_r \quad (11)$$

Isı taşınım katsayısını etkileyen önemli faktörlerden biri de rüzgâr hızıdır. Eşitlik (12)'deki bağıntı ile ısı taşınım katsayısı elde edilir [14].

$$h_t = 2,8 + 3V_w \quad (12)$$

Güneş panellerinde oluşan ısı, taşınım ile birlikte ışınım yoluyla da çevreye transfer olmaktadır. Isı ışınım katsayısını belirleyen faktörler, güneş panellerinin yayma katsayısı, modül ve gökyüzü sıcaklığıdır. Modül ile çevre arasındaki ışınım transfer katsayısı, Eşitlik (13)'de verilmiştir [14].

$$h_r = \sigma \varepsilon (T_m + T_g) + (T_m^2 + T_g^2) \quad (13)$$

Modül ve gökyüzü sıcaklığının artması ile ışınım transfer katsayısı ( $h_r$ ) artacaktır. Efektif gökyüzü sıcaklığının değeri, çevre sıcaklığı ile ilişkilidir ve Eşitlik (14)'deki bağıntıyla ifade edilmektedir [10, 14, 15].

$$T_g = T_a - 6 \quad (14)$$

Modül sıcaklığı, enerji ve ekserji verimleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Modül sıcaklığı, nominal çalışma sıcaklığı ve ışınım değeri kullanılarak Eşitlik (15) ile belirlenebilir [16]. Nominal çalışma koşullarında, güneş ışınım şiddeti, rüzgâr hızı, çalışma sıcaklığı ve hava kütlesi değerleri belirlenmiştir. Nominal çalışma koşullarında, ışınım şiddeti 1.000 W/m<sup>2</sup>, rüzgâr hızı 1 m/s, çalışma sıcaklığı 20 °C, hava kütle indeksi ise 1,5 kabul edilmiştir [14, 17,18].

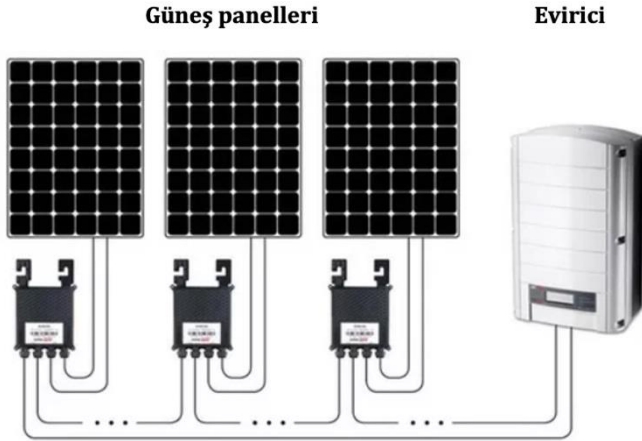
$$T_m = T_a + (NOCT - 20) \frac{G}{800} \quad (15)$$

Güneş paneli tarafından üretilen elektriğin, sahip olduğu (elektriksel) ekserji ise Eşitlik (16)'da verilen bağıntıyla belirlenmektedir [14, 18].

$$\dot{E}_{xe} = VocIscFF \quad (16)$$

### 2.3. Deneysel Çalışma

Çalışmada Kayseri'de gerçekleştirilen 1,21 MW kurulu gücündeki güneş enerjisi santralının, enerji ve ekserji verimleri elde edilmiştir. Santralde her biri 260 W gücünde toplam 4.692 adet güneş paneli ayrıca her biri 60 W elektrik çıkışı sağlayan, 17 adet evirici kullanılmıştır (Şekil 1). Burada çevre sıcaklıkları, güneş ışınım değerleri ve santraldeki güneş panelleri tarafından üretilen elektrik miktarları ölçülmüştür. Çevre sıcaklıkları ve güneşin ışınım değerleri, meteoroloji istasyonu vasıtasıyla ölçülmüştür. Pratik uygulamalardan ve literatürdeki kaynaklardan da [16] anlaşıldığı üzere güneş ışınımın ölçülen değerleri ile hesaplanan değerleri arasında, genel olarak %5-%10 arasında değişen bir farklılık olduğu bilinmektedir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Figure 1. Schematic figure of the experiment setup

Santralde güneş panelleri dizilimi 25° yerleşim açısı ile yapıldığı için ışınımölçer de 25° yerleşim açısı ile konumlandırılmıştır. Güneş panelleri tarafından üretilerek eviricilere giren elektriğin miktarı, eviricilerdeki elektronik ara yüz vasıtasıyla belirlenmiştir. Rüzgâr hızı üreticiler tarafından nominal çalışma koşulu olarak öngörülen değer olan, 1 m/s alınmıştır [18].

Modül sıcaklığı Eşitlik (15) yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan yüzey alanı ise toplam güneş paneli sayısı ile güneş panelinin alanı çarpılarak elde edilmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan katsayılar, Tablo 1'de verilmiştir. Havanın açık olduğu günler test günleri olarak belirlenmiştir. Ayrıca test günlerinin belirlenmesinde, güneş panellerinin tozsuz ve temiz olmasına dikkat edilmiştir. 2017 yılı Haziran-Ağustos (3 aylık) döneminde, her ay 5 gün olmak üzere toplamda 15 günlük performans verileri kullanılmıştır.

Tablo 1. Hesaplamalarda kullanılan katsayılar [10]

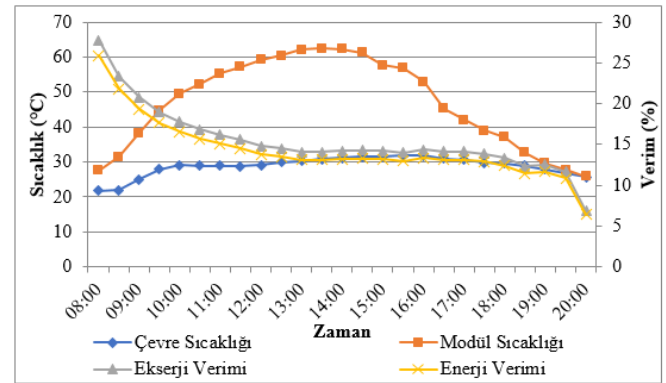
Table 1. Coefficients used in calculations [10]

Özellikler	Birim	Değer
Stefan-Boltzmann katsayısı ( $\sigma$ )	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	5,67 x 10 <sup>-8</sup>
Güneş panelinin yayma katsayısı ( $\varepsilon$ )	-	0,9
Güneşin sıcaklığı ( $T_s$ )	K	5.780

### 3. Bulgular

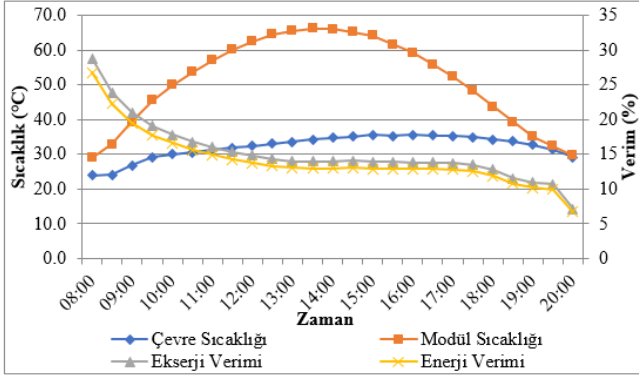
Şekil 2'de Haziran ayındaki ortalama modül sıcaklığına bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi verilmiştir. Çevre (ortam) sıcaklığının artışı, doğal olarak modül sıcaklığını arttırmaktadır. Modül sıcaklığının artması, hem enerji hem de ekserji veriminin azalmasına neden olmaktadır. Temmuz ve Ağustos aylarında da benzer değişim görülmektedir (Şekil 3 ve Şekil 4).

Haziran ve Temmuz aylarında (ortalama) ekserji verimi en yüksek %27,7 ve % 28,7 olarak elde edilmiştir. Enerji verimi ise aynı aylarda %25'in üzerinde gerçekleşmiştir (Şekil 2 ve Şekil 3). Haziran ayında ortalama ortam sıcaklığı, en yüksek 31,7 °C olarak ölçülmüştür. Buna karşılık modül sıcaklığının ortalama değeri, Haziran ayında en yüksek 62,4 °C olmuştur (Şekil 2). Çevre sıcaklığının sınırlı artışına karşılık modül sıcaklığı daha fazla artmıştır. Bu artışın nedeni, ışınlama birlikte güneş panelindeki hem elektrik hem de ısı üretiminin artmasıdır. Temmuz ayında ortam sıcaklığının ortalama değeri en yüksek 35,5 °C, modül sıcaklığı ortalama değeri ise en yüksek 66,1 °C olarak belirlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Haziran ayı ortalama modül ve çevre sıcaklıkları, enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

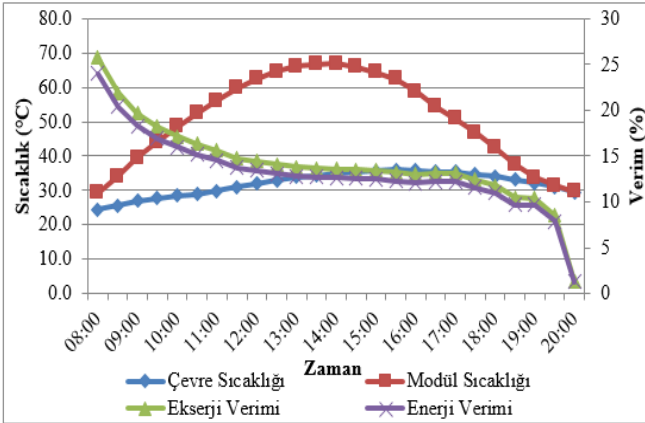
Figure 2. Changes of average module and environment temperatures, energy and exergy efficiencies in June



**Şekil 3.** Temmuz ayı ortalama modül ve çevre sıcaklıkları, enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

**Figure 3.** Changes of average module and environment temperatures, energy and exergy efficiencies in July

Ağustos ayı en yüksek ortalama ortam ve modül sıcaklıkları 35,9 °C ve 67 °C' olarak ölçülmüştür. Ağustos ayı ortalama enerji verimi en yüksek %24, ortalama ekserji verimi ise en yüksek %25,7 olarak belirlenmiştir (Şekil 4).



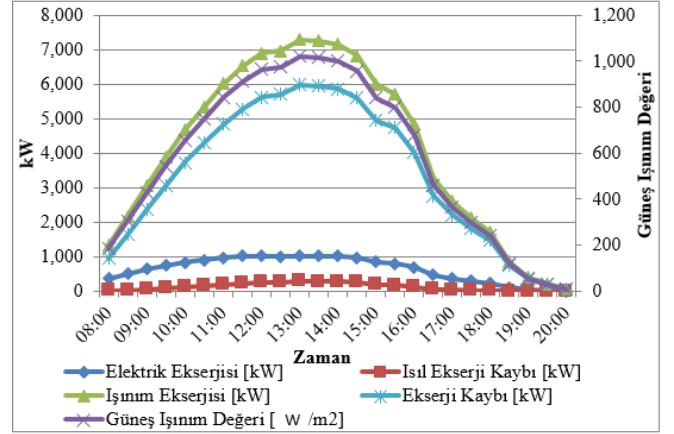
**Şekil 4.** Ağustos ayı ortalama modül ve çevre sıcaklıkları, enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

**Figure 4.** Changes of average module and environment temperatures, energy and exergy efficiencies in August

Güneş ışınım değerinin artması, elektrik ve ısıtım ekserji değerlerinin artmasına neden olmuştur. Haziran–Ağustos dönemindeki ortalama ısıtım ekserji( güç) değeri, en yüksek 7.000 kW'ın üzerine çıkmıştır. Bu dönemde ortalama güneş ışınım güç değerleri ise 1.000–1.100 kW/m<sup>2</sup> arasında gerçekleşmiştir (Şekil 5-7).

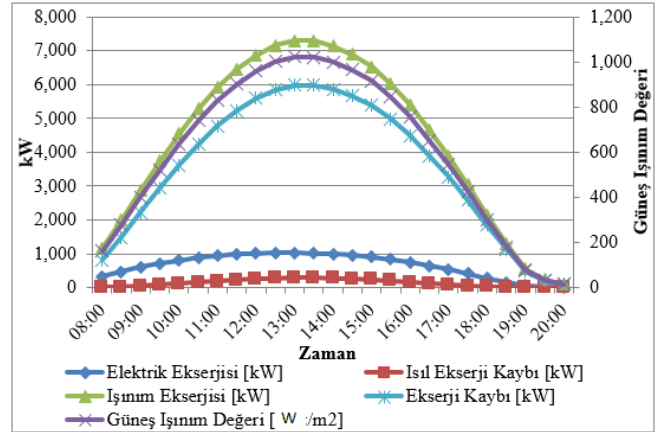
Sistemdeki ısı ekserji kayıpları (Şekil 5–7) daha sınırlı gerçekleşmiştir.

Ekserji veriminin en yüksek olduğu sabah saatlerinde bile tersinmezliklerden dolayı oluşan ekserji kayıpları, %70'in üzerindedir (Şekil 8).



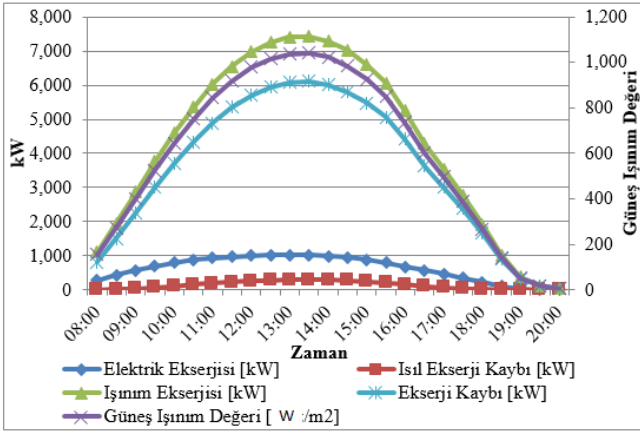
**Şekil 5.** Haziran ayı ortalama güneş ışınımı (0–1,200 W), elektriksel ekserji, ısıtım ekserjisi ve ekserji kayıplarının değişimi (0–8,000 kW)

**Figure 5.** Changes of average solar radiation (0–1,200 W), electrical exergy, radiation exergy and exergy losses (0–8,000 kW) in June



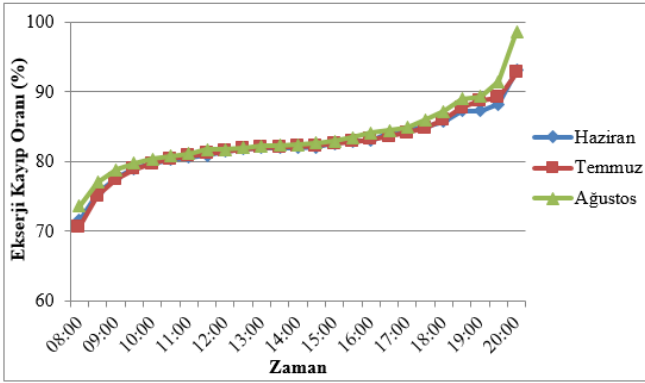
**Şekil 6.** Temmuz ayı ortalama güneş ışınımı (0–1,200 W), elektriksel ekserji, ısıtım ekserjisi ve ekserji kayıplarının değişimi (0–8,000 kW)

**Figure 6.** Changes of average solar radiation (0–1,200 W), electrical exergy, radiation exergy and exergy losses (0–8,000 kW) in July



**Şekil 7.** Ağustos ayı ortalama güneş ışınımı (0–1.200 W), elektriksel ekserji, ışınım ekserjisi ve ekserji kayıplarının değişimi (0–8.000 kW)

**Figure 7.** Changes of average solar radiation (0–1,200 W), electrical exergy, radiation exergy and exergy losses (0–8,000 kW) in August



**Şekil 8.** Tersinmezliklerden dolayı oluşan ekserji kayıp oranları

**Figure 8.** Exergy losses ratios due to irreversibilities

#### 4. Sonuç

Yapılan çalışma sonucunda, fotovoltaik güneş panellerinin enerji ve ekserji verimlerinin düşük olduğu görülmektedir. En büyük ekserji kaybının, güneş panelinin elektrik üretimi sırasındaki tersinmezliklerden kaynaklı olduğu belirlenmiştir.

Modül sıcaklığının artması, tersinmezlikleri artırmaktadır. Bu bakımdan sabah saatleri, ekserji veriminin en yüksek olduğu zamandır. Sabah saatlerinde çevre ve modül sıcaklıkları düşük olduğundan, enerji ve ekserji verimleri, günün diğer saatlerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Bilindiği gibi güneş ışınım değeri, ekserji verimini artıran önemli bir unsurdur. Güneş panelinin verimi ise sistemde yapılacak bazı iyileştirmelerle artırılabilir.

#### Semboller

$A$	Güneş panelinin yüzey alanı [m <sup>2</sup> ]
$\dot{E}$	Birim zamandaki enerji (güçü) (kW)
$\dot{E}_{XC}$	Sistemden çıkan ekserji (güçü) [kW]
$\dot{E}_{Xe}$	Elektriksel ekserji (güçü) [kW]
$\dot{E}_{XG}$	Sisteme giren ekserji (güçü) [kW]
$\dot{E}_{XI}$	Isıl ekserji (güçü) [kW]

$\dot{E}_{XK}$	Yıkıma uğrayan ekserji (güçü) [kW]
FF	Güneş panelinin dolun çarpanı
$G$	Güneş ışınım değeri [W/m <sup>2</sup> ]
$h_r$	Isı ışınım katsayısı [W/m <sup>2</sup> K]
$h_t$	Isı taşınım katsayısı [W/m <sup>2</sup> K]
$I$	Güneş paneli tarafından üretilen akım [A]
$I_{mp}$	En yüksek güç üretiminde akım değeri [A]
$I_{sc}$	Güneş panelinin kısa devre akımı [A]
$NOCT$	Güneş panelinin (hücrelerinin) nominal çalışma sıcaklığı [°C, K]
$P_e$	Güneş paneli tarafından üretilen elektriksel güç [W]
$P_{max}$	Güneş panelinden elde edilen en yüksek elektriksel güç [W]
$\dot{Q}$	Çevreye transfer olan ısı [kW]
$\dot{Q}_g$	Giren ısı [kW]
$\Delta S_{top}$	Toplam entropi değişimi (üretimi) [kJ/K]
$\Delta t$	Süre (s)
$T_a$	Çevre (Ortam) sıcaklığı [°C, K]
$T_g$	Gökyüzünün sıcaklığı [°C, K]
$T_m$	Modül (Parça) sıcaklığı [°C, K]
$T_s$	Güneşin sıcaklığı [°C, K]
$U$	Toplam ısı kaybı katsayısı
$V$	Güneş paneli tarafından üretilen gerilim [V]
$V_{mp}$	En yüksek güç üretimindeki gerilim değeri [V]
$V_{oc}$	Güneş panelinin açık devre gerilimi [V]
$V_w$	Rüzgâr hızı [m/s]
$\epsilon$	Güneş panelinin yayma katsayısı
$\eta_e$	Enerji verimi (%)
$\eta_{EX}$	Ekserji verimi (%)
$\sigma$	Stefan–Boltzmann katsayısı [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]

#### 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.

#### Yazar katkılarının beyanı

Her iki yazar, kaynak araştırması, hesaplamalarının yapılması, makale yazımı ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

#### Kaynaklar

- [1] <http://www.enerji.gov.tr> (Erişim Tarihi: 05.01.2024).
- [2] Cengel, Y. A. ve M. A. Boles. 2006. Thermodynamics: An Engineering Approach. Fifth Edition. Mc Graw Hill, 424s.
- [3] Ndiaye, A., M. F. Kébé, C., Ndiaye, P. A., Charki, A., Kobi, A. and Sambou, V. 2013. Impact of Dust on The Photovoltaic (PV) Module Characteristics after An Expositionyear in Saheli an Environment: Thecase of Senegal, International Journal of Physical Sciences, Vol. 8(21), s. 1166-1173. DOI: 10.5897/IJPS2013.3921
- [4] Şahin, A. D., Dinçer, İ. and Rosen, M. A. 2007. Thermodynamicanalysis of Solar Photovoltaic Cell Systems, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91(2-3) , s. 153-159. DOI: 10.1016/j.solmat.2006.07.015
- [5] Bejan, A., Tsatsaronis G., Moran M. 1996. Thermal Design and Optimization. John Wiley&Sons, New York.

- [6] Kotas, T.J. 1985. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Butterworth–Heinemann, 29s.
- [7] Wong, K.F.V. 2000. *Thermodynamics for Engineers*. Second Edition. CRC Press, Taylor@Francis Group, s. 4.1–4.2.
- [8] Hepbasli, A. 2008. A Key Review on Exergetic Analysis and Assessment of Renewable Energy Resources for a Sustainable Future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, s. 593–661. DOI:10.1016/j.rser.2006.10.001
- [9] Elhadj Sidi, C. E. B., Ndiaye, M. L., Ndiaye, A. and Ndiaye, P. A. 2015. Outdoor Performance Analysis of a Mono Crystalline Photovoltaic Module: Irradiance and Temperature Effect on Exergetic Efficiency, *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 10(11), s. 351–358. DOI: 10.5897/IJPS2015.4356
- [10] Sudhakar, K. and Srivastava, T. 2013. Energy and Exergy Analysis of 36 W Solar Photovoltaic Module, *International Journal of Ambient Energy*, 35(1), s. 51–57. Article ID: IJMET\_09\_06\_086
- [11] Petela, R. 2003. Exergy of Undiluted Thermal Radiation, *Solar Energy*, 74, s. 469–488. DOI:10.1016/S0038-092X(03)00226-3
- [12] Petela, R. 2008. An Approach to the Exergy Analysis of Photosynthesis, *Solar Energy*, 82(3), s. 11–328. DOI:10.1016/j.solener.2007.09.002
- [13] Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H. and Behzadmehr, A. 2010. Exergetic Performance Evaluation of a Solar Photovoltaic (PV) Array, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (3), s. 502–519
- [14] Ravat, P. 2017. Exergy Performance Analysis of 300 W Solar Photovoltaic Module, *International Journal of Engineering Sciences&Research Technology*, 3, s. 317–390. DOI: 10.5281/zenodo.438094
- [15] Shukla, A., Khare, M. and Shukla, K. N., 2015. Experimental Exergetic Performance Evaluation of Solar PV Module, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(1), s. 1–9
- [16] Kumar, P., Gupta, V., Sudhakar, K. and Kumar Singh, A. 2016. Experimental Analysis of Comparative Temperature and Exergy of Crystalline (c-Si) and Amorphous (a-Si) Solar PV Module Using Water Cooling Method, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(5), s. 21–26. DOI: 10.9790/1684-1305032126
- [17] Nuhoglu, S. 2017. Tek Eksen Güneş Takipli Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Konya İçin Örnek Bir Uygulama. T.C. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 28s, Konya.
- [18] Joshi, A. S., Dincer, I., and Reddy, B. V. 2009. Thermodynamic Assessment of Photovoltaic Systems, *Solar Energy*, 83 (8), s. 1139–1149. DOI: 10.1016/j.solener.2009.01.011