

Polikristal Silikon Fotovoltaik Panelin Enerji ve Ekserji Analizinin Deneysel İncelemesi

Hacer AKHAN^{1*} ve Mert Bora HAZAR¹

¹Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ahmet Karadeniz Yerleşkesi, Edirne 22030, Türkiye

Makale Künye Bilgisi: Akhan, H., Hazar, M.B., (2025). Polikristal Silikon Fotovoltaik Panelin Enerji ve Ekserji Analizinin Deneysel İncelemesi, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*. 26(2), 111-126

Öne Çıkanlar

- PV panel yüzeyine gelen güneş ışınımını artırmak için eğim açısı optimum değerinde olmalıdır.
- Ağustos ayı Edirne iklim koşulları için en yüksek güç üretimi PV panel eğim açısı 30° için elde edilir.
- Fotovoltaik panellerde ışınım şiddetinin ve dolayısıyla üretilen gücün artması, çoğu durumda sistem veriminde beklenen doğrusal bir iyileşmeye yol açmamaktadır.

Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihçesi: Geliş: 15 Kasım 2025 Kabul: 30 Aralık 2025	Günümüzde enerji dönüşüm maliyetlerinin ve enerji talebinin artması, mevcut kaynakların yetersizliği, enerjinin minimum kayıpla yüksek verimle üretilmesini gerekli kılmaktadır. Bu aşamada enerji dönüşüm sistemindeki verimlilik artırıcı uygulamalar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, gerçek saha koşullarında fotovoltaik sistem 20°, 30° ve 40° eğim açılarındaki çalıştırılarak, Edirne iklim koşullarında 2025 yılı ağustos ayı için hangi eğim açısında sistemin daha yüksek verimle çalıştığı deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda meteorolojik veriler, panel sıcaklığı, akımı ve gerilimi ölçüp kaydedilmiştir. Deneysel veriler kullanılarak sistemin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre ağustos ayında 30° eğim açısında fotovoltaik panelin enerji ve ekserji verimliliği en yüksektir. Daha önce literatürde Edirne iklim koşulları için fotovoltaik panelin farklı eğim açıları için enerji ekserji analizini inceleyen deneysel bir çalışma yapılmamıştır. Bu açıdan çalışma Edirne ve benzer iklim kuşağına sahip lokasyonlar için örnek model teşkil etmektedir.
Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik; Enerji-ekserji analizi; Enerji verimliliği; Güneş enerjisi.	

Experimental Investigation of Energy and Exergy Analysis of Polycrystalline Silicon Photovoltaic Panels

Article Info	Abstract
Article History: Received: November 15, 2025 Accepted: December 30, 2025	Today, the increase in energy conversion costs and energy demand, coupled with the inadequacy of existing resources, necessitates the production of energy with high efficiency and minimal loss. At this stage, efficiency-enhancing applications in energy conversion systems are becoming increasingly important. In this study, photovoltaic systems were operated at inclination angles of 20°, 30°, and 40° under real field conditions, and experimental studies were conducted to determine the inclination angle at which the system operated with higher efficiency in Edirne's climate conditions for August 2025. In the experimental studies, meteorological data, panel temperature, current, and voltage were measured and recorded. The energy and exergy analysis of the system was performed using the experimental data. According to the analysis results, the energy and exergy efficiency of the photovoltaic panel is highest at a 30° tilt angle in August. There have not been any experimental studies conducted in the literature examining the energy and exergy analysis of photovoltaic panels at different tilt angles for Edirne's climatic conditions. In this respect, the study serves as a benchmark for Edirne and for regions with similar climatic conditions.
Keywords: Photovoltaics; Energy-exergy analysis; Energy efficiency; Solar energy.	

1. Giriş

Hızla artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji, toplumlarının tüketim alışkanlıkları her geçen yıl hızla artması, enerji talebini arttırmaktadır. Fosil yakıtlarla artan talebi karşılamak çevresel ve iklimsel tahribata neden olduğu için yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve bu konularda yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Güneş enerjisi çalışmaları bunların başında gelmektedir. Güneş enerjisi 1990'lardan bu yana yılda yaklaşık %37 oranında istikrarlı bir büyüme göstermiştir ve şu anda en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynağı olarak sıralanmaktadır (Deng vd., 2019). Dünya genelinde fotovoltaik güneş enerjisi kurulu gücü 2016 yılında 310 GW'a, 2020 yılında ise neredeyse 700 GW'a ulaşmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) Küresel Fotovoltaik Piyasalar 2018 Raporu'na göre, 2017 yılı sonu itibarıyla fotovoltaik PV panel sistem kapasitesi, dünya çapında şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız kurulumlar dahil olmak üzere 402,5 GW'a ulaşmıştır (IEA, 2018). Küresel PV teknolojileri pazarı son yıllarda etkileyici büyüme oranları göstermektedir. Bu miktarın 2050 yılı için 4500 GW'a ulaşacağı tahmin edilmektedir (Sica vd., 2018).

Güneş enerjisi, temiz ve yenilenebilir bir kaynak olarak hem çevresel sürdürülebilirlik hem de yerel kaynakların kullanımı açısından önem kazanırken fotovoltaik (PV) paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemler olarak ön plana çıkmaktadır. Bu dönüşüm sürecinde PV panelin performansı, üzerine düşen ışınımın ne kadarının elektrik enerjisine çevrilebildiğiyle ölçülmektedir. Bu oran, yani verim, panelin malzemesine, sıcaklık koşullarına, yüzey temizliğine ve eğim açısına bağlı olarak değişmektedir. Panelin yüzey alanı, bulunduğu bölgenin yıllık ortalama ışınım değerleri ve çalışma süresi dikkate alınarak, bir PV sistemin ürettiği elektrik enerjisi hesaplanmaktadır. Üretilen enerji, PV panel performansının doğrudan göstergesidir, ancak enerji yalnızca miktarı ifade etmektedir; bu enerjinin ne

kadarının faydalı iş yapabileceğini anlamak için ekserjinin belirlenmesi gerekmektedir. Ekserji iş üretebilme kabiliyetidir. Başlangıç halinden ölü hale ulaşıncaya kadar, PV sistemden elde edilebilecek maksimum teorik yararlı iş olarak tanımlanmaktadır (Özel ve Çamdalı 2024). PV sistemin birim yüzey alana gelen güneş ışınımının ne kadarının faydalı işe dönüştürülebileceğinin tespiti için enerji analizleriyle beraber ekserji analizlerinin de yapılması faydalı olacaktır. Çünkü, ekserji miktarla beraber niteliğin de bir ölçüsüdür.

Sistemleri incelerken ekserji analizinin kullanımı özellikle önemlidir ve literatürde yenilenebilir enerji sistemleri söz konusu olduğunda çok yaygın değildir. Kuczynski ve Chliszcz, Kuzey Polonya'nın Koszalin bölgesinde ışınlama ile çalışan monokristal ve amorf fotovoltaik hücrelerin enerji ve ekserji analizinin sonuçlarını sunmaktadır. Çalışma gerçek saha koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu temelde, farklı fotovoltaik paneller kullanan fotovoltaik sistemlerin işleyişini karşılaştırmak için bir enerji ve ekserji analizi yapılmıştır (Kuczynski ve Chliszcz, 2023). Arslan vd., PV panelin performansı Antarktika Horseshoe Adası'nda deneysel olarak test edilmiştir. PV panelin enerji, ekserji ve ekonomik analizleri yapılmıştır. Üç gün boyunca gerçekleştirilen deneylerde enerji verimliliği sırasıyla %5,40, %7,39 ve %11,35 olarak belirlenmiştir. Ekserji verimleri ise sırasıyla %4,53, %6,58 ve %10,25 olarak hesaplanmıştır (Arslan vd., 2020).

Bu çalışma kapsamında, Edirne iklim koşulları için 20°, 30°, 40° eğim açılarında PV panelin enerji ve ekserji analizini yapılmış ve sistem performansı belirlenmiştir. Literatürde, Edirne iklim koşulları için fotovoltaik panelin farklı eğim açıları için enerji ekserji analizini inceleyen deneysel bir çalışma yapılmamıştır. Yapılan çalışma, Edirne ve benzer iklim koşullarındaki konumlarda elektrik enerjisini üretecek sistem uygulamaları için bir örnek model niteliğindedir.

2. Teorik Bilgiler/Deneysel Çalışmalar

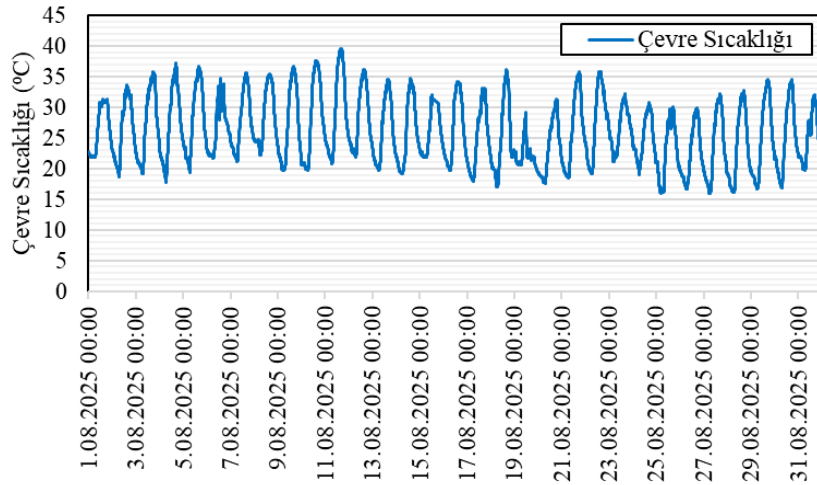
Bu bölümde, kurulumu yapılmış olan PV sistemin tanıtımı, kullanılan materyaller ve deneysel çalışma yöntemi sunulmuştur. Ayrıca, deneylerin enerji ve ekserji analizleri için gerekli formüller bu bölümde yer almaktadır.

2.1. Kurulum yapılan lokasyonun özelliği

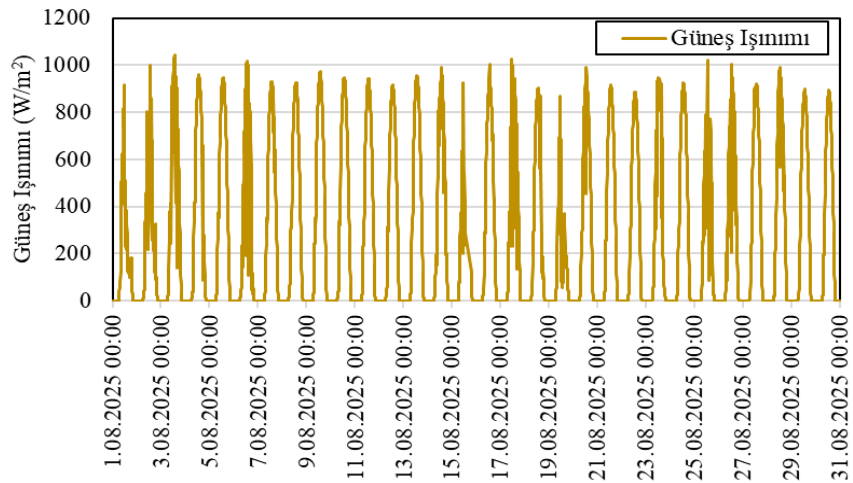
Edirne, 41°-40° kuzey paraleli ve 26°-34° doğu meridyeni arasında yer almaktadır (www.edirne.bel.tr). Edirne, 6.098 km² yüzölçümüyle deniz seviyesinden yaklaşık 41 metre yüksektir. Edirne ili, ılıman iklim kuşağında, yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve yağışlı geçen bir meteorolojik yapıya sahiptir. Yıllık ortalama sıcaklık 13,8°C ile 14,3°C aralığında ölçülmektedir. Yaz aylarında sıcaklıklar 30 °C'nin

üzerine çıkarken, kış aylarında ortalama en düşük sıcaklık 0 °C civarına kadar düşmektedir. Edirne'de yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.400–2.600 saat aralığındadır. Günlük ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 6–7 saat düzeyindedir. Yıllık toplam küresel ışıınım değerleri 1.400–1.500 Wh/m² civarındadır. Bu değerler, Türkiye ortalamasına yakın olup, özellikle yaz aylarında yüksek ışıınım ve uzun gün süreleri PV sistemler için avantaj sağlamaktadır (<https://www.enerji.gov.tr>).

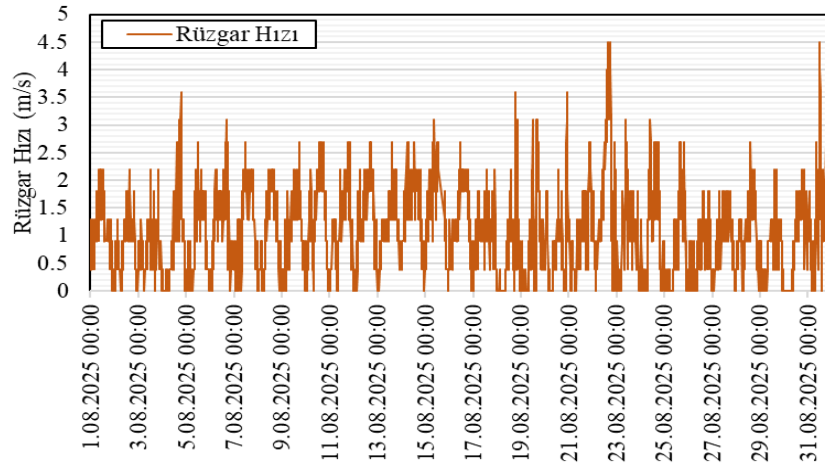
Şekil 1'de Ağustos 2025 ayında kurulum yapılan sahadaki meteoroloji istasyonu ile ölçülen çevre sıcaklığı değişimi, Şekil 2'de ise yatay düzleme gelen güneş ışıınımı değişimi ve Şekil 3'te ortalama rüzgar hızının zamanla değişimi yer almaktadır.



Şekil 1. Sahada ölçülen çevre sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 2. Sahada ölçülen yatay düzleme gelen güneş ışıınımının zamanla değişimi



Şekil 3. Sahada ölçülen ortalama rüzgar hızının zamanla değişimi

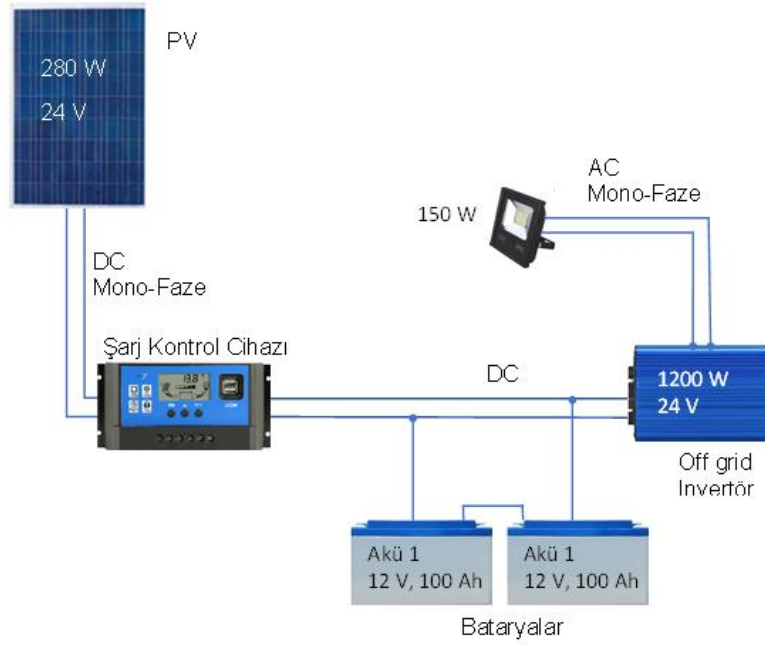
2.2. Deney Düzenegi

PV panellerin farklı eğim açılarındaki performansını incelemek amacıyla kurulan deney düzeneği, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm sürecini dış ortam saha koşulları altında gözlemlemeye ve analiz etmeye imkan tanımaktadır. Bu düzenek, yalnızca enerji üretim kapasitesini değil, aynı zamanda ekserji verimliliğini ve çevresel etkileri değerlendirmek için tasarlanmıştır. Çizelge 1’de PV sistem elemanları ve özellikleri, Şekil 4’te PV sistem şematik gösterimi yer almaktadır. Deney düzeneğinin 280W güç kapasitesine sahip bir polikristal silikon PV panel modülü yer almaktadır. Şekil 5’te kurulumu yapılmış olan PV panel, Çizelge 2’de PV panel teknik özellikleri görülmektedir. Şekil 6’da 20°, 30° ve 40° eğim açılarında çalıştırılan panel görüntülenmektedir. PV panel, ışınımın doğrudan yüzeye ulaşmasını sağlayacak şekilde ayarlanabilir bir taşıyıcı konstrüksiyon üzerine monte edilir. Bu taşıyıcı sistem, farklı eğim açıları ve yönelimler için ayarlanabilir özellikte olup, mevsimsel optimizasyon çalışmalarına olanak tanımaktadır.

Elektrik PV panelde doğru akım (DC) olarak üretilmekte, inverterde ise AC akıma dönüştürülmektedir. PV panellerin etiket değerleri nominal özellikleri 1000 W/m² ve 25 °C standart test koşulları altında belirlenmiştir.

Çizelge 1. PV sistem elemanları ve özellikleri

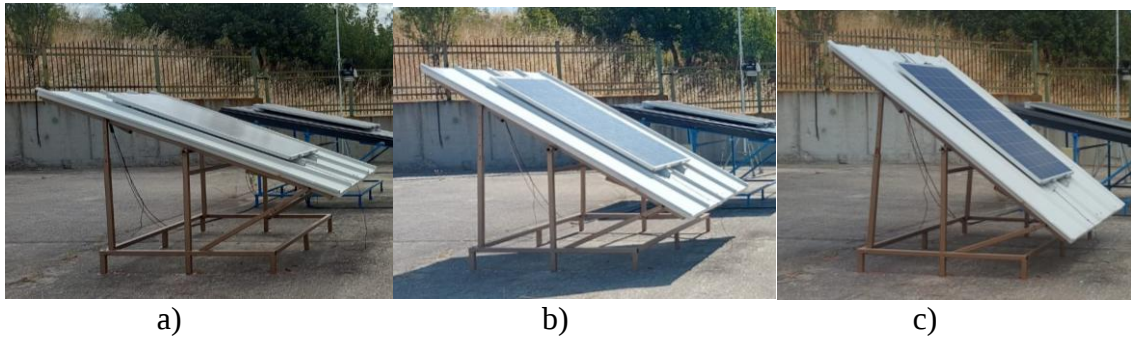
Sistem Elemanı	Özellik
Polikristal PV paneli	280 W, 24 V
Solar şarj Kontrol Cihazı	30 A
Akü	100 Ah, 12 V
İnverter	1200 W, 24 V
AC led projektörler (Direnç, yük)	150 W
Veri kaydediciler	
Ölçme sistemi	
Meteoroloji İstasyonu	



Şekil 4. PV sistem şematik gösterimi



Şekil 5. Kurulumu yapılan olan polikristal silikon PV panel



Şekil 6. a) 20°, b) 30° ve c) 40° eğim açılarında çalıştırılan polikristal silikon PV panel

Çizelge 2. PV panel teknik özellikleri

Özellik	Değer
Hücre Tipi	Polikristal
Hücre dizilişi	60 (60x1)
Boyutlar	1640x990x35 mm
Ağırlık	19 kg
Ön kaplama	3,2 mm temperli cam
Çerçeve malzemesi	Alaşımlı alüminyum
J-box	IP67
Kablo	4 mm ² (IEC)/12AWG(UL), 900 mm
Nominal Max. Güç	280 W
Maksimum Güç Noktası Çalışma Gerilimi (V_{mp})	31,2 V
Maksimum Güç Noktası Çalışma Akımı (I_{mp})	8,97 A
Açık Çevrim Gerilimi (V_{oc})	37,8 V
Kısa Çevrim Akımı (I_{sc})	9,50 A
Modül verimi	%19
Çalışma Sıcaklığı	-40°C~+85°C
Güç Toleransı	0 ~ 5 W

PV panelin akım ve gerilim verileri analiz yapmak için dijital ortamda depolanmaktadır. Bu veriler, anlık güç ve verim hesaplamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca eş zamanlı olarak PV panel yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığını kaydederek sıcaklığın verim üzerindeki etkisini belirlenmiştir. Trakya Üniversitesi meteoroloji istasyonu ile kurulum yapılan alandaki güneş ışıınımı, dış ortam sıcaklığı, rüzgar hızı ve yönü, dış ortam nem değeri 7 gün 24 saat her türlü hava koşulunda kesintisiz olarak ölçülmüştür.

2.3. Analiz Yöntemi

2.3.1. PV Panel Enerji Analizi

PV panellerin çıkış gücü hava koşullarından, güneş ışıınımından ve panel sıcaklığından oldukça etkilenir. PV panelin çıkış gücü, güneş ışıınımına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak standart test koşullarında elde edilenden farklılık göstermektedir. Çıkış gerilimi V_{PV}

(Volt) ve akımı I_{PV} (Amper) olan PV panelin çıkış gücü P_{PV} (Watt), Eşitlik 1 ile ifade edilir.

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV} \quad (1)$$

PV panelin enerji verimliliği hesaplamaları için gerekli denklemler aşağıda verilmiştir. $\dot{E}_{giriş}$ PV panele birim zamandaki enerji girişi (W), G ortalama güneş ışıınımı ve A_{PV} toplam panel yüzey alanına göre Eşitlik (2) ile hesaplanır (Kuczynski ve Chliszcz, 2023).

$$\dot{E}_{giriş} = A \times G \quad (2)$$

A PV panelin yüzey alanı [m²], G güneş ışıınım değeri [W/m²] olarak tanımlanır. $\dot{E}_{çıkış}$ PV panelin net enerji çıkışı, Eşitlik (3) ile hesaplanır (Kuczynski ve Chliszcz, 2023).

$$\dot{E}_{çıkış} = P_{mp} \quad (3)$$

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

FF (fill factor) doluluk oranıdır. Yani en yüksek çıkış gücünün, V_{OC} açık devre gerilimi ile I_{SC} kısa devre elektrik akımı çarpımına oranı doluluk oranını vermektedir. Doluluk oranı genellikle bir fotovoltaik modülün elektrik üretim kalitesini belirtmek için kullanılmaktadır.

$$FF = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (5)$$

η_{el} PV panelin enerji verimliliği, enerji çıkışı ve enerji girişinin oranı olarak Eşitlik (6) ile hesaplanmaktadır (Kuczynski ve Chliszcz, 2023).

$$\eta_{el} = \frac{\dot{E}_{çıkış}}{\dot{E}_{giriş}} \quad (6)$$

2.3.2. PV Panel Ekserji Analizi

Ekserji analizi, enerji kalitesinin ve tersinmezliklere bağlı olarak bir sistemde oluşan kayıpların belirlenmesi noktasında önemlidir. Enerjiyi dönüştüren tüm sistemler için ekserji analizi gerçekleştirmek mümkündür. Fotovoltaik sistemlerde PV panel tarafından üretilen elektrik enerjisi, sistemin ürettiği ekserji değerini vermektedir. Elektrik üretimi sırasında ısı da oluşmaktadır. Oluşan ısı, tersinmezliklerden kaynaklı olarak ekserji kayıplarını oluşturmaktadır.

Maksimum iş sadece tersinir bir süreçte elde edilebilir. Bu işlem, alıcı ile ısı kaynağı arasında sonsuz küçük bir sıcaklık düşüşü kullanılarak gerçekleştirilebilir. Doğadaki tüm gerçek süreçler tersinmezdir çünkü sonlu bir sıcaklık farkı ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle, bunlarda elde edilen iş, mümkün olan maksimumdan daha düşük değerlere sahip olacaktır. Elde edilen işi değerlendirirken, bunu belirli bir süreçteki maksimum değerle, yani ekserji ile karşılaştırmak gerekmektedir. Süreç, serbest bir ısı ve madde kaynağı olan çevre kullanılarak gerçekleştirilir. Buradan, maksimum işin yalnızca maddenin çevre ile eşzamanlı çalışmasıyla elde edildiği sonucu

çıkılmaktadır (Szargut, 1996; Kramarz ve Wyczasany, 1991). Ekserji ile ilgili hesaplamalarda, yaygın çevresel bileşenlerin (örneğin atmosferik hava) katılımıyla termodinamik denge durumu referans olarak kullanılmaktadır (Tsatsaronis, 2007).

PV panelin ekserji dengesi, Eşitlik (7)'teki gibi hesaplanmaktadır (Wong, 2000). Eşitlik (7)'de yer alan $\dot{E}x$ [W] birim zamandaki ekserji akısını belirtmektedir.

$$\dot{E}x_G = \dot{E}x_{\dot{C}} + \dot{E}x_K \quad (7)$$

$\dot{E}x_G$ sisteme giren ekserji akısı [W], $\dot{E}x_{\dot{C}}$ sistemden çıkan ekserji akısı [W], $\dot{E}x_K$ yıkıma uğrayan ekserji akısı [W] olarak tanımlanmaktadır.

Ekserji yıkımı (kayıbı) ise Eşitlik (8) ile ifade edilmektedir.

$$\dot{E}x_K = T_0 \times \frac{\Delta S_{top}}{\Delta t} \quad (8)$$

Δt süre (s), ΔS_{top} toplam entropi değişimi (üretimi) [kJ/K] olarak tanımlanmaktadır.

Fotovoltaik güneş enerjisi sistemlerinde sisteme giren ekserji $\dot{E}x_G$, $\dot{E}x_{SUN}$ güneş ışıınının sahip olduğu ekserji değerine eşittir. Bu değer Eşitlik (9) ile ifade edilmektedir (Petela, 2003; Petela, 2008).

$$\dot{E}x_G = \dot{E}x_{SUN} = A \times G \times \left[1 + \frac{1}{3} \times \left(\frac{T_0}{T_S} \right)^4 - \frac{4}{3} \times \left(\frac{T_0}{T_S} \right) \right] \quad (9)$$

T_0 Çevre (Ortam) sıcaklığı [K], T_S güneşin sıcaklığı [K] olarak tanımlanır. T_S güneş sıcaklığı 5770 K olarak alınmıştır (Petela, 2003).

Fotovoltaik sistem için sistemde $\dot{E}x_{\dot{C}}$ elde edilen ekserji akısı [W] ise $\dot{E}x_e$ üretilen elektriksel ekserji akısı [W] ile $\dot{E}x_I$ ısı ekserji akısı [W] farkına eşittir (Elhadj vd., 2015).

$$\dot{E}x_{\dot{C}} = \dot{E}x_e - \dot{E}x_I \quad (10)$$

PV panel tarafından üretilen elektriğin, sahip olduğu ekserji ise Eşitlik (11) ile belirlenmektedir (Ravat, 2017).

$$\dot{E}x_e = V_{OC} \times I_{SC} \times FF \quad (11)$$

PV panellerindeki elektrik üretimi sırasındaki oluşan ısı, ışıınım ve taşınım ile çevreye yayılmaktadır. $\dot{E}x_l$ ısıının ekserjisi Eşitlik (12)'de belirtilmiştir (Sarhaddi vd. 2010). Eşitlikten de görüleceği üzere ısıının ekserjisi, sistemden çevreye transfer olan ısı, çevre sıcaklığı ve modül (parça) sıcaklığı ile ilişkilidir.

$$\dot{E}x_l = \dot{Q} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) \quad (12)$$

$\dot{Q}$ çevreye transfer olan ısı [W], T_m modül (Parça) sıcaklığı [K] olarak tanımlanır.

Çevreye yayılan ısı, Eşitlik (13)'te gösterildiği gibi toplam ısı transfer katsayısı, toplam PV panel yüzey alanı ve modül sıcaklığı ile çevre sıcaklığının farkı ile ilişkilidir.

$$\dot{Q} = U \times A \times (T_m - T_0) \quad (13)$$

U toplam ısı transfer katsayısı, Eşitlik (14)'te görüldüğü gibi h_r [W/m²K] ışıınım ve h_t [W/m²K] taşınım ısı transfer katsayılarının toplamı olarak hesaplanmaktadır (Ravat, 2017).

$$U = h_t + h_r \quad (14)$$

Isı taşınım katsayısını etkileyen önemli faktörlerden biri de rüzgâr hızıdır. Eşitlik (15)'teki bağıntı ile ısı taşınım katsayısı elde edilmektedir (Ravat, 2017).

$$h_t = 2,8 + 3 \times V_w \quad (15)$$

V_w rüzgâr hızı [m/s] olarak tanımlanır.

PV panelde oluşan ısı, taşınım ile birlikte ışıınım yoluyla da çevreye transfer olmaktadır. Isı ışıınım katsayısını belirleyen faktörler, PV panelin yayma katsayısı, modül ve gökyüzü sıcaklığıdır. Modül ile çevre arasındaki ışıınım ısı transfer katsayısı, Eşitlik (16)'da verilmiştir (Ravat, 2017).

$$h_r = \sigma \times \varepsilon \times (T_m + T_g) \times (T_m^2 + T_g^2) \quad (16)$$

ε PV panelin yayma katsayısı, σ Stefan-Boltzmann katsayısı [W/m²K⁴], T_g gökyüzü sıcaklığı [K] olarak tanımlanmaktadır.

Modül ve gökyüzü sıcaklığının artması ile ışıınım ısı transfer katsayısı (h_r) artacaktır. Efektif gökyüzü sıcaklığının değeri, çevre sıcaklığı ile ilişkilidir ve Eşitlik (17)'deki bağıntıyla ifade edilmektedir (Sudhakar ve Srivastava, 2013; Ravat, 2017; Shukla, 2015).

$$T_g = T_0 - 6 \quad (17)$$

Modül sıcaklığı, enerji ve ekserji verimleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Modül sıcaklığı, nominal çalışma sıcaklığı ve ışıınım değeri kullanarak Eşitlik (18) ile belirlenebilir. Nominal çalışma koşullarında, güneş ışıınım şiddeti, rüzgâr hızı, çalışma sıcaklığı ve hava kütlesi değerleri belirlenmiştir. Nominal çalışma koşullarında, ışıınım şiddeti 1.000 W/m², rüzgâr hızı 1 m/s, çalışma sıcaklığı 20 °C, hava kütle indeksi ise 1,5 kabul edilmiştir. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), PV panel hücre sıcaklığının, standartlaştırılmış gerçek dış ortam koşullarında ulaştığı tipik değeri ifade etmektedir (Ravat, 2017).

$$T_m = T_0 + (NOCT - 20) \frac{G}{800} \quad (18)$$

PV panel emilen güneş ışıınımını, elektrik ve ısıya dönüştürür. PV panel tarafından üretilen (dönüştürülen) elektrik ise kullanılabilir enerjidir ve sistemin ekserjisi olarak kabul edilebilir (Elhadj vd., 2015). Ancak oluşan ısı genellikle kullanılamamakta ve çevreye transfer edilmektedir. Çevreye transfer edilen ısıının bir kısmı, sistem için ekserji kaybı olarak ifade edilebilir (Sudhakar ve Srivastava, 2013). Eşitlik (19) 'da görüldüğü gibi PV panel için η_{Ex} ekserji verimi, PV panelden elde edilen ekserjinin, güneş ışıınımının sahip olduğu ekserjiye oranı şeklinde tanımlanabilir (Petela, 2003).

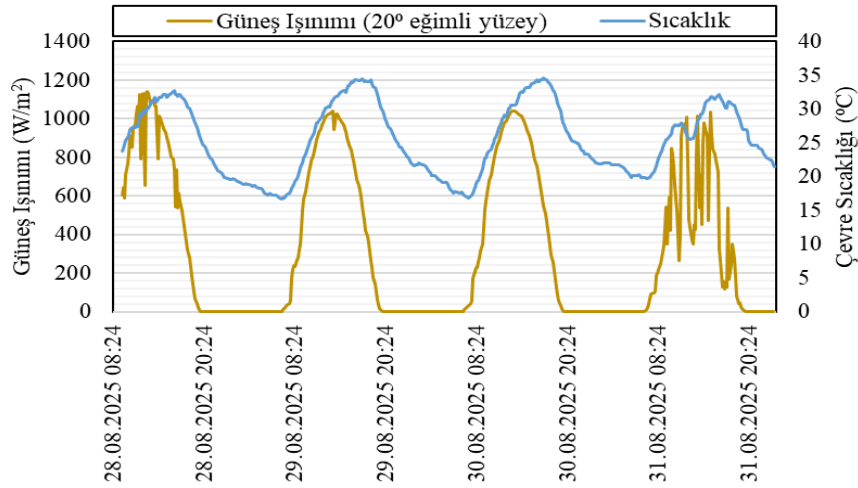
$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E}x_e}{\dot{E}x_G} \quad (19)$$

3. Bulgular ve Tartışmalar

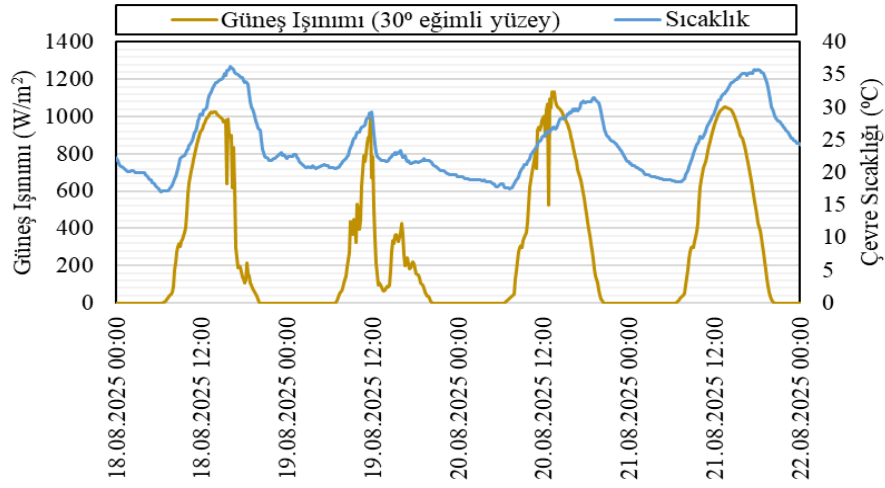
Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9 20°, 30° ve 40° eğimli yüzeylere gelen güneş ışınlamını ve çevre sıcaklığı değerlerini göstermektedir. Bu koşullar altındaki polikristal silikon PV panel akım ve gerilim değerleri Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de görülmektedir. Farklı eğim açıları yapılan güç üretimi Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15’te yer almaktadır. Farklı eğim açıları için polikristal silikon PV enerji ve ekserji verimleri Şekil 16, Şekil 17 ve Şekil 18’de verilmiştir.

PV panel eğim açısı, yüzeye gelen ışınlam miktarını ve dolayısıyla elektrik üretimini doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Yapılan ölçümlerde 20°, 30° ve 40° eğim açıları denenmiş ve 30° eğimde daha yüksek güç üretimi elde edilmiştir. Bu sonuç, güneş ışınlarının geliş açısının PV panel yüzeyi normaline çok yakın olması sayesinde yüzeye düşen ışınlamın maksimuma yaklaşmasıyla sağlanmaktadır.

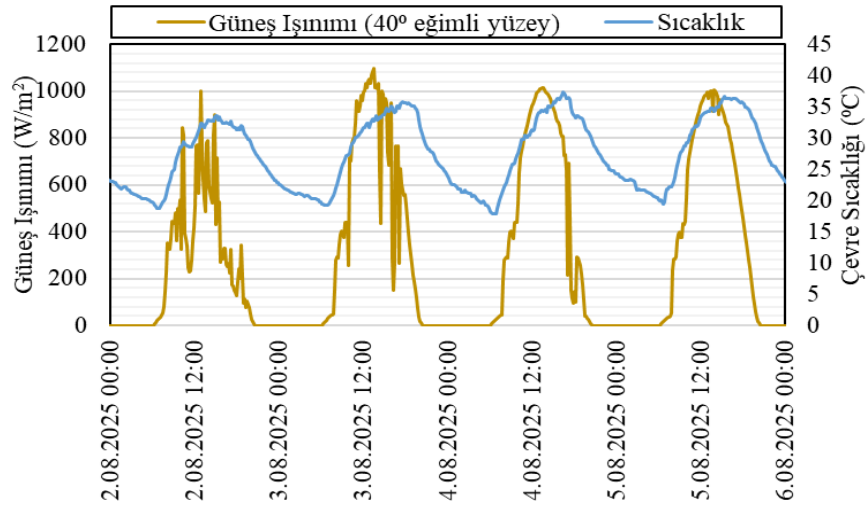
20° eğim açısında panel yüzeyi görece yatay konumda olduğundan, ışınlamın bir kısmı yüzeye optimum açıyla düşmemekte ve yansıma kayıpları artmaktadır. 40° eğim açısında ise panel yüzeyi fazla dik konumlandığı için ışınlamın bir kısmı yine yüzeye doğrudan ulaşamamakta, güç üretimde etkili ışınlam azalmakta ve gölgelenme riskleri artmaktadır. Buna karşılık 30° eğim açısı, ölçüm yapılan dönemde Edirne’nin coğrafi enlemi ve güneşin deklinasyon açısı ile daha uyumlu bir konum sağlamış; böylece panel yüzeyine düşen ışınlam miktarı artmış ve elektrik üretimi diğer açılara kıyasla daha yüksek gerçekleşmiştir. 30° eğim açısında elde edilen daha yüksek güç üretimi, panel yüzeyinin güneş ışınlarına daha uygun bir geometrik konumda bulunmasıyla açıklanmaktadır. Bu durum, PV sistemlerde optimum eğim açısının coğrafi enlem, mevsimsel güneş hareketleri ve yerel iklim koşulları dikkate alınarak belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.



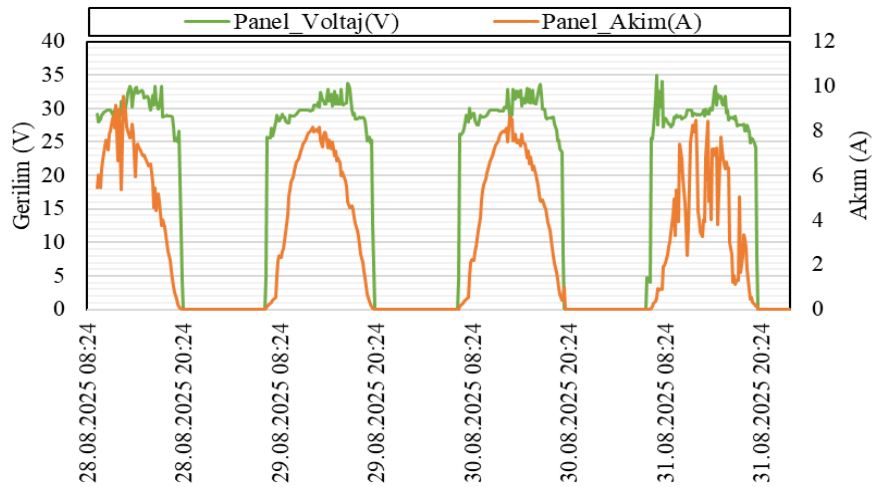
Şekil 7. 20° eğimli yüzeye gelen güneş ışınlamı ve çevre sıcaklığı değişimi



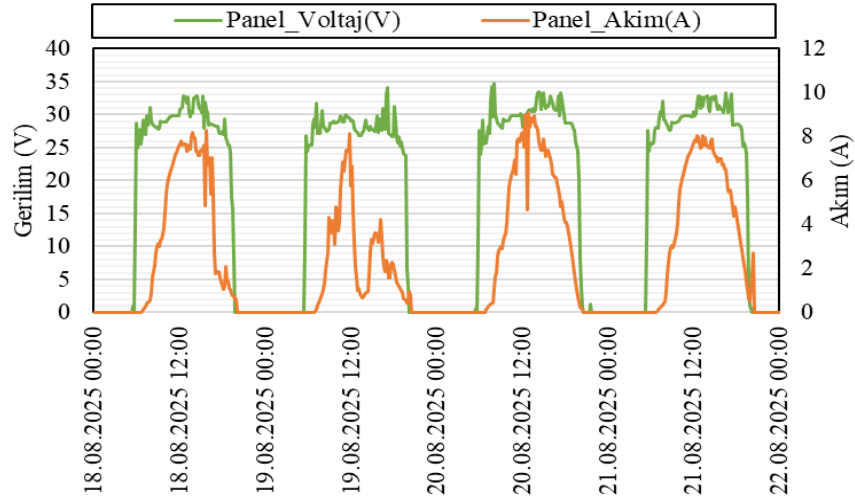
Şekil 8. 30° eğimli yüzeye gelen güneş ışınnımı ve çevre sıcaklığı değişimi



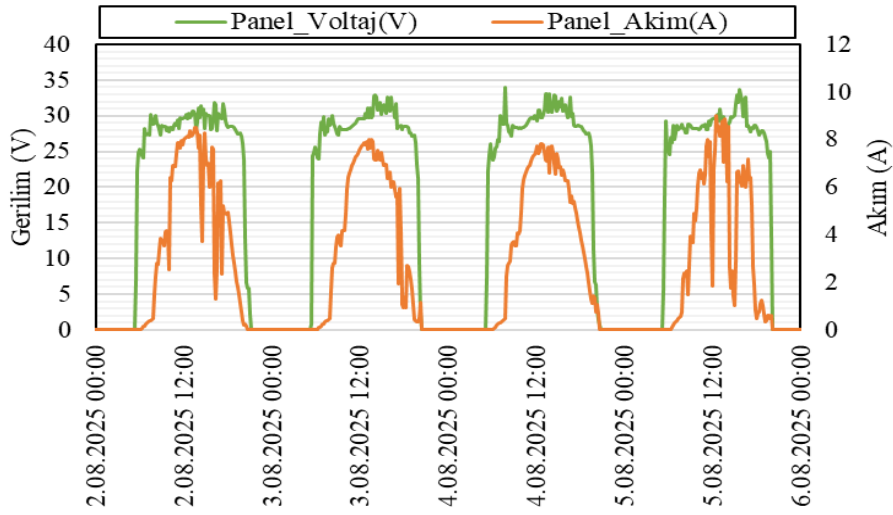
Şekil 9. 40° eğimli yüzeye gelen güneş ışınnımı ve çevre sıcaklığı değişimi



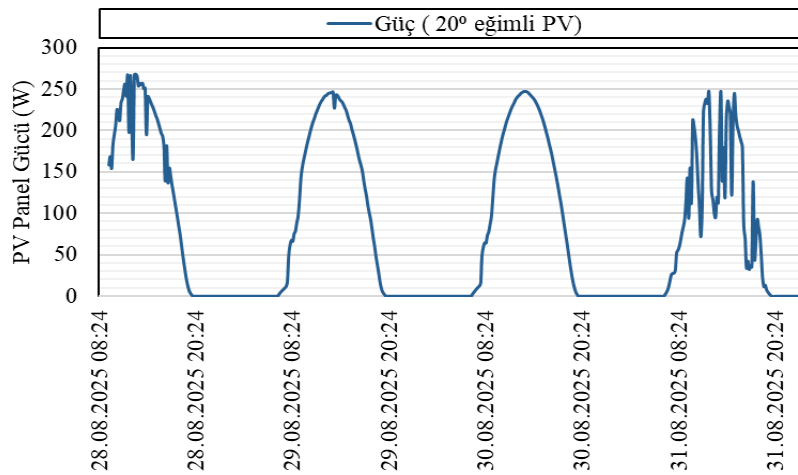
Şekil 10. 20° eğim açısında PV panelin akım ve gerilim değerlerinin zamana göre değişimi



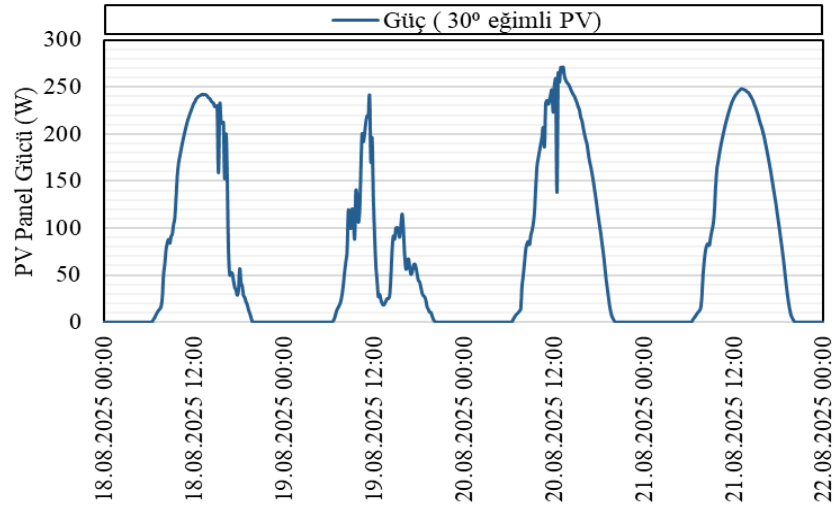
Şekil 11. 30° eğim açısında polikristal silikon PV panelin akım ve gerilim değerlerinin zamana göre değişimi



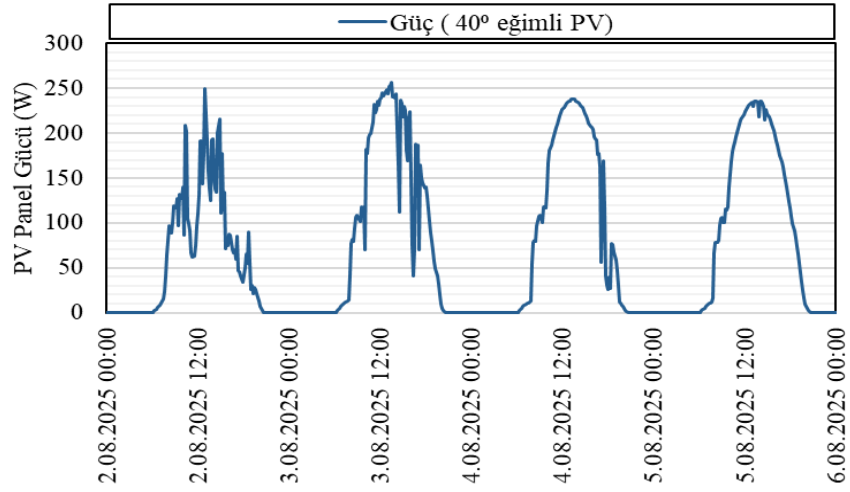
Şekil 12. 40° eğim açısında polikristal silikon PV panelin akım ve gerilim değerlerinin zamana göre değişimi



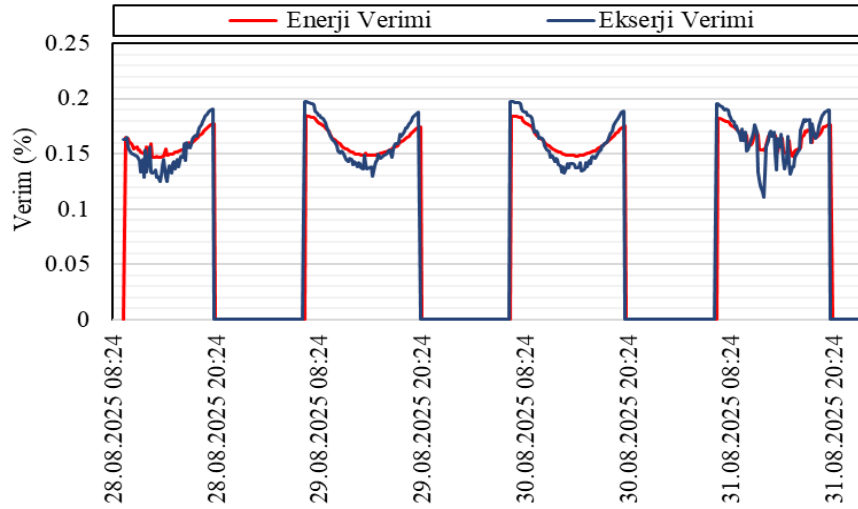
Şekil 13. 20° eğim açısında polikristal silikon PV panelin ürettiği gücün zamana göre değişimi



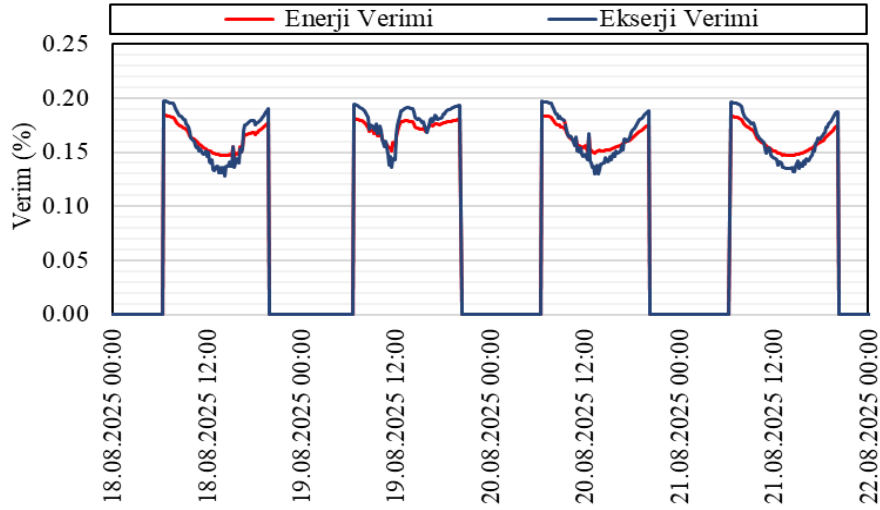
Şekil 14. 30° eğim açısında polikristal silikon PV panelin ürettiği gücün zamana göre değişimi



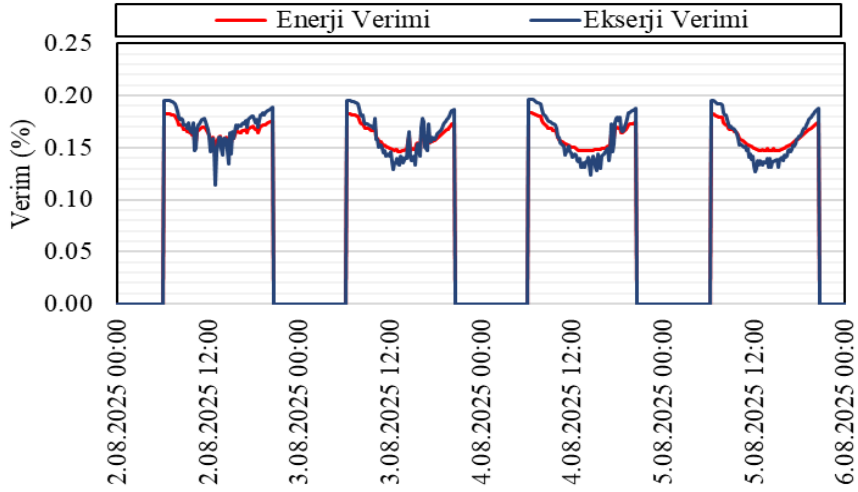
Şekil 15. 40° eğim açısında polikristal silikon PV panelin ürettiği gücün zamana göre değişimi



Şekil 16. 20° eğim açısında polikristal silikon PV panelin enerji ve ekserji verimliliği



Şekil 17. 30° eğim açısında polikristal silikon PV panelin enerji ve ekserji verimliliği



Şekil 18. 40° eğim açısında polikristal silikon PV panelin enerji ve ekserji verimliliği

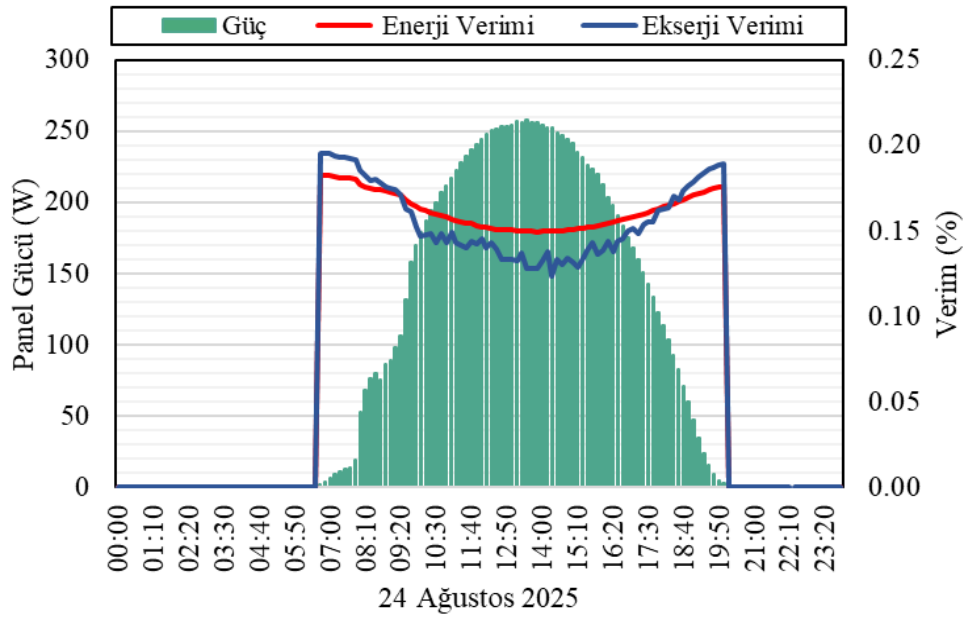
Fotovoltaik (PV) panellerde ışıınım şiddetinin ve dolayısıyla üretilen gücün artması, çoğu durumda sistem veriminde beklenen doğrusal bir iyileşmeye yol açmamaktadır. Bunun temel nedeni, artan ışıının hücre sıcaklığını yükseltmesi ve bu sıcaklık artışının yarı iletken malzemenin elektriksel özellikleri üzerinde olumsuz etkiler yaratmasıdır. Özellikle, hücre sıcaklığındaki yükselme açık devre geriliminin (V_{oc}) azalmasına neden olurken, kısa devre akımı (I_{sc}) yalnızca sınırlı bir artış göstermektedir. Bu durum, panelin maksimum güç noktası gerilimini düşürerek toplam güç üretiminde beklenen artışı sınırlamaktadır. Buna ek olarak, sıcaklıkla birlikte hücre içi seri direnç

ve bağlantı noktalarındaki kayıplar artmakta, bu da üretilen gücün bir kısmının ısıya dönüşmesine yol açmaktadır. PV panellerde ışıınım ve güç artışı her ne kadar üretim kapasitesini yükseltse de sıcaklık kaynaklı gerilim düşüşü, iç direnç kayıpları nedeniyle sistem verimi azalmakta; bu durum enerji ve ekserji analizlerinde de açıkça gözlemlenmektedir.

Şekil 19'da 30° eğim açısında 24 Ağustos 2025 tarihindeki PV panel güç üretimi ve enerji-ekserji verimliliği değişimi yer almaktadır. PV panellerde enerji ve ekserji verimleri arasındaki farklılık, panel sıcaklığı ve entropi üretimi ile ilişkilidir. Düşük güneş ışıınımında PV panelin sıcaklığı düşük kalmakta, bu da

ekserji verimini yükseltmektedir. Ancak ışıınım arttıkça panel sıcaklığı yükselmekte, entropi üretimi artmakta ve ekserji verimi enerji veriminin altına düşmektedir. Düşük güneş ışıınımında PV panelin yüzey sıcaklığı çevre sıcaklığına yakın kalmakta, bu da entropi üretimini sınırlamaktadır. Bu durumda üretilen elektrik enerjisi daha yüksek bir ekserji değerine sahip olmakta ve ekserji verimi enerji veriminden büyük çıkmaktadır.

Buna karşılık, güneş ışıınımının artmasıyla birlikte panel sıcaklığı yükselmekte ve hücrelerdeki gerilim düşüşüyle beraber entropi üretimi artmaktadır. Bu termodinamik kayıplar, ekserji verimini sınırlamakta ve enerji veriminin altına kalmasına yol açmaktadır. Yüksek ışıınım koşullarında enerji verimi hâlâ yüksek görünse de bu enerjinin çevreye göre kullanılabilirliği azalmaktadır.



Şekil 19. 30° eğim açısında polikristal silikon PV panel güç üretimi ve enerji-ekserji verimliliği değişimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada polikristal silikon fotovoltaiik (PV) panelin farklı eğim açıları altında enerji ve ekserji performansı deneysel olarak incelenmiştir. Panel eğim açısı, yüzeye gelen güneş ışıınımının miktarını ve yönünü doğrudan etkileyen kritik bir parametre olduğundan, optimum açı seçimi sistem verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışmada, Edirne iklim koşullarında 20°, 30° ve 40° eğim açılarında deneysel çalışmalarda panel yüzeyine gelen ışıınım, üretilen elektrik gücü, hücre sıcaklığı ve çevre koşulları ölçülmüş; elde edilen veriler enerji verimi ve ekserji verimi hesaplamalarında kullanılmıştır. Enerji analizi,

toplam ışıınım enerjisine karşılık elde edilen elektrik enerjisini ortaya koyarken; ekserji analizi, sistemdeki tersinmezlikleri ve kullanılabilir enerji miktarını değerlendirmiştir.

Analiz sonuçlarına göre ağustos ayında 30° eğim açısında fotovoltaiik panelin enerji ve ekserji verimliliği yüksektir. Elde edilen önemli sonuçlar, panel eğim açısının enerji ve ekserji verimleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Daha düşük veya daha yüksek eğim açıları, ışıınımın yüzeye optimum açıyla düşmesini engelleyerek verim kayıplarına yol açmıştır. Buna karşılık, Ağustos ayı için 30° eğim açısında panel yüzeyi güneş ışıınlarıyla daha

uyumlu hale gelmiş ve hem enerji hem de ekserji verimleri diğer açılara kıyasla daha yüksek bulunmuştur. 30° eğim açısında PV panelin enerji verimi ortalama %17, ekserji verimi ortalama %15 olarak tespit edilmiştir. 20° eğim açısında PV panelin ortalama enerji ve ekserji verimi sırasıyla %16 ve %14; 40° eğim açısında PV panelin ortalama enerji ve ekserji verimi sırasıyla %16,2 ve %14,1 olarak bulunmuştur. Ayrıca, PV panellerde enerji ve ekserji verimleri arasındaki farklılık, esasen panel sıcaklığı ve entropi üretimi ile ilişkilidir. Ekserji analizi, bu bağlamda sistemin gerçek performansını belirleyen daha kapsamlı bir yaklaşımdır. Farklı eğim açıları için yapılan deneysel inceleme, PV sistemlerin optimum eğim açısının belirlenmesinde enerji ve ekserji analizlerinin birlikte kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, sistem tasarımında hem maksimum enerji üretimini hem de termodinamik açıdan en yüksek kullanılabilirliği sağlamaya yönelik daha bütüncül bir değerlendirme sunmaktadır.

Çıkar Çatışması: Yazarların beyan edilecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Veri Paylaşım Bildirimi: Veriler makul talepler üzerine paylaşılabılır.

Yazar Katkıları: Kavram: H.A., Tasarım: H.A., Uygulama: M.Y., Malzeme temini: TÜBAP, Veri toplama: H.A., M.B.H., Veri analizi/yorumlanması: H.A., M.B.H., Yazım: H.A., Eleştirel değerlendirme: H.A.

Mali Destek: Bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP) tarafından Lisansüstü Tez Projeleri desteği ile finanse edilmiştir (Proje No: TÜBAP-2025/123).

ORCID

Hacer Akhan, 0000-0002-7896-6441

Mert Bora Hazar, 0009-0003-5081-7860

Kaynaklar

- Arslan, E., Küçük F.A., Biçer Ç., Özsoy, Ö. (2024). Determining energy, exergy and enviroeconomic analysis of stand-alone photovoltaic panel under harsh environment condition: Antarctica Horseshoe-Island cases. *Renewable Energy*, 226,120440.
- Deng, R., Chang N.L., Ouyang Z., Chong, C.M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling panel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 532-550.
- 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*, 10(11), 351-358. DOI: 10.5897/IJPS2015.4356
- Kramarz J, ve Wyczescany A. (1991). Exergetic evaluation of coal processing processes towards liquid fuels. Cracow University of Technology Publishing House.
- Kuczynski, W., Chliszcz, K. (2023). Energy and exergy analysis of photovoltaic panels in northern Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 113138.
- Kumar, P., Gupta, V., Sudhakar, K., 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*, 13(5), 21-26. DOI: 10.9790/1684-1305032126
- Özel, S., ve Çamdalı Ü. (2024). Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 26(78), 498-504.

- Petela, R. (2003). Exergy of Undiluted Thermal Radiation, *Solar Energy*, 74, s. 469–488. DOI:10.1016/S0038-092X(03)00226-3
- 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 .
- Ravat, P. (2017). Exergy Performance Analysis of 300 W Solar Photovoltaic Module. *International Journal of Engineering SciencesveResearch Technology*, 3, 317-390. DOI: 10.5281/zenodo.438094
- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A. (2010). Exergetic Performance Evaluation of a Solar Photovoltaic (PV) Array. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (3), 502–519.
- 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), 1-9
- Sica, D., Malandrino, O., Supino, S., Testa, M. and Lucchetti, M.C. (2018). Management of End-of-Life Photovoltaic Panels as a Step towards a Circular Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2934-2945. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.039>
- Sudhakar, K. ve 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
- Szargut J. (1996). Exergetic analysis of thermal processes. Institute of Thermal Technology of the Silesian University of Technology.
- Tsatsaronis G. (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, 32(4), 249–53.
- Wong, K.F.V. (2000). Thermodynamics for Engineers. Second Edition. CRC Press, Taylor@Francis Group, s. 4.1–4.2.
- <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
- www.edirne.bel.tr
- <https://www.enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (12.11.2025)