



## Tek Yüzeyle ve Çift Yüzeyle Fotovoltaik Panellerin Performans Analizi

Aslıhan BAYYIĞIT<sup>1</sup> , Oğuz Kaan ÇİNİCİ<sup>2\*</sup> , Adem ACIR<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>EÜAŞ, Elektrik Üretim Anonim Şirketi, 06510 ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 06500 ANKARA

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 17/05/2023  
Düzeltilme: 26/05/2023  
Kabul: 26/05/2023

### Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik (FV)  
Tek Yüzeyle FV  
Çift Yüzeyle FV  
PVsyst  
Albedo

### Article Info

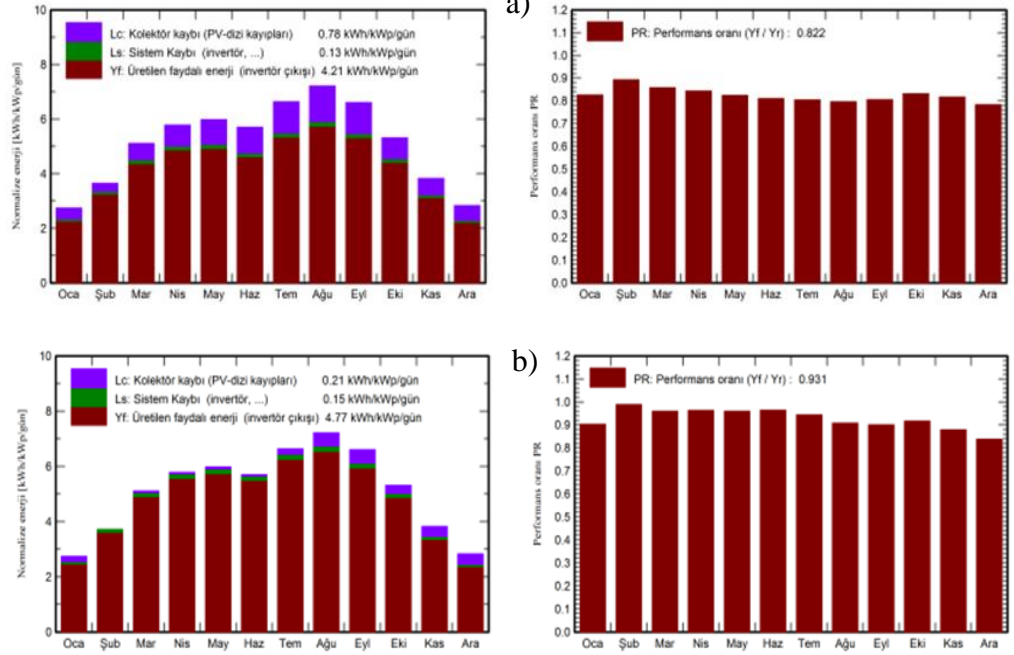
Research article  
Received: 17/05/2023  
Revision: 26/05/2023  
Accepted: 26/05/2023

### Keywords

Photovoltaic (PV)  
Monofacial PV  
Bifacial PV  
PVsyst  
Albedo

### Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada PVsyst yazılımı kullanılarak tek yüzeyle ve çift yüzeyle FV panellerin performansı karşılaştırılmıştır. / In this study, the performance of monofacial and bifacial PV panels was compared using PVsyst software.



**Şekil A:** a) Tek yüzeyle FV panelin aylık enerji üretimi ve performans oranı b) Çift yüzeyle FV panelin aylık enerji üretimi ve performans oranı eğrisi **Figure A:** a) Monthly energy production and performance rate of monofacial PV panel b) Monthly energy production and performance rate curve of bifacial PV panel

### Önemli noktalar ( Highlights)

- Tek yüzeyle ve çift yüzeyle FV'lerin kıyaslanması / Comparison of monofacial and bifacial PVs
- PVsyst yazılımı kullanımı / Use of PVsyst software

**Amaç (Aim):** Çalışma, tek yüzeyle ve çift yüzeyle FV sistemlerini karşılaştırarak hangi FV sistemi kullanmanın daha avantajlı olduğunu saptamayı amaçlamaktadır. / The study aims to determine which PV system is more advantageous by comparing monofacial and bifacial PV systems.

**Özgünlük (Originality):** Kurulum için seçilen yer, marka kullanımları ve yapılan analizler çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. / The location chosen for the installation, the use of brands and the analyses made constitute the original aspect of the study.

**Bulgular (Results):** Tek yüzeyle panellerin ortalama %82,21 performans oranıyla 1537 kWh/yıl ve çift yüzeyle panellerin ortalama %93,06 performans oranıyla 1740 kWh/yıl üretim potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. / It has been observed that monofacial panels have a production potential of 1537 kWh/year with an average performance ratio of 82.21%, and a production potential of 1740 kWh/year with an average performance ratio of 93.06% for bifacial panels.

**Sonuç (Conclusion):** Çift yüzeyle FV sistemlerini kullanmak, tek yüzeyle FV sistemlerini kullanmaktan daha avantajlıdır. / Using bifacial PV systems is more advantageous than using monofacial PV systems.



## Tek Yüzeyle ve Çift Yüzeyle Fotovoltaik Panellerin Performans Analizi

Aslıhan BAYYIĞIT<sup>1</sup> , Oğuz Kaan ÇİNİCİ<sup>2\*</sup> , Adem ACIR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EÜAŞ, Elektrik Üretim Anonim Şirketi, 06510 ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 06500 ANKARA

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 17/05/2023  
Düzeltilme: 26/05/2023  
Kabul: 26/05/2023

### Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik (FV)  
Tek Yüzeyle FV  
Çift Yüzeyle FV  
PVsyst  
Albedo

### Öz

Günümüzde enerji talebinin artmasıyla birlikte, fotovoltaik panellerin performansının artırılması önem kazanmaktadır. Bu nedenle, tek yüzeyle ve çift yüzeyle fotovoltaik panellerin (FV) performanslarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, PVsyst yazılımı kullanılarak tek yüzeyle ve çift yüzeyle panellerin performansları karşılaştırılmıştır. Çalışma, hesaplamaların hem tek taraflı hem de çift taraflı paneller için aynı koşullar altında yapılmasını sağlamak için Ankara ilinde aynı model tek yüzeyle ve çift yüzeyle FV paneller ile iki farklı güneş enerji santrali tasarlanmıştır. Bu iki tasarımın verimlilikleri kıyaslanmış, albedo etkisi incelenmiş, CO<sub>2</sub> emisyon analizi ve teknik analizleri yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları, tek yüzeyle panellerin ortalama %82,21 performans oranıyla 1537 kWh/yıl ve çift yüzeyle panellerin ortalama %93,06 performans oranıyla 1740 kWh/yıl üretim potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Çift yüzeyle panellerin tek yüzeyle panellere göre daha yüksek performans gösterdiği ve yıllık ortalama enerji üretiminin %13 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, çift yüzeyle güneş paneli sistemlerinin verimliliği ve çevresel faydaları nedeniyle tek yüzeyle sistemlere göre daha yaygın hale getirilmesi, sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir adım olabilir.

## Performance Analysis of Monofacial and Bifacial Photovoltaic Panels

### Article Info

Research article  
Received: 17/05/2023  
Revision: 26/05/2023  
Accepted: 26/05/2023

### Keywords

Photovoltaic (PV)  
Monofacial PV  
Bifacial PV  
PVsyst  
Albedo

### Abstract

With the increase in energy demand, it is important to increase the performance of photovoltaic panels. Therefore, comparing and evaluating the performances of monofacial and bifacial photovoltaic panels (PV) is an important research topic. In this study, the performances of monofacial and bifacial PV panels were compared using the PVsyst software. In the study, two different solar power plants were designed with the same model of monofacial and bifacial PV panels in Ankara to ensure that the calculations were made under the same conditions for both monofacial and bifacial PV panels. The efficiencies of these two designs were compared, the albedo effect was examined, and CO<sub>2</sub> emission analysis and technical analysis were made. The results of the study show that monofacial panels have a production potential of 1537 kWh/year with an average performance rate of 82.21%, and bifacial panels have a production potential of 1740 kWh/year with an average performance of 93.06%. It has been determined that bifacial panels perform higher than monofacial panels and the annual average energy production is 13% higher. These results, making bifacial solar panel systems more common than monofacial systems due to their efficiency and environmental benefits could be an important step for sustainable energy production.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan nüfus ve sanayileşme ile enerjiye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu talebi karşılamak için kullanılan fosil yakıtlar iklim krizine sebep olmuştur. Yaşanan olumsuzlukların etkilerini en aza indirmek için 2019 yılında yeşil mutabakat gündeme gelmiştir [1]. 2020 yılında Avrupa Komisyonu tarafından imzalanan bu mutabakat

2050 yılına kadar net sıfır emisyonu geçmek için birtakım hedefler içermektedir. Yenilenebilir enerji kullanımı ve enerji verimliliğine yönelik eylemler bu hedefler kapsamında önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi en hızlı gelişen yenilenebilir kaynaktır [2]. Güneş enerjisi, sonsuz ve yaygın bir kaynak olması, doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesi gibi avantajlarından dolayı hızla yaygınlaşmaktadır [3].

Ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş panelleri giderek yaygın hale gelmiştir. Ülkemizin bol güneşi ve artan enerji ihtiyacıyla birlikte, daha fazla kişi ve işletme, maliyet etkili ve sürdürülebilir bir çözüm olarak güneş enerjisine yönelmektedir. Türkiye’de güneş enerjisine dayalı kurulu güç 9.425,4 MW’tır. Diğer kurulu güç kaynakları içerisinde güneşin enerjisinin payı % 9,08 dir [4].

Kurulacak sistemin tasarımının doğruluğunu ve performansını optimize etmek için kurulum öncesi simülasyon programı kullanmak önemlidir. Çünkü simülasyon programları, güneş radyasyonu, panel, inverter performansı ve enerji üretimi gibi birçok faktörü hesaba katarak GES’in tasarım ve performans özelliklerini modelleyebilir [5]. Gerçek koşullara en yakın sonuçları sağlamak için çeşitli parametreleri ve koşulları kullanır. FV sistemleri ile enerji üretimi PVsyst, PVsol, Matlab/Simulink, Helioscope, PVcase vb. gibi simülasyon yazılım programları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Literatürde bu programların incelenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır [6]–[7]. Bu programlardan biri olan PVsyst, farklı FV panel tiplerinin modellerini içerir ve sistem bileşenleri için tasarım ve performans parametreleri sağlar.

Güneş enerjisi üretiminde kullanılan paneller, tek yüzeyli veya çift yüzeyli olarak üretilebilir. Çift yüzeyli fotovoltaik paneller, güneş ışığının hem ön yüzeyden hem de arka yüzeyden absorbe edilmesine izin verir. Bu, tek yüzeyli panellere kıyasla daha yüksek bir toplam enerji verimliliği sağlar. Bu nedenle, çift yüzeyli FV teknolojisi son yıllarda giderek daha yaygın hale gelmiştir ve ilgi artmıştır ve araştırma konusu olmuştur [8]–[9].

Çalık çalışmasında, 5 farklı bölge seçip çift yüzeyli ve tek yüzeyli FV panellerin beyaz zemin, kum zemin ve asfalt zemin koşullarında modellemesini yapmıştır. Çift yüzeyli ve tek yüzeyli panellerin performanslarını kıyaslamayı amaçlayan bu çalışmada PVsyst programını kullanmıştır. Çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında bütün bölgelerde çift yüzeyli panellerin veriminin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çift yüzeyli panelin geri ödeme süresinin tek yüzeyli panele göre 0,4 yıl daha erken olduğu belirlenmiştir [10].

Prasad, Batı Viti Levu, Fiji’de çift yüzeyli ve tek yüzeyli güneş enerjisi panellerinin karşılaştırmalı tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. PVsyst simülasyon programını kullanarak oluşturduğu modellerin sonucunda çift yüzeyli güneş enerjisi santralının %93,13’lük daha iyi bir performans oranıyla yıllık 22.149 MWh enerji

üretim potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Çift yüzeyli güneş enerji santrallerinin, tek yüzeyli güneş enerji santrallerine kıyasla daha fazla enerji üretme ve daha yüksek sera gazı önleme potansiyeline sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [11].

NSS Mohamed ve diğerleri, PVsyst simülasyon programını kullanarak tek ve çift yüzeyli panellerin tasarımını, simülasyonunu ve ekonomik analizini yapmıştır. Sonuçlar, 0,25’lik düşük albedo değeri ile çift yüzeyli FV modüllerinin arka tarafı, tek yüzeyli FV sistemine kıyasla %4,48 ek enerji üretimi yapabileceğini göstermektedir. Çift yüzeyli FV sisteminin, tek yüzeyli FV modüllerine sahip sisteme kıyasla daha düşük elektrik maliyetiyle daha yüksek enerji çıkışı üretim yapabileceğine ulaşılmıştır [12].

Türkdoğru ve Kutay tarafından yapılan çalışmada, farklı zemin modelleri ve albedo değerleri kullanarak çift yüzeyli FV sistemlerin performansı simüle edilmiştir. Sonuçlar, yüksek albedo değerlerinin çift yüzeyli FV sistemlerde daha büyük bir güç artışına neden olduğunu göstermiştir. Bu da çift yüzeyli FV sistemlerin albedo etkisine daha duyarlı olduğunu göstermiştir [13].

Bu çalışmada Ankara ilinde belirlenen koordinatlarda, çift yüzeyli ve tek yüzeyli güneş enerji santrallerinin tasarım ve analizi PVsyst simülasyon programının 7.2.4 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı koordinatlar kullanıldığı için, programın hesaplamaları her iki santral için de aynı koşullar dikkate alarak gerçekleştirir. Bu, tasarım ve analiz sonuçlarının daha doğru ve karşılaştırılabilir olmasını sağlar. Ayrıca, zeminin albedo etkisi de incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panellerin performansı PVsyst yazılımı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Tek yüzeyli paneller, sadece bir taraftan güneş ışığı alabilirken, çift yüzeyli paneller hem üst hem de alt taraflarından güneş ışığı alabilirler. Bu çalışmada, aynı boyuttaki ve aynı verimlilik sınıfına sahip iki farklı FV paneli kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan İsviçre Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilen PVsyst programı, fotovoltaik sistemlerin performansının daha doğru bir şekilde simüle edilmesini sağlayarak, tasarım, optimize etme ve finansal analiz gibi bir dizi farklı görevde kullanılabilir. Bu program, farklı çevresel parametreleri dikkate alınabilmesi ve detaylı hesaplamalar yapılabilmesi

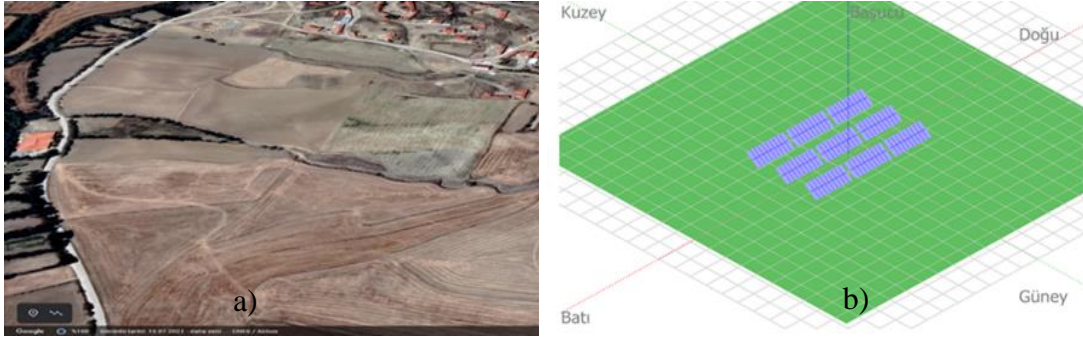
nedeniyle, benzer programlara kıyasla daha etkili bir araçtır [14].

Öncelikle, tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin aynı şartlarda test edilebilmesi için, her iki panel aynı güç çıkışına sahip olarak seçilmiştir. Ardından, PVsyst yazılımı kullanılarak her iki panelin performansı simüle edilmiştir.

## 2.1. Ankara'nın Parametreleri (Ankara's Parameters)

Ankara yüzölçümü olarak Konya ve Sivas'tan sonra, Türkiye'nin en büyük üçüncü ilidir. İlin genel yüzölçümü 24.521 km<sup>2</sup>'dir. Ankara ilinin 25 ilçesi

vardır. Ankara'nın güneyinde İç Anadolu ikliminin belirgin karasal iklimi, kuzey tarafında ise Karadeniz ikliminin ılıman ve yağışlı halleri görülür. Yıl içerisinde ortalama en düşük sıcaklık Ocak ayında -3.2 °C, ortalama en yüksek sıcaklık Ağustos ayında 30.5 °C olarak gerçekleşmiştir. Yıllık ortalama güneşlenme süresi 2506 saat ve yıllık ortalama güneş ışınımı 1389 Wh/m<sup>2</sup>'dir. Güneş panellerinin kurulumu için seçilen koordinatlar 39.55°K, 32.51°D ve rakım 859 m'dir. Şekil 1.a'da Google Earth görünümü gösterilmiştir. Seçilen bölgenin çevresinde yapı ve bitki örtüsü olmadığı için gölgeleme riski bulunmamaktadır.



**Şekil 1.** a) Güneş panellerinin kurulumu için seçilen alanın Google Earth görünümü (Google Earth view of the area selected for the installation of solar panels) b) Tasarlanan FV sisteminin PVsyst programında görünümü (View of the designed PV system in the PVsyst program)

PVsyst programında tasarlanan güneş enerji santralının görünümü Şekil 1.b'de gösterilmektedir. Bu görünüm, PVsyst programının "Gölgelendirme sahnesi" özelliği kullanılarak görüntülenebilir. Bu özellik, güneş panellerinin gerçek zamanlı gölgeleme analizlerinin yapılabildiği ve panellerin özelliklerinin detaylı bir şekilde görüntülenebildiği bir araçtır. Bu özellik kullanılarak, güneş panellerinin 3 boyutlu bir modeli oluşturulabilir ve panellerin arasındaki mesafeler, eğim açıları, dizi sayısı ve konumu gibi parametreler ayarlanabilir. Daha sonra, program, belirtilen tarih ve saatlerde güneşin ışınlarının panellere nasıl düştüğünü simüle eder ve panellerin gölgeleme risklerini belirler. Bu özellik sayesinde, güneş panellerinin tasarımı ve konumlandırılması optimize edilerek, enerji üretim potansiyelinin artırılması ve gölgeleme kaynaklı performans kayıplarının en aza indirgenmesi sağlanabilir.

PVsyst hava durumu verileri Meteonorm veri tabanından elde edilmiştir. Meteonorm, dünya genelindeki meteoroloji istasyonlarından toplanan uzun yıllar boyunca ölçülen hava durumu verilerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir veri tabanıdır. Bu veriler, güneş ışınımı, hava sıcaklığı, rüzgar hızı, nem oranı gibi hava koşullarını içerir [15]. PVsyst gibi yazılımların doğru bir şekilde güneş enerjisi sistemlerinin performansını modellenmesine yardımcı olur. Seçilen koordinatlar için bu değerler Tablo 1'de gösterilmiştir. Güneş panellerinin kurulumu için seçilen sahanın ortalama global yatay ışınlanması 1626,5 kWh/m<sup>2</sup> 'dir ve en yüksek değer Temmuz ayında, minimum değer ise Aralık ayında kaydedilmiştir. Aylık ortalama yatay dağınık ışınlama 641 kWh/m<sup>2</sup> dir ve en yüksek değer Haziran ayında, minimum değer ise Aralık ayında kaydedilmiştir. Aylık ortalama sıcaklık 11,3 °C olurken, en yüksek değer Ağustos ayında, en düşük değer ise Şubat ayında kaydedilmiştir.

**Tablo 1.** Kurulum için seçilen koordinatların aylık verileri (Monthly data of coordinates selected for installation)

	Global Yatay Işınlama (kWh/m <sup>2</sup> )	Yatay Difüz Işınlama (kWh/m <sup>2</sup> )	Sıcaklık (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Bağıl Nem (%)
<b>Ocak</b>	55,8	35,8	-3,1	1,44	63,9
<b>Şubat</b>	73,9	39,7	-3,7	1,69	79,3
<b>Mart</b>	128,3	54,3	6,8	2,31	63,7
<b>Nisan</b>	162	70,7	10,1	2,10	60,5
<b>Mayıs</b>	190,1	74,2	15,6	1,98	57,2
<b>Haziran</b>	186	82,1	19,7	2	59,4
<b>Temmuz</b>	217,1	72	21,9	2,46	48,2
<b>Ağustos</b>	212,4	59,6	24,5	2,15	42,8
<b>Eylül</b>	163,8	51,3	22,3	1,72	43,1
<b>Ekim</b>	115,5	42,5	15,7	1,59	53,2
<b>Kasım</b>	69,8	31,8	5,6	2,17	70,4
<b>Aralık</b>	51,8	27	0,7	1,42	76,5
<b>Toplam</b>	1626,5	641	11,3	1,9	59,9

## 2.2. FV Sistem Tasarımı (PV System Design)

PVsyst programında seçilen sahanın koordinatları girilmiştir. Güneş ışınımı verileri Meteororm veri tabanından elde edilmiştir. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV sistemleri için FV modülü yönlendirmesi, sabit eğik düzlem olarak seçilmiştir. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin performanslarını karşılaştırmak için aynı koordinatlar kullanılmış ve düzlem eğimi 37° olarak seçilmiş, azimut açısı ise 0° olarak belirlenmiş. Bu,

anellerin optimum açıda ve pozisyonda olmasını sağlayarak, enerji verimliliğini artırmayı hedefler.

### 2.2.1. FV Modül Seçimi (PV Module Selection)

Karşılaştırmalı bir çalışma yapabilmek için benzer özelliklerde tek yüzeyli ve çift yüzeyli modüller seçilmiştir. Marka olarak Trina Solar tercih edilmiştir. Tablo 2’de seçilen modüllerin özellikleri gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Çift yüzeyli ve tek yüzeyli panellerin özelliklerinin karşılaştırılması (Comparison of the properties of bifacial and monofacial panels)

	Tek yüzeyli modül	Çift yüzeyli modül
Üretici	Trina Solar	Trina Solar
Model	TSM-DE18M-(II)-500	TSM-DEG18MC-20-(II)-500 Bifacial
Nominal güç	500 Wp	500 Wp
Hücre	75x2	75x2
Uzunluk	2176 mm	2256 mm
Genişlik	1098 mm	1133 mm
Kalınlık	35 mm	30 mm
Ağırlık	26,3 kg	32,3 kg
Modül alanı	2,389 m <sup>2</sup>	2,556 m <sup>2</sup>
Kısa devre akımı (I <sub>sc</sub> )	12,28 A	13,92 A
Açık devre voltajı (V <sub>oc</sub> )	51,7 V	50,3 V
Maksimum güç noktası akımı (I <sub>mpp</sub> )	11,69 A	13,04 A
Maksimum güç noktası voltajı (V <sub>mpp</sub> )	42,8 V	41,8 V
Sıcaklık katsayısı	- 0,35 %/°C	- 0,34 %/°C
Diyot doyma akımı	0,023 nA	0,021 nA
Diyot kalite faktörü	0,99 /K	1,00 /K

### 2.2.2. İnvvertör Seçimi (Inverter Selection)

İnvvertör için güneş enerjisi sektöründe geniş bir ürün yelpazesine sahip olan Huawei Technologies marka tercih edilmiştir. İnvvertörün boyutu, panel sayısı ve panel tipi ile doğrudan ilişkilidir. Bu durumlar göz önüne alınarak 90 kW AC çıkış gücüne sahip ve çalışma gerilimi 600 ile 1450 V aralığında olan SUN2000-90KTL-H2 modeli tercih edilmiştir. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli iki model için de aynı invvertör kullanılmıştır.

### 2.2.3. Dizi Boyutlandırma (Array Sizing)

Dizi boyutlandırma bulunan modül sayısı ve zincir sayısı, PVsyst simülasyonunda tasarımınızı belirleyen önemli parametrelerdir. Bu parametreler, birbiriyle ilişkili ve tasarımın optimum performansını elde etmek için doğru şekilde seçilmelidir. Seri modül sayısı, modüllerin seri olarak bağlandığı dizi sayısını ifade eder. PVsyst'te, modüllerin çalışma gerilimi ve invvertörün çalışma gerilimi arasındaki uyumluluğa dikkat ederek seri modül sayısı belirlenir. Seri modül sayısını artırmak, güç çıkışını artırabilir, ancak invvertör çalışma gerilimi aşılmamalıdır. Zincir sayısı, paralel olarak bağlanan dizi sayısını ifade eder. Zincir sayısı arttıkça, toplam güç çıkışı artar, ancak toplam akım da artar. Bu nedenle, invvertörün giriş akımı sınırlarına dikkat etmek önemlidir. Ayrıca, özellikle gölgeleme gibi olumsuz koşullar altında, zincir sayısının azaltılması, modüllerin performansını artırabilir. Bu bilgiler ışığında seri modül sayısı 20, zincir sayısı 9 olarak belirlenmiştir.

### 2.2.4. Yerleşim ve zemin parametreleri (Layout and Ground Parameters)

Dizi parametreleri, güneş panellerinin konumlandırılması ile ilgilidir ve panellerin birbirine olan mesafesi, yüksekliği, açısı gibi faktörleri içerir. Bu parametreler, panellerin arasında gölgeleme olmamasını, güneş ışınlarının eşit olarak dağılmasını ve panellerin güneş ışınlarından en fazla yararlanmasını sağlamak için optimize edilmelidir. Zemin parametreleri ise, güneş panellerinin altındaki zemine ilişkindir. Bu parametreler, zeminin rengi, yüzeyi, eğimi gibi faktörleri içerir. Zemin parametreleri, güneş ışınlarının yansımaları ve emilimi üzerinde etkili olabilir.

$$d_{row} = w_m \cdot \cos \beta_z + w_m \left( \frac{\sin \beta_m \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_m)}{\tan \alpha} \right) \quad (1)$$

Eş. (1) kullanılarak diziler arasındaki boşluklar hesaplanmıştır. Tek yüzeyli panellerin aralıkları 8,95 m, dizi toplam eni 4,39; çift yüzeyli panellerin ise aralıkları 8,88 m, dizi toplam eni 4,36 m olarak

belirlenmiştir. Her iki panelin yerden yüksekliği 1,5 olarak ayarlanmıştır. Çift yüzeyli panel için zemin albedosu 0,6 olarak belirlenmiştir. Bu değer beyaz boya veya çimento ile rahatlıkla elde edilebilir [11].

### 2.3. Karbon Emisyon Analizi (Carbon Emission Analysis)

IPCC (Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli) 2006 Yönergeleri, karbon azaltımını hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir kaynaktır. Tier 1 hesaplama yöntemi, CO<sub>2</sub> emisyonlarını hesaplamak için kullanılan basit bir formüldür [16]. Eş. (2)'de gösterilen bu yöntemde, faaliyet verileri, kütle ve kalori değeri kullanılarak belirlenir. Kütle, bir sürecin veya ürünün ağırlığını ifade ederken, kalori değeri, yakıtın ne kadar enerji ürettiğini ifade eder.

$$\text{Faaliyet Verileri} = \text{Kütle (kg)} \times \text{Kalori Değeri (CV)} \quad (2)$$

Daha sonra, Eş. (3)'deki gibi emisyonlar/yıl hesaplaması, faaliyet verileri ile CO<sub>2</sub> emisyon faktörü (EF) çarpılarak yapılır. CO<sub>2</sub> emisyon faktörü, birim başına salınan CO<sub>2</sub> miktarını ifade eder ve yanma için varsayılan CO<sub>2</sub> emisyon faktörleri, bu faktörü hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir.

$$\text{Emisyonlar/yıl} = \text{Faaliyet Verileri} \times \text{EF} \quad (3)$$

### 2.4. Ekonomik Analiz (Economic Analysis)

FV sistemi yatırımı yaparken, yatırımcılar, sistemin sağlayacağı gelirlerin, maliyetlerin ve karların tahmin edildiği bir ekonomik değerlendirme yaparak, makul bir kar oranı elde etmek isterler. Bu değerlendirme, FV sisteminin yatırım maliyeti, yıllık enerji üretimi, enerji satış fiyatı, işletme ve bakım maliyetleri ve vergi avantajları gibi faktörlerin dikkate alınmasıyla yapılır. Bu hesaplamalar, yatırımın geri ödeme süresi, yatırım getirisi, net bugünkü değer ve iç verim oranı gibi finansal göstergelerin hesaplanmasına olanak tanır. Böylece yatırımcı, sistemin karlılığına ve yatırımın geri dönüş süresine ilişkin bir karar verebilir. FV güç santralinin toplam maliyetinin hesaplanması aşağıdaki gibi yapılır [17].

$$\begin{aligned} C_c = & (N_i \times N_s \times N_p \times (P_{M,STC}/1000) \times C_{PV}) \\ & + (N_i \times (P_{rated}/1000) \times C_{inv}) \\ & + (C_{transformer} \times P_{plant, nom} \times 1000) \\ & + (BOS \times P_{plant, nom} \times 1000) \\ & + (C_i \times P_{plant, nom} \times 1000) + (C_{land} \times \eta_{land}) \end{aligned} \quad (4)$$



Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE), ömür boyunca tüm maliyetlerin toplamının, bir enerji santralının ömrü boyunca ürettiği toplam elektrik enerjisiyle bölünmesiyle hesaplanır. Böylece, birim başına enerji maliyetini belirlemeye yardımcı olan standart bir ölçüt oluşturulur. LCOE, farklı enerji üretim teknolojilerinin maliyetlerini karşılaştırmak için kullanılan önemli bir araçtır. LCOE, ömür boyunca maliyetlerin toplamının ömür boyunca üretilen elektrik enerjisinin toplamına oranıdır ve Eşitlik (5) ile hesaplanır [9], [10], [17].

$$LCOE = (C_c + C_m + C_{rep}) / (E_{PLANT} \times 1000) \quad (5)$$

Brüt gelirler (R<sub>gross</sub>), projenin ömrü boyunca FV santrali tarafından üretilen tüm gelirlerin miktarını ifade eder. Hesaplama, FV santralının işlevsel ömrü boyunca üretilen elektrik enerjisi miktarının elektrik piyasası fiyatı ile çarpımı ile yapılır. Bu oran, seçilen yerin elektrik piyasasına bağlı olarak ve mevcut yardım planları dikkate alınarak değişebilir. Brüt gelirler için kullanılan formül Eşitlik (6)'da verilmiştir. [9], [10]:

$$R_{gross} = P_{electricity} \times E_{PLANT, TOT} \times n \quad (6)$$

Performans oranı (PR), FV güneş enerjisi santralının gerçek performansı ile nominal kapasitesi arasındaki ilişkiyi gösteren bir parametredir. Kullanılan formül Eşitlik (7)'de verilmiştir. [9], [10]:

$$PR (\%) = (E_{PLANT, TOT} / P_{plant, nom} \times G_t \times 10^{-6}) \times 100 \quad (7)$$

Geri ödeme süresi, bir projenin sermayeyi geri kazanması için geçen süreyi hesaplamak için kullanılan bir ölçüttür. Bu süre, projenin başlangıç yatırımının, yıllık gelirlere oranıdır ve Eş. (8) ile hesaplanır.

$$\text{Geri ödeme süresi} = \text{Toplam yatırım} / \text{Yıllık gelir} \quad (8)$$

Net bugünkü değer (NBD) yöntemi, bir projenin bugünkü değerini hesaplamak için kullanılan bir finansal analiz yöntemidir. Bu yöntem, bir projenin gelecekteki nakit akışlarının bugünkü değerini hesaplayarak, yatırımın toplam getirisini tahmin etmeye çalışır. Eğer NBD, yatırımın bugünkü değerinin pozitif olduğunu gösterirse, proje karlı kabul edilir [18]. Geri ödeme süresi, yatırımın geri kazanılması için geçen süreyi gösterirken, NBD yatırımın toplam getirisini gösterir. Bu nedenle, NBD, bir yatırımın gerçek getirisini belirlemek için kullanışlı bir ölçüt olarak kabul edilir ve Eş. (9) ile hesaplanır. Yaşam döngüsü maliyetlerinin bugünkü değeri ise, bir yatırımın tüm yaşam döngüsü boyunca tahmini tüm maliyetlerini hesaplamak için kullanılır. Bu maliyetler, yatırımın inşası, işletilmesi ve bakımı süresince ortaya çıkan tüm maliyetleri içerir [9], [10], [17].

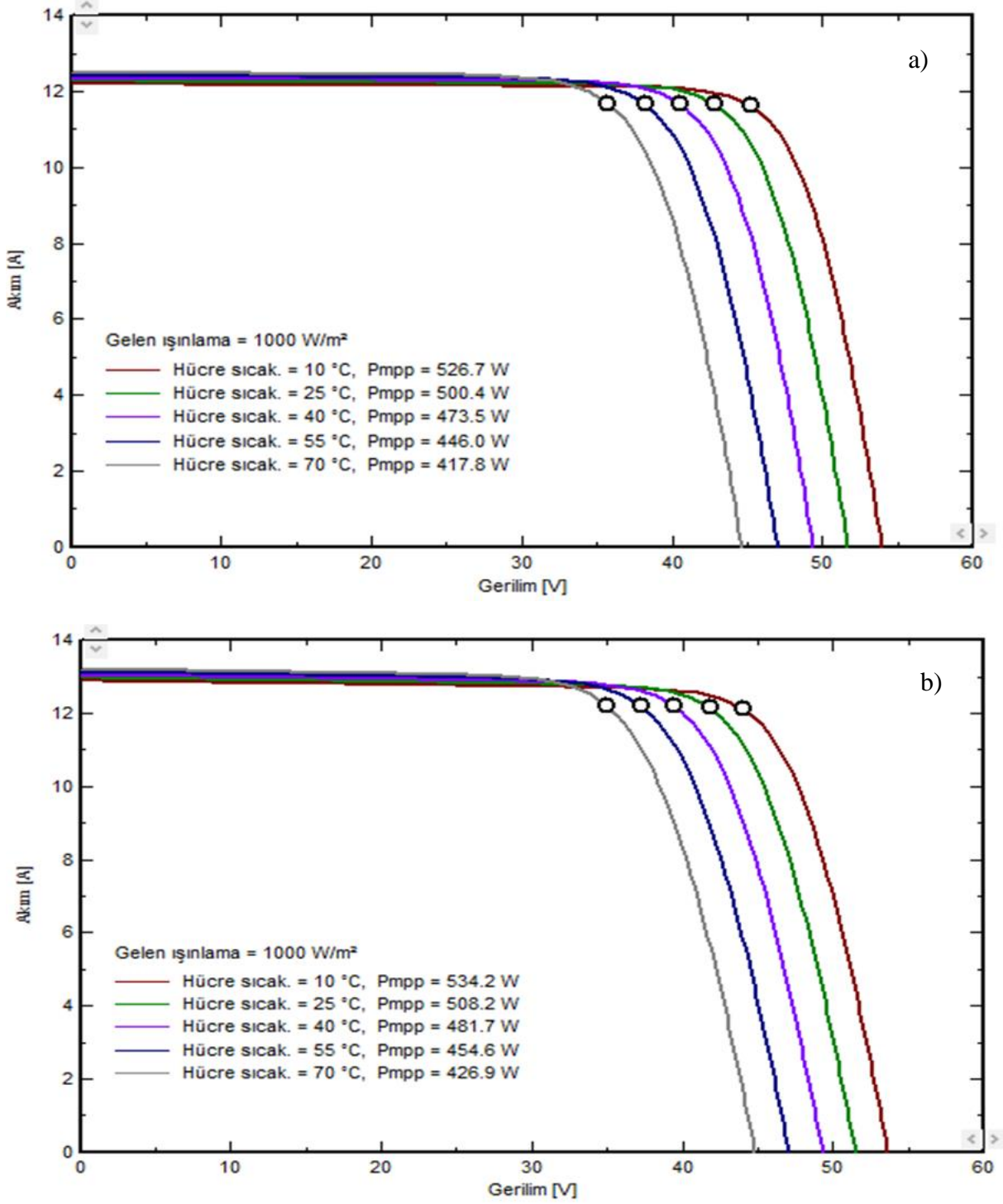
$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{Revenue_t - Costs_t}{(1+r)^t} \quad (9)$$

### 3. BULGULAR (RESULTS)

Ankara iline kurulması için tasarlanan tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin PVsyst programından elde edilen sonuçları bu bölümde verilmiştir.

#### 3.1. Enerji Analizi (Energy Analysis)

Tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panellerinin enerji analizi, PVsyst yazılımı kullanılarak yapılmıştır ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.



**Şekil 2.** a) Sıcaklığa bağlı tek yüzeyli FV panelin I-V eğrisi (I-V curve of a temperature-dependent monofacial PV panel) b) Sıcaklığa bağlı çift yüzeyli FV panelin I-V eğrisi (I-V curve of a temperature-dependent bifacial PV panel)

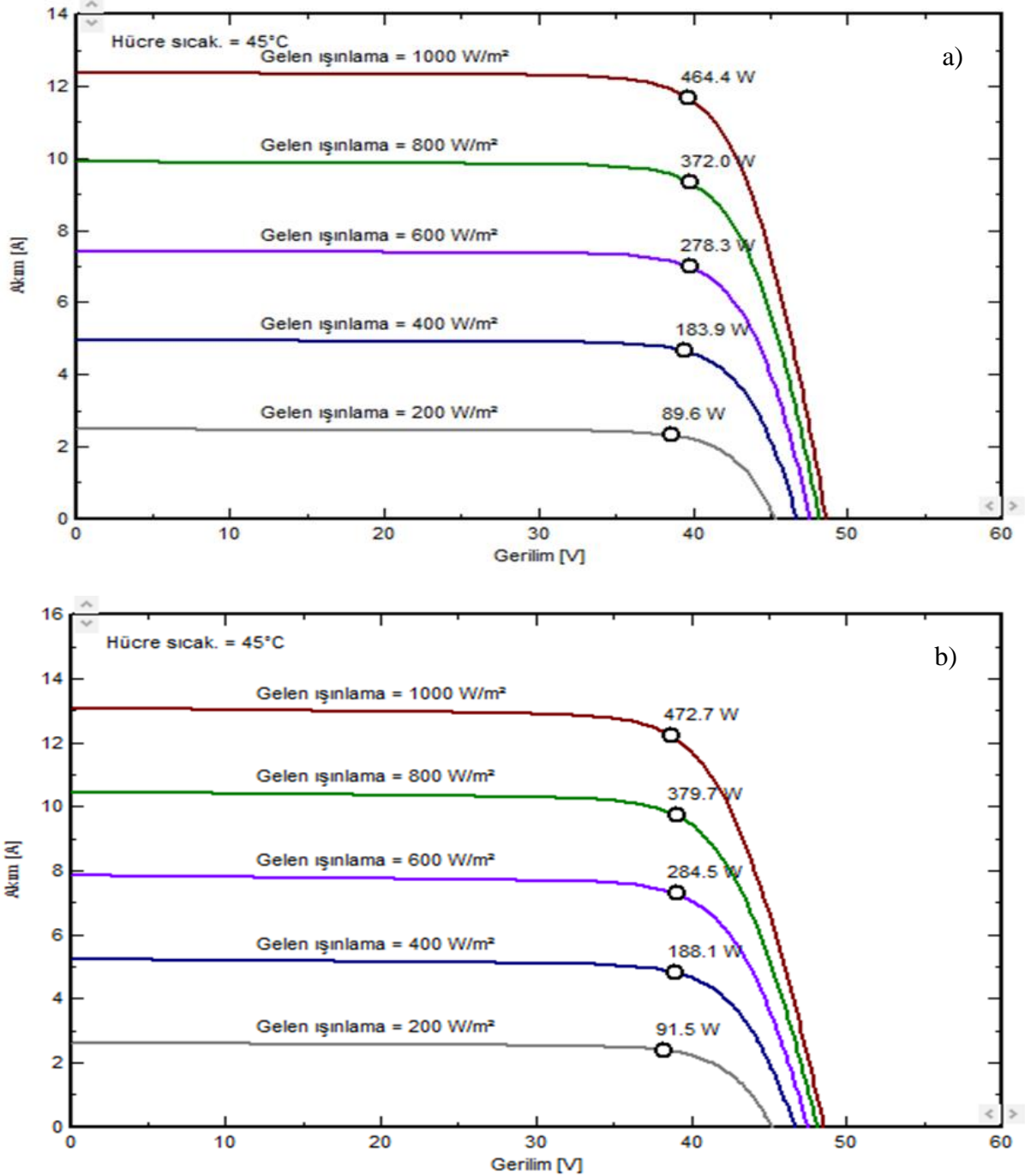
Şekil 2.a'da tek yüzeyli Şekil 2.b'de çift yüzeyli modül için çeşitli hücre sıcaklıklarına dayalı güneş modüllerinin güç çıkışları gösterilmiştir. Tek yüzeyli panelde hücre sıcaklığı 10 °C'den 70 °C'ye yükseldiğinde, güç çıkışı 526,7 W'tan 417,8 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli panelde ise hücre sıcaklığı 10 °C'den 70 °C'ye yükseldiğinde, güç çıkışı 534,2 W'tan 426,9 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli FV panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele

göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, her iki panelin de hücre sıcaklığı arttıkça maksimum güç çıkışı azalır. Hücre sıcaklığı 25°C'de iken, her iki panelin de maksimum güç çıkışı benzerdir. Ancak, hücre sıcaklığı arttıkça çift yüzeyli panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele göre daha yüksektir. I-V eğrilerine bakıldığında, hücre sıcaklığı arttıkça eğriler sol üst köşeye doğru hareket eder. Bu, panelin çıkış gerilimi düştüğünde çıkış akımının ise az miktarda arttığı anlamına gelir.



Ayrıca, çift yüzeyli panelin I-V eğrisi tek yüzeyli panele göre daha yüksek bir noktada başlar ve daha dik bir eğimle düşer. Bu, çift yüzeyli panelin daha yüksek bir açık devre gerilimine sahip olduğunu ve daha yüksek bir kısa devre akımı ürettiğini gösterir. Sonuç olarak, hücre sıcaklığı arttıkça, her iki

panelin de maksimum güç çıkışı azalırken, çift yüzeyli panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele göre daha yüksektir. Ayrıca, çift yüzeyli panelin daha yüksek bir açık devre gerilimine ve daha yüksek bir kısa devre akımına sahip olduğu görülür [9]-[11].



**Şekil 3.** a) Işınım şiddetine bağlı tek yüzeyli FV panelin I-V eğrisi (I-V curve of a monofacial PV panel depending on the radiation intensity) b) Işınım şiddetine bağlı çift yüzeyli FV panelin I-V eğrisi (I-V curve of the bifacial PV panel depending on the radiation intensity)

Şekil 3.a'da tek yüzeyli Şekil 3.b'de çift yüzeyli modül için ışınım şiddetine dayalı güneş modüllerinin güç çıkışları gösterilmiştir. Tek yüzeyli panelde gelen ışınım 1000 W/m<sup>2</sup>'den 200

W/m<sup>2</sup>'ye düştüğünde, güç çıkışı 464,4 W'tan 89,6 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli panelde gelen ışınım 1000 W/m<sup>2</sup>'den 200 W/m<sup>2</sup>'ye düşerken, güç çıkışı 472,7 W'tan 91,5 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli FV panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele

göre yine daha yüksektir. Ayrıca, her iki panelin de ışınım şiddeti arttıkça maksimum güç çıkışı artar. Işınım şiddeti  $1000 \text{ W/m}^2$ 'de iken, her iki panelin de maksimum güç çıkışı değerleri yakındır. Ancak, ışınım şiddeti azaldıkça çift yüzeyli panelin maksimum güç çıkışı tek yüzeyli panele göre daha

yüksektir. I-V eğrilerine bakıldığında, ışınım şiddeti arttıkça eğriler sağ üst köşeye doğru hareket eder. Bu, panelin çıkış gerilimi arttığında çıkış akımının da arttığı anlamına gelir. Ayrıca, çift yüzeyli panelin I-V eğrisi tek yüzeyli panele göre daha yüksek bir

noktada başlar ve daha dik bir eğimle düşer. Bu, çift yüzeyli panelin daha yüksek bir açık devre gerilimine sahip olduğunu ve daha yüksek bir kısa devre akımı ürettiğini gösterir. Sonuç olarak, ışınım şiddeti arttıkça, her iki panelin de maksimum güç çıkışı artar ve çift yüzeyli panelin maksimum güç

çıkışı tek yüzeyli panele göre daha yüksektir. Ayrıca, çift yüzeyli panelin daha yüksek bir açık devre gerilimine ve daha yüksek bir kısa devre akımına sahip olduğu görülür [9]-[11].

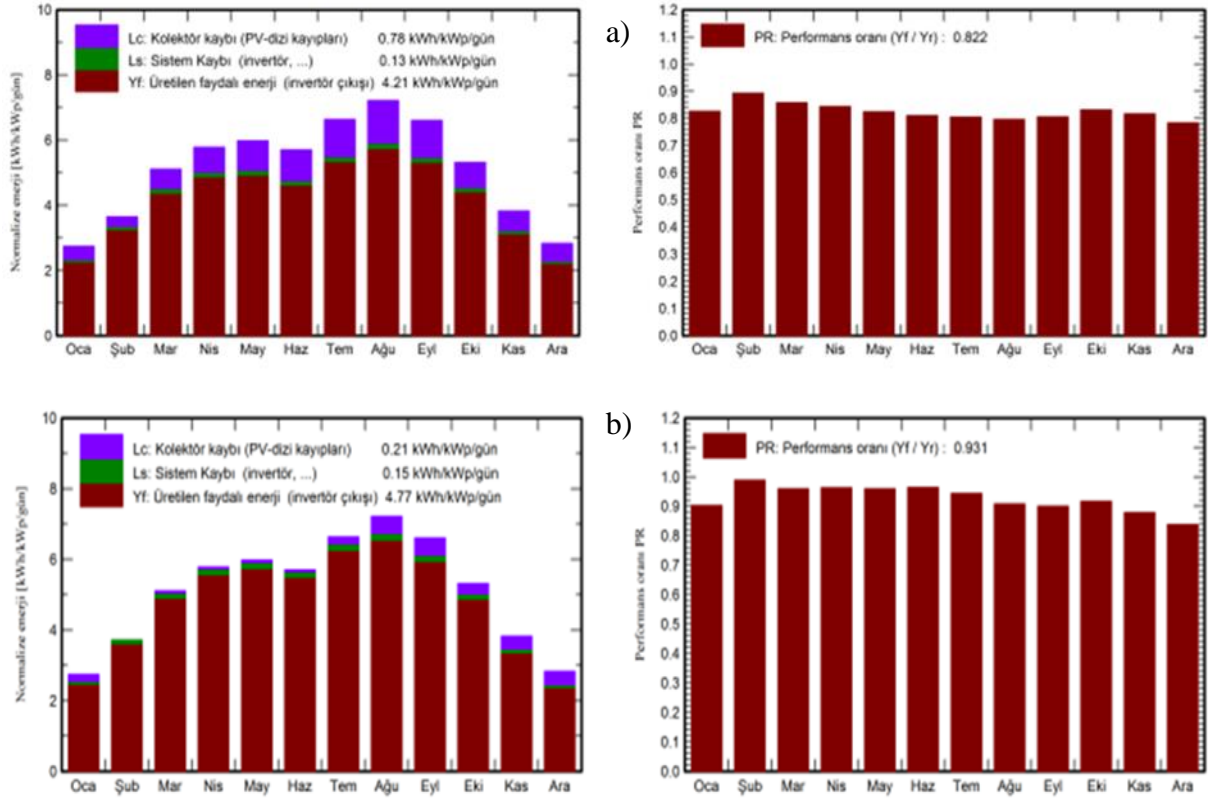
**Tablo 3.** Tek yüzeyli FV ve çift yüzeyli FV ile oluşturulan özdeş santrallerden elde edilen simülasyon çıktıları (Simulation outputs obtained from identical power plants created with monofacial PV and bifacial PV)

Ay	Tek Yüzeyli FV					Çift Yüzeyli FV				
	Glob <sub>inc</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	Glob <sub>eff</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	E <sub>Array</sub> (MWh)	E <sub>Grid</sub> (MWh)	PR	Glob <sub>inc</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	Glob <sub>eff</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	E <sub>Array</sub> (MWh)	E <sub>Grid</sub> (MWh)	PR
Ocak	85	77	6,52	6,32	0,826	85	77,6	7,12	6,90	0,902
Şubat	102,2	95,4	8,48	8,21	0,893	102,2	96,2	9,38	9,09	0,989
Mart	158,3	148,2	12,59	12,21	0,857	158,3	149,7	14,10	13,67	0,959
Nisan	173,3	161,4	13,55	13,16	0,843	173,3	163,6	15,49	15,03	0,963
Mayıs	185,5	172,5	14,17	13,75	0,824	185,5	175,5	16,51	16,02	0,960
Haziran	171	158,1	12,84	12,48	0,810	171	161,3	15,27	14,84	0,964
Temmuz	205,6	191,2	15,33	14,90	0,805	205,6	194,8	17,99	17,47	0,944
Ağustos	223,7	209,3	16,49	16,02	0,796	223,7	212,3	18,82	18,27	0,908
Eylül	198,1	185,9	14,79	14,37	0,806	198,1	187,8	16,54	16,05	0,900
Ekim	164,8	155,2	12,71	12,34	0,832	164,8	156,3	14,02	13,60	0,917
Kasım	114,8	105,9	8,7	8,43	0,816	114,8	106,5	9,36	9,07	0,878
Aralık	87,8	78,9	6,4	6,19	0,783	87,8	79,3	6,84	6,62	0,838
<b>Toplam</b>	<b>1870</b>	<b>1739</b>	<b>142,58</b>	<b>138,36</b>	<b>0,822</b>	<b>1870</b>	<b>1760,8</b>	<b>161,43</b>	<b>156,62</b>	<b>0,931</b>

Tablo 3'te, tek ve çift yüzeyli güneş panellerinin yıllık ortalama DC enerji üretimi ve şebekeye enjekte edilen AC enerjisi miktarları verilmiştir. Bu enerji üretimi, panel yüzeyine düşen güneş ışınımına bağlıdır ve panel yüzeyine düşen etkin küresel ışınım miktarı hesaba katılarak hesaplanmıştır.

Tek yüzeyli panelin kolektöre yansıyan küresel ışınımı (Glob<sub>inc</sub>),  $1870 \text{ kWh/m}^2$  ve etkin küresel ışınımı (Glob<sub>eff</sub>)  $1739 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. Bu ışınım miktarına bağlı olarak, tek yüzeyli panelin yıllık ortalama DC enerji üretimi (E<sub>Array</sub>)  $142,58 \text{ MWh}$  ve şebekeye enjekte edilen AC enerjisi miktarı (E<sub>Grid</sub>)

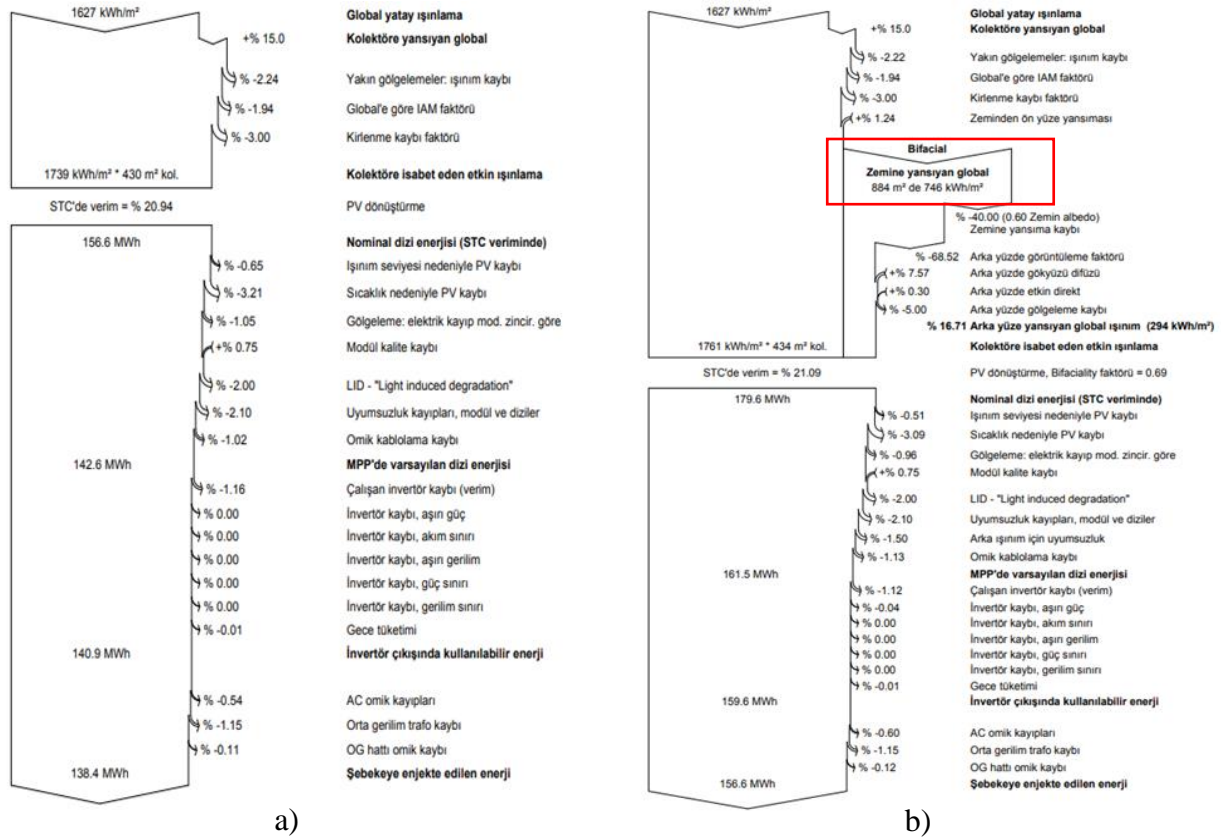
$138,36 \text{ MWh}$ 'dir. Çift yüzeyli panelin kolektöre yansıyan küresel ışınımı,  $1870 \text{ kWh/m}^2$  ve etkin küresel ışınımı  $1760,8 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. Bu ışınım miktarına bağlı olarak, çift yüzeyli panelin yıllık ortalama DC enerji üretimi  $161,43 \text{ MWh}$  ve şebekeye enjekte edilen AC enerjisi miktarı  $156,62 \text{ MWh}$ 'dir. Ayrıca, tek yüzeyli panelin yıllık ortalama performans oranı (PR)  $0,822$  ve çift yüzeyli panelin PR'si  $0,931$  olarak hesaplanmıştır. Çift yüzeyli panelin tek yüzeyli panele göre daha yüksek bir performans gösterdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, güneş panellerinin performansını etkileyen faktörlerin anlaşılması açısından önemlidir.



**Şekil 4.** a) Tek yüzeyli FV panelin aylık enerji üretimi ve performans oranı (Monthly energy production and performance rate of monofacial PV panel) b) Çift yüzeyli FV panelin aylık enerji üretimi ve performans oranı eğrisi (Monthly energy production and performance rate curve of bifacial PV panel)

PVsyst programı tarafından elde edilen veriler arasında aylık enerji üretimleri ve sistemin performans oranları gibi kayıpların da belirtildiği önemli veriler bulunmaktadır. Şekil 4.a ve Şekil 4.b, bu verilerin görsel olarak sunulduğu grafiklerdir. Grafiklerde, sistem kayıpları yeşil renk ile, kolektör kayıpları mor renk ile ve üretilen faydalı enerji bordo renk ile gösterilmiştir. Tek yüzeyli panellerde kolektör kaybı, sistem kaybı ve üretilen faydalı enerji sırasıyla 0,78 kWh/kWp/gün, 0,13 kWh/kWp/gün ve 4,21 kWh/kWp/gün olarak ölçülmüştür. Çift yüzeyli panellerde ise, kolektör kaybı, sistem kaybı ve üretilen faydalı enerji

sırasıyla 0,21 kWh/kWp/gün, 0,15 kWh/kWp/gün ve 4,77 kWh/kWp/gün olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, çift yüzeyli panellerin tek yüzeyli panellere kıyasla daha yüksek performans ve daha az kayıp sağladığını göstermektedir. Her iki panel türünde de, modüllerin verimli çalıştığı aylar benzer olduğu için aylık artışlar ve azalmalar da benzer şekildedir. Performans oranları, tek yüzeyli panellerde 0,822 ve çift yüzeyli panellerde 0,931 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, çift yüzeyli panellerin daha yüksek performans oranlarına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu bilgi, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve performansının optimize edilmesi için kullanılabilir.



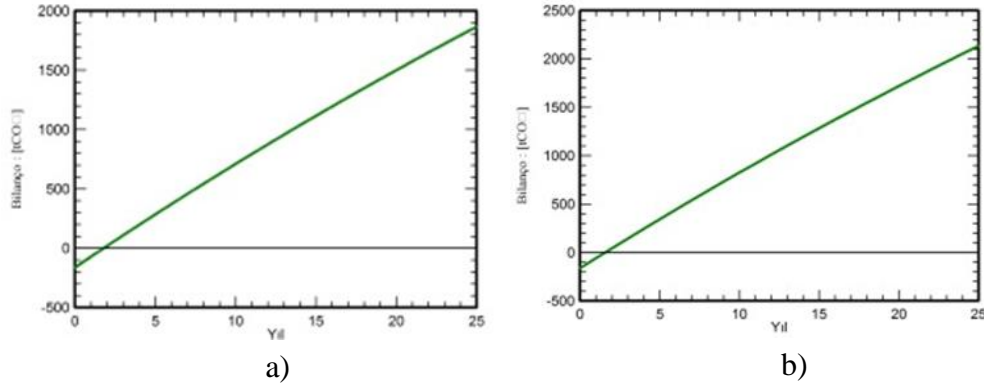
Şekil 5. a) Tek yüzeyli FV panelin kayıp diyagramı (Loss diagram of monofacial PV panel) b) Çift yüzeyli FV panelin kayıp diyagramı (Loss diagram of bifacial PV panel)

Kayıp diyagramı, güneş panellerinin güç çıkışını etkileyen faktörlerin analiz edildiği bir araçtır. Bu faktörler arasında güneş ışınlarının yoğunluğu, panel sıcaklığı, panel yüzey alanı ve özellikleri gibi çeşitli parametreler yer alır. Şekil 5.a ve Şekil 5.b, tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin kayıp diyagramlarını göstermektedir. İncelenen diyagramlara göre, her iki güneş enerjisi santralinde de  $1627 \text{ kWh/m}^2$  miktarda küresel yatay ışınım aldığı görülmektedir. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellere ulaşan ışınım sırasıyla  $1739 \text{ kWh/m}^2$  ve  $1761 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. Çift yüzeyli panel modüllerine ulaşan ışınımın daha fazla olması, arka tarafında güneş pilleri bulunması ve zemin yüzeyinin albedo etkisinden kaynaklanmaktadır. Tek yüzeyli panel sistemi,  $156,6 \text{ MWh}$  dizi enerji üretimi ve  $138,4 \text{ MWh}$  şebekeye enjekte edilen enerji sağlayacaktır. Çift yüzeyli panel sistemi ise,  $179,6 \text{ MWh}$  dizi enerji üretimi ve  $156,6 \text{ MWh}$  şebekeye enjekte edilen enerji sağlayacaktır. Bu sonuçlar, çift yüzeyli panel sisteminin tek yüzeyli panele göre daha yüksek bir dizi enerji üretimi ve şebekeye daha fazla enerji enjekte etme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu veriler, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında ve performans tahminlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Güneş paneli kayıplarının analizi, sistem verimliliğini

arttırmak için tasarım ve bakım süreçlerinde de kullanılabilir.

### 3.2. Çevresel ve Ekonomik Değerlendirme (Environmental and Economic Evaluation)

Tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panellerinin çevresel ve ekonomik analizi, PVsyst yazılımı kullanılarak yapılmıştır ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir. Şekil 6.a ve Şekil 6.b, tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panelin gelecek 25 yılda sistem için  $\text{CO}_2$  emisyonları. Bu sonuçlarına göre tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV sistemlerinin kurulmasıyla 25 yıllık proje süresince önlenen karbon emisyonu miktarları sırasıyla  $1866,462\text{-ton}$  ve  $2134,123\text{-ton}$  olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, FV sistemlerinin ürettiği elektriğin geleneksel elektrik üretim yöntemleri yerine kullanılması durumunda, kaç ton  $\text{CO}_2$  emisyonunun önlenmesine katkı sağlayacağını hesaplanması sonucu elde edilmiştir [9]-[11]. Bu sonuçlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji üretimi için önemli olduğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle, tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV sistemleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, çevre kirliliği ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilir.



**Şekil 6.** a) Tek yüzeyli FV panelin gelecek 25 yılda sistem için CO<sub>2</sub> emisyonları (CO<sub>2</sub> emissions of the monofacial PV panel for the system in the next 25 years) b) Çift yüzeyli FV panelin gelecek 25 yılda sistem için CO<sub>2</sub> emisyonları (CO<sub>2</sub> emissions of the bifacial PV panel for the system in the next 25 years)

FV panellerinin kurulumu için 20.000 € öz kaynak bulunmakta ve kalan tutar eşit taksitli 5 yıl ödemeli kredi kullanılarak tamamlanmaktadır. Kurulum maliyetleri, paneller, invertör, arazi bedeli, işçilik ve sigorta bedelleri gibi faktörler dikkate alınarak hesaplanmıştır ve tek yüzeyli paneller için toplam kurulum maliyeti 84.545 €, çift yüzeyli paneller için ise 105.451 € olarak bulunmuştur. Çift yüzeyli bir sistemin kurulum maliyeti, tek yüzeyli bir sistemin kurulum maliyetine göre yaklaşık % 20 daha yüksektir. Ayrıca, geri ödeme süresi hesaplanırken kurulum maliyetleri ve yıllık işletme maliyetleri dikkate alınmıştır. İki sistem için de çalışma ömrü 25 yıl olarak belirlenmiş ve geri ödeme süreleri, tek yüzeyli sistem için 5,8 yıl, çift yüzeyli sistem için ise 5,4 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, çift yüzeyli sistemin kurulum maliyetinin daha yüksek

olmasına rağmen, daha kısa bir geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, yatırımcılar uzun vadede daha karlı bir seçenek için çift yüzeyli panelleri tercih edebilirler.

#### 4. LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRMA (COMPARISON WITH LITERATURE)

Bu bölümde, çift yüzeyli FV panellerin önceki literatür çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda, deneysel ve sayısal çalışmalara dayalı olarak farklı FV panel tasarımları kullanılarak enerji kazanım oranları araştırılmıştır. Literatür çalışmalarında, farklı FV tasarımları ve albedo oranlarına göre enerji kazanımları Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 4'te görüldüğü gibi, bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatür çalışmaları ile uyumludur.

**Tablo 4.** Bu çalışma ile elde edilen enerji kazancı sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması (Comparison of the energy gain results obtained in this study with the literature)

Referans	Araştırma	Konum	Albedo	Eğim (°)/Yön	Enerji kazancı (%)
Bu çalışma	Simülasyon	Ankara, Türkiye	0,6	37/güney	13
Shoukry vd. [19]	Sayısal	Konstanz, Almanya	0,5	37/güney	15,98
Janssen vd. [20]	Simülasyon	Amsterdam, Hollanda	0,5	90/doğu	10,4
Pelaez vd. [21]	Deneysel	Richmond, VA, ABD	0,62	5-40/güney	10-20
Seo vd. [22]	Deneysel	Güney Kore	0,82	30/güney	14,47
Shoukry vd. [23]	Sayısal	Kasese, Uganda	0,5	-/-	17,93
Yusufoglu vd. [24]	Simülasyon	Oslo, Norveç	0,8	46/güney	16,4

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, özdeş model tek yüzeyli ve çift yüzeyli güneş panelleri kullanılarak iki ayrı güneş enerjisi santralının PVsyst simülasyon programı ile

enerji analizi yapılmış ve sonrasında çevresel ve ekonomik değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, panel tiplerinin hücre sıcaklığı ve ışınım şiddetine göre maksimum güç çıkışı, I-V eğrileri,



açık devre gerilimi ve kısa devre akımı gibi özelliklerini karşılaştırmaktadır.

• Tek yüzeyli panelde hücre sıcaklığı 10 °C'den 70 °C'ye yükseldiğinde, güç çıkışı 526,7 W'tan 417,8 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli panelde ise hücre sıcaklığı 10 °C'den 70 °C'ye yükseldiğinde, güç çıkışı 534,2 W'tan 426,9 W'a düşmüştür. Çift yüzeyli panellerin maksimum güç çıkışının tek yüzeyli panellere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur.

• Çift yüzeyli panellerin yıllık ortalama enerji üretiminin, tek yüzeyli panellere göre %13 daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Bir güneş enerjisi projesi için, çift yüzeyli panellerin tercih edilmesinin daha verimli olabileceği düşünülebilir.

• Tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV sistemlerinin kurulmasıyla 25 yıllık proje süresince önlenecek karbon emisyonu miktarları sırasıyla 1866,462 ton ve 2134,123 ton olarak belirlenmiştir. Bu sayede, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji üretimi için önemli olduğunu vurgulamaktadır.

• İki sistem için de çalışma ömrü 25 yıl olarak belirlenmiş ve geri ödeme süreleri, tek yüzeyli sistem için 5,8 yıl, çift yüzeyli sistem için ise 5,4 yıl olarak hesaplanmıştır.

• Sonuç olarak, bu çalışma çift yüzeyli güneş paneli sistemlerinin verimliliği ve çevresel faydaları nedeniyle tek yüzeyli sistemlere göre daha yaygın hale getirilmesi, sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir adım olabilir.

#### **ETİK STANDARTLARIN BEYANI** (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

#### **ÇIKAR ÇATIŞMASI** (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

#### **KAYNAKLAR** (REFERENCES)

[1] İnternet: Yeşil Mutabakat. Web: <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat> adresinden 4 Mart 2023'te alınmıştır.

[2] Aksoy M. H. ve Çalık M. K. (2022) Performance Investigation Of Bifacial Photovoltaic Panels At Different Ground Conditions. Konya Journal of Engineering Sciences, 10(3), 704–718.

[3] Morales Pedraza J. Solar energy for electricity generation. (2022). Elsevier, Non-Conventional Energy in North America. 137–174.

[4] Yük tevzi dairesi başkanlığı. (2023). Kurulu Güç Raporları -Mart 2023. <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari> adresinden erişildi.

[5] Varış, Ç. (2017). Çift eksenli güneş takip sisteminin pilot uygulaması, üretim değerlendirme ve ekonomik analizi, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13-40

[6] Baqir M. ve Channi H. K. (2022). Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software. Mater Today Proc, 48(5). 1332–1338.

[7] Khatib T. Mohamed A. ve Sopian K. (2012). A software tool for optimal sizing of PV systems in Malaysia. Modelling and Simulation in Engineering, 11.

[8] Muthu V. ve Ramadas G. (2023) Performance studies of Bifacial solar photovoltaic module installed at different orientations: Energy, Exergy, Enviroeconomic, and Exergo-Enviroeconomic analysis. Environmental Science and Pollution Research, 30, 62704–62715.

[9] Abdalla S. N. M. ve Özcan H. (2021). Design and simulation of a 1-GWp solar photovoltaic power station in Sudan. Clean Energy, 5(1), 57–78.

[10] Çalık M. K. (2023). Çift yüzeyli fotovoltaik panellerin farklı zemin koşullarında incelenmesi. <https://gcris.ktun.edu.tr/handle/20.500.13091/3519> adresinden erişildi.

[11] Prasad M. ve Prasad R. (2023). Bifacial vs monofacial grid-connected solar photovoltaic for small islands: A case study of Fiji. Renew Energy, 203, 686–702.

[12] Mohamed N. S. S. Sulaiman S. I. ve Rahim S. R. A. (2022). Design of ground-mounted grid-connected photovoltaic system with bifacial modules using Pvsyst software. J Phys Conf Ser, 2312(1), 12058.

[13] Türkdöğru E. ve Kutay M. (2022). Analysis of albedo effect in a 30-kW bifacial PV system with different ground surfaces using PVSYSY software. Journal of Energy Systems, 6(4), 543–559.

[14] Makalesi A. Akcan E. Kuncan M. ve Minaz R. (2020). Pvsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 18, 248–261.



- [15] İnternet: Meteonorm Version 8. Web: <https://meteonorm.com/meteonorm-version-8> adresinden 04 Mayıs 2023'te alınmıştır.
- [16] Garg T. P. A. Kazunari K. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2.
- [17] Roca A. (2018). Design and Modelling of a Large-Scale PV Plant. 95.
- [18] Batista R. V. F. (2018). The impact of shadowing in photovoltaic systems and how to minimizing it. 1–57.
- [19] Shoukry, I., Libal, J., Kopecek, R., Wefringhaus, E., & Werner, J. (2016). Modelling of Bifacial Gain for Stand-alone and in-field Installed Bifacial PV Modules. *Energy Procedia*, 92, 600-608.
- [20] Janssen, G. J., Van Aken, B. B., Carr, A. J., & Mewe, A. A. (2015). Outdoor Performance of Bifacial Modules by Measurements and Modelling. *Energy Procedia*, 77, 364-373.
- [21] S. A. Pelaez, C. Deline, S. M. MacAlpine, B. Marion, J. S. Stein ve R. K. Kostuk (2019). Comparison of Bifacial Solar Irradiance Model Predictions With Field Validation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(1). 82-88.
- [22] Y. Seo et al. (2019). Effect of Front Irradiance and Albedo on Bifacial Gain in 1.8kW Bifacial Silicon Photovoltaic System. *IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, ABD, 1298-1301.
- [23] Shoukry, I., Libal, J., Kopecek, R., Wefringhaus, E., & Werner, J. (2016). Modelling of Bifacial Gain for Stand-alone and in-field Installed Bifacial PV Modules. *Energy Procedia*, 92, 600-608.
- [24] U. A. Yusufoglu, T. M. Pletzer, L. J. Koduvelikulathu, C. Comparotto, R. Kopecek and H. Kurz. (2015). Analysis of the Annual Performance of Bifacial Modules and Optimization Methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 5(1). 320-328.