

Tek ve Çift Yüzeyli Fotovoltaik Sistemlerde Yüzey Temizliğinin ve Panel Yerleşim Açılarının Enerji Üretim Performansına Etkisi

Nihat PAMUK^{1*}

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak

¹<https://orcid.org/0000-0001-8980-6913>

*Sorumlu yazar: nihotpamuk@beun.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 28.03.2025

Kabul tarihi: 11.07.2025

Online Yayınlanma: 13.01.2026

Anahtar Kelimeler:

Tek ve çift yüzeyli paneller

Eğim açısı

Yüzey temizliği

PV*SOL

PVSyst

Verimlilik

ÖZ

Son yıllarda fotovoltaik (FV) enerji üretiminde teknolojik gelişmeler hızla ilerlemektedir. Bu gelişmeler, modül hücre sayısının artırılması, gelişmiş cam teknolojilerinin uygulanması ve çift yüzeyli cam kullanılarak üretilen FV modüllerinin geliştirilmesi gibi önemli yenilikleri içermektedir. Ayrıca, bu ilerlemeler, FV modüllerinin enerji üretim verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli saha uygulamalarının önünü açmıştır. Bu tür uygulamalar, kurulum maliyetinin amortisman süresini kısaltmanın yanı sıra FV modüllerinin verimliliğini de artırmaktadır. Özellikle çift yüzeyli modüller, her iki yüzeyden de güneş ışığını absorbe ederek enerji üretiminde önemli bir artış sağlamaktadır. Bu çalışmada, Ankara ili Polatlı ilçesinde belirlenen koordinatlarda, PVSyst ve PV*SOL benzetim programları kullanılarak tasarlanan 9.639,630 kWp üretim kapasiteli bir güneş enerjisi santrali analiz edilmektedir. Bu araştırmanın temel amacı, tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panellerin eğim açılarındaki değişimlerin enerji üretimine etkilerini incelemek ve tespit edilen optimum açı değerleri ile temizlik stratejilerini belirlemektir. Böylece, santralin enerji üretim kapasitesini en üst düzeye çıkarırken aynı zamanda işletme maliyetlerini düşürmek hedeflenmektedir. Bu araştırmanın bulguları, güneş enerjisi yatırımlarının hem yerel hem de ulusal düzeyde daha verimli hale getirilmesine önemli bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca, güneş enerjisi sektörüne optimal sistem konfigürasyonları ve bakım uygulamaları konusunda kritik bilgiler sunarak sektöre önemli bir kaynak oluşturacaktır.

The Impact of Surface Cleaning and Panel Placement Angles on Energy Production Performance in Monofacial and Bifacial Photovoltaic Systems

Research Article

Article History:

Received: 28.03.2025

Accepted: 11.07.2025

Published online: 13.01.2026

Keywords:

Monofacial and bifacial panels

Tilt angle

Surface cleaning

PV*SOL

PVSyst

Efficiency

ABSTRACT

In recent years, technological advancements in photovoltaic (PV) energy production have progressed rapidly. These developments include significant innovations such as increasing the number of module cells, implementing advanced glass technologies, and producing PV modules with double-sided glass. Furthermore, these advancements have facilitated various field applications aimed at enhancing the energy production efficiency of PV modules. Such applications not only shorten the amortization period of installation costs but also improve PV module efficiency. Bifacial modules, in particular, offer a notable increase in energy generation by capturing sunlight from both surfaces. In this study, a solar power plant with a production capacity of 9.639.630 kWp, designed using PVSyst and PV*SOL simulation programs at specified coordinates in the Polatlı district of Ankara Province, is analyzed. The primary objective of this research is to investigate the effects of variations in the tilt angles of unidirectional and bidirectional PV panels on energy production and to determine the optimal angles and cleaning strategies.

By doing so, the study aims to maximize the power plant's energy generation capacity while simultaneously reducing operational costs. The findings of this research will serve as a valuable resource for improving the efficiency of solar energy investments both locally and nationally. Moreover, they will contribute significantly to the solar energy sector by providing insights into optimal system configurations and maintenance practices.

To Cite: Pamuk N. Tek ve Çift Yüzeyli Fotovoltaik Sistemlerde Yüzey Temizliğinin ve Panel Yerleşim Açılarının Enerji Üretim Performansına Etkisi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 144-166.

1.Giriş

Güneş enerjisi, dünya genelindeki artan enerji talebine ve çevresel sürdürülebilirlik endişelerine karşılık olarak, en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, fotovoltaik (FV) sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme potansiyeli sunarak büyük bir önem kazanmıştır. Fotovoltaik sistemlerin temel bileşenleri, güneş panelleri, inverterler, montaj yapıları ve enerji depolama ünitelerinden oluşmaktadır (Hernández-Callejo ve ark., 2019). Geleneksel fotovoltaik paneller, yalnızca panelin ön yüzeyinde yer alan hücreler aracılığıyla enerji üretirken, çift yüzeyli fotovoltaik panellerin her iki yüzeyinde de fotovoltaik hücreler bulunmaktadır (Rajesh ve Mabel, 2015). Bu yapı, çift yüzeyli panellerin, yalnızca doğrudan güneş ışığını değil, aynı zamanda zemin yüzeyinden yansıyan ışığı da kullanarak, tek yüzeyli fotovoltaik modüllere kıyasla daha yüksek enerji üretim kapasitesine ulaşmasını sağlamaktadır.

Çift yüzeyli panellerin enerji verimliliği, kullanılan yüzey malzemeleri, çevresel faktörler ve coğrafi koşullar gibi değişkenlere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Özellikle, fotovoltaik modülün arka yüzeyine yansıyan ışığın yansımaya katsayısı, sistemin toplam enerji üretim kapasitesini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerin başında gelmektedir (Venkateswari ve Sreejith, 2019). Dolayısıyla, çift yüzeyli panellerin performansını maksimize etmek için çevresel etkenler, panelin yerleştirilme açısı ve yüzey özellikleri gibi bileşenler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir. Bu tür çok boyutlu analizler, fotovoltaik sistemlerin verimliliğini artırarak, güneş enerjisinden elde edilen elektrik üretiminin optimize edilmesine olanak tanımaktadır (Lupangu ve Bansal, 2017). Güneş enerji santralleri, hızlı bir teknolojik gelişim süreci geçirmiştir. 50W üretim potansiyeline sahip fotovoltaik (FV) modüller, günümüzde 680W üretim potansiyeline sahip modüllere dönüşmüş ve tek yüzeyli üretim yapan fotovoltaik modüllerden, çift yüzeyli üretim gerçekleştirebilen modüllere geçiş yapılmıştır (Obi ve Bass, 2016).

Santral tasarımında kullanılan fotovoltaik modül tipi, sistemin genel üretim verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür (Karakaya ve Sriwannawit, 2015). Özellikle, tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin üretim verileri incelendiğinde, çift yüzeyli panellerin güneş ışığının hem panelin ön yüzeyine hem de arka yüzeyine düşen ışıyım miktarını daha verimli bir şekilde kullanabildiği görülmektedir. Bu özellik, çift yüzeyli panellerin enerji üretiminde belirgin farklar yaratmasına neden olmaktadır. Tek yüzeyli paneller, genellikle sabit bir yerleşim açısı ile güneş ışığını toplarken, çift yüzeyli paneller ise güneşin günlük hareketlerine daha uyumlu bir şekilde tepki verebilmekte ve her iki yüzeyde de ışıyımı absorbe edebilme kapasitesine sahiptir (Pearsall, 2017). Güneş enerji santralinin kurulum aşamasında,

santral tasarımının doğruluğu yüksek benzetim programlarıyla test edilmesi oldukça önemlidir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre santral tasarımı optimize edilerek, maliyet analizleri gerçekleştirilmelidir. Gerçek santral verilerine en yakın sonuçların elde edilmesi için farklı benzetim yazılımları kullanılabilir. PVSyst ve PV*SOL gibi benzetim programları sayesinde, ekonomik analizler, yıllık enerji üretim kapasiteleri ve kablo metrajları gibi teknik veriler hesaplanarak saha uygulamalarına yönelik detaylı analizler gerçekleştirilmektedir (Baqir ve Channi, 2022).

PV*SOL ve PVSyst simülasyon programlarının kullanılması farklı coğrafi bölgelerdeki enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla güneş enerjisi sistemlerindeki bileşenlerin seçiminde ve boyutlandırılmasında etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, Ghafiri ve arkadaşları, Kanada'da bulunan Sherbrooke Üniversitesi kampüsünün elektrik ihtiyacını karşılamak üzere fotovoltaik (FV) temelli bir enerji üretim sistemi tasarlamışlardır (Ghafiri ve ark., 2020). Bu çalışmada, deneysel olarak albedo faktörünün 0,6 alındığı ağırlıklı kış koşulları altında ve yükseltinin 1 metrenin üzerinde olduğu güneş enerjisi potansiyeli, güneş ışıınımı verileri ve farklı yük koşullarına yönelik hassasiyet analizleri PVSyst simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kazanç değerinin % 10 – % 15 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Juaidi ve arkadaşları, Filistin'nin Nablus kentindeki An-Najah National Üniversitesindeki kampüsün elektrik ihtiyacını karşılamak üzere tek yüzeyli FV sistem tasarımı gerçekleştirmişlerdir. (Juaidi ve ark., 2019). Tasarlanan sistem PVSyst yazılımı ile analiz edilmiş olup, sistemde albedo faktörünün ~0,25 ve yükseklik etkisinin 1 m olduğu durumlardaki analizler gerçekleştirilmiş ve sistemin kazanç değeri % 6,8 olarak belirlenmiştir.

Türkdoğru ve arkadaşları Manisa ili, Salihli ilçesinde güneş enerjisi kaynaklarına dayalı sistemler kurarak elektrik ihtiyacını karşılamayı hedeflemişlerdir. Bu kapsamda, sistem bileşenlerinin seçimi ve boyutlandırılması için PVSyst yazılımından yararlanmışlardır (Türkdoğru ve Kutay, 2022). Yapılan analizlerde, albedo faktörünün 0,5 alındığı, yükseltinin 1,2 metre olduğu ve çalışma sonucunda kazanç değerinin % 10 – % 12 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Çoban tarafından Ardahan bölgesinde yürütülen çalışmada ise, karlı zemin koşullarında çift yüzeyli FV panellerin performansları analiz edilmiştir. Arazinin 1,5 metreden fazla kar kalınlığına sahip olup, yüksek kar yansıtması ve uygun panel yerleşimi sayesinde çift yüzeyli FV sistemlerde % 30'a kadar üretim artışı gözlemlenmiştir (Çoban, 2023). Garrod ve ekibi ise, Çin'de gerçekleştirilen geniş ölçekli saha çalışmalarında çift yüzeyli güneş panellerinin performansını yüksek yansıtıcılığa sahip zemin koşullarında incelemişlerdir. Arazi yüksekliğine bağlı albedo faktörünün 0,35 ile 0,45 aralığında değiştiği ve kar kalınlığının 1,2 metrenin üzerinde olduğu bölgelerde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel gözlemler, bu çevresel koşullarda çift yüzeyli panellerin tek yüzeyli sistemlerle karşılaştırıldığında % 9 ile % 11 oranında daha yüksek enerji üretimi sağlandığını ortaya koymuştur (Garrod ve Ghosh, 2023).

Alzahrani ve ekibi tarafından 2025 yılında yayımlanan bir çalışmada, Suudi Arabistan'ın Cidde kentinde yoğun toz birikiminin yaşandığı koşullarda farklı eğim açılara sahip FV panellerin performansları incelenmiştir. Sonuçlara göre, 25° eğim açısı yıl genelinde en yüksek enerji üretimini sağlamış; 45° eğim ise yağışlı dönemlerde panel yüzeyinin doğal temizlenmesini kolaylaştırarak verimi artırmıştır. Bu

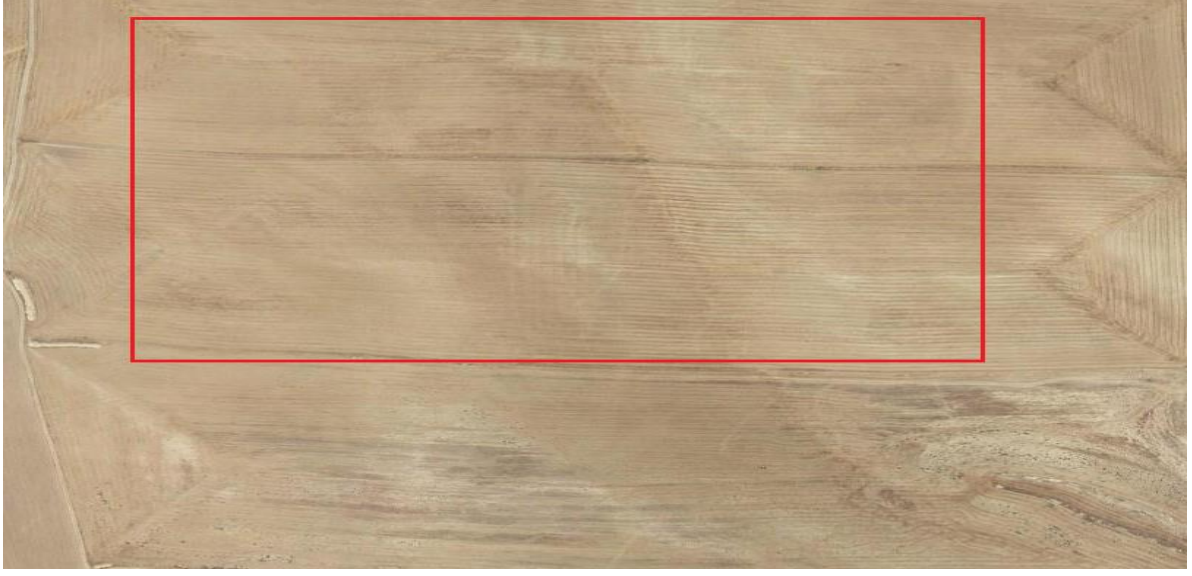
bulgular, tozlu bölgelerde eğim açısının hem enerji verimi hem de kirlilik etkisini azaltma açısından kritik olduğunu göstermektedir (Alzahrani ve ark., 2025). 2024 yılında Mısır’da yapılan bir çalışmada, FV panellere uygulanan nano kaplamalar sayesinde, kurak iklim koşullarında kısa devre akımı % 64,7 oranında artmıştır. Bu artış, toz birikimini azaltarak panel yüzeyini temiz tutma etkisinden kaynaklanmıştır. Çalışma, kurak bölgelerde kaplama teknolojilerinin FV verimini ciddi şekilde iyileştirebileceğini göstermektedir (Ahmed ve ark., 2024). 2024 yılında yapılan deneysel bir çalışmada, FV panellerin farklı eğim ve yönlerdeki performansı incelenmiş; güney yönü ve 30° eğim ile en yüksek verim elde edilmiştir. Mevsimsel eğim ayarlamalarıyla üretimin % 3 ile % 4 oranında artabileceği gösterilmiştir. Çalışma, yerel koşullara uygun açisal optimizasyonun önemini vurgulamaktadır (Kara ve ark., 2024). Türkiye’nin Adana, Ankara, Erzurum ve İstanbul gibi dört şehrinde yapılan deneysel bir çalışmada, FV paneller için yıllık optimum eğim açısı 36°–39° arasında bulunmuştur. Özellikle yaz ayları için önerilen eğim açıları, enlem değerlerinden yaklaşık 5° düşük (~enlem –5°), kış ayları için ise yaklaşık 5° yüksek (~enlem +5°) olarak ayarlanmıştır. Bu sonuçlar, sabit açılı sistemlere kıyasla daha verimli ve etkili bir FV konfigürasyonu sağlamıştır (Çağlar, 2018).

Bu çalışma ise, Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli yüksek bölgelerinden biri olan Ankara’nın Polatlı ilçesinde tek ve çift yüzeyli fotovoltaik sistemlerin performansını hem PV*SOL hem de PVSyst gibi iki farklı simülasyon yazılımı ile karşılaştırmalı olarak analiz etmesi bakımından literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Çalışmanın özgünlüğü, iki farklı yazılımın çıktılarının eğim açısına bağlı olarak sistematik biçimde karşılaştırılması, çift yüzeyli panel kazancının düşük albedo faktöründe (~0,20) ve sınırlı panel-zemin yüksekliği durumunda (<1 m) sahaya özgü koşullar altında değerlendirilmesi ve panel tozlanma etkisinin detaylı şekilde simülasyona dahil edilmesidir. Ayrıca, çalışmada hem tek yüzeyli hem de çift yüzeyli paneller için optimum eğim analizlerine yer verilmiş; bu analiz özellikle düşük albedo değerli panel yüzeylerinde çift yüzeyli panel performansının sınırlarını belirlemektedir. Literatürde sıklıkla idealize edilmiş koşullara dayalı yüksek kazançlar ortaya konurken, bu çalışma daha gerçekçi saha varsayımlarıyla elde edilen ölçülü sonuçları sunmaktadır. Bu nedenle Türkiye’deki yatırımcılar ve saha tasarımcıları için daha uygulanabilir referanslar sağlaması açısından önemlidir. Sonuçların detaylı kayıp analizleriyle desteklenmesi ve kirlilik gibi genellikle ihmal edilen verim düşürücü etkilerin vurgulanması, çalışmanın pratik yönünü güçlendirmektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada tek ve çift yüzeyli fotovoltaik modüllerin, eğim açısı değişimi ve yüzey kirlilik oranlarına bağlı olarak üretebildiği enerji miktarları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, FV sistem performans analizinde yaygın olarak kullanılan PVSyst ve PV*SOL benzetim programları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında, toplam kurulu gücü 9.639,630 kWp olan güneş enerjisi santralinin bulunduğu coğrafi bölgenin detaylı bir ön değerlendirilmesi yapılmıştır. İlk aşamada, santralin yer aldığı konumun coğrafi ve iklimsel koşulları belirlenmiş, bölgeye ait güneşlenme süresi, sıcaklık değişimleri ve rakım gibi temel parametreler ele alınmıştır. Şekil 1’de verilen Google Earth

uydu görüntüsünde, kırmızı dikdörtgen içerisine alınan 47,783 m²'lik alanda 39,38°K ve 32,12°D koordinatlarına ait iklim verileri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen verilere göre, söz konusu bölgede yıllık ortalama en yüksek sıcaklık 30,5 °C, en düşük sıcaklık ise -3,2 °C olarak kaydedilmiştir. Bölgenin ortalama günlük güneşlenme süresi 2506 Wh/m² olarak belirlenmiş olup, santralin konumlandığı alanın deniz seviyesinden yüksekliği (rakımı) 900 metre olarak tespit edilmiştir. Bu parametreler, güneş enerjisi santralının enerji üretim verimliliği açısından kritik öneme sahip olup, benzetim süreçlerinde temel girdiler olarak kullanılmıştır.



Şekil 1. Güneş enerji santralının kurulacağı alanın google earth görüntüsü

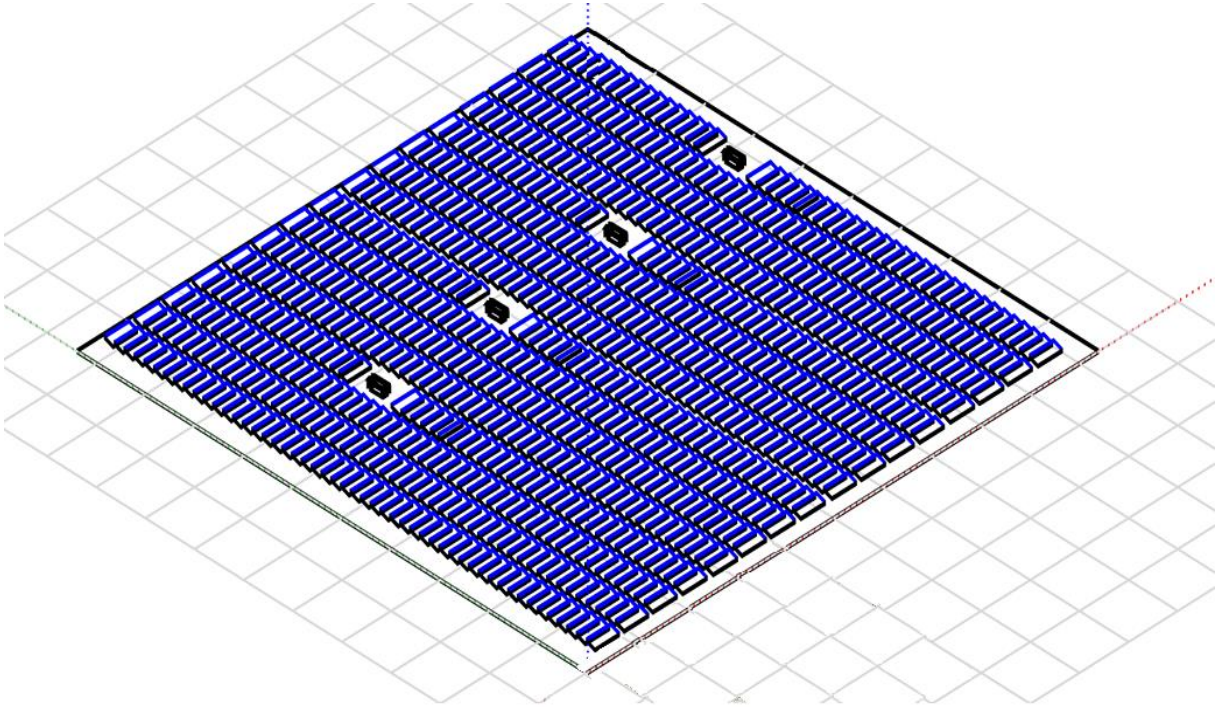
2.1. PVSyst tabanlı enerji üretim analizi

Santral tasarım sürecine, güneş enerjisi sistemlerinin simülasyonu ve performans analizi için yaygın olarak kullanılan PVSyst yazılımı aracılığıyla başlanmıştır. Bu yazılım, fotovoltaik sistemlerin tasarımı, analizi ve optimizasyonu için kapsamlı araçlar sunarak, gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Çalışmanın başlangıç aşamasında, santral kurulumu için belirlenen 39,38 °K ve 32,12 °D koordinatları sisteme tanımlanmış, ardından bu koordinatlara ait iklimsel veriler, PVSyst yazılımının entegre veri tabanlarından biri olan Meteonorm üzerinden temin edilmiştir (Mermoud ve Wittmer, 2014). Söz konusu iklimsel veriler, sıcaklık, rüzgâr hızı, güneşlenme süresi ve ışınlam değerleri gibi önemli meteorolojik parametreleri içermekte olup, santral performans analizinin doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Tasarım sürecinde, seçilen inverter ve FV modüllere uygun olarak santralin genel yerleşim planı oluşturulmuştur. Ardından, PVSyst yazılımının kritik analiz araçlarından biri olan “Gölgeleme Sahnesi” fonksiyonu kullanılarak santralin üç boyutlu (3B) modeli kurulmuştur. Bu aşamada, panel yerleşimleri, paneller arası mesafeler, string konfigürasyonları ve montaj açısı gibi parametreler sisteme girilerek, çalışma sahasının fiziksel düzeni detaylı bir şekilde modellenmiştir. Üç boyutlu modelleme süreci, santral sahasında oluşabilecek gölgeleme etkilerini tespit etmek ve bu etkileri minimize edecek düzenlemeler yapmak açısından büyük önem taşımaktadır (Irwan ve ark., 2015). Gölgeleme

kayıpları detaylı olarak hesaplanmış ve minimum seviyeye indirgenmesi amacıyla yerleşim planında gerekli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen analizler kapsamında, farklı eğim açılarında ve iki farklı FV modül seçeneği ile enerji üretim potansiyeli değerlendirilmiş, gölgelenme kayıplarının sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 2’de PVSyst yazılımındaki güneş enerjisi santralının üç boyutlu tasarımı gösterilmiştir. Üç boyutlu modelleme çıktısı, santralin fiziksel tasarımını görselleştirerek, panel konfigürasyonlarının ve gölgelendirme analizlerinin daha etkin bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece, santral tasarımının optimize edilmesi ve enerji üretim verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 2. PVSyst yazılımındaki güneş enerji santralının üç boyutlu tasarımı

2.2. FV panel tasarımı ve seçim kriterleri

PVSyst yazılımı kullanılarak tasarlanan güneş enerji santralinde, enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak amacıyla üç farklı eğim açısı değerlendirilmiştir. FV sistemlerde panel eğim açısı, güneş ışığının modül yüzeyine düşme açısını doğrudan etkileyerek enerji üretim miktarında önemli farklılıklara yol açmaktadır (Muñoz ve ark., 2017). Bu çalışma kapsamında, farklı eğim açılarının enerji üretimi üzerindeki etkilerini analiz edebilmek için, aynı tip FV modülleri kullanılarak detaylı bir performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tercih edilen FV modüller, JA Solar firmasına ait JAM66D42 ve JAM78-S30 kodlu modüllerdir. Bu modüller, aynı tür FV hücre yapısına sahip olup, her biri 585 W gücünde enerji üretim kapasitesine sahiptir (Ait Omar ve ark., 2024). Aynı teknik özelliklere sahip modüllerin kullanılması, elde edilen verilerin güvenilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini artırarak,

eğim açısına bağlı olarak enerji üretimindeki değişimlerin daha sağlıklı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Araştırmada ele alınan üç farklı açı değeri, güneş ışınlarının yıl içerisindeki değişken konumları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Eğim açısındaki değişimler, FV modüllerin gün içindeki ışıyım alma süresini ve yoğunluğunu etkileyerek, toplam enerji üretimini doğrudan şekillendirmektedir. Bu nedenle, her bir açı için ayrı ayrı gerçekleştirilen performans analizleri, FV santralının en yüksek verimlilikle çalışabileceği optimum açının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablo 1’de, çalışmada kullanılan FV modüllerin teknik özellikleri detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bu tabloda, modüllerin maksimum güç çıkışı (W), verimlilik oranı (%), açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktası gerilimi (V_{mpp}) ve maksimum güç noktası akımı (I_{mpp}) gibi temel elektriksel parametreler yer almaktadır. Söz konusu teknik veriler, FV modüllerinin performans karakteristiklerini belirlemek açısından kritik bir öneme sahiptir ve FV santrallerin tasarım aşamasında önemli bir basamak olarak kabul edilmektedir.

Modüllerin bu temel elektriksel parametreleri, farklı eğim açılarındaki enerji üretim analizlerinde kullanılarak, sistemin genel verimliliği üzerindeki etkileri belirlenmektedir. Özellikle, maksimum güç çıkışı ve verimlilik oranı, FV modüllerinin belirli bir ışıyım seviyesinde ne kadar enerji üretebileceğini belirleyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır (Kasim ve ark., 2019). Açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) gibi parametreler ise, modülün karakteristik eğrisini oluşturarak farklı çalışma koşullarındaki performansını anlamaya yardımcı olmaktadır.

Tablo 1. Santral tasarımı yapılırken kullanılan FV modüllerin teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Tek Yüzeyle Modül	Çift Yüzeyle Modül
Üretici	JA Solar	JA Solar
Model	JAM72-S30-560-585-LR	JAM66D42-565-590- MB
Maksimum Güç Çıkışı (W)	585Wp	585Wp
Hücre Sayısı	144 (72x2)	132 (6x22)
Uzunluk	2333 ± 2 mm	2278 ± 2 mm
Genişlik	1134 ± 2 mm	1134 ± 2 mm
Ağırlık	28 kg	31,8 kg
Kısa devre akımı (I_{sc})	14,56 A	15,26 A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	50,49 V	48,38 V
Maksimum güç noktası akımı (I_{mpp})	13,79 A	14,40 A
Maksimum güç noktası gerilimi (V_{mpp})	42,42 V	40,63 V
Güç Toleransı	0~+5 W	0~+5 W
Modül Verimliliği (%)	22,1	22,6

Bu teknik özelliklerin incelenmesi, FV sistemlerin tasarım ve optimizasyon süreçlerinde büyük önem taşımaktadır. Özellikle, panel eğim açısının değiştirilmesi ile modül üzerine düşen ışıyım miktarı farklılık göstereceğinden, bu parametrelerin performans analizlerinde dikkate alınması, en uygun eğim açısının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar için güvenilir bir temel sağlamaktadır. Elde edilen teknik veriler ışığında yapılan analizler, güneş enerji santralının verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler geliştirilmesine katkı sağlayarak, sistemin uzun vadeli performans optimizasyonuna yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

2.3. İnverter seçim kriterleri

Günümüzde, farklı markalara ait ve çeşitli teknik özelliklere sahip inverter modelleri bulunmaktadır. Bu inverterler, kullanım alanlarına bağlı olarak hem arazi tipi hem de çatı tipi güneş enerjisi santrallerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, inverterlerin teknik özellikleri, soğutma sistemleri, maksimum güç çıkışı, verimlilik oranları ve çalışma sıcaklık aralıkları gibi parametreler açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle büyük ölçekli arazi tipi güneş enerjisi santrallerinde, yüksek güç kapasiteli ve verimli inverterlerin kullanılması, sistem performansı ve enerji üretim kapasitesini doğrudan etkileyen kritik faktörlerden birisidir (Usah ve ark., 2020).

Verimli inverter modelinin kullanılmak istenmesi nedeniyle, arazi tipi güneş enerjisi santrallerinde en yaygın tercih edilen inverter markalarından biri olan Sungrow markası tercih edilmiştir. Sungrow inverterler ileri düzey teknik özellikleri ve güçlü servis desteği ile sektörde önemli bir yer elde etmiştir. Sungrow'un üretmiş olduğu inverterler, geniş çalışma gerilimi aralığı ve gelişmiş soğutma sistemleri ile ön plana çıkmaktadır (Dirlik ve ark., 2023). Bu nedenle tasarımı gerçekleştirilen 9.639,630 kWp kurulu güce sahip güneş enerjisi santralinde, Sungrow markasına ait SG350-HX modeli tercih edilmiştir. SG350-HX modeli, her biri 350 kW nominal güç kapasitesine sahip olup, yüksek verimlilik oranı ile enerji üretim sürecinde maksimum performans sağlamaktadır.

Santralin tasarımında inverterlerin 320 kW güç sınırında çalışması planlanmış olup, bu sayede sistemin daha dengeli ve uzun ömürlü bir şekilde işletilmesi amaçlanmıştır. Güç sınırlandırılması, inverterlerin aşırı yüklenmesini önleyerek hem güvenilirliklerini arttırmakta hem de uzun vadede bakım ve işletme maliyetlerini optimize etmektedir (Sancar ve Bayram, 2023). Sungrow SG350-HX inverter modeline ait detaylı teknik özellikler Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Sungrow SG350-HX inverterin teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Değerler
Maksimum FV giriş gerilimi	1500 V
Minimum FV giriş gerilimi / Başlangıç giriş gerilimi	500 V / 550 V
Nominal FV giriş gerilimi	1080 V
MPP Gerilim aralığı	500 V – 1500 V
MPP Nominal güçteki gerilim aralığı	860 V – 1300 V
Bağımsız MPP giriş sayısı	12
MPPT başına maksimum konnektör giriş adedi	2
Maksimum FV giriş akımı	12 * 40 A
Her bir MPPT için maksimum DC kısa-devre akımı	60 A
Nominal şebeke frekansı / Şebeke frekans aralığı	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz
Maksimum verimlilik	% 99,01
AC çıkış gücü	352 kVA @ 30 °C / 320 kVA @40 °C 295 kVA @50 °C

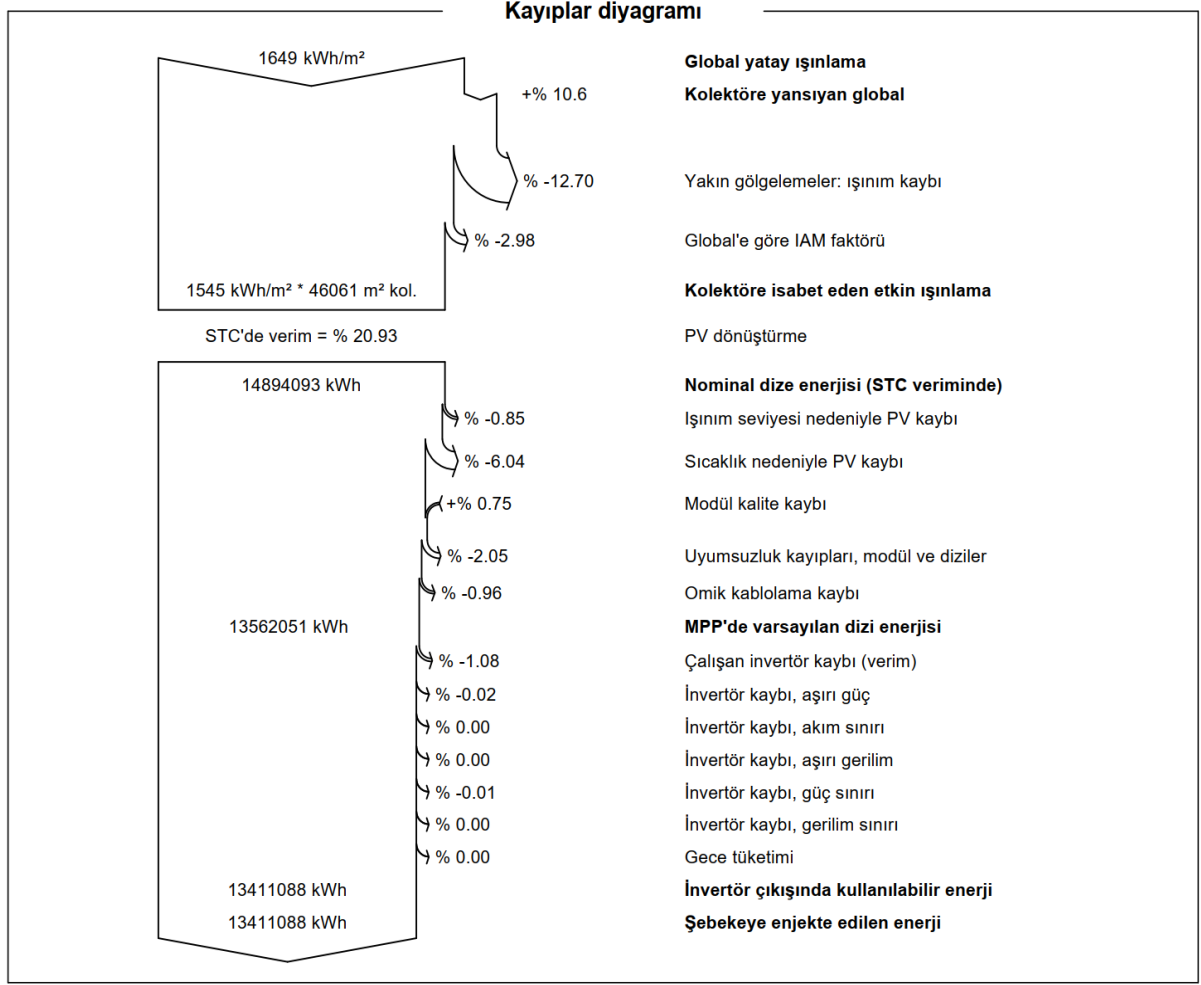
Bu teknik veriler, inverterlerin çalışma koşullarını, performansını ve enerji üretimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemli bir referans sağlamaktadır. İnverter seçiminde dikkate alınan bu teknik özellikler, güneş enerji santralinin toplam verimliliğini ve uzun vadeli işletme maliyetlerini doğrudan etkileyen faktörler arasında yer almakta olup, bu çalışmada gerçekleştirilen tasarım sürecinde kritik bir rol oynamaktadır.

2.4. PVSyst simülasyon sonuçları

Çalışmanın ilk aşamasında, güneş enerji santralinin performansını değerlendirmek amacıyla eğim açısının 20° olarak belirlendiği bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, JA Solar markasına ait 585 W gücündeki tek yüzeyli toplam 16478 adet FV modül kullanılmıştır. Seçilen FV modüller, yüksek verimlilik oranları, uzun ömürlü performansları ve zorlu çevresel koşullara karşı dayanıklılıkları ile bilinen ileri teknolojiye sahip ürünlerdir (Kayri, 2024).

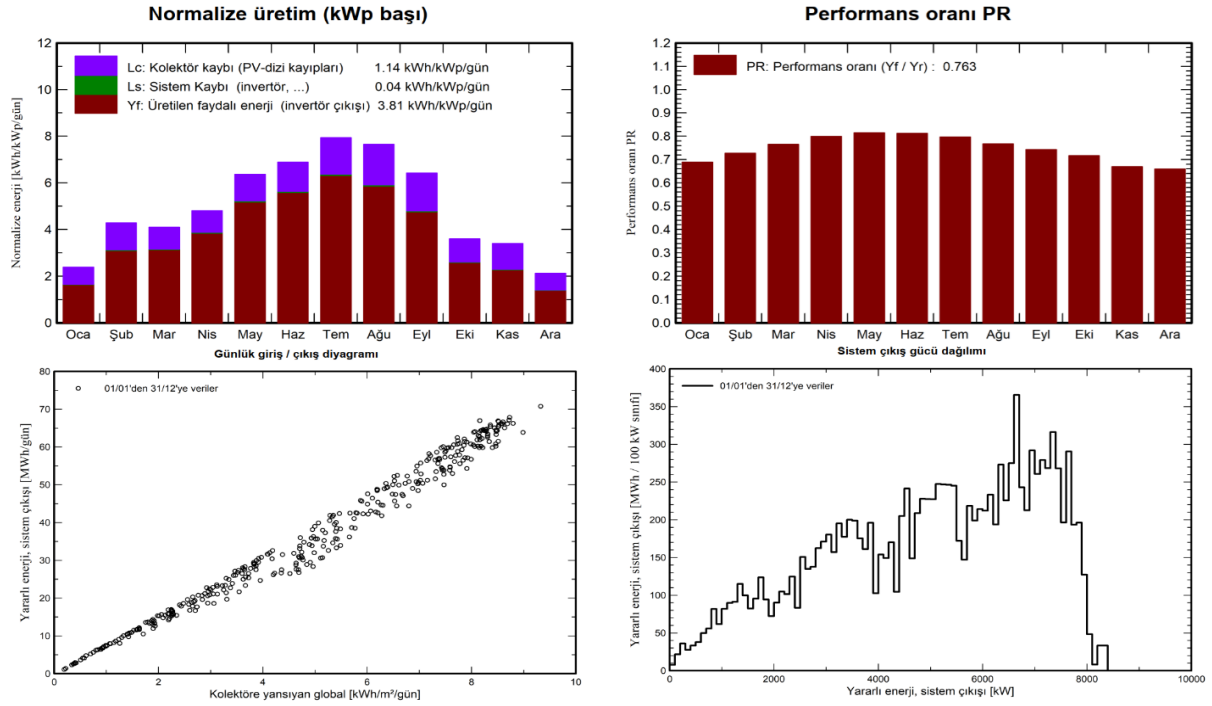
Modüller 20°'lik eğim açısı altında güneş ışığını en verimli şekilde yakalayarak, gelen ışıınımı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Eğim açısının doğru belirlenmesi, FV modüllerin gün içinde maksimum ışıınım almasını sağlamakta ve böylece enerji üretimini artırmaktadır. Ayrıca, modüllerin açısai konumlandırması, yıllık enerji üretim kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye neden olmaktadır (Faiz ve ark., 2021). Bu nedenle, simülasyon sürecinde belirlenen eğim açısının enerji üretimine olan katkısı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Şekil 3'te 20°'lik eğim açısına sahip FV panellerin simülasyon sonuçlarına ait üretim verisinin kayıp diyagramı gösterilmiştir. Bu veriler, belirlenen açi ve zaman dilimi boyunca üretilen toplam enerji miktarını, FV modüllerin ortalama verimliliğini ve kurulması planlanan santralin yıllık enerji üretimini içermektedir. Elde edilen simülasyon sonuçları, FV santralinin gerçek çalışma koşullarında nasıl bir performans sergileyebileceğini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, bu analizler, sistemin uzun vadeli enerji üretim kapasitesini optimize ederek en uygun panel eğim açısını belirlemektedir.



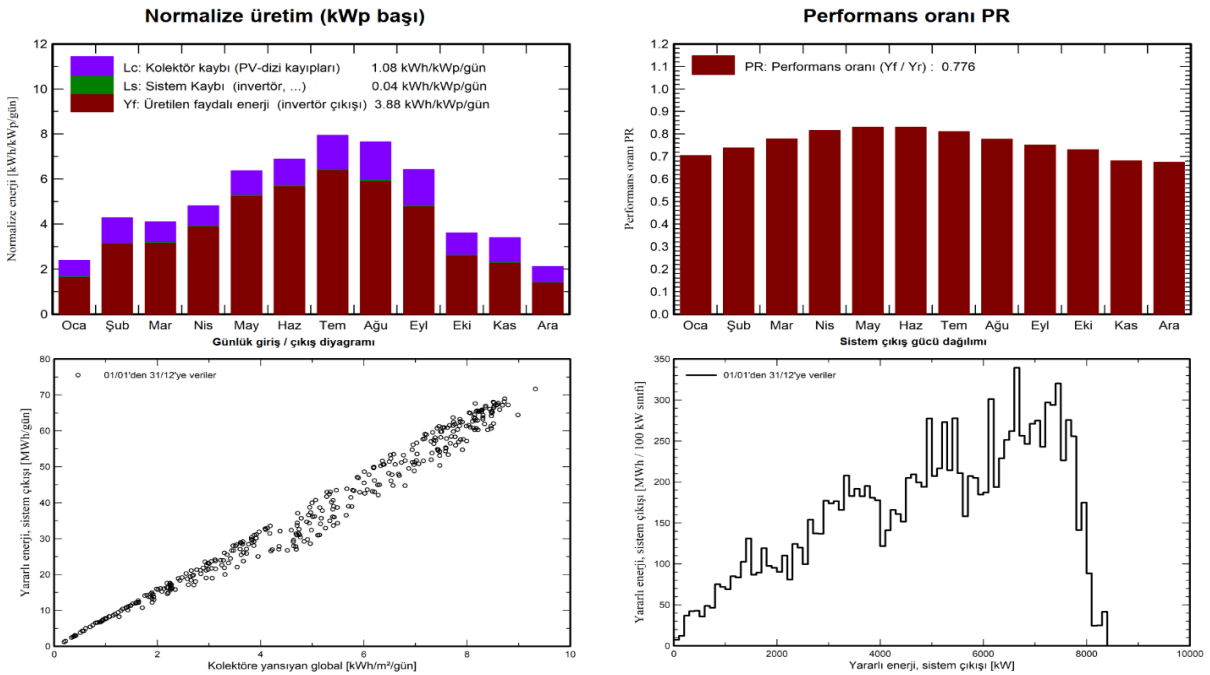
Şekil 3. 585W tek yüzeyli FV modülün 20°'lik eğim açısı altındaki üretim verisinin kayıp diyagramı

20°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı (PR), fotovoltaik sistemin gerçek enerji çıkışı (Yf), sistem kaybı (Ls) ve kolektör kaybı (Lc) değerlerinin referans enerji çıkışına oranlayarak sistemin genel verimliliği değerlendirilmektedir. Şekil 4'te FV sisteme ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4. 20°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

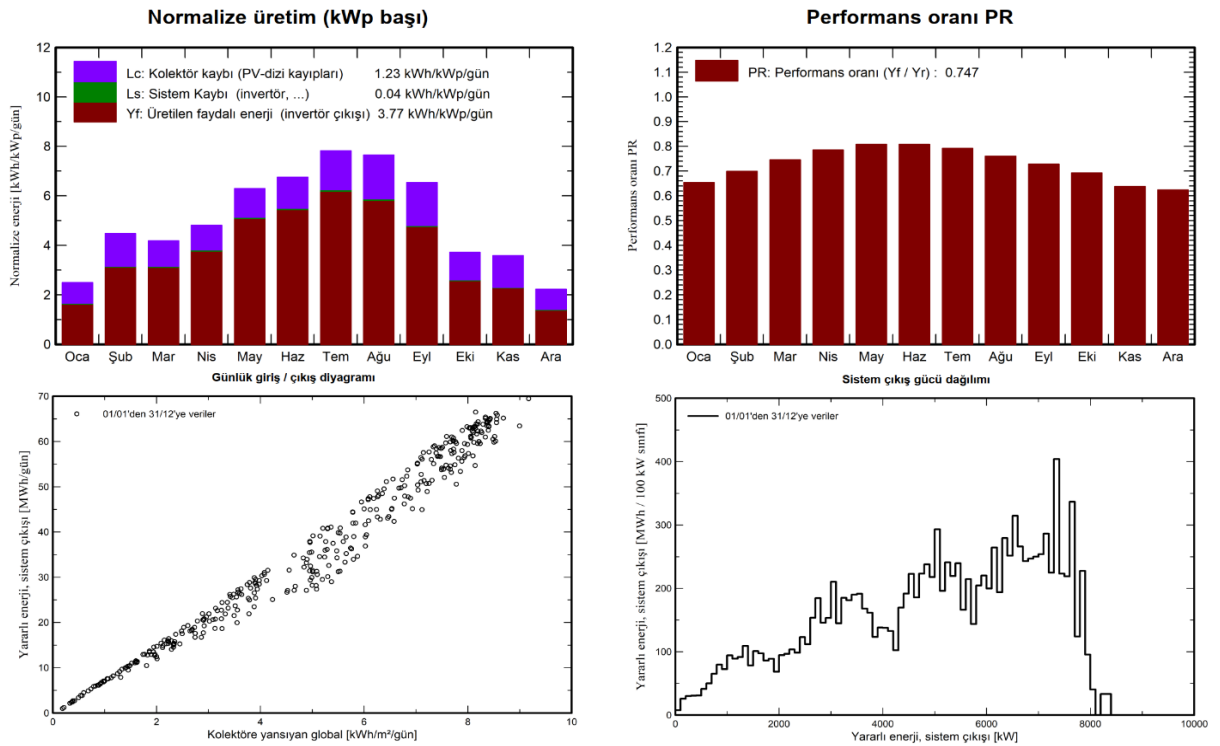
Şekil 5'te 20°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir. Sistemimizde ölçülen performans oranı değerlerinin yüksekliği, özellikle çift yüzeyli FV modüller aracılığıyla elde edilen arka yüzey kazançlarının etkisiyle oluşmaktadır.



Şekil 5. 20°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

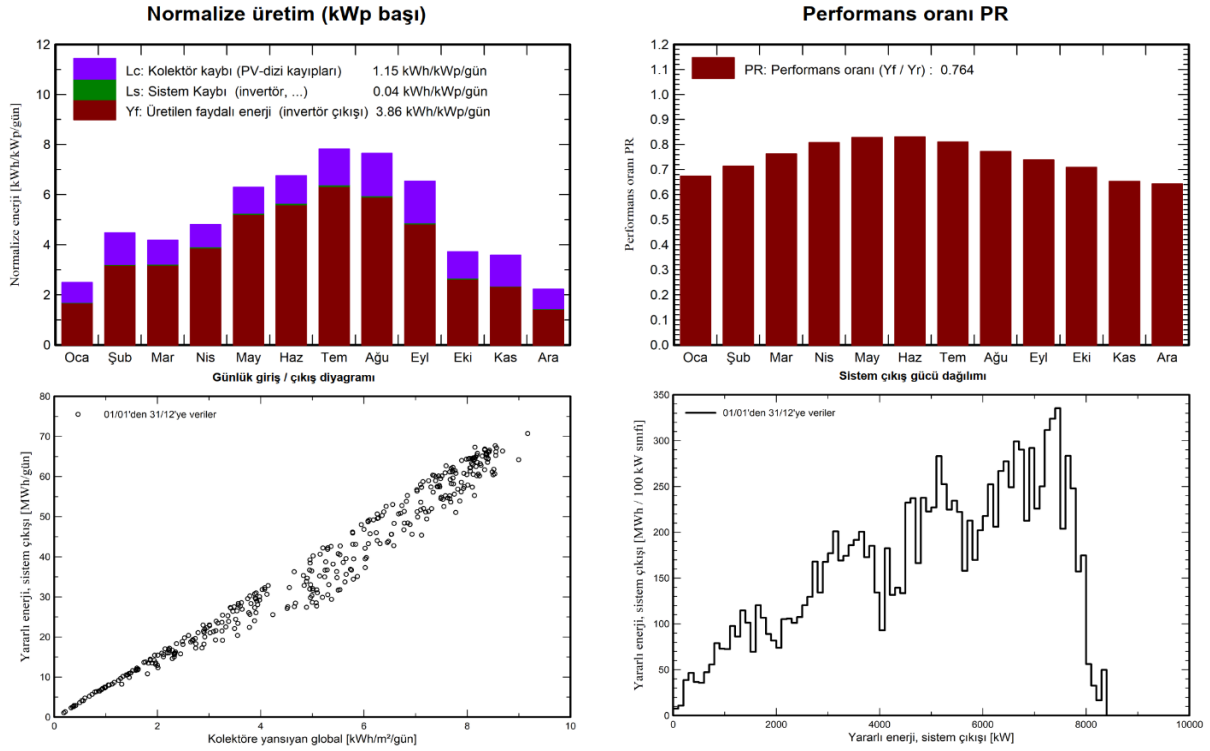
Başlangıç aşamasında, santral sahasında yapılan ölçümler sonucunda global yatay ışıınım değeri 1649 kWh/m² olarak belirlenmiştir. Ancak, güneş ışığının atmosferden geçişi ve yüzeyle etkileşimi sırasında çeşitli faktörlere bağlı olarak kayıplar meydana gelmiştir. Bu ışıınının değerlerinin % 10,6'sı doğrudan FV modüllerin kolektör yüzeyine yansımış ve modüller tarafından enerji üretimi için kullanılabilir hale gelmiştir. Ancak, santral sahasında bulunan çevresel unsurlar ve sistem bileşenlerinden kaynaklanan kayıplar nedeniyle, FV modüllerin aldığı toplam ışıınım miktarlarında azalmalar görülmüştür.

Şekil 6'da 25°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 6. 25°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

Şekil 7'de 25°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir. Sistemimizde ölçülen performans oranı değerlerinin yüksekliği, özellikle çift yüzeyli FV modüller aracılığıyla elde edilen arka yüzey kazançlarının etkisiyle oluşmaktadır.

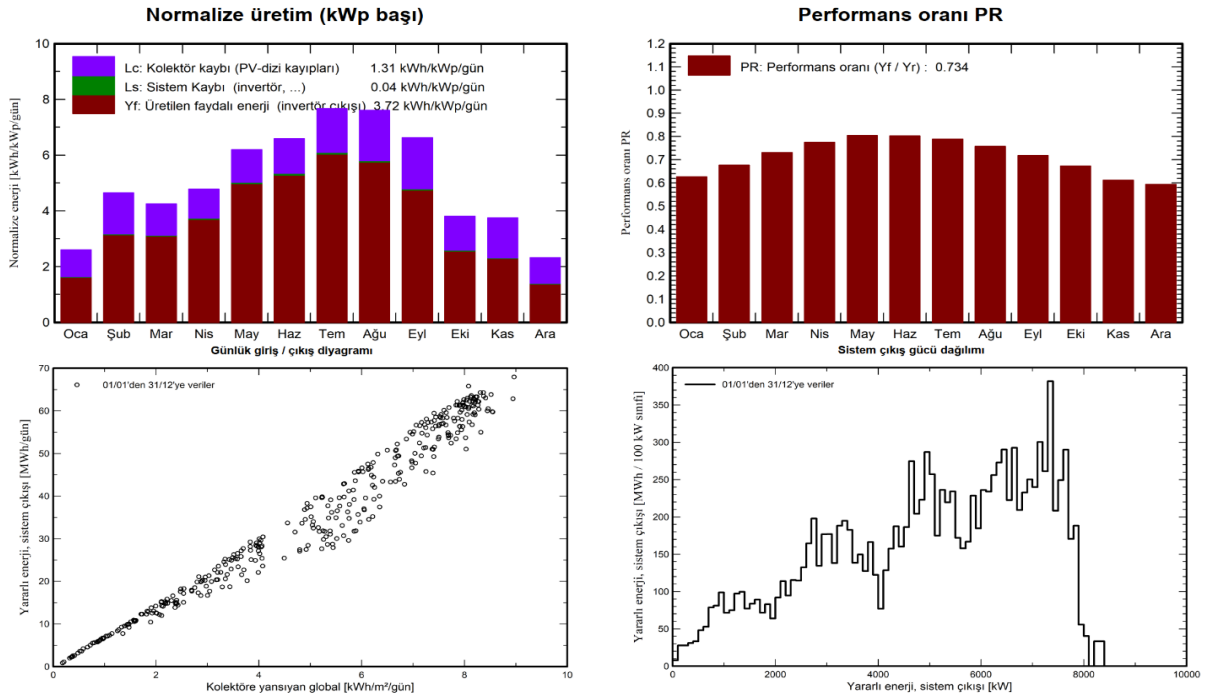


şekil 7. 25 'lik e im a ısındanki çift yüzeyli fotovoltai  modüle ait sistem grafikleri

Kayıplar arasında en belirgin faktörlerden biri, santral çevresinde yer alan nesnelerden kaynaklanan yakın gölgelenme etkisidir (Endiz ve Coşgun, 2023). Yapılan hesaplamalara göre, yakın gölgelenmeler toplam ışınımın % 12,7'sine karşılık gelen bir kayba neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, IAM (Incidence Angle Modifier – ışınım geliş açısının değişme faktörü) etkisi nedeniyle, gelen ışınımın miktarının % 2,98'lik bir kısmı kaybedilmektedir. Bu kayıpların bir sonucu olarak, başlangıçta ölçülen 1649 kWh/m 'lik global yatay ışınım değeri, FV modüllere ulaşan etkin ışınım açısından değerlendirildiğinde 1545 kWh/m  olarak hesaplanmıştır.

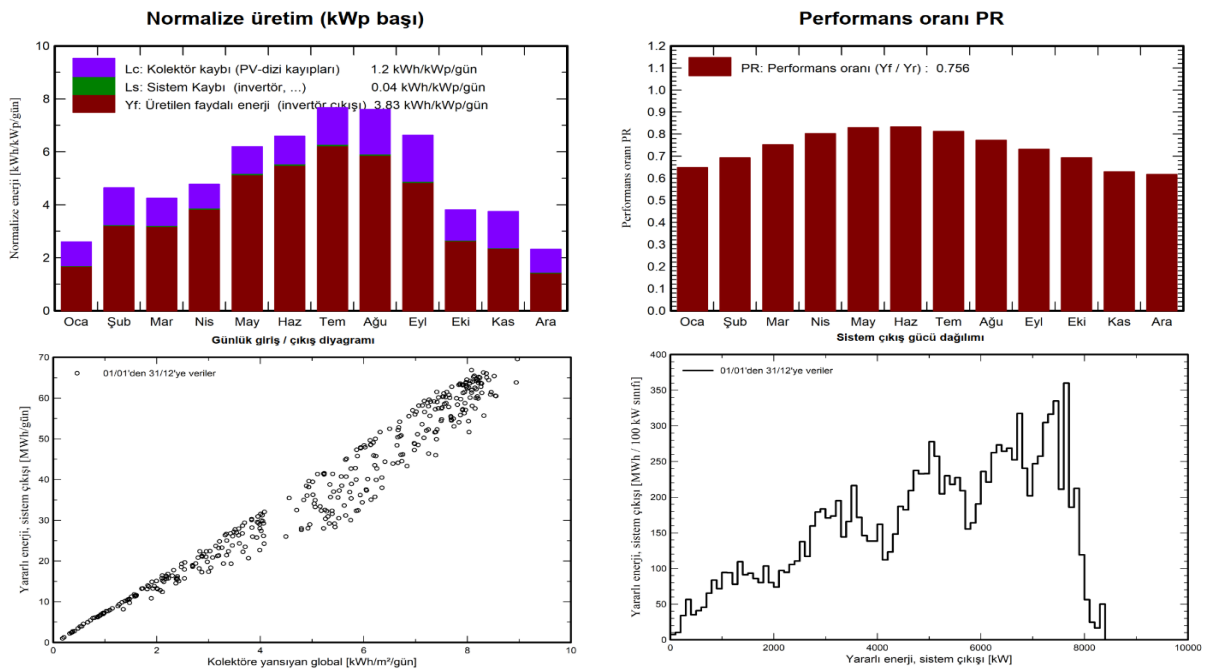
Bu etkin ışınım, FV modüller tarafından elektrik enerjisine dönüştürülerek başlangıç aşamasında 14.894,093 kWh nominal dize enerjisi elde edilmiştir. Ancak, elektrik üretim sürecinde farklı fiziksel ve teknik faktörler nedeniyle çeşitli kayıplar meydana gelmiştir. Bunlar arasında en dikkat çekici olanlardan birisi, FV modüllerin sıcaklık değişimlerinden etkilenmesi sonucunda ortaya çıkan performans kaybıdır. Modüllerin  alışma sıcaklığına bağlı olarak % 6,04 oranında bir performans kaybı gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra, FV hücreler arasındaki üretim farklılıkları ve elektriksel karakteristiklerin tam olarak örtüşmemesinden kaynaklanan uyumsuzluk kayıpları % 2,05 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, elektrik enerjisinin taşınması esnasında kablolama sisteminde meydana gelen direnç kayıpları % 0,96 oranında bir azalmaya neden olmuştur.

şekil 8'de 30 'lik e im a ısındanki tek yüzeyli fotovoltai  modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 8. 30°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

Şekil 9'da 30°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir. Sistemimizde ölçülen performans oranı değerlerinin yüksekliği, özellikle çift yüzeyli FV modüller aracılığıyla elde edilen arka yüzey kazançlarının etkisiyle oluşmaktadır.



Şekil 9. 30°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

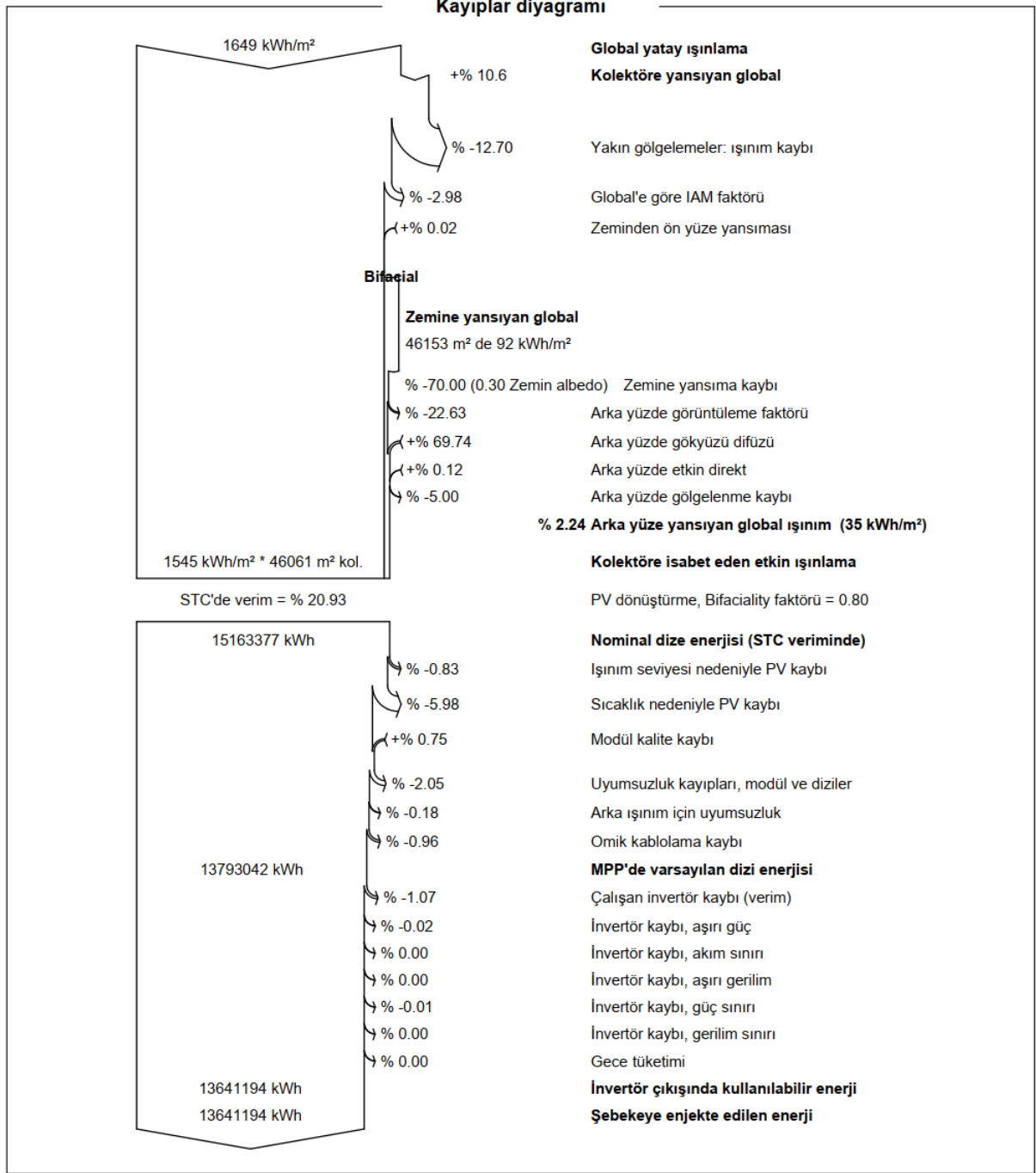
Tüm bu kayıpların etkisiyle birlikte, başlangıçta hesaplanan 14.894,093 kWh'lik nominal panel enerjisi, 13.562,051 kWh seviyesine azalmıştır. Ayrıca, invertör sistemlerinde meydana gelen verimlilik kayıpları ve santralin gece tüketimi gibi küçük ölçekli enerji kayıpları da değerlendirilmiş ve invertör çıkışlarında toplam 13.411,088 kWh gücünde enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu enerji, herhangi bir ek kayıp olmadan tamamen şebekeye iletilerek santralin toplam üretim kapasitesine katkı sağlanmıştır. Geleneksel tek yüzeyli FV modüller yalnızca ön yüzeyleri aracılığıyla güneş ışığını absorbe ederek elektrik üretirken, çift yüzeyli FV modüller hem ön hem de arka yüzeylerinden ısınım alarak daha yüksek verimlilik sağlayabilmektedir. Bu nedenle, aynı eğim açısı değerinde tek yüzeyli FV modül yerine çift yüzeyli FV modül kullanıldığında, toplam enerji üretim miktarının daha yüksek olması beklenmektedir.

Çift yüzeyli FV modüllerin sağladığı en büyük enerji üretim avantajlarından birisi de zeminden yansıyan ısınım miktarının değerlendirilebilme kapasitesidir. Gelen ısınımın miktarının bir kısmı doğrudan FV modül yüzeyine düşerken, kalan kısmı zemin tarafından yansıtılarak modülün arka yüzeyi tarafından absorbe edilmektedir. Bu yansıma oranı, zeminin reflektans özelliğine (albedo faktörüne) bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Chine ve ark., 2016). Açık renkli ve yüksek yansıtıcılığa sahip yüzeyler (örneğin beyaz çakıl taşları veya kar örtüsü), çift yüzeyli modüllerin arka yüzeyine daha fazla ısınım yönlendirebilir ve böylece enerji üretimine katkı sağlayabilirler.

Şekil 10'da enerji santrallerinde çift yüzeyli FV modüllerin kullanılması durumundaki zemine yansıyan global ısınım miktarındaki üretim verisinin kayıp diyagramı gösterilmiştir. Bu veriler, yansıyan ısınımın enerji üretimi üzerindeki katkısını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Çift yüzeyli FV modüller, bu ek ısınımı kullanarak enerji üretim kapasitelerini artırmakta ve belirli bir alan için daha yüksek verimlilik elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, çift yüzeyli FV modüllerin sağladığı ek kazanç, kurulum sahasının yüzey özellikleri, modül yüksekliği, panel aralıkları ve sistem bileşenlerinin optimizasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, yapılan simülasyon çalışmaları, çift yüzeyli FV modül kullanımının gerçek saha koşullarında sağladığı avantajları anlamak ve en uygun kurulum parametrelerini belirlemek açısından kritik bir rol oynamaktadır (Makki ve ark., 2015). Sistemdeki etkin ısınım seviyesi 1545 kWh/m² olarak belirlenmiş ve çift yüzeyli faktör 0,80 olarak hesaplanmıştır. FV dönüşüm süreci sonucunda elde edilen nominal dizi enerjisi 15.163,377 kWh olarak tespit edilmiştir.

Isınım seviyesi (% 0,83) ve sıcaklık değişimi (% 5,98) gibi çevresel faktörlerden kaynaklanan kayıplar ile, modül kalitesi (% 0,75) ve uyumsuzluk kayıpları (% 2,05) gibi unsurların etkisiyle yıllık üretilen enerji miktarı 13.793,042 kWh seviyesine düşmüştür. Buna ek olarak, arka yüzey uyumsuzluğu (% 0,18) ve omik kayıplar (% 0,96) gibi faktörler de dikkate alınmıştır. MPPT sürecinde meydana gelen invertör kaybı (% 1,07) ve gece tüketimi (% 0,01) gibi ek kayıplarda göz önünde bulundurulduğunda, invertör çıkışında elde edilen kullanılabilir enerji miktarı 13.641,194 kWh olarak hesaplanmıştır ve bu enerji miktarının tamamı şebekeye iletilmiştir. 20° eğim açısında kurulu tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV modüllerin üretim verileri simülasyon yoluyla incelenmiştir. Çevresel etkenler (ortam sıcaklığı, DC/AC

dönüşümündeki enerji kayıpları vb.) göz önüne alınarak yapılan değerlendirmede, çift yüzeyli FV modülün 20° eğim açısında tek yüzeyli FV modüle kıyasla yıllık 230,076 kWh daha fazla enerji ürettiği belirlenmiştir. Tablo 3'te, 20°, 25° ve 30° eğim açıları için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ve üretilen enerji miktarlarındaki farklılıklar gösterilmiştir.



Şekil 10. 585W çift yüzeyli FV modülün 20°'lik eğim açısı altındaki üretim verisinin kayıp diyagramı

Tablo 3. PVSyst simülasyon programı ile alınan üretim verileri

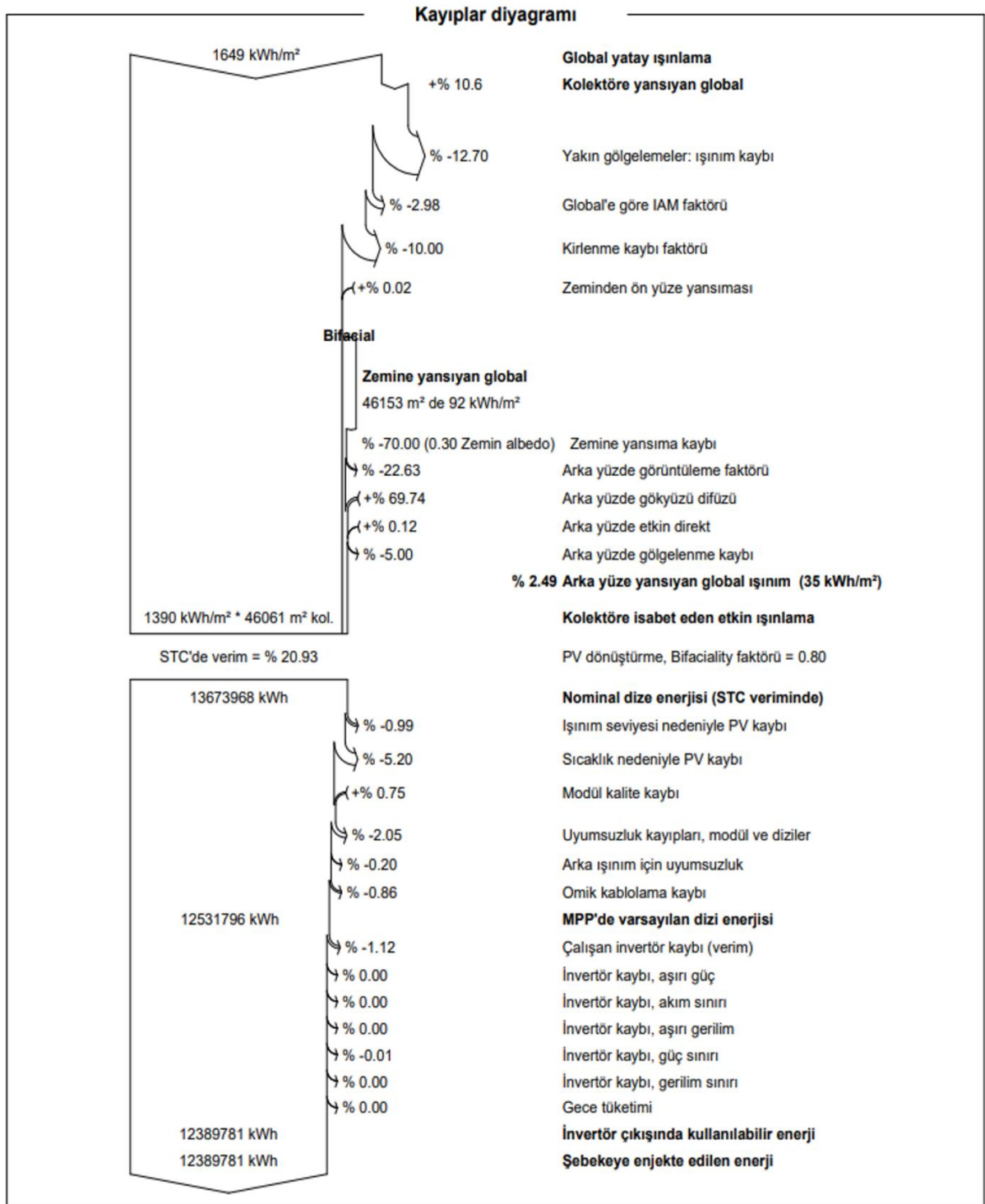
Eğim Açısı	Çift Yüzeyli Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Tek Yüzeyli Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Üretim Farkı (kWh/Yıl)
20°	13.641,194	13.411,880	230,076
25°	13.569,483	13.266,840	302,643
30°	13.471,269	13.086,034	385,235

Simülasyon sonuçları, çift yüzeyli ile tek yüzeyli fotovoltaik (FV) modüllerin enerji üretim verimliliğinin, panel eğim açısına bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tek yüzeyli paneller, yalnızca ön yüzeylerinden gelen güneş ışınımını alabilmekte iken, çift yüzeyli paneller her iki yüzeyleri aracılığıyla ışınımı emebilme kapasitesi sayesinde, özellikle düşük ışınım koşullarında arka yüzeyden yansıyan ışığın katkısıyla toplam enerji üretiminde anlamlı artış sağlamaktadır. Bu bağlamda, her iki panel türü için optimum eğim açısının farklılık göstermesi, enerji verimliliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Yapılan çalışma ile, tek yüzeyli panellerin genellikle 30-35° arası daha dik açılarla maksimum verimlilik sağlanırken, çift yüzeyli panellerin daha geniş bir açı aralığında üstün performans göstererek 20-25° eğim açılarında daha avantajlı sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca, çift yüzeyli panellerin verimliliğinin çevresel faktörlere bağlı olarak geniş bir ışınım spektrumunda iyileşme göstermesi, zemin özellikleri ve temizlik işlemleri gibi etmenlerin de üretim performansında önemli rol oynadığını göstermektedir (Pamuk, 2023).

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, en yüksek enerji üretim veriminin 20° eğim açısında ve 585 W gücündeki çift yüzeyli FV modülü ile elde edildiği tespit edilmiştir. Tablo 3'te sunulan simülasyon verileri, 20° açıda gerçekleştirilen üretimin diğer açılara göre daha verimli olduğunu göstermektedir. Şekil 11'de, yıllık %10 kirlilik oranı altında 20° eğim ve 585 W gücündeki çift yüzeyli modül ile elde edilen üretim verisinin kayıp diyagramı gösterilmiştir. Ayrıca, yıllık %20 ve %30 kirlilik oranlarının FV modüllerinin enerji üretimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tablo 4'te kirlilik oranlarına bağlı üretim kayıpları verilmiştir.

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, kirlilik oranındaki artışlar nedeniyle FV modüllerin enerji üretiminde belirgin düşüslere yol açmaktadır. Özellikle, % 10 ile % 30 kirlilik oranlarındaki elde edilen enerji üretim değerleri arasında önemli bir farklılaşma görülmektedir. FV modüllerin kurulumu aşamasında optimum eğim açısının belirlenmesinin yanı sıra, yüzey temizliğinin düzenli olarak sağlanması da enerji üretimi açısından büyük önem arz etmektedir. Artan kirlilik, modül yüzeyine ulaşan güneş ışınımını azaltarak üretim kayıplarına neden olmakta; bu nedenle, güneş enerji santrallerinde verimli bir üretim sürdürülebilirliği için periyodik modül temizliği ve düzenli bakım uygulamalarının titizlikle uygulanması gerekmektedir.



Şekil 11. 585W FV çift yüzeyli modülün 20° eğim açısında yıllık %10 kirlilik oranındaki üretim verisinin kayıp diyagramı

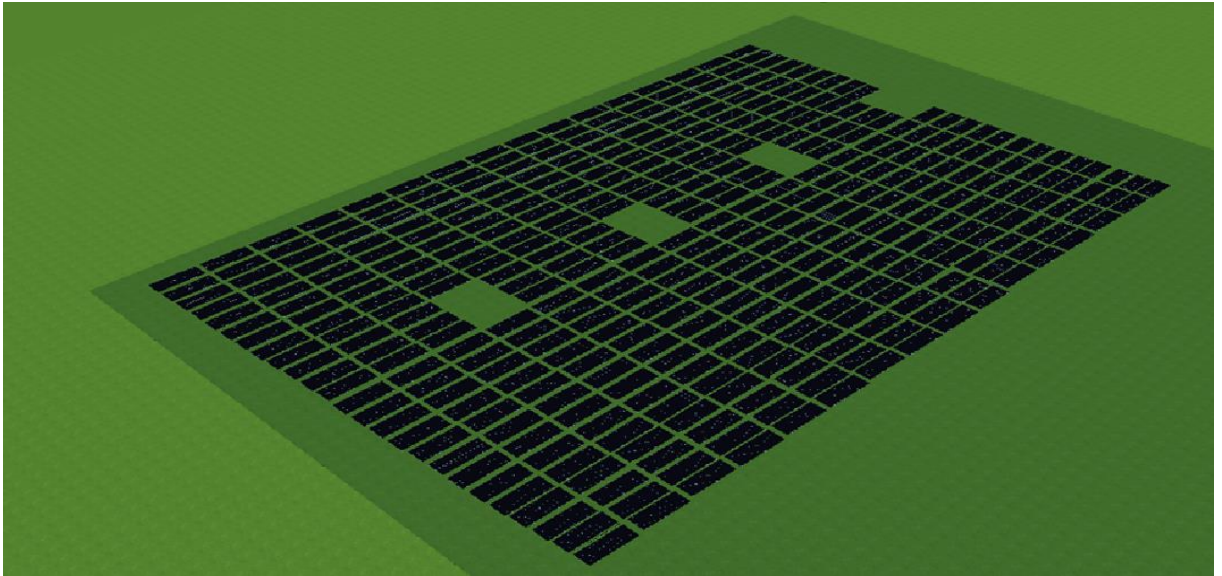
Tablo 4. Yıllık kirlilik oranında yapılan üretim ve üretim kayıpları

Yıllık Kirlilik Oranı	Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Üretilmesi Beklenen Enerji (kWh/Yıl)	Üretim Kaybı (kWh/Yıl)
%10	12.389,781	13.641,194	1.251,413
%20	11.106,393	13.641,194	2.534,801
%30	9.794,812	13.641,194	3.846,382

Artan kirlilik seviyesi modüllerin arka yüzeyine ulaşan ışınım miktarını belirgin şekilde azaltarak, bu yüzeyden elde edilen enerji katkısının düşmesine ve dolayısıyla toplam enerji üretiminin azalmasına neden olmaktadır. Simülasyon sonuçları, yıllık % 10 kirlilik oranı altında santralin 12.389,781 kWh/Yıl enerji üretebildiğini, ancak kirlilik oranının % 30'a çıkması durumunda bu değerin 9.794,812 kWh/Yıl'a kadar düştüğünü ortaya koymaktadır. Bu veriler, yüksek kirlilik oranına sahip bölgelerde FV modül yüzeylerinin düzenli temizliğinin, santralin uzun vadeli enerji üretimini artırmak ve sistem verimliliğini korumak açısından kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, santralin kurulum ve işletme süreçlerinde FV modül temizliğine yönelik etkin bir bakım programının uygulanması gerekmektedir.

3. PV*SOL Tabanlı Enerji Üretim Analizi

PV*SOL simülasyon programı, özellikle çatı uygulamaları için tercih edilen ve gölgelendirme ile ekonomik analiz gibi kritik özellikler sunan etkili bir güneş enerjisi simülasyon aracıdır (Islam ve ark., 2025). Santral tasarımı sürecinde, PVSyst programında kullanılan FV modül ve inverterlerden oluşan sistem, PV*SOL ortamında da incelenmiş olup, elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 12'de PV*SOL programında gerçekleştirilen gölgelendirme analizine dayalı santralin üç boyutlu modellenmesi gösterilmiştir.



Şekil 12. PV*SOL ortamında santralin üç boyutlu tasarımı

Bölüm 2'de belirtilen yöntem doğrultusunda hem çift yüzeyli hem de tek yüzeyli FV modüller kullanılarak farklı eğim açılarında (20°, 25° ve 30°) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar kapsamında, modüllerin performansı detaylı biçimde analiz edilmiş ve santralin maksimum verimlilikle çalışabilmesi için en uygun yerleşim düzeni ile eğim açılarının belirlenmesi sağlanmıştır. Tablo 5'de PV*SOL programından elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir. Sistemin, farklı eğim açılarında

ortaya çıkan gölgelendirme etkileri ve bu etkiler sonucunda meydana gelen üretim kayıpları gösterilmiştir.

Tablo 5. 585W çift yüzeyli ve tek yüzeyli FV modülün 20° eğim açısındaki üretim verileri (şebekeye bağlı FV sistem)

Teknik Özellikler	FV sistemi 585W Çift Yüzeyli	FV sistemi 585W Tek Yüzeyli
İklim verileri	Ankara, TUR (2001-2020)	Ankara, TUR (2001-2020)
Değerlerin kaynağı	Meteonorm 8.2	Meteonorm 8.2
FV jeneratör çıkışı	9639,63 kWp	9639,63 kWp
Sayı FV modülleri	16478-585W Çift Yüzeyli	16478-585W Tek Yüzeyli
Yıllık Özgül Kazanç	1.416,74 kWh/kWp	1.416,74 kWh/kWp
Izgara Dışa Aktarma	13.657,711 kWh/Yıl	13.335,193 kWh/Yıl
İlk yıl içindeki şebeke beslemesi	13.657,711 kWh/Yıl	13.335,193 kWh/Yıl
Önlenen CO ₂ emisyonu	6.418,697 kg/yıl	6.267,114 kg/Yıl

Simülasyon sonuçlarına göre, çift yüzeyli modüllerin şebekeye sağladığı yıllık enerji üretimi 13.657,711 kWh/Yıl, tek yüzeyli modüller için ise 13.335,193 kWh/Yıl olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, PVSyst programı çıktıları ile genel olarak uyumlu olmakla birlikte, iki program arasındaki yazılım farklılıklarından kaynaklanan belirli üretim sapmalarının olduğunu göstermiştir. Her iki simülasyon programı kapsamında elde edilen bulgular, 20° eğim açısında çift yüzeyli FV modülün üretim verisinin diğer açılara kıyasla daha üstün olduğunu göstermektedir. Tablo 6’da üç farklı eğim açısı altında gerçekleştirilen enerji üretim değerleri ve her iki tip FV modül arasındaki üretim farkları gösterilmiştir.

Tablo 6. PV*SOL simülasyon programı ile alınan üretim verileri

Eğim Açısı	Çift Yüzeyli Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Tek Yüzeyli Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Üretim Farkı (kWh/Yıl)
20°	13.657,711	13.335,193	322,518
25°	13.527,144	13.260,878	266,266
30°	13.326,858	13.115,103	211,775

Tablo 7’de 585W FV çift yüzeyli modülün 20° eğim açısında yıllık % 10 kirlilik oranındaki üretim değerleri gösterilmiştir. Tablo 8’de FV modüllerindeki kirlilik oranının yıllık enerji üretimine etkisi, yıllık %10, %20 ve %30 kirlilik oranlarında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda incelenmiş ve her bir durumda meydana gelen üretim kayıpları sunulmuştur. Kirlilik oranındaki artış, FV modüllerinin yüzeyine ulaşan güneş ışığının azalmasına yol açarak, üretim miktarında belirgin kayıplara sebep olmuştur. Özellikle, % 30 kirlilik oranı altında enerji üretiminin belirgin ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 7. 585W FV çift yüzeyli modülün 20° eğim açısında yıllık % 10 kirlilik oranındaki üretim verileri

Teknik Özellikler	Üretim Tahmini
FV jeneratör çıkışı	9.639,63 kWp
Yıllık FV Modül Kirlenme Oranı	% 10
Izgara Dışa Aktarma	12.313,190 kWh/Yıl
İlk yıl içindeki şebeke beslemesi (Modülün performans düşüşü dahil)	12.313,190 kWh/Yıl
Önlenen CO ₂ emisyonu	5.910,572 kg/Yıl

Tablo 8. Yıllık kirlilik oranında yapılan üretim ve üretim kayıpları

Yıllık Kirlilik Oranı	Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Üretilmesi Beklenen Enerji (kWh/Yıl)	Üretim Kaybı (kWh/Yıl)
%10	12.313,190	13.335,193	1.022,003
%20	10.231,683	13.335,193	3.103,510
%30	9.531,145	13.335,193	3.804,048

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, 9.639,630 kWp kurulu gücünde bir güneş enerjisi santrali tasarlanarak, tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik (FV) modüllerin performansları karşılaştırılmıştır. Santral tasarımında JA Solar markasının JAM78_585W modeline ait hem tek yüzeyli hem de çift yüzeyli modülleri tercih edilmiştir. Analizlerde PVSyst ve PV*SOL simülasyon programları kullanılmış, farklı eğim açlarına (20°, 25°, 30°) ve kirlenme oranlarına ait (% 10, % 20, % 30) senaryolar incelenmiştir. Analizler sonucunda PVSyst ve PV*SOL programları arasındaki farklar ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, her iki simülasyon programında da 20° eğime sahip çift yüzeyli modüllerin en yüksek enerji üretimini sağladığını ortaya koymuştur. 30° eğimde ise üretim kaybı belirginleşmiştir. Bu sonuçlar, eğim açısının optimize edilmesinin ve modül tipinin doğru seçilmesinin enerji üretim verimliliği açısından kritik rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca, güneş ışınlarının panel yüzeyine düşme açısını doğrudan etkileyen eğim faktörü, sistem tasarımında göz ardı edilmemesi gereken önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Kirlenme analizlerinde, panel yüzeyinde biriken toz ve partiküllerin özellikle optik performans üzerinde olumsuz etkiler yarattığı belirlenmiştir. Ön yüzeydeki kirlenme, gelen güneş ışığını engelleyerek modülün verimini düşürmekte; bu da çift yüzeyli panellerde arka yüzeyden sağlanan katkının da azalmasına yol açmaktadır. Kirlenme oranı arttıkça bu kayıplar daha belirgin hale gelmekte, sistem genelinde performans düşüşlerine neden olmaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, fotovoltaik sistemlerin sadece teknik tasarım aşamasında değil, aynı zamanda işletme sürecinde de düzenli bakım ve temizlik uygulamalarıyla desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Kurulum öncesinde gerçekleştirilecek lokasyon bazlı simülasyon analizleri, sistemin iklimsel ve çevresel koşullara en uygun şekilde yapılandırılmasına olanak sağlayarak, uzun vadeli enerji verimliliği ve operasyonel sürdürülebilirliğin temin edilmesinde önemli bir katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

- Ahmed A., Elsakka M., Elhenawy Y., Amer A., Mansi A., Bassyouni M., Gadalla M., Refaat A. Experimental investigation of a nano coating efficiency for dust mitigation on photovoltaic panels in harsh climatic conditions. Scientific Reports 2024; 14(1): 23013.
- Ait Omar O., EL Fadil H., El Fezazi NE., Oumimoun Z., Ait Errouhi A., Choukai O. Real yields and PVSYST simulations: comparative analysis based on four photovoltaic installations at Ibn Tofail University. Energy Harvesting and Systems 2024; 11(1): 20230064.

- Alzahrani M., Rahman T., Rawa M., Weddell A. Impact of dust and tilt angle on the photovoltaic performance in a desert environment. *Solar Energy* 2025; 288: 113239.
- Baqir M., Channi HK. Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software. *Materials Today: Proceedings* 2022; 48: 1332-1338.
- Chine W., Mellit A., Lughi V., Malek A., Sulligoi G., Pavan AM. A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks. *Renewable Energy* 2016; 90: 501-512.
- Çağlar A. Farklı derece-gün bölgelerindeki şehirler için optimum eğim açısının belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2018; 22(2): 849-854.
- Çoban HH. Experimental study of bifacial solar photovoltaic systems in snowy environments. 2nd International Congress on Innovation Technologies & Engineering, October 2023; 189-201.
- Dirlik EE., Gezeğin C., Mohammadi SA. Comparison of pvsyst, pvsol and homer simulation software results with real production data of solar power plants in different provinces of Turkey. *Journal of Engineering Research and Applied Science* 2023; 12(2): 2357-2364.
- Endiz MS., Coşgun AE. Assessing the potential of solar power generation in Turkey: A PESTLE analysis and comparative study of promising regions using PVsyst software. *Solar Energy* 2023; 266: 112153.
- Faiz FU., Shakoor R., Raheem A., Umer F., Rasheed N., Farhan M. Modeling and analysis of 3 MW solar photovoltaic plant using PVSyst at Islamia University of Bahawalpur, Pakistan. *International journal of Photoenergy* 2021; 2021(1): 6673448.
- Garrod A., Ghosh A. A review of bifacial solar photovoltaic applications. *Frontiers in Energy* 2023; 17(6): 704-726.
- Ghafiri S., Darnon M., Davigny A., Trovão JPF., Abbes D. A comprehensive performance evaluation of bifacial photovoltaic modules: insights from a year-long experimental study conducted in the Canadian climate. *EPJ Photovoltaics* 2024; 15(28): 1-14.
- Hernández-Callejo L., Gallardo-Saavedra S., Alonso-Gómez V. A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy* 2019; 188: 426-440.
- Irwan YM., Amelia AR., Irwanto M., Leow WZ., Gomesh N., Safwati I. Stand-alone photovoltaic (SAPV) system assessment using PVSYST software. *Energy Procedia* 2015; 79: 596-603.
- Islam MA., Ali MN., Benitez IB., Habib SS., Jamal T., Flah A., Blazek V., El-Bayeh CZ. A comprehensive evaluation of photovoltaic simulation software: A decision-making approach using Analytic Hierarchy Process and performance analysis. *Energy Strategy Reviews* 2025; 58: 101663.
- Juaidi A., Kobari M., Mallak A., Titi A., Abdallah R., Nassar M., Albatayneh A. A comparative simulation between monofacial and bifacial PV modules under palestine conditions. *Solar Compass* 2023; 8: 100059.
- Kara R., Ekici M., Yıldırım G. Fotovoltaik hücrelerin panel açılarına göre enerji verimliliği. *International Journal of Engineering Research and Development* 2024; 16(2): 573-584.

- Karakaya E., Sriwannawit P. Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015; 49: 60-66.
- Kasim NK., Hussain HH., Abed AN. Performance analysis of grid-connected CIGS PV solar system and comparison with PVsyst simulation program. *International Journal of Smart Grid* 2019; 3(4): 172-179.
- Kayri İ. Investigation of near shading losses in photovoltaic systems with PVsyst software. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 2024; 12(1): 10-19.
- Lupangu C., Bansal RC. A review of technical issues on the development of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 73: 950-965.
- Makki A., Omer S., Sabir H. Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015; 41: 658-684.
- Mermoud A., Wittmer B. PVSYST user's manual. Switzerland, 2014.
- Muñoz Y., Vargas O., Pinilla G., Vásquez J. Sizing and study of the energy production of a grid-tied photovoltaic system using PVsyst software. *Tecciencia* 2017; 12(22): 27-32.
- Obi M., Bass R. Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 58: 1082-1094.
- Pamuk N. Performance analysis of different optimization algorithms for MPPT control techniques under complex partial shading conditions in PV systems. *Energies* 2023;16(8): 3358.
- Pearsall NM. Introduction to photovoltaic system performance. In *The performance of photovoltaic (PV) systems*, Woodhead Publishing 2017; 1-19.
- Rajesh R., Mabel MC. A comprehensive review of photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015; 51: 231-248.
- Sancar MR., Bayram AB. Modeling and economic analysis of greenhouse top solar power plant with Pvsyst Software. *International Journal of Engineering and Innovative Research* 2023; 5(1): 48-59.
- Türkdoğan E., Kutay M. Analysis of albedo effect in a 30-kW bifacial PV system with different ground surfaces using PVSYST software. *Journal of Energy Systems* 2022; 6(4): 543-559.
- Usah EO., Ozuomba S., Oduobuk EJ., Ekott EE. Pvsyst software-based comparative techno-economic analysis of PV power plant for two installation sites with different climatic conditions. *International Multilingual Journal of Science and Technology* 2020; 5(7): 2819-2829.
- Venkateswari R., Sreejith S. Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019; 101: 376-394.