



FOTOVOLTAİK SİSTEM ÇIKIŞ GÜCÜNÜN YAPAY SİNİR AĞLARI VE MATLAB/SİMULİNK MODELLERİNİN ENTEGRASYONU İLE BELİRLENMESİ

Erşan Ömer YÜZER¹, Altuğ BOZKURT^{2*}, İbrahim Çağrı BARUTÇU¹

¹ Hakkâri Üniversitesi, Çölemerik MYO, Elektrik Bölümü, Hakkâri, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*PV Sistem,
Meteorolojik Veri,
Yapay Sinir Ağları,
Tahminleme,
PV Çıkış Gücü.*

Öz

PV sistemlerin çıkış gücü, temel olarak güneş ışınımına ve diğer atmosferik koşullara bağlıdır. Bu çalışmada, Türkiye'nin Güneydoğusunda yer alan Hakkâri ilinde ölçülmüş olan meteorolojik veriler, tahminleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Yapay Sinir Ağları (YSA) modelinde giriş değişkenleri olarak değerlendirilmeye alınmış olup, bu modelin çıkışında güneş ışınımının tahmin değerleri belirlenmiştir. Farklı atmosferik koşullarda maksimum gücün belirlenebilmesi için DC - DC yükseltici (boost) güç elektroniği dönüştürücüsüne uygulanan artımlı iletkenlik maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması bulunan PV sistemin Matlab / Simulink modeli göz önünde bulundurulmuştur. Gerçek güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ile YSA modelinde tahmin edilen güneş ışınımı değerleri ayrı ayrı göz önüne alınarak Matlab / Simulink ortamındaki PV sistemin çıkış güçleri hesaplanmıştır. İlk olarak gerçek güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı değerleri daha sonra ise tahmin edilen güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı değerleri, ilgili PV sistem modelinde ele alınarak belirlenen PV sistem çıkış güçleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları literatürde yaygın olarak kullanılan değerlendirme metrikleri ile hesaplanmış ve güneş ışınımı için 0,9705 ve PV sistem çıkış gücü için 0,9668 belirleme katsayısı (R^2) değeri ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

DETERMINATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM OUTPUT POWER BY INTEGRATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND MATLAB/SIMULINK MODELS

Keywords

*PV System,
Meteorological Data,
Artificial Neural Networks,
Forecasting,
PV Output Power.*

Abstract

The output power obtained from PV systems depends mainly on solar radiation and other atmospheric conditions. In this study, meteorological data measured in Hakkari province in the Southeast of Turkey has been evaluated as input parameters in the Artificial Neural Networks (ANN) model, which is widely used in the literature in forecasting studies, and the prediction values of solar radiation have been determined at the output of this model. Matlab/Simulink model of PV system with incremental conductivity maximum power point tracking (MPPT) algorithm applied to DC-DC boost power electronics converter has been considered to determine the maximum power under different atmospheric conditions. Output powers of the PV system in Matlab/Simulink environment have been calculated by considering the real solar radiation, ambient temperature and the solar radiation values estimated in the ANN model separately. First, the actual solar radiation and ambient temperature values and then the predicted solar radiation and ambient temperature values have been handled to compare the output powers in the relevant PV system model. Comparison results have been calculated with evaluation metrics commonly used in the literature, and successful results have been obtained with a determination coefficient (R^2) value of 0.9705 for solar radiation and 0.9668 for PV system output power.

* İlgili yazar / Corresponding author: abozkurt@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5834

Alıntı / Cite

Yüzer, E.Ö., Bozkurt, A., Barutçu, İ.Ç., (2023). Fotovoltaik Sistem Çıkış Gücünün Yapay Sinir Ağları ve Matlab/Simulink Modellerinin Entegrasyonu ile Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(2), 551-563.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
E.Ö. Yüzer, 0000-0002-9089-1358	Başvuru Tarihi / Submission Date	17.08.2022
A. Bozkurt, 0000-0001-6458-1260	Revizyon Tarihi / Revision Date	28.12.2022
İ.Ç. Barutçu, 0000-0001-6164-2048	Kabul Tarihi / Accepted Date	17.01.2023
	Yayın Tarihi / Published Date	28.06.2023

DETERMINATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM OUTPUT POWER BY INTEGRATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND MATLAB/SIMULINK MODELS

Erşan Ömer Yüzer¹, Altuğ Bozkurt^{2†}, İbrahim Çağrı Barutçu¹

¹ Hakkâri University, Celemerik JTC, Department of Electricity, Hakkâri, Türkiye

² Yıldız Technical University, Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electrical Engineering, Istanbul, Türkiye

Highlights

- Meteorological data measured in Hakkari province has been considered as input parameters of ANN.
- Estimation values of solar radiation have been determined at the output of ANN model.
- Matlab/Simulink model of PV system has been considered to determine the maximum power.
- PV system powers have been calculated by considering ambient temperature and radiation values.

Graphical Abstract



Figure. Geographical Location of the Meteorological Station and Arrangement of Measuring Devices

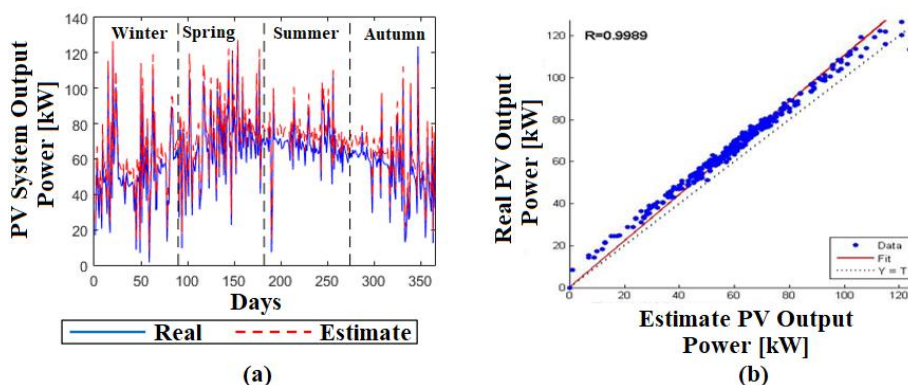


Figure. (a) Yearly PV Output Power Values, (b) Regression graph of PV Output Power

Purpose and Scope

In this study, meteorological and solar radiation data obtained in Hakkari area has been considered. The data has been handled as the input parameters of Artificial Neural Network (ANN) model. The solar radiation values have been estimated at the output of ANN model. The impact of measured ambient temperature and real and estimated solar radiation values on the photovoltaic (PV) system output power has been observed.

Design/methodology/approach

In this paper, meteorological data measured in Hakkari province in the Southeast of Turkey has been evaluated as the input parameters in the ANN model. The estimation values of solar radiation have been determined at the output of this model. Matlab/Simulink model of PV system has been considered to determine the maximum power. Output powers of the PV system in Matlab/Simulink environment have been calculated by considering ambient temperature, real and estimated solar radiation values.

Findings

Successful results have been obtained with a determination coefficient (R^2) value of 0.9705 for solar radiation and 0.9668 for PV system output power.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: abozkurt@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5834

Originality

This study has the importance in terms of considering both ANN and Matlab/Simulink models for the estimation of PV system output powers.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde önemini giderek artıran en güncel problemler arasında, fosil yakıtlardan kaynaklanan enerji bağımlılığını azaltma, hava kirliliğini ve karbondioksit yoğunluğunu sınırlama ihtiyacı önemli bir yere sahiptir. Öte yandan, nüfus artışı ve yaşam standartlarının yükselmesi, sürdürülebilir kalkınma ışığında karşılanması gereken ve artan enerji talebine yol açmaktadır (Bevilacqua vd., 2021). Toplumun ulaşım, barınma ve sağlık hizmetleri gibi temel ihtiyaçları, güncel elektrik uygulamalarının ortaya çıkmasıyla önemli ölçüde iyileşmekte ve elektrik uygulamaları için güç üretimi önemli bir araştırma alanı olmaktadır (Hao vd., 2022).

Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi çevreyi karbondan arındırmak, küresel ısınmayı sınırlamak ve artan enerji talebini karşılamak için önemli bir rol oynamaktadır (Gul vd., 2022). Son yıllarda, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi önemli bir araştırma alanı haline gelmektedir (Swarupa vd., 2021). Yenilenebilir enerji, güç talepleri ve çevresel faktörler nedeniyle hızla büyümektedir. Özellikle güneş enerjisi sistemlerinin elektrik üretimi için kullanılması artış göstermektedir (Catelani vd., 2016). Bu artış, temel olarak kömür, petrol, doğalgaz vb. gibi fosil yakıtların azalmasından kaynaklanmaktadır. Geleneksel yakıt maliyetlerinin çok hızlı artması, insanları güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarını kullanmaya motive etmektedir (Ayeng'o vd., 2019; Shankar vd., 2020). Bu nedenle, PV sistemler gibi daha güvenilir ve uzun vadeli enerji kaynaklarına geçiş için acil bir ihtiyaç bulunmaktadır (Koondhar vd., 2022). Bu durum, bölgelerin çoğunda güneş enerjisi kaynaklarının mevcut olması ve aynı zamanda toplumu onu kullanmaya çeken temiz bir kaynak olmasından kaynaklanmaktadır. PV sistem maliyetlerinin düşmesi, özellikle şebekeden bağımsız alanlarda bu sistemleri düşük gelirli kişilerin kullanımı için de daha uygun maliyetli hale getirmektedir. Elektrik enerjisi üretmek için güneş ışınımını kullanan PV sistemleri geleceğin küresel elektrik üretiminde gelişmeye devam etmektedir.

PV üretim sistemlerden elde edilen avantajları en üst düzeye çıkarmak için çeşitli teknik zorluklarını ele almak büyük önem taşımaktadır. Bu enerjiden yararlanmanın zorluğu, verimliliği yükseltmek ve üretim maliyetlerini düşürmektir. Bu sebeple, çeşitli MPPT algoritmaları, farklı güneş izleme yöntemleri ve bu yöntemler kullanılarak kazanılan enerji literatürde gözden geçirilmeye çalışılmıştır (Sumathi vd., 2017; Ali vd., 2022). PV sistemlerin çıkış gücü, güneş ışınımına ve hücre sıcaklığı koşullarına bağlıdır. Bir PV sistemi tam ışınım koşulları (1000 w/m^2) altında olduğunda, her modül tarafından üretilen güç benzer olduğundan toplam çıkış gücü ayrı ayrı modüllerin güçlerinin toplamıdır. Öte yandan, hava şartlarından kaynaklı ışınım koşullarındaki ani değişimler, PV sistemler üzerinde olumsuz etkiye sahip olup, güç kayıplarının artmasına neden olmaktadır (Chepp vd., 2021; Pachauri vd., 2022). Özellikle, sıcaklık ve güneş ışınımı değişimlerinde PV sistem güç üretiminin doğru tahmini güvenilir ve ekonomik çalışması açısından çok önemlidir (Wang vd., 2021). PV sistemlerde güç üretimi esas olarak güneş ışınım miktarına bağlıdır. Ancak ışınım mevcut hava olaylarından dolayı zaman içerisinde sürekli değişiklik gösterebilir. Bu değişkenlik ve buna bağlı olarak tahminlerdeki belirsizlik enerji sisteminin yönetimi için gereklidir ve ayrıca elektrik şebekesinin kararlılığı için de önemli bir sorundur. Bu nedenle PV sistemin çıkış gücünü belirlemeden önce güneş ışınımının belirlenmesi oldukça önemlidir.

YSA modelleri güneş ışınımını tahmin etmek için en yaygın kullanılan ve yüksek performansla sahip tahmin modelleri olarak kabul edilen güçlü araçlardır (Majumder vd., 2017). Bu yöntemler enerji sistemlerindeki hata riskini en aza indirir ve gelecekteki senaryoları modelleyerek veya simüle ederek güvenilirliklerini belirler (Lyu vd., 2014). YSA modelleri, özellikle son on yıldan beri en yaygın kullanılan güneş enerjisini tahmin yöntemlerinden biri olmuştur ve güneş enerjisini tahmin etmek için doğrusal olmayan bir istatistiksel araç olarak kullanılmaktadır. Performansı diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlar göstermektedir (Lv vd., 2019; Martín vd., 2010). YSA güneş ışınımını tahmin etmek için diğer deneysel regresyon modellerinden daha uygundur ve güneş radyasyonu verilerinin hem modellenmesi hem de öngörülmesi için kullanılabilir (Praynlin vd., 2017).

Bu çalışmada, Hakkâri bölgesinde ölçülmüş olan güneş ışınımı ve meteorolojik verileri göz önünde bulundurulmuştur. Bu veriler, YSA modelinde giriş değişkenleri olarak ele alınmış olup, bu modelin çıkışında güneş ışınımı değerleri tahmin edilmiştir. DC - DC yükseltici güç elektroniği dönüştürücüsü ara yüzü bulunan PV sistemin Matlab / Simulink modeli ele alınmıştır. Bu modelde, farklı atmosferik koşullarda maksimum gücün elde edilebilmesi için DC - DC dönüştürücüye uygulanan artımlı iletkenlik MPPT algoritması bulunmaktadır. Gerçek güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı kullanılan YSA modelinde tahmin edilen güneş ışınımı değerleri göz önünde bulundurularak Matlab / Simulink ortamındaki PV sistemin çıkış gücü elde edilmiştir. İlk olarak gerçek güneş ışınımı ile ortam sıcaklığı değerleri daha sonra ise tahmin edilen güneş ışınımı ile ortam sıcaklığı değerleri PV

sistem modelinde kullanılarak elde edilen çıkış güçleri karşılaştırılmıştır. Bu şekilde ölçülen gerçek ve tahmin edilen güneş ışınımı ile ortam sıcaklığı değerlerinin PV sistem çıkış gücüne olan etkisi gözlemlenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Çalışma Bölgesi (Study Area)

Güneş enerjisinin verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve kullanılması için, güneş enerjisi sistemleri tasarlayan mühendisler, küresel güneş ışınımının geçmişten günümüze kadar uzun süreli verilerine ihtiyaç duymaktadır (Sözen vd. 2005). Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli çok yüksektir (Sözen vd., 2004). Özellikle Akdeniz, Doğu ve İç Anadolu bölgelerinin güney kesimleri PV santrallerinin kurulumu için oldukça uygun yerlerdir.

Bu çalışma, Doğu Anadolu Bölgesinde bulunan Hakkâri ilinde elde edilen veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölgede yer alan çalışma alanı, piranometrenin yanı sıra güneş panellerinin yükseklik seviyesindeki rüzgâr hızını ölçmek için bir anemometreye ek olarak sıcaklık, bağıl nem ve basınç sensörleri ile donatılmıştır. Verilerin kayıt altına alınması, işlenmesi, modellerin gelişimi ve analiz edilmesi, Intel Xeon Silver 20 çekirdek işlemcili 2.2 GHz hız, 24 GB bellek ve 1024 Cuda içerikli Quadro P2000 ekran kartına sahip bir Workstation altında MATLAB2021a programı ile geliştirilmiştir. Meteoroloji istasyonu ile PV panellerin ve ölçüm cihazlarının düzeninin bulunduğu bölgenin konumu Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Meteoroloji istasyonunun coğrafi konumu ve ölçüm cihazlarının düzeni
(Geographical location of the meteorological station and arrangement of measuring devices)

2.2. Veri Seti (Data Set)

PV sistemlerden elde edilen güç için güneş ışınımı en önemli değişkendir. Ek olarak, ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı, rüzgâr hızı ve nem dahil olmak üzere diğer hava durumu değişkenleri, PV sistem güç çıkışını tahmin etmek için en yaygın değişkenler olarak kabul edilmektedir (Das vd., 2018). Güneş ışınım ölçümleri çalışma bölgesinde güneş panelleri üzerine monte edilen piranometre tarafından 1 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Ayrıca rüzgâr hızı, ortam sıcaklığı, bağıl nem ve atmosferik basınç değerleri de aynı konumdaki sensörler vasıtasıyla senkron olarak ölçülmüştür. Gün boyunca elde edilen dakikalık verilerin ortalaması alınarak meteorolojik verilerin günlük ortalamaları elde edilmiştir. Güneş ışınımının sıfır olduğu değerlerde PV panellerde güç üretilmediği için bu değerdeki güneş ışınım verileri çalışmada kullanılmamıştır. Tablo 1, coğrafi koordinatları, ölçülen meteorolojik bileşenleri, ölçüm periyodunu ve özelliklerini göstermektedir.

Tablo 1. Ölçüm yapılan istasyon bilgileri (Measurement station information)

Çalışma Yeri	Hakkâri Merkez
Enlem	37.571799° K
Boylam	43.724936° D
Yükseklik	1755 m
Veri Ölçüm Periyodu	01/03/2020 – 31/05/2022

Ölçülen Meteorolojik Bileşenler	Rüzgâr Hızı (m/s)
	Ortam Sıcaklığı (°C)
	Atmosferik Basınç (hPa)
	Bağıl Nem (%)
	Küresel Yatay Işınım (W/m ²)

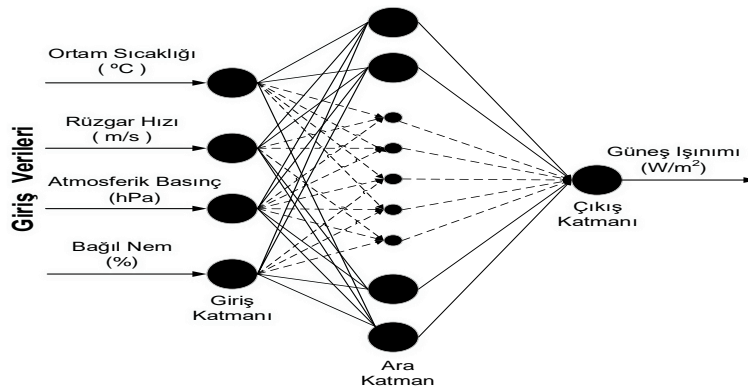
Güneş ışınımının tahmin modelini oluşturmak için 106840 adet dakikalık meteorolojik değişkenler kullanılmıştır. Bu değişkenlerden oluşan veriler iki gruba ayrılır: eğitim ve test verileri. Toplam verilerin %80'lik kısmı, modelin gelecekteki değerlerini tahmin etmek için öğrenme aşamasında kullanılır ve eğitimin her yenilemesinde veri seti rastgele belirlenir. %20'lik kısmı ise test verileri olarak güneş ışınımı tahmin modelini doğrulamak için kullanılmıştır.

2.3. Tahminleme modeli (Prediction Model)

PV sistemden elde edilen güç ile güneş ışınım tahmini de dâhil olmak üzere farklı tahmin uygulamalarında kullanılan YSA, yüksek başarı düzeyine sahiptir. Meteorolojik verilerin doğrusal olmaması nedeniyle çoğu araştırmacı güneş ışınımı ve PV sistemden üretilen gücün tahmininde YSA modellerini yaygın olarak kullanmaktadır (Das vd., 2018). Doğrusal olmayan fonksiyonlara yüksek doğrulukla yaklaşma konusunda benzersiz bir yeteneğe sahip olan YSA, meteorolojik tahminler, finans, fizik, mühendislik ve tıp gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Ahmed vd., 2020). Bu yaklaşım yeteneği nedeniyle YSA, güneş enerjisi ile ilgili tahminleme çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang vd., 2020).

YSA'nın ana bileşenleri yapay nöronlar ve bağlantılardan oluşan giriş katmanı, ara katman ve çıkış katmanıdır. Giriş katmanında kullanılan değişkenler, tahmin modellerinin doğruluğu üzerinde doğrudan etkiye sahiptir ve model performansının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Tek veya birkaç katmandan oluşabilen ara katman, giriş bilgilerini analiz eder. Güneş ışınımının tahmin edildiği çıktı katmanı, giriş ve ara katmanda analiz edilen sonuçları alır ve w/m² cinsinden güneş ışınım değerini verir (Das vd., 2017; Wang vd., 2015). Ayrıca bir YSA, çok sayıda düğümden ve bunların bağlantılarından oluşur. Her düğüm, etkinleştirme işlevi olarak adlandırılan belirli bir çıktı işlevini uygular (Deo vd., 2017).

Bir yapay sinir ağı tasarlama sürecinde veri seçimi tartışmasız en önemli adımdır. Öğrenme için kullanılan veri tabanının en yüksek doğruluğa sahip olması, sinir ağının performansı için esastır. Ağın tasarımı, değişkenleri düzeltmek için bir deneme yanılma sürecini takip ettiğinden, nihai ağın uygulanabilmesi için birçok düzenlemenin yapılması gerekir. Yapılabilecek düzenlemeler, ara katmandaki nöronların sayısını veya ağın zaman gecikmesini ayarlamayı içerir (Rodríguez vd., 2018). Şekil 2, PV güç üretiminde en etkili değişken olan güneş ışınım tahmininde kullanılan YSA modelini göstermektedir.



Şekil 2. Tek ara katmanlı YSA mimarisi (Single-layer ANN architecture)

YSA modelinde her giriş bir bağlantı ağırlığı ile çarpılır. En basit durumda, ürünler ve önyargılar basitçe toplanır, daha sonra bir sonuç üretmek ve son olarak bir çıktı elde etmek için bir transfer fonksiyonu aracılığıyla dönüştürülür. Güneş sistemleri için girdiler çoğunlukla, güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, bağıl nem ve atmosferik basınç gibi meteorolojik değişkenlerdir. Bu değişkenler ise iklim durumuna ve coğrafi konuma bağlıdır (Das vd., 2017; Wang vd., 2015).

Çalışmada kullanılan veriler toplam veri seti içerisinde ayrıştırmak üzere 106840 adet bağımsız ölçümü içermektedir. Veri seti içerisindeki veriler rastgele seçilmiş olarak eğitim, doğrulama ve test aşamalarında kullanılmıştır. YSA

modeli 5 kez iterasyon yaptırılarak çalıştırılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Böylece rastgele seçilen veri setinin neden olacağı şans faktörünün etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan YSA modelinin tasarımına ait özellikler Tablo 2'de verilmiştir. YSA mimarisi genellikle bir giriş katmanı, ara katmanlar, bir çıkış katmanı, bağlantı ağırlıkları ve önyargıları, aktivasyon fonksiyonu ve toplama düğümünden oluşur. Bu çalışmada, giriş, ara ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmanlı geri beslemeli YSA mimarisi kullanılmıştır. Öğrenme algoritması olarak yapay sinir ağlarında sağlamış olduğu hız ve kararlılık nedeniyle Levenberg-Marquardt (trainlm) geri yayılım algoritması tercih edilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olarak, çıkışı -1 ile 1 arasında olan ve denklem 1' de belirtilen bir logsigmoid transfer fonksiyonu (logsig) kullanılmıştır.

Tablo 2. Güneş ışınım tahmininde kullanılan YSA modeli için belirlenen çalışma koşulları
(Working conditions determined for the ANN model used in solar radiation prediction)

Çalışılan ağ tipi	Çok Katmanlı Geri Yayılım Algoritması (MLP)
Eğitim fonksiyonu	Trainlm
Giriş sayısı	4
Çıkış sayısı	1
Ara katman sayısı	1
Ara katmandaki nöron sayısı	8
Transfer fonksiyonu	Logsigmoid

$$\text{Logsig} = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

2.4. PV Sistem modelinde gücün belirlenmesi (Determining the power in the PV System model)

PV sistemler yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması hususunda öne çıkan teknolojilerden biridir. PV sistemlerin uygulamaları, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız konfigürasyonlarda giderek daha yaygın hale gelmektedir. PV güç üretimi, güneş enerjisi kullanımının önemli bir şeklidir. Güneş ışınımı yoğunluğunun yüksek olduğu yerler, PV sistemlerinin yaygın kullanımı için uygundur. Bununla birlikte, güneş ışınımındaki ani değişimler, PV sistemden elde edilen güç çıkışı ve verimliliği olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, değişen atmosfer koşullarında PV sisteminden maksimum gücü elde etmek için güç elektroniği DC - DC dönüştürücüleri tarafından MPPT algoritması kullanılmalıdır. MPPT algoritmaları, bir PV üretim sisteminin güç ve verimliliğinin optimizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır.

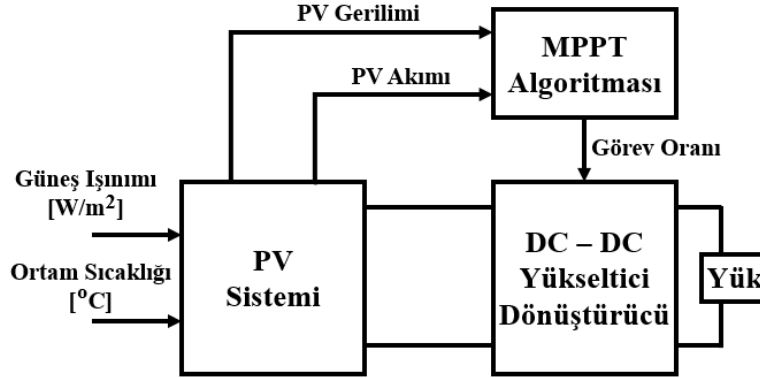
Atmosferik koşullarda değişiklik olması durumunda maksimum güç noktasının belirlenmesi için DC - DC dönüştürücüde kullanılan MPPT algoritması ile görev oranı (duty cycle) ayarlanmaktadır. Bu amaçla kullanılmak üzere birçok DC - DC dönüştürücü konfigürasyonu bulunmaktadır. DC - DC yükseltici dönüştürücü literatürde yaygın olarak kullanıldığı ve oldukça güvenilir olduğu için bu çalışmada kullanılmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan artımlı iletkenlik maksimum güç noktası izleme algoritması, PV sistemden maksimum gücü elde etmek için uygulanmıştır. Artımlı iletkenlik yöntemi, literatürdeki ilgili çalışmalarda ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Mahela vd., 2017; Loukriz vd., 2016).

Bu çalışmada, PV sistemi modeli Matlab / Simulink ortamında uygulanmıştır. PV sistemde bulunan modüllerin elektriksel özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir. PV dizide, dizi başına seri bağlı modül sayısı 5 ve paralel dizi sayısı ise 66 olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan PV sistemin toplam kurulu gücü 100 kW'tır.

Tablo 3. PV modülün elektriksel özellikleri (Electrical characteristics of the PV module)

PV modülün parametreleri	Değerler
Maksimum güç [W]	305,2
Maksimum güç noktasındaki gerilim [V]	54,7
Maksimum güç noktasındaki akım [A]	5,58
Açık devre gerilimi [V]	64,2
Kısa devre akımı [A]	5,96

Bu çalışmada kullanılan ve aynı zamanda literatürde kabul görmüş olan Matlab / Simulink ortamındaki PV sistem modelinin blok diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. İlgili PV sistem modeli göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen çalışmalarda, pratik durumda gözlenen sonuçların Matlab / Simulink PV sistem modelinde elde edilen sonuçlar ile tutarlı olduğu görülmüştür. Bu kapsamda, ilgili çalışmalarda bu model göz önüne alındığında, deneysel sonuçların yazılım ortamında elde edilen bulgular ile uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, literatürdeki çalışmalarda önerilen yöntemler, pratik açıdan bakıldığında anlamlı sonuçlar veren PV sistemin Matlab / Simulink modeli ilgili araştırmacılar tarafından uygulanmıştır (Mahela vd., 2017).

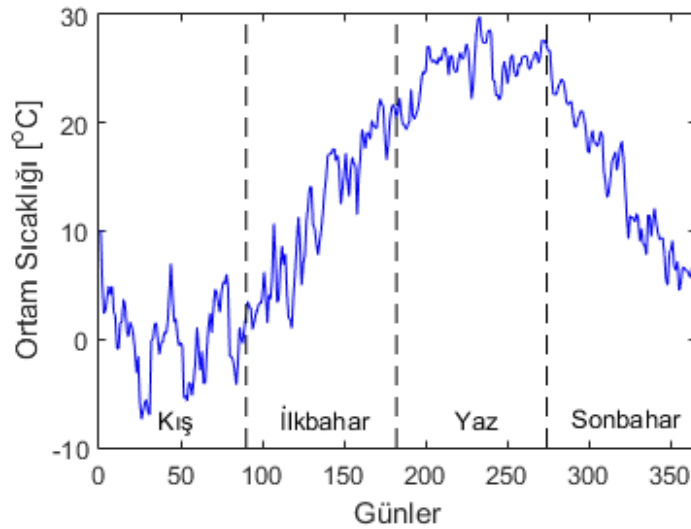


Şekil 3. PV sistem modelinin blok diyagramı (Block diagram of the PV system model)

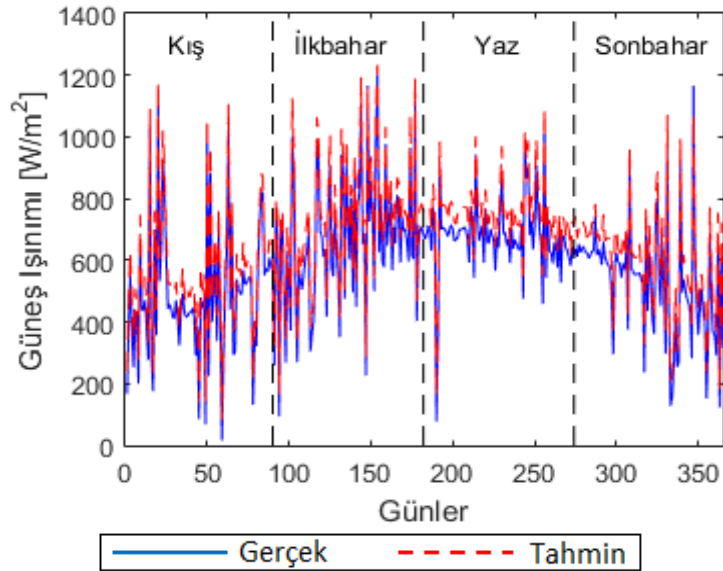
3. Bulgular (Findings)

Küresel ısınma ve sera emisyonları ile ilgili çevresel sorunlar, mühendislik camiasını giderek daha fazla yenilenebilir kaynaklar aramaya ve temiz enerji kaynaklarından yararlanabilecek yeni teknolojiler geliştirmeye sevk etmektedir. PV simülasyon araçları, PV dizisi tarafından üretilen enerji miktarını tahmin etmeyi sağlamaktadır. Güneş enerjisi en kolay elde edilebilen enerji kaynaklarından biridir ve PV sistemler kullanılarak çok temiz bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir.

Hakkâri ilinde yer alan çalışma bölgesinde kurulu bulunan meteoroloji istasyonu tarafından ölçülen güneş ışınımı ve diğer temel meteorolojik veriler göz önünde bulundurulmuştur. Bu veriler, YSA modeline giriş değişkenleri olarak uygulanmış olup, bu model yardımıyla güneş ışınımının tahmin değerleri elde edilmiştir. YSA modelinde ele alınmış olan 1 yıl boyunca ölçülen günlük ortalama sıcaklık değerlerinin değişimi Şekil 4'te sunulmuştur. Aynı zamanda, yıl boyunca günlük ortalama gerçek güneş ışınımı verileri ve YSA modeli ile elde edilmiş olan tahmini güneş ışınımı değerlerinin değişimi Şekil 5'te verilmiştir.



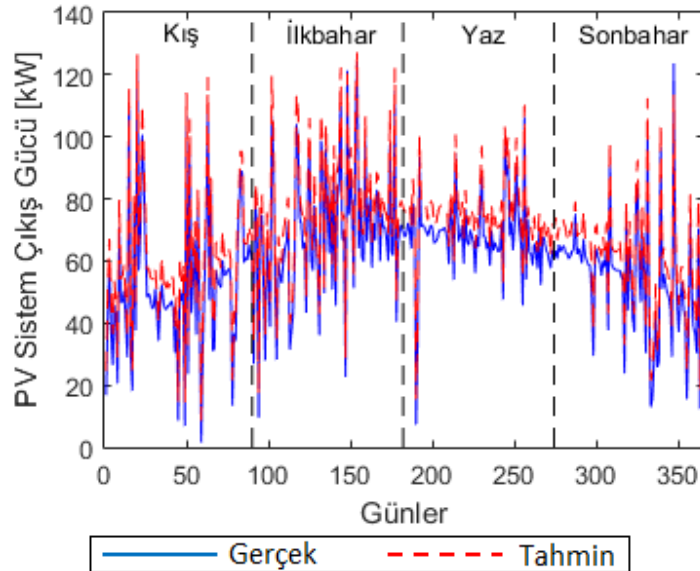
Şekil 4. Yıl boyunca günlük ortalama sıcaklık verileri (Average daily temperature data throughout the year)



Şekil 5. Yıl boyunca günlük ortalama gerçek ve tahmini güneş ışınımı değerleri
(Average daily actual and predicted solar radiation values throughout the year)

Şekil 5'te görüldüğü gibi, 1 yıl boyunca ölçülen gerçek güneş ışınımı ve YSA modelinin çıkış katmanından elde edilen tahmini güneş ışınımı değerlerine bakıldığında, gerçek verilerdeki belirsizliklere rağmen YSA modeli ile elde edilen tahmin değerlerinin yüksek oranda başarı elde ettiği saptanmıştır. Yıl boyunca günlük ışınım değerleri incelendiğinde, YSA'nın tahmin başarısındaki tutarlılığı gözlenmektedir.

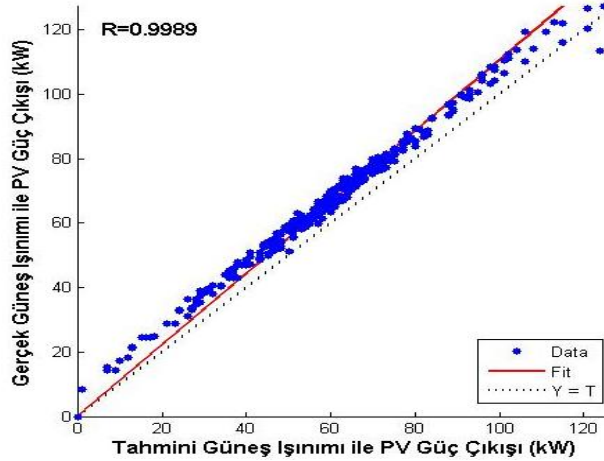
Bu çalışmada, gerçek güneş ışınımı, gerçek ortam sıcaklığı ve YSA modelinde tahmin edilen güneş ışınımı değerleri göz önünde bulundurularak Matlab / Simulink ortamındaki PV sistemin çıkış güçleri elde edilmiştir. Öncelikle gerçek güneş ışınımı ve gerçek ortam sıcaklığı değerleri daha sonra ise tahmin edilen güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı değerleri ilgili PV sistem modelinde ele alınarak belirlenen çıkış güçleri karşılaştırılmıştır. Yıl boyunca gerçek ve tahmini güneş ışınımı ile belirlenen günlük ortalama PV sistem çıkış gücü değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yıl boyunca günlük ortalama gerçek ve tahmini PV çıkış gücü değerleri
(Average daily actual and predicted PV output power values throughout the year)

Şekil 6'da, PV sistem çıkış güçleri açısından gerçek ve tahmin değerleri karşılaştırıldığında, tahmin değerlerinin kararlılığının ve gerçek değerlere yakınlığının oldukça iyi olduğu görülmüştür. Gerçek PV sistem çıkış gücü değerlerinde belirsizlikler yıl boyunca devam etmesine karşın, tahmin değerlerinin tutarlılığını ve kabul edilebilir oranda doğruluğunu sürdürdüğü gözlenmiştir.

Bir tahmin modelinin performansı, büyük ölçüde modelin girdi ve çıktı değerlerinin korelasyonuna bağlıdır. Bu durumda, güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, atmosferik basınç ve nem gibi farklı meteorolojik girdilerin PV sistem güç çıkışı ile korelasyonunun incelenmesi önemlidir. Bu çalışmada, güneş ışınımının tahmini için modellenen YSA eğitildikten sonra güneş ışınımının gerçek ve tahmin değerlerinin yanı sıra ortam sıcaklığı değerlerine bağlı olarak Matlab / Simulink ortamında yapılan simülasyon ile elde edilen PV panel gücü performansı değerlendirilmiştir. Aynı sıcaklık ortamında gerçek güneş ışınım değerleri ile tahmin edilen güneş ışınım verilerinden elde edilen PV sistem çıkış gücünün korelasyon katsayısı değeri Şekil 7'de görüldüğü gibi 0,9989 olarak hesaplanmıştır. Korelasyon sonucu, YSA modeli ile tahmin edilen güneş ışınımına bağlı PV sistem çıkış gücü ile gerçek güneş ışınımına bağlı PV sistem çıkış gücü değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, güneş ışınımına bağlı olarak elde edilen PV sistem çıkış gücünün birkaç istisna değer dışında en uygun çizgiyi takip ettiği görülmüştür.



Şekil 7. PV sistemin ürettiği güç ile elde edilen regresyon grafiği
(Regression graph obtained with power produced by PV system)

Güneş kaynaklı yenilenebilir enerjiden elde edilen gücün son kullanıcılara aktarılması süreci, güneşten gelen ışınımlardaki belirsizliklerin PV çıkış gücüne yansması sonucunda beklenen düzeyde verimle gerçekleşmeyebilmektedir. PV santralının uygun bir şekilde çalıştırılabilmesi amacıyla, bu belirsizliklerin önceden tahmini yüksek öneme sahiptir. Doğası gereği belirsizlikler barındıran ve PV sistemin yüzeyine güneşten gelen ışınımların gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilmesi, hem PV sistem hem de bu sistemin güç ilettiği yük talebi açısından oluşan problemleri avantajlara dönüştürmektedir.

3.1. Sonuçların istatistiksel değerlendirmesi (Statistical evaluation of results)

İstatistiksel olarak, literatürde modellerin doğruluğunu ve performans kapasitesini değerlendirmek için çok sayıda gösterge kullanılmıştır (Vakitbilir vd., 2022; Ağbulut vd., 2021; Obiwulu vd., 2020; Vakili vd., 2017). Bu çalışmada kullanılan performans metrikleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. İstatistiksel metriklerin detayları (Details of statistical metrics)

Metrik	Denklem	İdeal Değer
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (y_m - \hat{y}_m)^2}$	$0 \leq RMSE$
rRMSE	$rRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (y_m - \hat{y}_m)^2}}{\bar{y}_m}$	Mükemmel tahmin : $rRMSE < \%10$ İyi tahmin : $\%10 < rRMSE < \%20$ Orta tahmin : $\%20 < rRMSE < \%30$ Kötü tahmin : $rRMSE > \%30$
MAPE	$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{(y_m - \hat{y}_m)}{y_m}$	Yüksek tahmin : $MAPE \leq \%10$ İyi tahmin : $\%10 < MAPE \leq \%20$ Makul tahmin : $\%20 < MAPE \leq \%50$ Hatalı tahmin : $MAPE > \%50$
R ²	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{m=1}^N (y_m - \hat{y}_m)^2}{\sum_{m=1}^N (y_m - \bar{y}_m)^2}$	$0 < R^2 \leq 1$

Güneş ışınım ve buna bağlı olarak PV sistem çıkış gücü değerinin tahmininde kullanılan modellerin performansını belirlemek için Tablo 5'te gösterilen RMSE, rRMSE, MAPE ve R² gibi çeşitli istatistiksel göstergeler kullanılmıştır. Bu istatistik göstergelerin sonuçları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. İstatistiksel metriklerin değerleri (Values of statistical metrics)

	Günlük Ortalama Güneş Işınımı (w/m ²)	Günlük Ortalama PV Sistem Güç Çıkışı (kW)
RMSE	0,723	0,757
rRMSE (%)	12,250	12,460
MAPE (%)	15,609	16,067
R²	0,9705	0,9668

Tablo 5' te elde edilen istatistik göstergelerden, modellenen YSA ile tahmin edilen güneş ışınım verilerinin PV sistemden elde edilen güce olan etkisinin başarılı sonuçlar ortaya çıkardığı anlaşılmaktadır. Burada elde edilen sonuçların Tablo 4'te belirtilen ideal değer aralıklarında yer alması ve özellikle de güneş ışınım ve PV sistemden elde edilen güç için elde edilen istatistiksel sonuçların birbirine yakın olması her iki parametre için tahmin sonuçlarının gerçek sonuçlarla yakınsak olduğunu göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Result)

PV sistemler, günümüz dünyasında en popüler yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Bu sistemler, kentsel ve kırsal olmak üzere sayısız ortamda her yerde bulunabilmektedir. Birçok avantajı nedeniyle hem kamu hem de özel sektör bu cihazlardan enerji üretme potansiyeline büyük ilgi göstermektedir. PV teknolojisinin en büyük avantajlarından biri, düşük işletme ve bakım maliyetleri ile uzun yaşam ömrüne sahip olmasıdır. Ayrıca, bu teknoloji temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağının habercisidir. PV teknolojisinin göze çarpan bir diğer özelliği, gerektiğinde tamamen yeni bir sistem kurmak yerine modüler olmasıdır. Bu durumda, mevcut bir sistem kısa bir süre içinde yükseltilebilmektedir. Önemi nedeniyle, birçok ülkede büyük PV güç sistemleri kurulmuştur. Ancak, bu teknoloji için gerekli olan yüksek başlangıç sermayesi nedeniyle güneş enerjisinin optimum kullanımı sigortalanmalı ve kurulmadan önce PV güç sisteminin kesin çalışmaları ve simülasyonu yapılmalıdır.

Bu çalışmada, Hakkari ilinde kurulu bulunan meteoroloji istasyonu tarafından ölçülen güneş ışınımı ve diğer meteorolojik ölçüm verileri göz önüne alınmıştır. Bu veriler, YSA modelinde giriş değişkenleri olarak ele alınmış olup, bu modelden güneş ışınımı tahmin değerleri elde edilmiştir. Güneş ışınımının tahmini için modellenen YSA eğitildikten sonra güneş ışınımının gerçek ve tahmin değerlerinin yanı sıra ortam sıcaklığı değerlerine bağlı olarak Matlab / Simulink ortamında yapılan simülasyon ile elde edilen PV panel gücü performansı değerlendirilmiştir. İlk olarak gerçek güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı değerleri daha sonra ise tahmin edilen güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı değerleri ilgili PV sistem modelinde ele alınarak belirlenen çıkış güçleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda günlük ortalama güneş ışınımı değerleri tahmininde rRMSE ve MAPE değerleri sırasıyla %12,250 ve %15,609 olarak iyi tahmin sınırları arasında bulunmuştur. Ayrıca 0 ile 1 arasında ve 1 değerine yakın olması beklenen belirleme katsayısı değeri ise yaklaşık olarak 0,9705 olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde tahmin edilen güneş ışınım değerlerine bağlı olarak elde edilen günlük ortalama PV sistem güç çıkışının belirlenmesinde rRMSE ve MAPE değerleri sırasıyla %12,460 ve %16,067 olarak kabul edilen sınırlar aralığında elde edilmiştir. Ayrıca tahmini güneş ışınım değeri kullanılarak PV sistem çıkış gücünün tahmininde belirleme katsayısı 0,9668 olarak belirlenmiştir. PV sistem çıkış güçleri açısından gerçek ve tahmin değerleri karşılaştırıldığında, tahmin değerlerinin kararlılığının ve gerçek değerlere yakınlığının oldukça iyi olduğu görülmektedir. Gerçek PV sistem çıkış gücü değerlerinde belirsizlikler yıl boyunca devam etmesine karşın, tahmin değerlerinin tutarlılığını ve kabul edilebilir oranda doğruluğunu sürdürdüğü gözlenmiştir.

Tesekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde yürütülmekte olan "Bölgesel Güneş Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesinde Yeni Bir Yaklaşım" başlıklı lisansüstü tezi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ali A.I. M., Mohamed H. R. A., 2022. Improved P&O MPPT algorithm with efficient open-circuit voltage estimation for two-stage grid-integrated PV system under realistic solar radiation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 137, 107805.
- Ağbulut, Ü., Gürel, A. E., Biçen, Y., 2021. Prediction of daily global solar radiation using different machine learning algorithms: Evaluation and comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110114.
- Loukriz A., Haddadi M., Messalti S., 2016. Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems. *ISA Transactions*, 62, 30–38.
- Sozen A., Arcaklioglu E., 2005. Effect of relative humidity on solar potential. *Applied Energy*, 82 (4), 345–367.
- Sozen A., Arcaklioglu E., Ozalp M., 2004. Estimation of solar potential in Turkey by artificial neural networks using meteorological and geographical data. *Energy Conversion and Management*, 45 (18–19), 3033–3052.
- Hao D., Qi L., Tairab A. M., Ahmed A., Azam A., Luo D., Pan Y., Zhang Z., Yan J., 2022. Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: a comprehensive review. *Renewable Energy*, 188, 678–697.
- Gul E., Baldinelli G., Bartocci P., Bianchi F., Piergiovanni D., Cotana F., Wang J., 2022. A techno-economic analysis of a solar PV and DC battery storage system for a community energy sharing. *Energy*, 244, 123191.
- Chepp E. D., Krenzinger A., 2021. A methodology for prediction and assessment of shading on PV systems. *Solar Energy*, 216, 537–550.
- Praynlin E., Jenson J. I., 2017. Solar radiation forecasting using artificial neural network. In *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 1–7.
- Rodríguez F., Fleetwood A., Galarza A., Fontán L., 2018. Predicting solar energy generation through artificial neural networks using weather forecasts for microgrid control. *Renewable Energy*, 126, 855–864.
- Wang F., Zhen Z., Mi Z., Sun H., Su S., Yang G., 2015. Solar irradiance feature extraction and support vector machines based weather status pattern recognition model for short-term photovoltaic power forecasting. *Energy and Buildings*, 86, 427–438.
- Wang H., Liu Y., Zhou B., Li C., Cao G., Voropai N., Barakhtenko E., 2020. Taxonomy research of artificial intelligence for deterministic solar power forecasting. *Energy Conversion and Management*, 214, 112909.
- Majumder I., Behera M. K., Nayak N., 2017. Solar power forecasting using a hybrid EMD-ELM method. In *international conference on circuit, power and computing technologies (ICCPCT)*, 1–6.
- Lv K., Wang F., Che J., Wang W., Zhen Z., 2019. A novel solar irradiance forecast model using complex network analysis and classification modeling. In *IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 882–887.
- Lyu L., Kantardzic M., Arabmakki E., 2014. Solar irradiance forecasting by using wavelet based denoising, In *IEEE symposium on computational intelligence for engineering solutions (CIES)*, 110–116.
- Martín L., Zarzalejo L. F., Polo J., Navarro A., Marchante R., Cony M., 2010. Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: Application to solar thermal power plants energy production planning. *Solar Energy*, 84 (10), 1772–1781.
- Koondhar M. A., Laghari I. A., Asfaw B. M., Kumar R. R., Lenin A. H., 2022. Experimental and simulation-based comparative analysis of different parameters of PV module. *Scientific African*, 16, e01197.
- Swarupa M. L., Kumar E. V., Sreelatha K., 2021. Modeling and simulation of solar PV modules based inverter in MATLAB-SIMULINK for domestic cooking. *Materials Today: Proceedings*, 38, 3414–3423.
- Wang M., Xu X., Yan Z., Wang H., 2021. An online optimization method for extracting parameters of multi-parameter PV module model based on adaptive Levenberg-Marquardt algorithm. *Energy Conversion and Management*, 245, 114611.
- Catelani M., Ciani L., Kazimierczuk M. K., Reatti A., 2016. Matlab PV solar concentrator performance based on triple junction solar cell model. *Measurement*, 88, 310–317.
- Shankar N., SaravanaKumar N., 2020. Reduced partial shading effect in multiple PV array configuration model using MPPT based enhanced particle swarm optimization technique. *Microprocessors and Microsystems*, 103287.
- Obiwulu, A. U., Erusiafe, N., Olopade, M. A., Nwokolo, S. C., 2020. Modeling and optimization of back temperature models of mono-crystalline silicon modules with special focus on the effect of meteorological and geographical parameters on PV performance. *Renewable Energy*, 154, 404–431.
- Mahela O. P., Shaik A. G., 2017. Power quality recognition in distribution system with solar energy penetration using S-transform and Fuzzy C-means clustering. *Renewable Energy*, 106, 37–51.
- Bevilacqua P., Perella S., Bruno R., Arcuri N., 2021. An accurate thermal model for the PV electric generation prediction: long-term validation in different climatic conditions. *Renewable Energy*, 163, 1092–1112.
- Pachauri R. K., Thanikanti S. B., Bai J., Yadav V. K., Aljafari B., Ghosh S., Alhelou H. H., 2022. Ancient Chinese magic square-based PV array reconfiguration methodology to reduce power loss under partial shading conditions. *Energy Conversion and Management*, 253, 115148.
- Ahmed R., Sreeram V., Mishra Y., Arif M. D., 2020. A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109792.
- Deo R. C., Sahin M., 2017. Forecasting long-term global solar radiation with an ANN algorithm coupled with satellite-derived (MODIS) land surface temperature (LST) for regional locations in Queensland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 828–848.
- Ayeng'o S. P., Axelsan H., Haberschusz D., Sauer D. U., 2019. A model for direct-coupled PV systems with batteries depending on solar radiation, temperature and number of serial connected PV cells. *Solar Energy*, 183, 120–131.
- Das U. K., Tey K. S., Seyedmahmoudian M., Mekhilef S., Idris M. Y. I., Van Deventer W., Horan B., Stojcevski A., 2018. Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 912–928.

- Das U. K., Tey K. S., Seyedmahmoudian M., Idris M. Y. I., Mekhilef S., Horan B., Stojcevski A., 2017. SVR-based model to forecast PV power generation under different weather conditions. *Energies*, 10 (7), 876.
- Vakili, M., Sabbagh-Yazdi, S. R., Khosrojerdi, S., Kalhor, K., 2017. Evaluating the effect of particulate matter pollution on estimation of daily global solar radiation using artificial neural network modeling based on meteorological data. *Journal of cleaner production*, 141, 1275-1285.
- Vakitbilir, N., Hilal, A., Direkoğlu, C., 2022. Hybrid deep learning models for multivariate forecasting of global horizontal irradiation. *Neural Computing and Applications*, 34 (10), 8005-8026.
- Sumathi V., Javapragash R., Bakshi A., Akella P. K., 2017. Solar tracking methods to maximize PV system output – a review of the methods adopted in recent decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 130–138.