

Yapay sinir ağları kullanılarak fotovoltaik sistemin maksimum güç noktası takibi

Maximum power point tracking of the photovoltaic system using artificial neural networks

Leyla KARAGÖZOĞLU*¹, Zeynep Bala DURANAY¹

¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 12.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 23.06.2023

Öz

Bu çalışmada, bir fotovoltaik sistemin yapay sinir ağı kullanılarak maksimum güç noktası takibinin benzetimi yapılmıştır. Fotovoltaik sistemlere olan ilgi, fosil kaynakların yetersizliği ve enerjiye olan talebin yükselmesi ile giderek artmaktadır. Fotovoltaik sistem performansının çevre koşullarına göre değişmesi, sistem verimliliğini düşürmektedir. Bunun önüne geçmek, maksimum güç noktasına ulaşmakla mümkündür. Sistemi maksimum güç noktasında çalıştırmaya yönelik birçok teknik geliştirilmiştir. Yapay zekanın yaygınlaşmasıyla, maksimum güç noktası tespitinde akıllı sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Akıllı sistemlerden biri olan yapay sinir ağı, öğrenilme, genelleme yapabilme ve karar verme kabiliyetine sahiptir. Bu çalışmada giriş değişkenleri sıcaklık ve ışınım olan bir yapay sinir ağı ile maksimum güç noktası tespit edilmektedir. Sistemin benzetimi MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Levenberg-Marquardt algoritmasının kullanıldığı ağı eğitiminde, %70'i eğitim, %15'i geçerlilik ve %15'i test aşamalarında olmak üzere toplam 1000 veri kullanılmıştır. Işınımın 1000W/m²'den 200W/m²'ye belirli aralıklarla azaltıldığı sistemde, fotovoltaik panelin gücünün 225.1W'dan 46.9W'a, yükseltici konvertör gücünün 220.9W'dan 45.75W'a kadar azaldığı izlenmiştir. Sıcaklığın 25°C'den 45°C'ye belirli aralıklarla artırıldığı sistemde, fotovoltaik panel gücünün 225.1W'dan 194.6W'a, yükseltici konvertörün gücünün 220.9W'dan 190.7W'a kadar azaldığı görülmüştür. Sabit ışınım (1000W/m²) ve sıcaklık (25°C) değerlerinde, sistem %98 ile en yüksek verim değerine sahiptir. Sabit sıcaklık ve farklı ışınım koşullarında, sistem verimi incelenmiş, ışınım değeri azaldıkça sistem veriminin azaldığı görülmüştür. Benzer olarak, sabit ışınım ve farklı sıcaklık koşulları altında, sıcaklık artışının sistem veriminin azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, yapay sinir ağı tabanlı maksimum güç noktası izleme sistemine sahip fotovoltaik sistemin, değişen çevre koşullarında maksimum güç noktasını izlediğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik, Güneş enerjisi, Maksimum güç noktası, Yapay sinir ağı, Yenilenebilir enerji.

Abstract

In this study, a photovoltaic system is simulated for maximum power point tracking using an artificial neural network. The interest in photovoltaic systems is increasing with inadequacy of fossil resources and rise in demand for energy. The variation of photovoltaic system performance depending on environmental conditions reduces efficiency. It is possible to prevent this by reaching maximum power point. Many techniques have been developed to operate system at maximum power point. With the spread of artificial intelligence, smart systems have started to be used in determining maximum power point. Artificial neural networks are intelligent systems that have the ability to learn, generalize and make decisions. In this study, maximum power point is determined with an artificial neural network whose inputs are temperature and radiation. The system was simulated in MATLAB/Simulink environment. A total of 1000 data were used in training of network in which Levenberg-Marquardt algorithm was used, 70% in training, 15% in validation and 15% in testing stages. It was observed that power of photovoltaic panel decreased from 225.1W to 46.9W, and power of boost converter from 220.9W to 45.75W when radiation was reduced from 1000W/m² to 200W/m² at regular intervals. When temperature was increased from 25°C to 45°C at regular intervals, it was determined that power of photovoltaic panel decreases from 225.1W to 194.6W, and power of boost converter from 220.9W to 190.7W. At constant radiation (1000W/m²) and temperature (25°C), system has the highest efficiency value of 98%. At constant temperature and different radiation conditions, it was seen that efficiency decreased as radiation value decreased. Similarly, under constant radiation and different temperature conditions, temperature increase caused a decrease in efficiency. The results show that photovoltaic system with artificial neural network based maximum power point tracking reaches maximum power point under changing environmental conditions.

Keywords: Photovoltaic, Solar energy, Maximum power point, Artificial neural network, Renewable energy.

* Leyla KARAGÖZOĞLU; leylakaragozoglu@gmail.com

1. Giriş

1. Introduction

Günümüzde güneş enerjisi, güvenilir, çevre dostu, yaygın yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul görmektedir. Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (FV) sistemlerin kullanımı, artan enerji talebi ile birlikte hızla artmaktadır. Bununla birlikte, FV sistemler düşük verimlilik ve yüksek maliyetten muzdariptir. FV sistemlerin bulut, yağmur, kar, toz, nem gibi çevre şartlarına bağımlı olmaları verimliliklerini düşürmektedir (Berrera vd., 2009; Sreekanth & Raglend, 2012; Karagözoğlu & Duranay, 2021; Duranay vd., 2021). Bu dezavantajın üstesinden gelmek için, FV sistemler maksimum güç noktası (MGN) etrafında çalıştırılarak üretilen enerji maksimuma çıkarılmaktadır. Bu ise maksimum güç noktası izleme (MGNİ) teknikleri ile mümkün olmaktadır (Chy & Khaliluzzaman, 2015).

FV sistemler için kullanılan birçok MGNİ tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler basitlik, doğruluk, zaman cevabı, popülerlik, maliyet ve diğer teknik yönlerden farklılık göstermektedir. Değiştir gözle tekniği (Liu vd., 2014), tepe tırmanma tekniği (Bouakkaz vd., 2020), artımlı iletkenlik algoritması (Liu vd., 2008; Safari & Mekhilef, 2010) gibi geleneksel yöntemler kolaylık ve hız sebebiyle yaygın kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin dezavantajı, değişen hava koşullarında MGN etrafındaki salınımin sistem verimini büyük ölçüde azaltmasıdır (Dadfar vd., 2019). Yani tam bir MGN izlemesi mevcut değildir.

Bu problemleri çözebilmek amacıyla, MGN takibinde yapay sinir ağı (YSA) (Joshi & Arora, 2017; Seyedmahmoudian vd., 2016) ve bulanık mantık (Fathi & Parian, 2021) gibi yapay zeka teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, değişen hava şartlarında MGN'yi daha verimli izleyebilmektedir.

Literatür çalışmalarına bakıldığında yapay sinir ağları ve geleneksel yöntemler kullanılarak sistemin maksimum güç takibinde simülasyon çalışmaları değerlendirilmiştir (Makhloufi vd., 2014). Işınım değişiminin sık yaşandığı durumlarda YSA'nın klasik yöntemlere göre enerji kaybını en aza indirgeyerek sistem verimini artırabileceği görülmüştür.

Literatürdeki bir çalışmada, fotovoltaik sistem verimliliğinin artırılması için bulanık sinir ağı yapısı kullanan MGNİ yöntemi geliştirilmiştir (Gani, 2021). Belirtilen çalışmada, incelenen simülasyonlardan elde edilen sonuçlar artımsal iletkenlik ve gözle & değiştir MGNİ yöntemleriyle karşılaştırıldığında değişken ışınım koşullarında MGN'de sapmaların meydana gelmediği gözlemlenmiştir.

Yapılan bir başka çalışmada, fotovoltaik sistemlerde kullanılan çeşitli MGNİ yöntemlerinin performans, maliyet, izleme hızı, karmaşıklık, doğruluk, avantaj ve dezavantajları incelenerek bu yöntemler sınıflandırılmıştır (Mao vd., 2020).

Sinirsel-bulanık denetim esaslı iki döngülü MGNİ ve artımsal iletkenlik yöntem esaslı tek döngülü MGNİ'nin performansları karşılaştırılmıştır (Gani vd., 2020). Değişken yük ve güneş ışınımı altında iki döngülü benzetim çalışmalarında takip sisteminin, tek döngülü takip sistemine göre daha hızlı olduğu ve daha az güç kayıplarına sebep olduğu görülmüştür.

Güneş ışınımı ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden etkilenen FV sistem çıkış karakteristiği, doğrusal değildir. YSA tekniğinde, ışınım ve sıcaklık gibi bilgiler alınarak, değişen hava koşullarına göre YSA tarafından sistem eğitilir. Böylece MGNİ amacıyla YSA kullanılarak, FV sistemin MGN'de çalışması sağlanmış olur.

Bu çalışmada, Matlab/Simulink'te bir FV sistemin YSA kullanılarak MGN takibine yönelik benzetimi gerçekleştirilmiştir. Materyal ve metot bölümünde, ilk olarak MGNİ konusu açıklandıktan sonra, sistemde kullanılan DA-DA yükseltici konvertör devresinden bahsedilmiştir. Daha sonra YSA'nın oluşturulması ve eğitilmesi aşamalarına değinilmiştir. Son olarak, Bulgular bölümünde farklı çevresel koşullar ve yük değerleri için elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir.

Çalışma, Bulgular bölümünde sunulan benzetim sonuçları ile YSA tabanlı MGNİ sistemine sahip bir FV sistemin, değişen çevre koşullarında MGN'yi izlediğini açık bir şekilde göstermektedir. YSA kullanılarak oluşturulan MGN izleyicisinin, değişken yük ve güneş ışınımı altında sistemin maksimum gücünü elde ettiği ve salınımları azalttığı görülmektedir.

2. Materyal ve metot

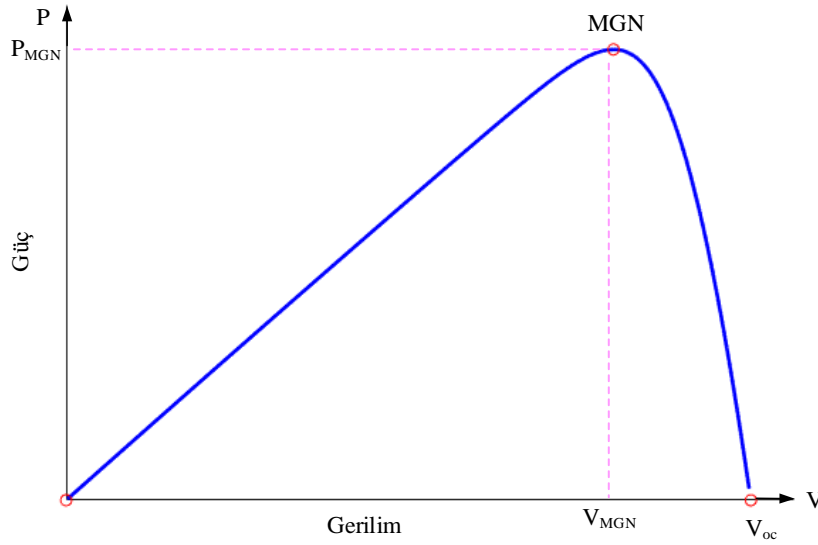
2. Material and method

2.1. Maksimum güç noktası izleme

2.1. Maximum power point tracking

FV sistemlerde modül için en verimli çalışma noktası MGN olarak adlandırılmaktadır. MGN'da çalışma durumunda, panelden elde edilen verim de maksimum olmaktadır.

Bir FV sistemin çıkış karakteristiği Şekil 1'de görüldüğü gibi doğrusal değildir (Duranay & Guldemir, 2021). FV panellerin maksimum güç noktası, FV güç üretim sistemlerinin verimliliklerini düşürmektedir. Maksimum güç noktası çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğinden, yükün talep ettiği gücü sağlamak için, FV sistemlerde modüller seri ya da paralel bağlanarak panelleri oluşturmaktadır ve panellerde birleştirilerek diziler tasarlanmaktadır. Bu durum, FV sistemin maliyetini artırmaktadır ve önemli miktarda enerji kayıplarına neden olmaktadır.



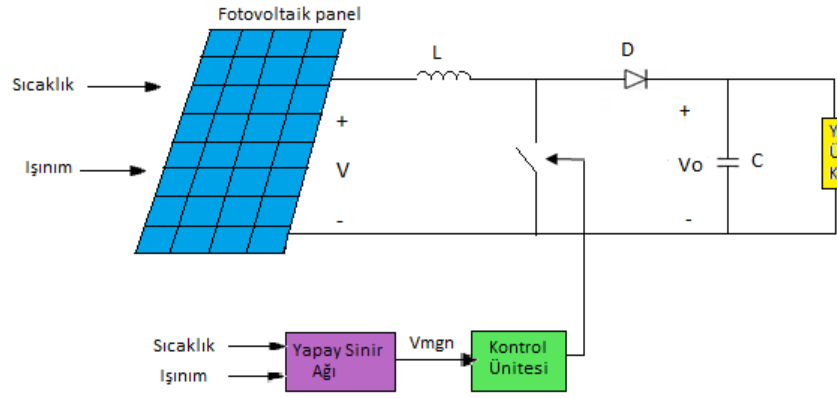
Şekil 1. FV sistem güç karakteristiği

Figure 1. PV system power characteristic

Hem bu olumsuzluğu gidermek hem de sistem çıkışında yüksek verim almak için, FV panel maksimum güç noktasında çalıştırılmalıdır. Belirli şartlar altında FV sistemden maksimum güç elde etmeyi sağlayan ve şarj kontrol cihazlarına dahil edilen algoritmalar ile sistem maksimum güç noktasında çalıştırılabilmektedir. Bu amaçla MGNİ yöntemleri kullanılmaktadır. MGNİ yöntemi, FV sistemin gerilim ve akımını izleyerek çıkış gücünü kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır (Köse, 2018; Kurak vd., 2016; Duranay & Guldemir, 2019).

Sistemi kendi MGN'sinde çalıştırmak için bir MGNİ algoritmasının kullanılması gerekir. MGNİ için gözle ve düzelt (Liu vd., 2014), tepe tırmanma teknikleri (Waszynek, 1983; Hsiao & Chen, 2002), kesirli yöntemler, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı (Kobayashi vd., 2004; Hart vd., 1984), bulanık mantık tabanlı (Fathi & Parian, 2021; Duranay & Guldemir, 2021) ve NN tabanlı yöntemler (Divyasharon vd., 2019; Elaissoui vd., 2020) gibi farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Bu çalışmada YSA kullanan bir FV sistem için MGNİ simülasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 2'de gösterilen sistem bir FV panel, bir DA-DA yükseltici konvertör, bir kontrol ünitesi ve bir rezistif yükten oluşmaktadır. Eğitilmiş YSA, her bir sıcaklık ve güneş ışın değeri için, uygun yükseltici konvertör görev döngüsüne karşılık gelen MGN'yi belirlemektedir.

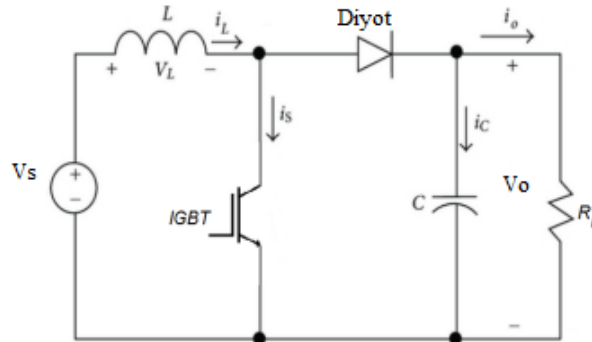


Şekil 2. YSA tabanlı FV sistemin blok şeması
Figure 2. Block diagram of ANN based PV system

2.2. DA-DA yükseltici konvertör

2.2. DC-DC boost convertor

Yükseltici konvertör, DA gerilimi yükselterek, gerekli olan DA gerilimi elde etmek amacıyla kullanılan bir güç elektroniği devresidir (Duranay & Guldemir, 2020). Şekil 3’de gösterilen DA-DA yükseltici konvertör devresi indüktör, kondansatör, diyot ve IGBT içermektedir. Yükseltici konvertör, FV uygulamaları için panel gerilimini uygun seviyeye yükseltmek için kullanılır. Ayrıca konvertör, FV panelden maksimum güç çekmek için kontrollü bir yük olarak düşünülebilir ve güç elektroniği anahtarının görev döngüsü D’yi değiştirerek, giriş kaynağından yüke enerji transferini modüle etmek için kullanılır.



Şekil 3. Yükseltici konvertör devre şeması
Figure 3. Boost convertor circuit diagram

Yükseltici konvertörün V_s giriş gerilimi ile V_o çıkış gerilimi arasındaki ilişki Denklem 1’de verilmiştir (Duranay & Guldemir, 2020)

$$\frac{v_s}{v_o} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

Yükseltici konvertör devresi, yarı iletken güç anahtarının iletme ve kesime götürülmesine göre çalışmaktadır. Anahtar iletme götürüldüğünde, indüktör içinden geçen akım artmakta ve üzerinde enerji depolanmaya başlanmaktadır. Anahtar kesime götürüldüğünde ise, indüktör içinden geçmekte olan şarj akımı diyot üzerinden kondansatör ve yüke doğru akmaya başlamaktadır. Böylece, indüktör, enerjisini deşarj eder ve indüktör üzerindeki gerilimin polaritesinin yönü gerilim kaynağının polaritesi ile aynı olur ve diyot üzerinden yüke bağlanır. Böylece çıkış geriliminin seviyesi yükseltilmiş olur.

Denklem 2’de giriş gerilimin görev döngüsüne bağlı olarak gösterimi verilmiştir. Denklem 3 ve Denklem 4’te sırasıyla indüktör ve kondansatör değerlerinin değişimi gösterilmektedir (Duranay & Guldemir, 2020)

$$V_0 = \frac{V_s}{1-D} \quad (2)$$

$$L > \frac{v_s D}{f_s \Delta I_L} \quad (3)$$

$$C > \frac{DP_0}{f_s V_0 \Delta V_0} \quad (4)$$

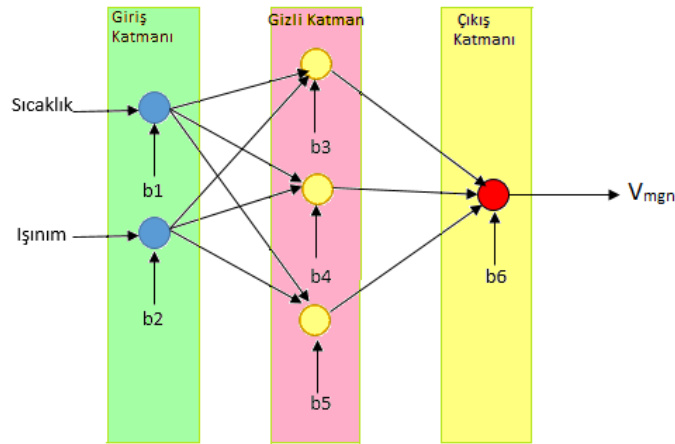
Burada D görev döngüsü, f_s anahtar frekansı, ΔI_L indüktör akım dalgalanması, P_0 çıkış gücü, ΔV_0 ise çıkış gerilim dalgalanmasını ifade etmektedir.

2.3. Yapay sinir ağının oluşturulması

2.3. Implementation of artificial neural network

YSA insan beyninin öğrenme ve karar verme fonksiyonlarından esinlenerek oluşturulmuş uyarlanabilir sistemlerdir. YSA'ların öğrenme ve genelleme yapabilmeleri onların esnek ve güçlü olmalarını sağlamaktadır. Bu sayede karar verme noktasında vazgeçilmez araçlar olmaktadır. YSA'lar öğrenme, uyarlanabilir ve genelleme özelliklerine sahiptir (Öztemel, 2003). Bunun yanı sıra çok girişli, çok çıkışlı sistemlere de uygulanabilmektedir. Bu sebeple denetim sistemlerinde tercih edilmektedir. YSA çok sayıda basit işlemciden oluşmaktadır ve bağlantı ağırlıkları ayarlanabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı YSA'lar esnek bir yapıya sahiptir. YSA'da ağırlıklar; problemdeki değişikliklere göre ayarlanabilmektedir. Problemi çözebilmek için eğitilen bir YSA, problemdeki değişime göre tekrar eğitilebilmektedir.

Yapay nöronlar, doğal nöronların işleyişini simüle etmektedir (Hassan, 2020). Yapay nöronlar aralarında bağlantı oluşturularak ve katmanlar halinde gruplandırılarak YSA oluşturulur. YSA birbirine bağlı bir grup yapay nörondan oluşur. Nöronların aynı doğrultuda bir araya gelmeleriyle katmanlar oluşur. Şekil 4'te gösterildiği gibi bir YSA üç katmandan oluşmaktadır. Giriş katmanı, ara/gizli katman ve çıkış katmanı.



Şekil 4. YSA yapısı

Figure 4. ANN structure

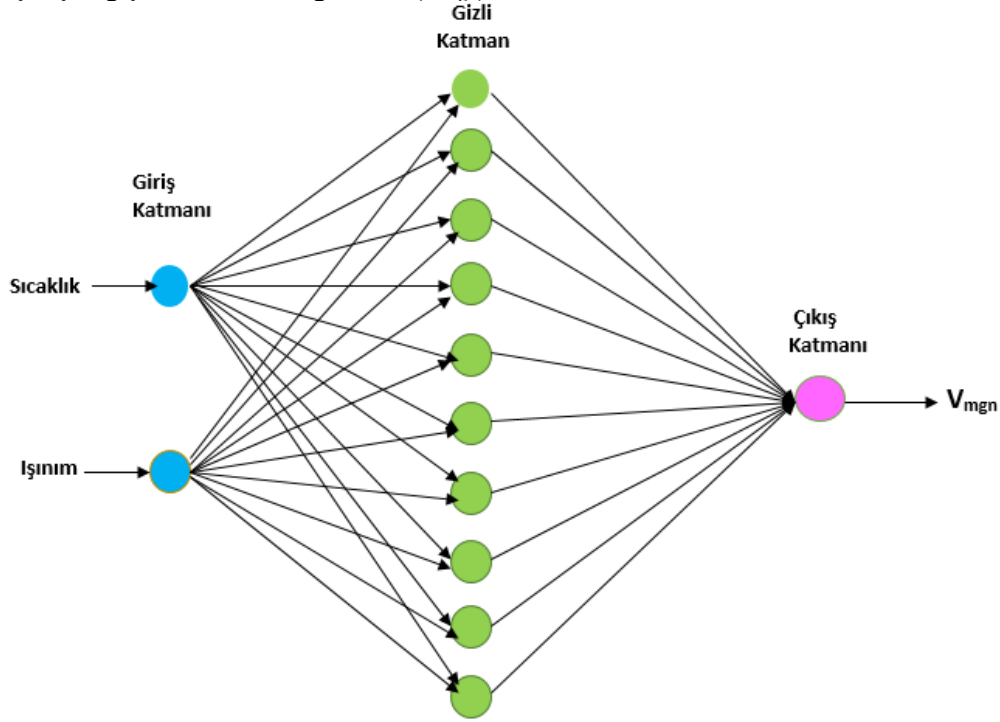
Giriş katmanı dışardan girişleri alan nöronları içermektedir (Jyothy Lakshmi & Sindlu, 2018; Ibrahim vd., 2019). Çıkış katmanı nihai YSA çıktısını üreten katmandır. Gizli katman, giriş katmanından çıkış katmanına YSA ara hesaplamalarını gerçekleştirir. Giriş ve çıkış katmanlarındaki nöron sayısı, giriş ve çıkış problemlerinin sayısına bağlıdır. Gizli katmandaki nöron sayısı ise gerekli doğruluk ve hesaplama süresine bağlıdır.

2.4. Yapay sinir ağı eğitimi

2.4. Artificial Neural Network Training

Bu çalışmada, MATLAB programı içerisindeki YSA'nın uygulamalarını bulunduran Neural Network Toolbox'tan yararlanılmıştır. Bu çalışmada MGN'yi izleyebilmek için bir YSA yapısı kullanılmıştır. Şekil 5'te

gösterilen bir üç katmanlı YSA, MGN'ye ulaşmak için kullanılmıştır. YSA'nın iki giriş değişkeni sıcaklık (S) ve ışınım (I), çıkış değişkeni ise MGN gerilimi (V_{mgn})'dir.



Şekil 5. Sinir ağı yapısı
Figure 5. Neural network structure

Sinir ağını eğitmek için giriş ve çıkış değişkenleri olarak bazı verilere ihtiyaç duyulmaktadır. MATLAB'da FV model programlaması ile istenilen veri değerleri elde edilmiştir. YSA başarısı ölçülürken regresyon katsayısı (R^2) ve ortalama kare hata (MSE) dikkate alınmıştır.

MSE bir regresyon eğrisinin bir dizi noktaya mesafesinin ne kadar olduğunu göstermektedir. Yani MSE ile öğrenme modelinin performansı ölçülmektedir. Bu değer sürekli pozitiftir ve sifıra yaklaştıkça performans daha iyi gelişim göstermektedir.

Bu yöntem hataların ortalamasını ölçen sürekli değişkenlerde yaygındır. MSE Denklem 5'te gösterilmiştir (Gündoğdu & Çelikel, 2020).

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_i)^2}{n} \quad (5)$$

İki ya da daha fazla nicel değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan analiz yöntemine regresyon analizi denir. Analiz işleminde tek değişken varsa tek değişkenli regresyon, birden fazla değişken kullanılıyorsa çok değişkenli regresyon analizi olarak adlandırılmaktadır. Denklem 6'da regresyon katsayısının formülü gösterilmiştir.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_{m,1})^2} \quad (6)$$

Burada n örnekleme boyutu, y_p tahmini değer, y_m ölçülen değer, y_i örneklenmiş veri değeridir.

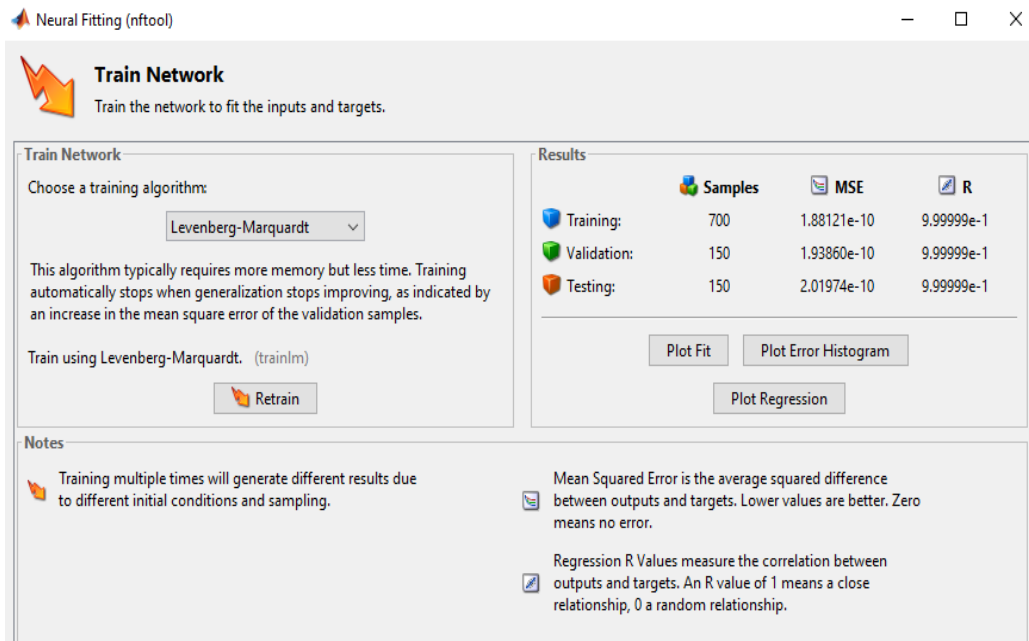
YSA eğitimi için gereken veri değerleri Matlab'da oluşturulmuştur. Matlab'da FV sistemler için kullanılan arayüzden faydalanarak, giriş değişkenleri için 1000 tane farklı sıcaklık ve ışınım değerine karşılık MGN gerilimi üretilerek, YSA eğitimi için gerekli veriler elde edilmiştir. Bu değerler üretilirken, sıcaklık 15-35 °C

değerleri arasında değiştirilmiş, ışınlım ise 0-1000 değerleri arasında rastgele oluşturulmuştur. Örnek veri setine ait değerler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Örnek veri seti
Table 1. Sample data set

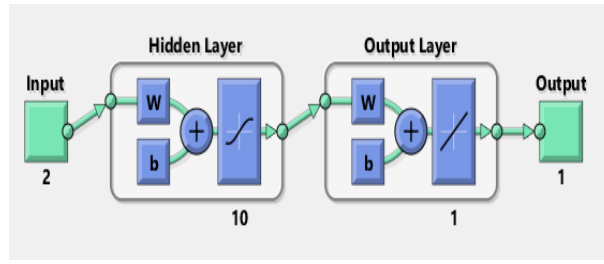
Işınım (W/m ²)	Sıcaklık (°C)	Maksimum güç gerilimi (W)
905	31	28.377
913	17	33.452
97	27	29.723
546	20	32.334
964	34	27.323
970	18	33.226
485	34	27.326
141	31	28.483
915	23	31.277
959	30	28.543

YSA eğitimi için 1000 veri kullanılmıştır. Bu 1000 tane verinin %70’i (700) eğitim aşaması için, %15’i (150) geçerlilik aşaması için ve %15’i (150) test aşaması için kullanılmıştır. Bu uygulamada Levenberg-Marquardt (LM), Bayesian Regularization (BR), Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritmaları kullanılarak ağ eğitimi yapılmıştır. Daha sonra bu algoritmaların tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Algoritmaların karşılaştırılması sonucunda LM algoritmasının en düşük ortalama kare hatayı bulduğu ve maksimum başarıyı sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca LM algoritmasının diğerlerinden hızlı olduğu belirlenmiştir. Ağ eğitimi tamamlandıktan sonra regresyon eğrileri incelenmiştir. Şekil 6’da görüldüğü gibi LM algoritmasının test aşamasındaki MSE değeri 2.0197e-10 olarak bulunmuştur.



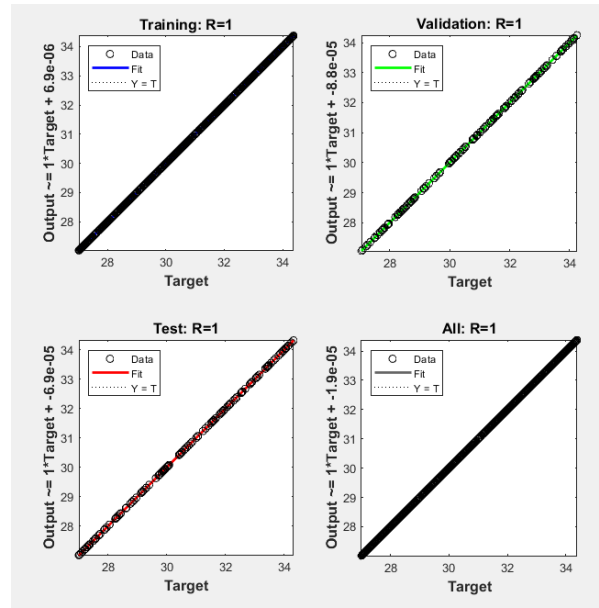
Şekil 6. LM algoritmasının kullanılması
Figure 6. Using the LM algorithm

Sinir ağının eğitimi için Matlab nntool ara yüzü kullanılmıştır. Şekil 7’de sistemde kullanılan YSA modeli görülmektedir. Sinir ağı modelinde gizli katman aktivasyon fonksiyonu tan-sigmoid fonksiyonu ve çıkış katmanı aktivasyon fonksiyon doğrusal fonksiyon olarak belirlenmiştir. Gizli katman nöron sayısı deneme yanılma yöntemi ile hesaplanmıştır ve 10 olarak seçilmiştir. YSA’nın performansı ortalama kare hata göz önünde bulundurularak seçilmiştir.



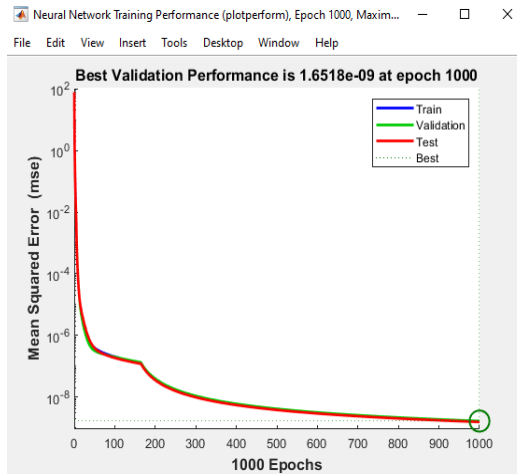
Şekil 7. YSA modeli
Figure 7. The ANN model

Şekil 8’de verilen LM algoritmasına ait regresyon analiz sonuçlarına bakıldığında modelin tüm durumlarında R=1 değeri ile oldukça iyi sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 8. Regresyon eğrileri
Figure 8. Regression curves

Şekil 9’da YSA’nın eğitim performansı gösterilmiştir. YSA’nın eğitim performansında ortalama kare hata değerinin iterasyon sayısı arttıkça, azaldığı görülmektedir. İyi eğitilmiş bir YSA’da ortalama kare hatanın çok düşük olması gerekmektedir.



Şekil 9. Sinir ağının eğitim performansı
Figure 9. Training performance of neural network

Ağ eğitimi tamamlandıktan sonra matlab simulinkte FV sistem tasarımı yapılmıştır. Simulinkte kullanılan FV panelin özellikleri Tablo 2’de, tasarlanan sistemde kullanılan elemanların değerleri ise Tablo 3’de gösterilmiştir.

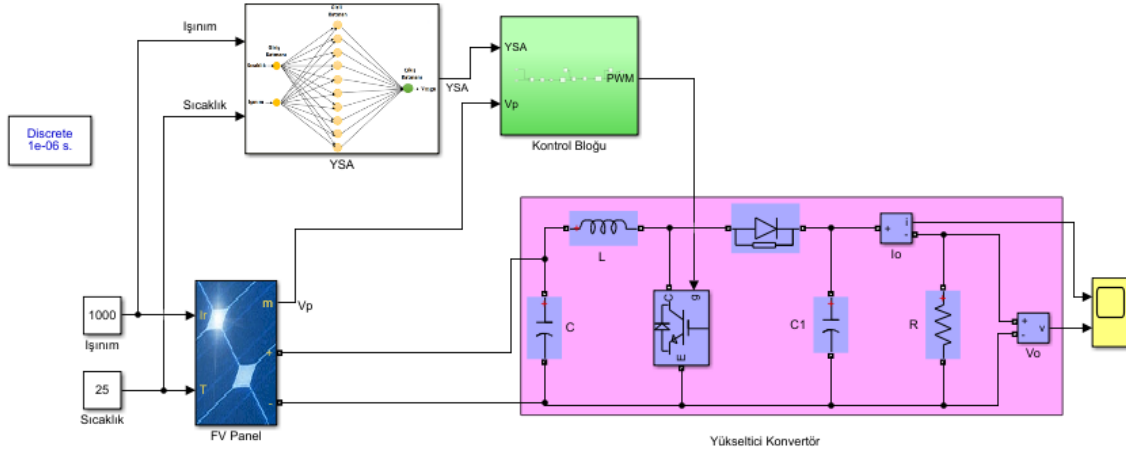
Tablo 2. FV panel özellikleri
Table 2. PV panel specifications

Parametre	Değer
Paralel dizi sayısı	1
Dizi başına seri bağlı modül sayısı	1
Maksimum güç değeri	250.205 W
Açık devre gerilimi- V_{OC}	37.3 V
Kısa devre akımı- I_{SC}	8.66 A
Modül başına hücre sayısı	60
Maksimum güç noktası gerilimi- V_{mp}	30.7 V
Maksimum güç noktası akımı- I_{mp}	8.15 A
V_{OC} 'nin sıcaklık katsayısı	-0.36901
I_{SC} 'nin sıcaklık katsayısı	0.086998

Tablo 3. Sistemde kullanılan elemanların değerleri
Table 3. The values of the elements used in the system

Parametre	Değer
Kondansatör	470 μ F
Kondansatör	1200 μ F
İndüktans	2.5 mH
Direnç	20 Ω
Frekans	5 kHz

Tasarlanan sistemin MATLAB/Simulink Modeli Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10. YSA tabanlı MGNİ simulink modeli
Figure 10. ANN based MPPT simulink model

3.Bulgular

3. Results

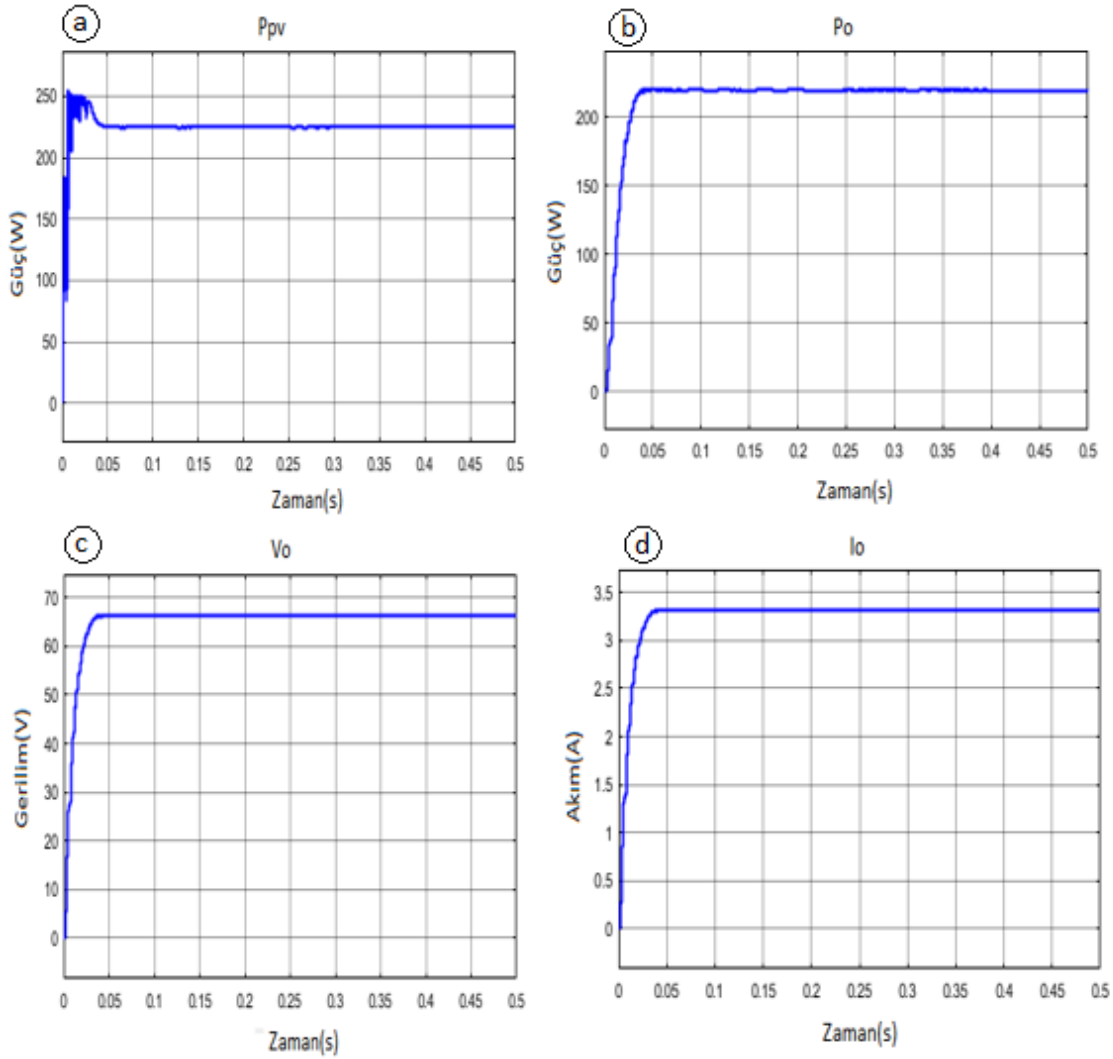
Bu çalışmada farklı sıcaklık, ışınım ve yük değerleri için Simulink/MATLAB’da simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir.

Işınım değerinin 1000 W/m², sıcaklık değerinin 25°C ve direnç değerinin 20 Ω olarak belirlendiği durumda FV panelin güç çıkışı Şekil 11 (a)’da gösterilmektedir. Bu durumda çıkış gücü 225.1W olarak elde edilmiştir. Aynı

durum için, yükseltici konvertörün güç çıkışı, çıkış gerilimi ve çıkış akımı ise sırasıyla Şekil 11 (b), (c) ve (d)'de verildiği gibidir. Tablo 4'te fotovoltaik panel çıkış gücü, yükseltici konvertörün çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış akım değerleri verilmektedir.

Tablo 4. Sabit ışınım ve sıcaklık için FV panel ve yükseltici konvertör çıkış değerleri
Table 4. PV panel and boost converter output values for constant radiation and temperature

Parametre	Değer
Fotovoltaik panel çıkış gücü	225.1 W
Yükseltici konvertör çıkış gücü	220.9 W
Yükseltici konvertör çıkış gerilimi	66.47 V
Yükseltici konvertör çıkış akımı	3.323 A



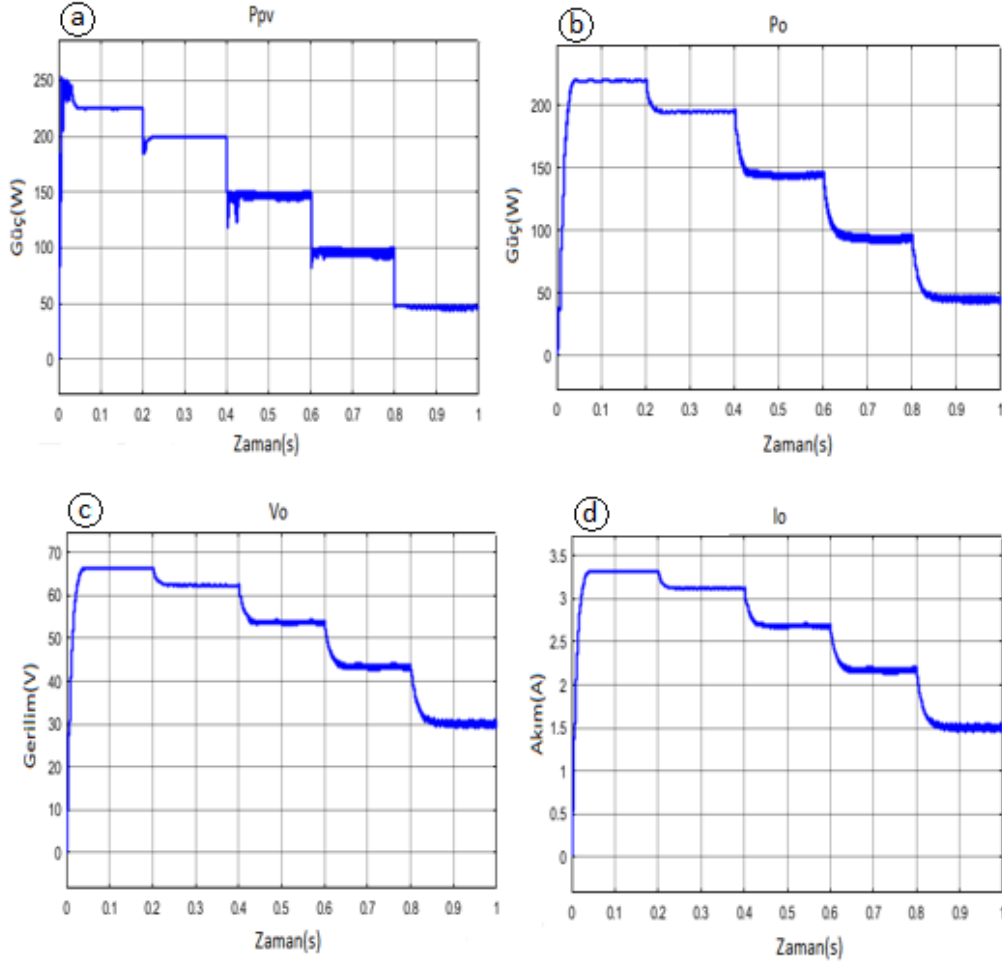
Şekil 11. Işınım değerinin 1000W/m^2 , sıcaklık değerinin 25°C ve direnç değerinin 20Ω olduğu durum için (a) FV panel güç çıkışı, yükseltici konvertörün (b) güç çıkışı (c) çıkış gerilimi ve (d) çıkış akımı.

Figure 11. For the case where the irradiance value is 1000W/m^2 , the temperature value is 25°C and the resistance value is 20Ω (a) PV panel power output, (b) power output (c) output voltage and (d) output current of the boost converter.

Şekil 11'deki güç değerleri baz alınarak ve Denklem 7 kullanılarak sistem verimi %98 olarak hesaplanmıştır.

$$\eta\% = 1 - \frac{P_{max} - P_{max} \cdot \eta}{P_{max}} \quad (7)$$

Işınım değerlerinin sırasıyla 1000-800-600-400-200 W/m², sıcaklık değerinin 25°C ve direnç değerinin 20Ω olarak belirlendiği durumda FV panelin güç çıkışı Şekil 12 (a)'da gösterilmektedir. Işınım değeri azaldıkça panel gücünde azalmaktadır. Aynı durum için, yükseltici konvertörün güç çıkışı, çıkış gerilimi ve çıkış akımı ise sırasıyla Şekil 12 (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir. Şekil 12 (b)'de görüldüğü gibi ışınım değerleri belirli bir süre zarfında azaltıldığında çıkış gücünde azalma görülmektedir. Çünkü ışınım değeri azaldıkça yükseltici konvertörün Şekil 12 (c) ve (d)'de görüldüğü gibi gerilim ve akım değerleri de azalmaktadır. Akım değerleri ışınımın azalmasına paralel olarak azalmaktadır.



Şekil 12. Işınım değerlerinin sırasıyla 1000-800-600-200 W/m², sıcaklık değerinin 25°C ve direnç değerinin 20Ω olduğu durum için (a) FV panel güç çıkışı, yükseltici konvertörün (b) güç çıkışı (c) çıkış gerilimi ve (d) çıkış akımı.

Figure 12. For the case where the irradiance values are respectively 1000-800-600-200 W/m², the temperature value is 25°C and the resistance value is 20Ω (a) PV panel power output, (b) power output (c) output voltage and (d) output current of the boost converter.

Tablo 5'te FV panel çıkış gücü, yükseltici konvertörün çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış akım değerleri listelenmektedir.

Tablo 5. Değişken ışımaya durumu için FV panel ve yükseltici konvertör çıkış değerleri

Table 5. PV panel and boost converter output values for variable radiation

Parametre	1000	800	600	400	200
FV panel çıkış gücü	225.1	199.1	150.6	99.25W	46.98W
Yükseltici konvertör çıkış	220.9	195.5	146.9	95.96 W	45.75 W
Yükseltici konvertör çıkış	66.47	62.53	54.2 V	43.81 V	30.25 V
Yükseltici konvertör çıkış	3.323	3.126	2.71A	2.19 A	1.513 A

Ayrıca, Denklem 7 kullanılarak, farklı ışınma durumları için hesaplanan verim değerleri, Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 6. Farklı ışınma durumları için verim değerleri
Table 6. Efficiencies for different radiation values

Işınma değeri (W/m ²)	Verim
200	97
400	96
600	97
800	98
1000	98

Işınım değerlerinin 1000W/m², sıcaklık değerlerinin sırasıyla 25-30-35-40-45°C ve direnç değerinin 20Ω olarak belirlendiği durumda FV panelin güç çıkışı Şekil 13'te gösterilmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak panel güç çıkışı azalmaktadır. Aynı durum için, yükseltici konvertörün güç çıkışı, çıkış akımı ve çıkış gerilimi ise sırasıyla Şekil 13 (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir.

Tablo 7'de ışınım değerinin 1000W/m² ve sıcaklık değerlerinin ise değişken olduğu durum için FV panel çıkış gücü, yükseltici konvertörün çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış akım değerleri verilmiştir.

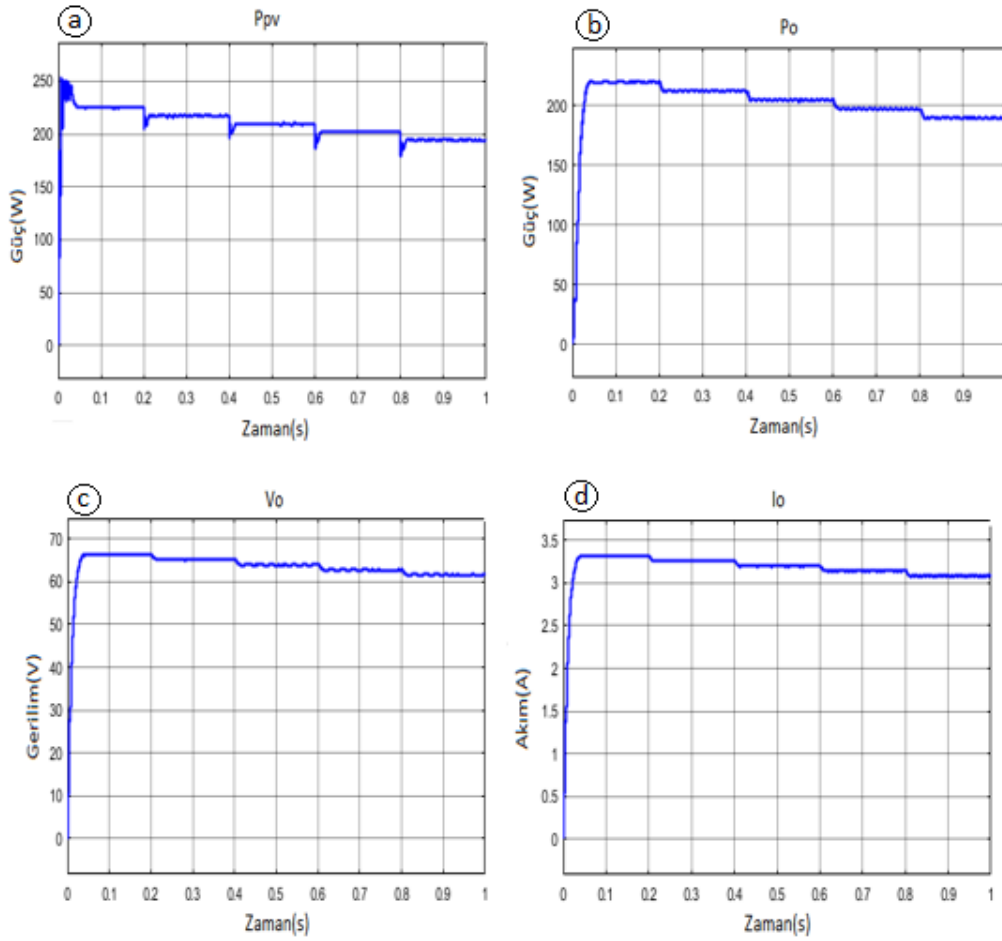
Tablo 7. Farklı sıcaklık değerleri için FV panel ve yükseltici konvertör çıkış değerleri
Table 7. PV panel and boost converter output values for different temperature values

Parametre	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
FV panel çıkış gücü	225.1W	217.4W	209.7W	202.1W	194.6W
Yükseltici konvertör çıkış	220.9W	213.3W	205.7W	198.1W	190.7W
Yükseltici konvertör çıkış	66.47V	65.31V	64.14V	62.95V	61.76V
Yükseltici konvertör çıkış	3.323A	3.265A	3.207A	3.148A	3.088A

Sıcaklık değerinin artması panel çıkış gücünü azaltmaktadır. Ayrıca sıcaklık arttıkça konvertör çıkış gerilimi ve çıkış akımı da azalmaktadır. Buna bağlı olarak, yükseltici konvertörün çıkış gücü de azalmaktadır. Ayrıca, Denklem 7 kullanılarak, farklı sıcaklık durumları için hesaplanan verim değerleri, Tablo 8 ile verilmektedir.

Tablo 8. Farklı sıcaklık durumları için verim değerleri
Table 8. Efficiencies for different temperature values

Sıcaklık değeri (°C)	Verim
25	98
30	98
35	97
40	96
45	97



Şekil 13. Işınım değerinin 1000W/m^2 , sıcaklık değerlerinin sırasıyla 25-30-35-40-45°C ve direnç değerinin 20Ω olduğu durum için (a) FV panel güç çıkışı, yükseltici konvertörün (b) güç çıkışı (c) çıkış gerilimi ve (d) çıkış akımı.

Figure 13. For the case where the irradiance value is 1000W/m^2 , the temperature values are 25-30-35-40-45°C and the resistance value is 20Ω (a) PV panel power output, (b) power output (c) output voltage and (d) output current of the boost converter.

Şekil 13 (a) incelendiğinde, belirli aralıklarla sıcaklık değeri arttırıldıkça çıkış gücünde azalma görülmektedir. Çıkış gerilimi ve çıkış akımı azalmaktadır. Çünkü sıcaklık değeri arttırıldıkça yükseltici konvertörün Şekil 13 (c) ve (d)'de görüldüğü gibi gerilim ve akım değerleri de azalmaktadır.

Işınım değerinin 1000W/m^2 , sıcaklık değerlerinin 25°C ve direnç değerinin 50Ω olarak belirlendiği durumda FV panelin güç çıkışı Şekil 14 (a)'da gösterilmektedir. Bu durumda FV panel güç çıkışı 107W olarak elde edilmiştir. Aynı durum için, yükseltici konvertörün güç çıkışı, çıkış gerilimi ve çıkış akımı Şekil 14 (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir.

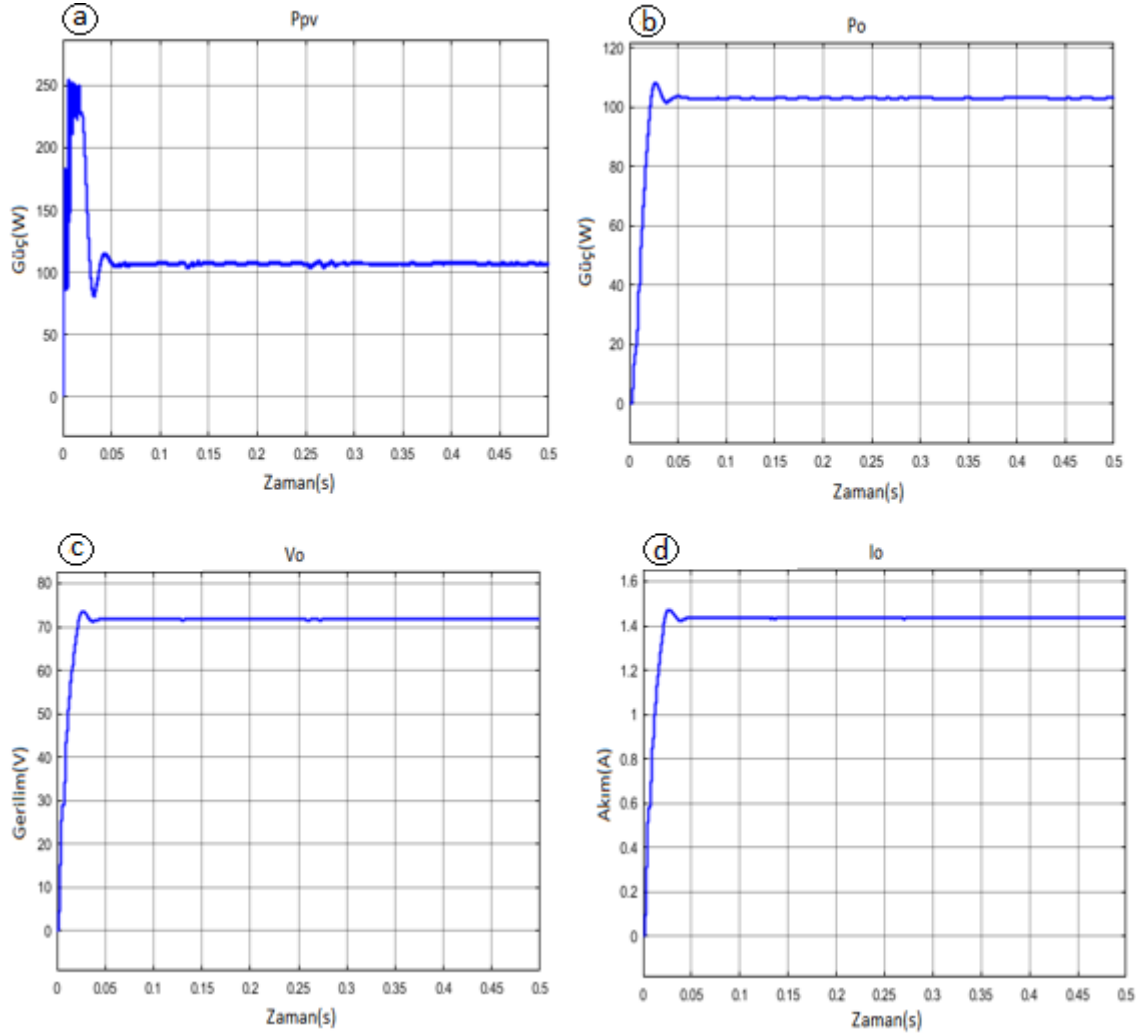
Tablo 9'da 50Ω yük için FV panel çıkış gücü, yükseltici konvertörün çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış akım değerleri verilmiştir.

Tablo 9. 50Ω yük için FV panel ve yükseltici konvertör çıkış değerleri
Table 9. Photovoltaic panel and boost converter output values for 50Ω load

Parametre	Değer
Fotovoltaik panel çıkış gücü	107.8 W
Yükseltici konvertör çıkış gücü	103.2 W
Yükseltici konvertör çıkış gerilimi	71.82 V
Yükseltici konvertör çıkış akımı	1.436 A

Sistemdeki yükün artmasına bağlı olarak konvertör çıkışındaki gerilim ve akım azalmaktadır. Buna bağlı olarak konvertör çıkışındaki güç değeri de azalmaktadır. Bu durum için verim değeri $\eta\%=95$ hesaplanmıştır.

Şekil 14 (c)'de görüldüğü gibi çıkış gerilimi, artan yük ile ve çıkış güç ve çıkış akımındaki azalmaya bağlı olarak azalmaktadır. Bu durumda, yükseltici konvertörün çıkış gücü 103W, çıkış gerilimi 71.8V, çıkış akımı ise 1.43A olarak elde edilmiştir.



Şekil 14. Işınım değerinin $1000\text{W}/\text{m}^2$, sıcaklık değerinin 25°C ve direnç değerinin 50Ω olduğu durum için (a) FV panel güç çıkışı, yükseltici konvertörün (b) güç çıkışı (c) çıkış gerilimi ve (d) çıkış akımı.

Figure 14. For the case where the irradiance value is $1000\text{W}/\text{m}^2$, the temperature value is 25°C and the resistance value is 50Ω (a) PV panel power output, (b) power output (c) output voltage and (d) output current of the boost converter.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek amacıyla FV sistemlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Fakat bu sistemler sıcaklık, ışınım, rüzgar, hava kirliliği vb. birçok faktörden etkilenmektedir. Değişen faktörlere bağlı olarak FV sistemin çıkış gücünde de değişim meydana gelmektedir. Bu değişimler sırasında MGN'yi bulmak önemli bir sorun oluşturmuştur. Çünkü sistemin MGN'de çalıştırılması verimi büyük ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden FV sistemler verimliliklerinin artırılması için MGN etrafında çalıştırılmalıdır. MGN'nin kontrolü için birçok algoritma kullanılmaktadır. Bu algoritmalarda giriş değişkeni olarak açık devre gerilimi, kısa devre akımı, ışınım şiddeti, rüzgar hızı, modülün sıcaklığı gibi faktörler kullanılabilir. Ayrıca bu MGN yöntemleri karmaşıklık, maliyet, kararlılık durumu, yakınsama vb. birçok açıdan farklı özelliklere sahiptir.

MGNİ algoritmalarının kullanılması sistem verimini etkileyen en önemli unsurdur. Bu nedenle sistemin tasarım aşamasında kullanılacak MGNİ algoritması önem kazanmaktadır. Eşit dağılımlı ışıma koşullarında geleneksel yöntemlerin verimleri yüksektir. Ancak farklı ışınım koşullarında bu yöntemler düşük yakınsama hızına sahiptir ve dinamik cevapları yavaştır. Akıllı yöntemler, matematiksel hesaplamalara bağımlı olmadan sistemi daha basit yapmaktadır. Ayrıca verilerin depolanabilip, algılanabilmesiyle izleme hızları artmaktadır. Bu yöntemler kısmi gölgelenme koşullarında MGN'yi izlemek için uygun tekniklerdendir.

Bu çalışmada, akıllı MGNİ yöntemlerinden biri olan, YSA kullanılarak bir FV sistem MGN etrafında çalıştırılmış ve maksimum güç elde edilmiştir. YSA'nın eğitimi için gerekli olan veriler Matlab programından elde edilmiştir. 1000 farklı ışınım ve sıcaklık değeri için elde edilen V_{mgn} değerleri YSA eğitiminde kullanılmıştır. Bu uygulamada eğitim için verilerin %70'i eğitim aşaması, %15'i geçerlilik aşaması ve %15'i test aşaması için kullanılmıştır. Bu eğitimde LM, BR ve SCG algoritmalarının tahmin performansları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

YSA oluşturulurken gizli katman nöron sayısı deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmiş ve performansın yüksek olduğu YSA modeli seçilmiştir. YSA için öğrenme algoritması belirlenirken ortalama kare hatası göz önünde bulundurulmuştur. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan geleneksel MGNİ teknikleri ile YSA tabanlı MGNİ tekniği karşılaştırıldığında, ışıma ve sıcaklık değişimlerinin sık yaşandığı durumlarda, YSA kontrolörünün enerji kaybını azaltarak, tüm sistem verimini arttırdığı görülmüştür. Bunun yanında YSA kontrolörün kullanılmasıyla MGN etrafındaki dalgalanmalar da ortadan kaldırılmıştır.

Simülasyon sonuçlarına bakıldığında MGNİ kontrolüne dayalı YSA performansı, farklı sıcaklık ve ışınım değerlerinde FV sistemin MGN'ye ulaşmasında etkili olduğu görülmüştür.

Geleneksel MGNİ yöntemleri düşük yakınsama hızına sahiptir ve çevresel koşulların ani değişiminde dinamik cevapları yavaştır. Bu nedenle geleneksel MGNİ yöntemlerinin bu dezavantajları ile başa çıkmak için bu yöntemler, akıllı yöntemler ve optimizasyon yöntemleriyle birleştirilerek hibrit yöntemler oluşturulmaktadır. FV sistemin MGN'yi izleme süresi, yakınsama hızı, salınım süresi vb. parametreler dikkate alındığında hibrit yöntemlerin verimlilikleri daha yüksektir. Bu nedenle FV sistemlerin statik ve dinamik performanslarını daha iyi hale getirmek için hibrit MGNİ yöntemleri kullanılabilir.

Teşekkür / Katkı belirtme

Acknowledgement

Bu makale Leyla Karagözoğlu'nun yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

Yazar katkısı

Author contribution

Leyla Karagözoğlu: Verilerin oluşturulması, makale yazılması.

Zeynep Bala Duranay: Sonuçların yorumlanması, makale yazılması.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Berrera, M., Dolara, A., & Leva, S. (2009). *Experimental test of seven widely adopted MPPT algorithms*. 2009 Bucharest PowerTech Conference (ss. 1-8). Bucharest, Romania: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5282010>
- Bouakkaz, M. S., Boukadoum, A., Boudebouz, O., Attoui, I., Boutasseta, N., & Bouraiou, A. (2020). *Fuzzy logic based adaptive step hill climbing MPPT algorithm for PV energy generation systems*. 2020 International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT-1441) (ss. 1-5). Tabuk, Saudi Arabia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIT-144147971.2020.9213737>
- Chy, D. K., & Khaliluzzaman, M. (2015). *Experimental assessment of PV arrays connected to buck-boost converter using MPPT and Non-MPPT technique by implementing in real time hardware*. 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE) (ss. 306-309). Dhaka, Bangladesh: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2015.7506856>
- Çoruh, N., Erfidan, T., & Ürgün, S. (2008). DA-DA Boost Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Elektrik- Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)* (pp. 362-365), Bursa.
- Dadfar, S., Wakil, K., Khaksar, M., Rezvani, A., Miveh, M. R., & Gandomkar, M. (2019). Enhanced control strategies for a hybrid battery/photovoltaic system using FGS-PID in grid-connected mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 14642-14660. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.174>
- Divyasharon, R., Narmatha Banu, R., & Devaraj, D. (2019). *Artificial neural network based MPPT with cuk converter topology for PV systems under varying climatic conditions*. 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS) (ss. 1-6). Tamilnadu, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/INCOS45849.2019.8951321>
- Duranay, M., Turmus, A., & Tanyildizi, V. (2021). Experimental efficiency analysis of a solar panel electricity generation system using planar reflection. *IET Renewable Power Generation*, 15(3), 521-531. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12012>
- Duranay, Z. B., & Guldemir, H. (2019). *Modelling and simulation of a single phase standalone PV system*. 2019 International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI) (ss. 1-6). Pitesti, Romania: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECAI46879.2019.9041997>
- Duranay, Z. B., & Guldemir, H. (2020). Voltage controlled boost converter-inverter system for photovoltaic applications. *Turkish Journal of Science and Technology*, 15(2), 85-92.
- Duranay, Z. B., & Guldemir, H. (2021). Fuzzy logic based maximum power point tracking for photovoltaic systems. *2021 International Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automatics and Informatics of the Republic of North Macedonia (ETAI)* (ss. 95-101), Macedonia.
- Elaissaoui, H., Zerouali, M., Ougli, A. E., & Tidhaf, B. (2020). *MPPT algorithm based on fuzzy logic and artificial neural network (ANN) for a hybrid solar/wind power generation system*. 2020 International Conference On Intelligent Computing in Data Sciences (ICDS) (ss. 1-6). Fez, Morocco: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDS50568.2020.9268747>
- Fathi, M., & Parian, J. A. (2021). Intelligent MPPT for photovoltaic panels using a novel fuzzy logic and artificial neural networks based on evolutionary algorithms. *Energy Reports*, 7, 1338-1348. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.02.051>
- Gani, A., Açıkgöz, H., & Şekkel, M. (2020). Fotovoltaik sistemlerde değişken yük ve güneş ışınımı altında sinirsel-bulanık denetleyici ile maksimum güç noktası takibi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19, 734-745.
- Gani, A. (2021). Improving dynamic efficiency of photovoltaic generation systems using adaptive type 2 fuzzy- neural network via EN 50530 test procedure. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 49(11), 3922-3940.
- Gündoğdu, A., & Çelikel, R. (2020). ANN-based MPPT algorithm for photovoltaic systems. *Turkish Journal of Science & Technology*, 15(2), 101-110.

- Hart, G. W., Branz, H. M., & Cox Iii, C. H. (1984). Experimental tests of open-loop maximum-power-point tracking techniques for photovoltaic arrays. *Solar Cells*, 13(2), 185-195. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(84\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0379-6787(84)90008-5)
- Hasson, U., Nastase, S. A., & Goldstein, A. (2020). Direct fit to nature: An evolutionary perspective on biological and artificial neural networks. *Neuron*, 105(3), 416-434. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.12.002>
- Hsiao, Y. T., & Chen, C. H. (2002). *Maximum power tracking for photovoltaic power system*. 2002 IEEE Industry Applications Conference (ss. 1035-1040). Pittsburgh, PA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1042685>
- Ibrahim, A., Jin, X., Dai, X., Sarhan, M. A., Shafik, M. B., & Zhou, H. (2019). Artificial neural network based maximum power point tracking for PV sytems. *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference* (ss. 6559-6564), Guangzhou, China.
- Joshi, P., & Arora, S. (2017). Maximum power point tracking methodologies for solar PV systems—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1154-1177. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.019>
- Jyothy Lakshmi, P. N., & Sindhu M. R. (2018). An artificial neural network based MPPT algorithm for solar PV sytem. *4th International Conference on Electrical Energy Sytems (ICEES)* (ss. 375-380), Chennai, India.
- Karagözoğlu, L., & Duranay, Z. B. (2021). Fotovoltaik panel performansını etkileyen faktörlerin incelenmesi. *2021 2nd International Baku Conference on Scientific Research* (ss. 218-228), Baku.
- Kobayashi, K., Matsuo, H., & Sekine, Y. (2004). *A novel optimum operating point tracker of the solar cell power supply system*. 2004 IEEE Power Electronics Specialists Conference (ss. 2147-2151). Aachen, Germany: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355451>
- Köse, E. (2018). Fotovoltaik sistemlerin maksimum güç noktasında çalıştırılması. *Dünya Multidisipliner Araştırmalar Dergisi*, 2018(1), 8-27.
- Kurak, E., Erdemir, V., & Dursun, B. (2016). PV sistemin için maksimum güç noktası izleyicisi tasarım ve uygulanması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 581-592.
- Liu, F., Duan, S., Liu, F., Liu, B., & Kang, Y. (2008). A variable step size INC MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7), 2622-2628. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.920550>.
- Liu, Y., Li, M., Ji, X., Luo, X., Wang, M., & Zhang, Y. (2014). A comparative study of the maximum power point tracking methods for PV systems. *Energy Conversion and Management*, 85, 809–816. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.049>
- Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327.
- Makhloufi, M. T., Khireddine, M. S., Abdessemed, Y., & Boutarfa, A. (2014). Tracking power photovoltaic sytem using artificial neural network control strategy. *I.J. Intelligent Sytems and Applications*, 6(12), 17-26.
- Öztemel, E. (2003). *Yapay sinir ağları*. Papatya yayıncılık.
- Safari, A., & Mekhilef, S. (2010). Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1154–1161. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2048834>
- Seyedmahmoudian, M., Horan, B., Soon, T. K., Rahmani, R., Oo, A. M. T., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (2016). State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 435–455. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.053>
- Sreekanth, S., & Raglend, I. J. (2012). *A comparative and analytical study of various incremental algorithms applied in solar cell*. 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET) (ss. 452-456). Nagercoil, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCEET.2012.6203876>
- Waszynuk, O. (1983). Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 9, 3031-3037. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.318109>