

Geometrik Ortalama Optimizasyonunu Kullanarak PV Parametre Tahmini

Gamze NALÇACI ^{1*} 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 30.03.2024
Kabul Tarihi: 20.11.2024
Yayın Tarihi: 31.12.2025

Anahtar Kelimeler:

Geometrik ortalama optimizasyon,
Pv parametre tahmini,
Balina optimizasyon algoritması,
Gri kurt optimizasyonu.

ÖZET

Bu makale, geometrik ortalama optimizasyon (GMO) algoritmasından yararlanarak güneş fotovoltaik (PV) modüllerini modellemek için yeni bir metodoloji önermektedir. PV özelliklerinin doğru modellenmesi, tasarımı optimize etmek ve değişen çevre koşulları altında PV sistemlerinin performansını tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Ancak sınırlı üretici verileri (V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} , I_{sc}), doğru modelleme için kesin parametre tahminini engellemektedir. Bu çalışma, GMO'yu model parametrelerini çıkarmak için bir optimizasyon tekniği olarak kullanmaktadır. Bu parametreler modelin doğruluğunu önemli ölçüde etkiler ve bunların kesin tahmini verimli bir modelleme için çok önemlidir. Önerilen GMO tabanlı modelin verimliliği, bir güneş PV paneli kullanılarak değerlendirilmektedir. GMO'nun etkinliğini değerlendirmek için balina optimizasyon algoritması ve gri kurt optimizasyonu gibi yerleşik optimizasyon teknikleriyle bir performans karşılaştırması yapılmaktadır. GMO tabanlı yaklaşımın üstünlüğünü kanıtlayacak kapsamlı simülasyonlar sunulmaktadır. Bu simülasyon sonuçlarına göre GMO algoritması, 10^{-160} bir hata oranı ile PV parametre değerlerini tek diyet ve iki diyet modeline göre tahmin etmiştir. Diğer iki algoritma ile yapılan tahminlerde bu başarı oranı elde edilememiştir. Bu araştırma, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımının, performans tahmininin ve optimizasyonunun geliştirilmesine yol açacak şekilde PV modelleme doğruluğunu önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir.

PV Parameter Estimation Using Geometric Mean Optimization

Article Info

Received: 30.03.2024
Accepted: 20.11.2024
Published: 31.12.2025

Keywords:

Geometric mean optimization,
Pv parameter estimation,
Whale optimization algorithm,
Grey wolf optimizer.

ABSTRACT

This paper proposes a new method to contain solar photovoltaic (PV) modules by leveraging geometric mean optimization (GMO) applications. Accurate modeling of the PV line has criticism for optimizing the design and predicting the PV efficiency under sustainable environmental conditions. This means that data data (V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} , I_{sc}), hinder the estimation of the correct model in these parameters. This is why GMO model parameters are used to optimize technology and performance. It significantly affects the robustness of the impact model and is crucial for their precise estimation to be robust. The regime of the proposed GMO-based model is considered as a solar PV panel. For GMO's evaluation results, a comprehensive performance comparison with efficiency techniques such as whale optimization algorithm and gray wolf optimizer is made. Criticism of benchmarking focuses on performance measures. Extensive simulations are presented to prove the superiority of the GMO-based approach. According to these simulation results, the GMO algorithm estimated the PV parameter values according to the single diode and two diode models with an error rate of 10^{-160} . This success rate could not be achieved in predictions made with the other two algorithms. This research has the potential to significantly increase PV modeling accuracy, leading to improved design, performance prediction and optimization of solar energy systems.

To cite this article:

Nalçacı, G. (2025). Geometrik ortalama optimizasyonunu kullanarak PV parametre tahmini. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3), 396-410. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2026.101>

*Sorumlu Yazar: Gamze Nalçacı, gmz.nlc@gmail.com



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya, yüksek teknoloji araştırmaları ve yeni politika önceliklerinin yönlendirdiği küresel bir enerji dönüşümüyle karşı karşıya kalmaktadır. Küresel enerji dönüşümü, G20 Grubunun (G20) tüm üyelerinde gösterilmektedir, ancak her birinde daha temiz enerji sistemlerine geçişin belirli özellikleri yansıtan belirli koşullar ve öncelikler vardır ve bu nedenle sıklıkla enerji verimliliğine atıfta bulunulur [1-2]. Geçtiğimiz üç yılda, yenilenebilir enerji G20 gündeminde belirgin bir şekilde yer almıştır ve yenilenebilir enerjinin G20 ülkelerinde yaygınlaştırılmasını hızlandırmak için bir dizi eylem belirlenmiştir [3]. Yenilenebilir enerji, devam eden enerji geçişlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Pek çok ülkede meydana gelen enerji dönüşümlerinin doruk noktası olarak küresel bir enerji dönüşümü, daha müreffeh ve kapsayıcı bir dünya yaratabilir. Eylül 2015'te, BM Genel Kurulu'ndaki 193 ülke, planlarını içeren 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemini benimsemiştir. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDG'ler), 2030 yılına kadar dünya çapındaki canlılık karışımında sürdürülebilir güç kaynağının payının önemli ölçüde genişletilmesine yönelik Hedef 7.2'yi de içermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının hızlandırılmış dağıtımı, ekonomik büyüme ve istihdam yaratılmasından iklim değişikliğinin hafifletilmesine ve dünya çapında birçok bölgede sağlık üzerinde ciddi etkileri olan hava kirliliğinin azaltılmasına neden olacaktır [4]. Yenilenebilir kaynaklar biyokütle, hidroelektrik, jeotermal, rüzgar ve güneş enerjisi olarak sıralanabilir. Güneş enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarına göre önemli avantajları vardır. Bunlar, temiz, yeşil, sessiz enerji sağlaması, doğadan sağlanan bedava ve bol enerji, düşük işletme ve bakım maliyetleri, çatılara veya yere kolay kurulumu olarak sıralanabilir [5].

Günümüz senaryosunda güç dönüştürücüye bağlanan fotovoltaiik (PV) modüllerin elektriksel model parametrelerinin elde edilmesi oldukça önemlidir [6]. PV elektrik modeli, arzu edilen bir dinamik yapı, en iyi maksimum güç izleme tekniği (MPPT) [7] ve çekilen gücün doğru tahminini elde etmek için güç dönüştürücünün ve kontrol cihazının yeterli tasarımında bir temel sağlar. Bu elektriksel modelin, farklı sıcaklık ve ışınım koşulları altında PV modülünden enerji üretimini tahmin edebilmesi için güvenilir ve doğru parametre değerlerine sahip olması gerekmektedir [8]. Dönüştürücünün boyutu tahmin edilen parametreler ışığında belirlenebilir [9].

Güneş pillerinin parametrelerini tahmin etmek için çeşitli parametre çıkarma teknikleri önerilmiştir [10-13]. Güneş pili modellerinin parametrelerinin çıkarılması için iki olası yaklaşım vardır: Birincisi analitik yaklaşım, ikincisi ise sayısal çıkarım yaklaşımıdır. Geleneksel çıkarım tekniklerinde ise, parametre çıkarım analitik tekniğinin kullanılmasının zorluğu nedeniyle, sayısal çıkarım yaklaşımı araştırmacıların daha fazla ilgisini çekmiştir [14]. Bir dizi hücrenin seri ve paralel olarak bir araya getirilmesiyle PV modülü elde edilir. PV modüllerin çıkış güçleri seri ve paralel hücre sayısına göre farklılık göstermektedir. Çift diyot modeli (DDM), güneş pilinin davranışını PV modüllerinde daha iyi gösterirken, tek diyot modeli (SDM) genellikle PV modüllerini simüle etmek için kullanılır [15-17].

Araştırmacılar, güneş pili parametrelerinin daha doğru tahmin edilmesi için iki ana kategoriye ayrılacak birçok yöntem sunmuşlardır: Analitik yöntemler [18, 19] ve evrimsel algoritmalar [11-14]. Analitik yöntemler, PV parametrelerini çözerek belirleyen denklemlere dayanmaktadır. Güneş pili modelinin doğrusal olmamasından kaynaklanan zorluklar nedeniyle, analitik yöntemlerde bilinmeyen parametreler azaltılmakta veya bazı parametrelerin sabit bir değere sahip olduğu varsayılmaktadır. Örneğin, Referans [20]'de, DDM'deki iki doyum akımı miktarının $I_{d1} = I_{d2}$ 'ye eşit olduğunu düşünerek parametre sayısını azaltmışlardır. Ayrıca a_1 ve a_2 gibi diyot idealite faktörlerinin birbirinin aynı olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle, parametrelerin sayısı 5'e düşürülmüştür. Örneğin, Referans [21-22]'de seri ve paralel direnç parametreleri dikkate alınmaz. Bununla birlikte, bu parametreler model doğruluğunu, özellikle de kullanılan panel miktarını etkilemektedir.

PV hücreleri için uygun bir parametre tahmin stratejisinin aşağıdaki önemli noktalara sahip olması gerekir:

- Tam model parametrelerini vermelidir. Yani, I-V verilerine veya I-V noktalarına yol açan model parametreleri, deney bilgilerine veya veri sayfası verilerine mümkün olduğu kadar yakındır.
- Optimizasyon algoritmasıyla tahmin edilen verilerin çeşitli durumlar için belirli bir veri kümesine bağlandığı noktayla temelde elde edilen sonuçlar aynı olmalıdır [23].
- Çeşitli veri kümelerine kesin model parametreleri vermelidir [23]. Özellikle güç noktası takibi için şebekeye bağlandığında düşük hesaplama süresine sahip olmalıdır.

Analitik yöntemler basit ve hızlı performansa sahiptir ancak yanlış hipotezler ve parametre elemeleri nedeniyle model doğruluğunu azaltır. Analitik yöntemlerin dezavantajları, araştırmacıların PV modelinin parametrelerini tahmin etmek için evrimsel algoritmalar kullanmalarına neden olmuştur [24]. Bu yöntemlerde, genellikle tekrarlayan bir süreçten geçilerek, parametreler değiştikçe problemin uygunluk fonksiyonu optimize edilir. Bu süreç bitene kadar devam eder ve uygunluk fonksiyonu bir sonlanma koşuluna ulaşır ve bu durumda şöyle söylenebilir: parametreler tatmin edici değerlerle tahmin edilmiştir [25-27].

Son yıllarda güneş pilinin parametrelerini tahmin etmek için birçok evrimsel algoritma önerilmiştir ve bunlardan bazıları listelenmiştir [28-42]. Bu bilgiler ışığında literatürde PV parametre tahmini konusunda Rezaei [43] tarafından sunulan umut verici bir Geometrik Ortalama Optimizasyonu (GMO) algoritmasını içeren bir çalışma bulunmamaktadır.

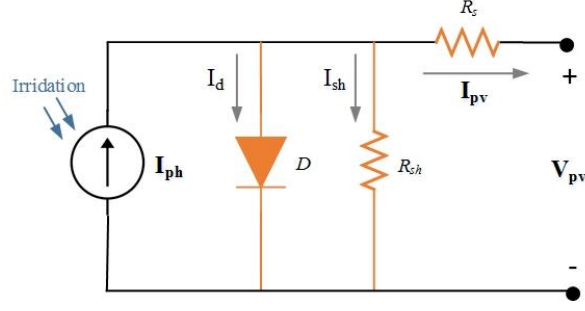
PV hücre modeli parametrelerinin gerçeğe en yakın şekilde tahmin edilebilmesi amacıyla son yıllarda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu makalede, PV hücresi parametre tahmini alanındaki güncel çalışmalar değerlendirilmekte, mevcut literatür doğrultusunda araştırma boşlukları ortaya konmakta ve gelecekteki araştırmalar için çeşitli yönelimler önerilmektedir. Önerilen yöntemin Balina Optimizasyon Algoritması ve Gri Kurt Optimizasyonu[44] ile karşılaştırılması, kıyaslama fonksiyonları üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar aracılığıyla incelenmekte ve elde edilen sonuçlar gelecekteki çalışmalar için değerlendirmeler sunmaktadır. Geometrik Optimizasyon Algoritması, WOA ve GWO algoritmalarına kıyasla daha üstün doğruluk ve performans göstermektedir. Elde edilen bulgular, fotovoltaiik sistemlerin toplam verimliliğinde artış sağlandığını ve bunun sonucunda işletme maliyetlerinde önemli azalmalar meydana geldiğini göstermektedir.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHOD)

Fotovoltaiik güneş enerji sisteminin en temel parçası güneş panelleridir. Güneş ışınlarını bünyesindeki güneş hücreleri ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Piyasada 5 W ila 340 W arası kapasitede güneş panelleri kullanılmaktadır. Güneş panelleri ayrıca hücre türüne göre polikristal, monokristal, ince film gibi çeşitlere ayrılmaktadır. Bu paneller matematiksel ve elektriksel olarak tek diyot modeli (SDM), çift diyot modeli (DDM) ve pv panel modeli olarak üç grupta toplanmaktadır.

A. Tek Diyot Modeli (SDM)

Basitliği ve kesinliği nedeniyle tek diyot modeli (SDM), güneş hücresinin statik yapısını tasvir etmek için geniş çapta kullanılır. Eşdeğer devre SDM'nin yapısı Şekil 1'de anlatılmıştır. Bu modelde, güneş ışığı bazlı hücrenin çıkış akımı Denklem (1)'de gösterilmektedir.



Şekil 1

Tek diyot modelin eşdeğer devresi.

Çıkış akımının formülasyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

burada I_{pv} güneş pili çıkış akımıdır, I_{ph} hücrenin ışınımına ve sıcaklığına bağlı olarak üretilen akımdır, I_d ve I_{sh} sırasıyla Denklem (2) ve (3)'te tanımlanan diyot akımı ve şönt direnç akımıdır:

$$I_d = I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{a \cdot V_t} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_{sh} = (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}) / R_{sh} \quad (3)$$

burada V_{pv} güneş pili çıkış voltajıdır, I_{sh} diyotun ters doyma akımıdır, R_s seri dirençtir, R_{sh} şönt direncidir, a diyot ideallik sabitidir ve V_t şu şekilde hesaplanan bağlantı termal voltajıdır:

$$V_t = k_b \cdot T / q \quad (4)$$

k_b Boltzmann sabitidir ($1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K), T ise Kelvin cinsinden p-n bağlantısının açıklığı ve q elektron yüküdür ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C). Denklem (2) ve (3) ile gösterildiği gibi Denklem (5)'te yeniden yazılabilir:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sd} \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{(a \cdot V_t)} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} \quad (5)$$

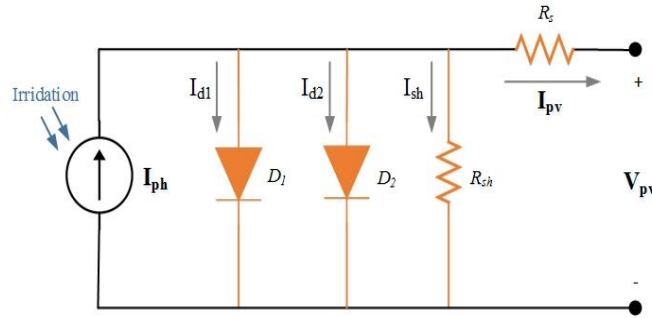
B. Çift Diyot Modeli (DDM)

Şekil 2, DDM için eşdeğer elektrik devresini göstermektedir [18,19]. Bu modelde, iki diyot mevcut kaynağa paralel olarak bağlanarak PN bağlantı noktasındaki fiziksel etkilerin daha iyi tanımlanmasını sağlamaktadır. Diyot D1 kesişimdeki difüzyon akımıdır, yani azınlık taşıyıcılarının difüzyon prosedürünü diyot aracılığıyla tüketim katmanına yeniden üretir.

Çıkış akımı Denklem (6) ve (7)'de verilmektedir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (6)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sd1} \cdot \left[\exp \left(\frac{(V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{(a_1 \cdot V_t)} \right) - 1 \right] - I_{sd2} \cdot \left[\exp \left(\frac{(V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{(a_2 \cdot V_t)} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} \quad (7)$$



Şekil 2

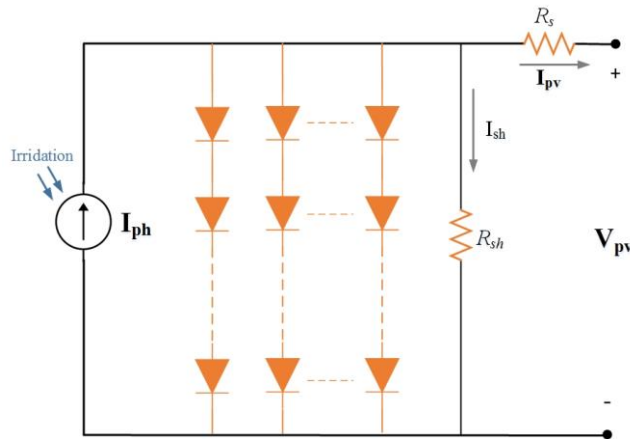
Çift diyot modelin eşdeğer devresi.

C. PV paneller

Şekil 3'te gösterilen bir fotovoltaik panel, belirli bir konfigürasyonda düzenlenmiş bir dizi M hücresinden oluşur. PV panelinde SDM'nin kullanılması her bileşen için öngörülmektedir. Çıkış akımı Denklem (8)'de verilmiştir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sd} \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + M \cdot I_{pv} \cdot R_s}{a \cdot M \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + M \cdot R_s \cdot I_{pv}}{M \cdot R_{sh}} \quad (8)$$

Bir PV panelin şeması Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3

Bir PV modelin eşdeğer devre şeması.

Ç. Problem Formülasyonu

Bu makalenin amacı, iki model için bu bilinmeyen faktörlerin en iyi tahminlerini bulmaktır. Ayırt edici faktörlere sahip modelin bilgileri ile test verilerinin çıkarılmasıyla elde edilen ve Denklem 9'da sunulan ortalama karekök hatanın (RMSE) iyileştirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, her modelin bilinmeyen değişkenler tahmin edilir, bu nedenle her modelin kendi fonksiyonu vardır. Hatanın fonksiyonu çalışmamızda amaç fonksiyonu olarak alınan Denklem (9)'da verilmiştir. Böylece çıkış akımının ölçülen verileri, Denklem (10) ve (11) ile tahmin edilip elde edilen verilerle hesaplanan hata da sınırlıdır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f(I_{pv}, V_{pv}, X)} \quad (9)$$

Denklem (10) ve (11)'de I_{pv} ve V_{pv} sırasıyla ölçülen akım ve voltajı temsil eder; k , ölçülen veri setinde yer alan örneklerin sayısıdır. Tek diyot modeli için X , $X = [I_{ph}, I_d, a, R_s, R_{sh}]$ olarak tanımlanabilir, benzer şekilde tek diyot modeli için X , $X = [I_{ph}, I_{d1}, I_{d2}, a_1, a_2, R_s, R_{sh}]$ olarak tanımlanabilir.

$$f(I_{pv}, V_{pv}, X) = I_{ph} - I_{sd} \cdot \left[\exp \left(\frac{(V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{(a \cdot V_t)} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} \right] \quad (10)$$

$$f(I_{pv}, V_{pv}, X) = I_{ph} - I_{sd1} \cdot \left[\exp \left(\frac{(V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{(a_1 \cdot V_t)} - 1 \right) - I_{sd2} \cdot \left[\exp \left(\frac{(V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{(a_2 \cdot V_t)} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \right] \right] \quad (11)$$

D. Geometrik Ortalama Optimizasyonu

Geometrik Ortalama Optimizasyonu (GMO) algoritması, hem çözümün kalitesini (uyum) hem de çözümlerin çeşitliliğini (çeşitlilik) aynı anda değerlendirebilen güçlü bir optimizasyon yöntemidir [43]. GMO, bir çözümün hem ne kadar iyi olduğunu (uyum) hem de diğer çözümlerden ne kadar farklı olduğunu (çeşitlilik) aynı anda değerlendirerek daha dengeli ve kapsamlı bir optimizasyon sağlar. Bulanık mantık sayesinde çözümler arasındaki karşılaştırmalar daha esnek ve gerçek hayata daha yakın bir şekilde yapılır. Tek bir ölçütte hem uyum hem de çeşitlilik bilgisi taşır. Bulanık mantık, çözümler arasındaki karşılaştırmaları daha esnek hale getirir. Pseudo-Geometrik Ortalama, çözümlerin genel bir değerlendirmesi için uygun bir yöntemdir. Çift Uyumlu İndeks (DFI) ise bu algoritmanın merkezinde yer alan ve bu iki faktörü bir araya getiren özel bir ölçüttür. Çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir:

- En İyi Konumun Belirlenmesi: Her bir çözüm (agent) için şimdiye kadar elde edilen en iyi çözüm bulunur.
- Üyelik Fonksiyonlarının Hesaplanması: Diğer çözümlerin, mevcut çözümün en iyi konumuna göre ne kadar iyi olduğu bulanık mantık kullanılarak üyelik fonksiyonları (MF) ile belirlenir.
- Üyelik Fonksiyonlarının Çarpımı: Diğer çözümlerin üyelik fonksiyonları çarpılarak bir çarpım elde edilir.
- Pseudo-Geometrik Ortalamanın Hesaplanması: Elde edilen çarpımların pseudo-geometrik ortalaması alınarak mevcut çözümün DFI değeri bulunur.
- Optimizasyon: DFI değeri maksimize edilerek hem çözümün kalitesi hem de çözümlerin çeşitliliği artırılır.

Bu algorithmada MF'leri tanımlamak için aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{a(x-c)}}; a < 0 \quad (12)$$

Denklem (12)'de, a ve c sigmoidal MF'nin parametrelerini temsil etmektedir. Aslında bu fonksiyon, x değişkenine ayarlanan “yüksek x değerlerine” bir MF atar. Denklem a ve c parametreleri her bulanıklaştırma çabasında bilinmiyorsa, bu parametrelerin deneme yanılma tekniği yoluyla ayarlanmasına ihtiyaç vardır. Bulanık sistemlerde parametre ayarı için deneme yanılma prosedürünün hatalı ve zaman alıcı bir süreç olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle bu parametrelerin diğer etkili yöntemlerle belirlenmesi daha iyidir. Bu yöntemlerden biri bulanık üyelik fonksiyonlarının a ve c gibi parametrelerinin Denklem (12)'de yapılması olabilir ve bu denklem istatistiksel parametrelere bağlıdır. Bu fikri göz önünde bulundurarak artan sigmoidal MF'de sırasıyla x değerlerinin ortalamasını ve standart sapmasını temsil eder. Ayrıca e Napier sabitidir. X 'i en iyi arama aracı için hesaplanan amaç fonksiyonu değeriyle değiştirerek, bu aracının bulanık MF değeri Denklem (13)'e göre hesaplanabilir:

$$MF_j^t = \frac{1}{1 + \exp \left[-\frac{4}{\sigma^t \sqrt{e}} \times (Z_{best,j}^t - \mu^t) \right]}; j = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

İterasyonda $Z_{best,j}^t$, j 'inci en iyi amaç fonksiyonu değeridir; sırasıyla, bu iterasyonda en iyi etmenlerin amaç fonksiyonu değerlerinin ortalaması μ^t ve σ^t standart sapmasıdır; MF_j^t , j 'inci en iyi temsilcinin MF değeridir ve N popülasyon sayısıdır. Daha sonra, çift uygunluk indeksi (DFI) olarak adlandırdığımız yeni bir indeks aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$DFI_i^t = MF_1^t \times \dots \times MF_{i-1}^t \times MF_{i+1}^t \times \dots \times MF_N^t = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N MF_j^t \quad (14)$$

DFI_i^t t 'inci yinelemedeki i 'inci etmenin ikili uygunluk indeksidir. Tüm en iyi temsilcilerin, her temsilci benzersiz bir küresel rehber aracı oluşturmaya katkıda bulunmasını sağlamak için, ağırlıkları kendilerine atanan DFI değerleri olan tüm zıt en iyi araçların ağırlıklı ortalaması tanımlanır. Denklem (15) söz konusu ilişkiyi göstermektedir:

$$Y_i^t = \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N DFI_j^t \times X_j^{best}}{\sum_{j=1}^N DFI_j^t + \varepsilon} \quad (15)$$

Y_i^t , t yinelemesinde i aracısı için hesaplanan benzersiz küresel kılavuz aracının konum vektörüdür, j 'inci arama aracısının kişisel şimdiye kadarki en iyi konum vektörünü temsil eder ve j 'inci arama aracısının t 'inci yinelemedeki ikili uygunluk indeksidir. Ayrıca ε , Denklemin paydasına eklenen çok küçük bir pozitif sayıdır. Burada ε 'nın sadece basit problemlerin, özellikle de tanım alanlarının merkezinde optimumun yer aldığı problemlerin çözümünde eklenmesinin gerekli olduğu dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, daha karmaşık problemleri, özellikle de optimumun alanın merkezinden uzakta olduğu problemleri çözerken ε 'nın eklenmesi gereksizdir. Çözülmesine karar verilen problem hakkında önceden bilgi yoksa Denklem (15)'ün paydasına ε eklenmemesi önerilir. Algoritma arama sürecini daha etkili hale getirmek ve algoritmayı gerçekleştirmenin hesaplama yükünü hafifletmek için, her bir rehber aracının hesaplanmasına yalnızca şimdiye kadarki en iyi araçların dahil edilmesi önerilir. Bu amaçla, tüm en iyi temsilciler, en yüksek DFI'den en düşük DFI'ye kadar sıralanır ve ilk N_{best} en iyi temsilciler, elit temsilciler olarak seçilir. N_{best} sayısını belirlemenin basit bir yolu olarak, yinelemeler boyunca doğrusal olarak azaltılabilir, böylece ilk yinelemedeki popülasyon büyüklüğüne eşit olacak ve son yinelemede 2'ye eşit olacaktır. Nihai yinelemede N_{best} için 2 değerinin göz önünde bulundurulması esas olarak elit temsilcilerin çeşitliliği daha fazla korumak için daima konumlarını değiştirmelerine yardımcı olur. Böylece Denklem (16)'e dönüştürülebilir.

$$Y_i^t = \frac{\sum_{j \in N_{best}, j \neq i} DFI_j^t \times X_j^{best}}{\sum_{j \in N_{best}} DFI_j^t + \varepsilon} \quad (16)$$

Kılavuz ajanların çeşitliliğinin daha iyi korunmasına yardımcı olabilecek doğası gereği daha stokastik olan bu ajanlar, GMO'da mutasyona uğramıştır. Mutasyon şemasının Gauss mutasyonu olduğu kabul edilir. Bu mutasyon biçimini rehber ajanlara empoze eden denklem aşağıdaki gibidir:

$$Y_{i,mut}^t = Y_i^t + w \times randn \times (Std_{max}^t - Std^t) \quad (17)$$

randn standart normal dağılımdan oluşturulan rastgele bir vektördür; Std^t iterasyonda şimdiye kadarki en iyi ajanlar için hesaplanan standart sapma vektörüdür; Std_{max}^t iterasyondaki kişisel şimdiye kadarki en iyi aracı boyutlarının maksimum standart sapma değerlerinden oluşan bir vektördür ve mutasyon adım boyutunu yinelemeler kadar azaltan ve Denklem (17) ile hesaplanan bir parametredir ve arama ajanlarına rehberlik etmek için kullanılır. Görülebileceği gibi, arama uzayındaki bir boyutun standart sapması ne kadar fazla olursa, en iyi etmenler arasındaki mevcut yüksek çeşitliliği korumak için kılavuz etmenlerin $Y_{i,mut}^t$ mutasyon adımı o kadar küçük olur, bu da tüm popülasyonun arama uzayında çeşitlendirilmesine katkıda bulunur. Öte yandan, arama uzayındaki bir boyutun standart sapması ne kadar az olursa, mutasyon mekanizmasında o kadar büyük bir adım atılmış olur, böylece arama uzayı genişletilir ve belirli boyuttaki etmenlerin çeşitliliği artar. Son olarak, güncelleme denklemleri her arama aracı için Denklemlere göre formüle edilebilir. Denklem (18) ile (20):

$$V_i^{t+1} = w \times V_i^t + \varphi \times (Y_{i,mut}^t - X_i^t); \varphi = 1 + (2 \times rand - 1) \times w \quad (18)$$

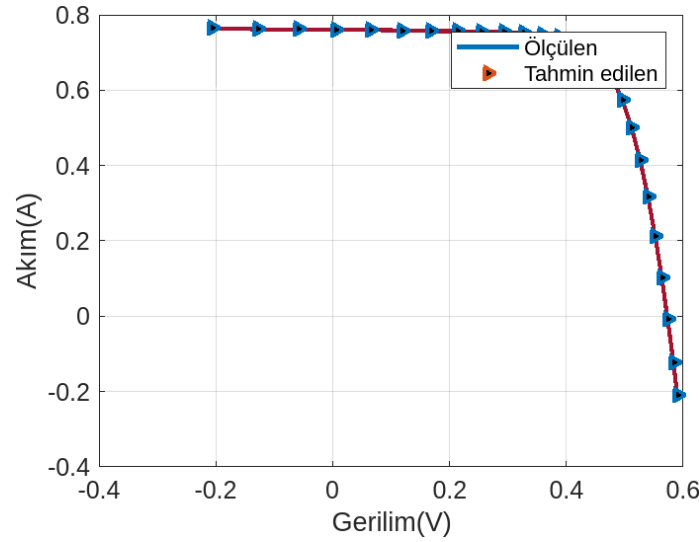
$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (19)$$

$$w = 1 - \frac{t}{t_{max}} \quad (20)$$

w bir kontrol parametresidir, t geçerli yinelemenin sayısıdır ve t_{max} maksimum yineleme sayısıdır. V_i^t i 'inci arama aracısının t 'inci iterasyondaki hız vektörüdür, V_i^{t+1} i 'inci arama aracısının $t + 1$ iterasyondaki hız vektörüdür. $Y_{i,mut}^t$, t yinelemesinde i etmeni için benzersiz küresel kılavuzun konum vektörüdür ve X_i^t t yinelemesindeki i 'inci etmenin konum vektörüdür. Ek olarak, rand aracının adımlarını tanımlayan bir ölçeklendirme parametre vektörüdür, $[0, 1]$ 'de üretilen rastgele bir sayıdır. Görüldüğü gibi vektörün uzunluğu $[0, 2]$, $[0,1, 1,9]$, $[0,2, 1,8]$, ..., $[0,8, 1,2]$, $[0,9, 1,1]$ ve $[1, 1]=\{1\}$ aralıklarında iterasyon arttıkça azalmaktadır. Bu azalan sıralama için dikkate alınmıştır: aralıkları, ilk yinelemelerde GMO'nun keşif kapasitesini arttırabilmenin yanı sıra, arama-kullanma geçişinin iyi dengelenmiş olmasına yardımcı olmak için son yinelemelerde kullanıma odaklanmayı oldukça arttırabilmektedir.

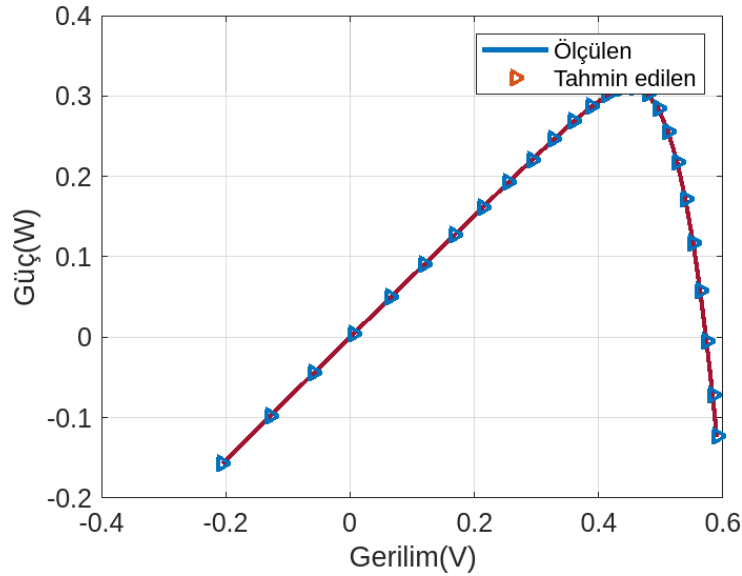
BULGULAR ve TARTISMA (RESULTS and DISCUSSION)

GMO [43], PV panellerin parametre tahminlerini yaparken panel verilerini de alarak tahminde bulunur. Panelin elektriksel özellikleri, çevresel koşullar (sıcaklık, güneş ışınımı) gibi veriler toplanır. Toplanan verilere uygun bir matematiksel model oluşturulur. Modelin parametreleri, ölçülen verilere en iyi uyan değerlere ayarlanır [8]. Modelin tahmin ettiği değerler, gerçek ölçümlerle karşılaştırılarak doğrulanır [11, 15]. Bu tahminlere göre panel grafikleri elde edilir. Bu bölümde, GMO da dahil olmak üzere çeşitli tekniklerin sonuçlarının yakınsama oranı ve sonuç kalitesi üzerine değerlendirmeler yapılmıştır. Tek diyot modeli için GMO ile yapılan tahminler ile elde edilen I-V ve P-V grafikleri Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4

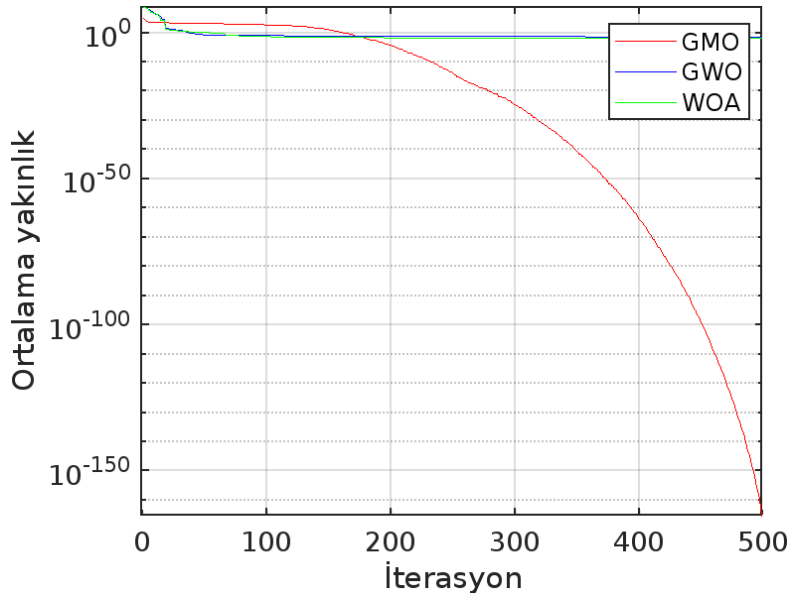
SDM model için I-V karakteristiği.



Şekil 5

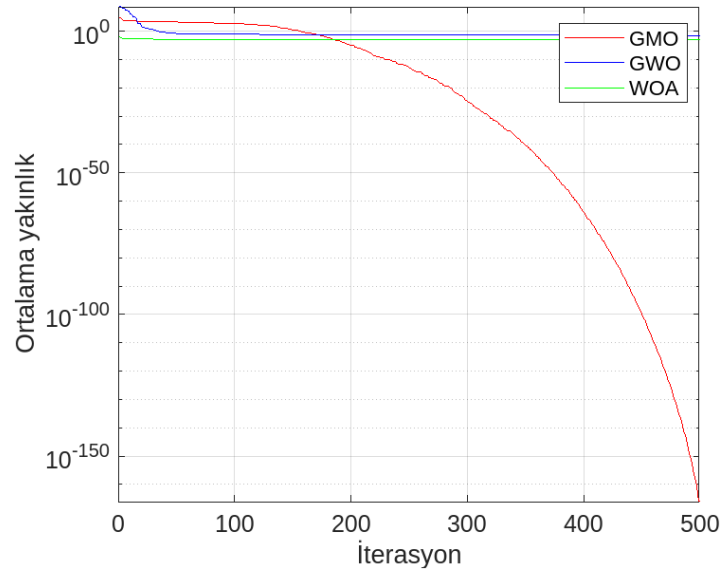
SDM model için P-V karakteristiği.

GMO'nun bu sorunu çözmedeki etkinliğini belirlemek için balina optimizasyon algoritması (WOA) ve gri kurt optimizeri (GWO) [44] ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan algoritmalarla ilgili parametreler şu şekilde sıralanabilir. GWO ve WOA için a değeri 2 ile 0 arasında lineer değişmektedir. Bu en yeni, köklü yöntemler geçmiş araştırmalarda performans ve çözüm kalitesi açısından çeşitli faydalar göstermiştir. Bu nedenle önerilen GMO tabanlı yöntemin ne kadar rekabetçi olduğunu görmek için bu algoritmalar en son teknoloji karşılaştırmalı yöntemler olarak değerlendirilebilir. Tüm sonuçlar, rastgele başlatılan 30 otonom çalışmanın ve her birinde 30 arama aracısının geliştirilmesinin genel sonucuna dayanarak elde edilir. 500 iterasyon olarak algoritmalar çalıştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen tüm sonuçlar adil bir karşılaştırma yapılabilmesi için tek bir bilgisayar kullanılarak kayıt altına alınmış ve tüm testler aynı koşullarda yeniden yapılmıştır. Test ve programlamaya yönelik tüm deneylerin Intel(R) Core(TM) i5-6400 CPU, 2712 Mhz, 4 Çekirdek, 4 Mantıksal İşlemci CPU, 8 GB RAM, 2.70 GHz frekans ve 223 GB sabit diske sahip bilgisayarda gerçekleştirilmesi için MATLAB 2023 yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 6

GMO, GWO ve WOA kullanarak SDM parametreleri belirlenirken algoritmanın hata-iterasyon değerleri.



Şekil 7

GMO, GWO ve WOA kullanarak DDM parametreleri belirlenirken algoritmanın hata-iterasyon değerleri.

Şekil 6’de GMO, GWO ve WOA için tek diyot modeli (SDM) ile hesaplanan PV panel değerleri için algoritmaların yakınsama oranlarının iterasyonlarla değişimi gösterilmiştir. Bu grafiklere göre, 500 iterasyon için GMO, 10^{-160} gibi bir hata oranı ile parametreleri tahmin etmiştir ve daha düşük iterasyon değerlerinde GWO, 0,04 ve WOA, 0,06 iken bu algoritmalarından daha başarılı bir sonuç elde etmiştir. Elde edilen değerler ve RMSE hata oranları Sunrise Solartech SR-M672310 paneli için Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1

Sunrise Solartech SR-M672310 paneli için tahmin edilen SDM parametrelerin değerleri

Algoritma	$I_{ph} (A)$	$I_{sd} (\mu A)$	$R_s (\Omega)$	$R_{sh} (\Omega)$	a	RMSE
GMO	9,253	3,41e-10	0,324	166,37	1,005	1e-160
GWO	9,29	3,29e-10	0,34	165,8	1,0009	4e-02
WOA	9,22	3,36e-10	0,308	166,6	1,005	6e-02

Şekil 7, çift diyot modeli (DDM) kullanarak GMO, GWO ve WOA algoritmalarının PV panel parametrelerini tahmin etmedeki yakınsama oranlarını göstermektedir. 500 iterasyon için:

- GMO: Hata oranı 10^{-170} .
- GWO: Hata oranı 0,05.
- WOA: Hata oranı 0,008.

Bu grafiklere göre, GMO ilk iterasyonlarda GWO ve WOA'dan daha hızlı yakınsamaktadır. 500 iterasyonda ise GMO'nun hata oranı GWO ve WOA'dan daha düşüktür. Tahmin edilen DDM parametre değerleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2

Sunrise Solartech SR-M672310 paneli için tahmin edilen DDM parametrelerin değerleri

<i>Algoritma</i>	<i>I_{ph} (A)</i>	<i>I_{sd} (μA)</i>	<i>R_s (Ω)</i>	<i>R_{sh} (Ω)</i>	<i>a</i>	<i>RMSE</i>
GMO	9,25	3,20e-10	3,43e-10	0,34	166,37	1,001
GWO	9,28	3,33e-10	3,42e-10	0,315	166,9	0,992
WOA	9,28	3,21e-10	3,41e-10	0,345	165,5	1,004

GMO sonuçlarındaki değişikliklerin ana nedeni, önerilen yöntemin arama ve çıkarma eğilimleri arasında daha iyi ve daha güvenilir bir denge kurabilmesidir. Diğer yaklaşımlara benzer şekilde GMO da daha fazla çok yönlülük, daha az araştırıcı ve sömürücü davranışlar sergilenmektedir. Geniş olarak keşif süreci başlatır ve son adımlarda daha fazla çıkarma modeliyle devam eder. GMO'nun yerel optimum durgunluk durumunda zamanla değişen güçlü mekanizmaları, keşfedilen diğer yaklaşımların çevresini araştırmaya yardımcı olur ve en az hatayla yakınsama sağlar. Sonuç olarak, doğruluk, tutarlılık, yakınsama hızı ve mutlak hata açısından GMO daha üstün özellikler sergilemektedir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Bir fotovoltaiik (PV) sistemin doğru bir şekilde tanımlanması son derece önemlidir. PV model için en uygun parametrelerin elde edilmesi süreci, özel bir optimizasyon metodolojisinin uygulanmasını gerektirir. Çeşitli güneş modülü modellerinin araştırılması, Geometrik Ortalama Optimizasyonu (GMO) olarak adlandırılan yeni bir optimizasyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilebilir. GMO kullanımı, ayarlama gerektiren daha az sayıda değişken içerir. IV'ün özelliklerini değerlendirmek için GMO tarafından oluşturulan parametreler, deneysel verilerden elde edilen parametrelerle dikkate değer bir benzerlik göstermektedir. Kısmi gölgeleme gibi azalan ışıınım seviyeleri ile karakterize edilen senaryolarda, GMO, çeşitli ışıınım ve sıcaklık durumları spektrumunu kapsayan optimum modül konfigürasyonlarını belirleme yeteneğini sergiler. Geometrik Optimizasyon Algoritması, WOA ve GWO algoritmalarına göre hassasiyeti ve etkinliğiyle öne çıkmaktadır. Tüm PV sisteminin optimum performansını elde etmek için fotovoltaiik (PV) modüllerin hassas simülasyonu gereklidir. Sonuç olarak, fotovoltaiik (PV) sistem genel verimliliğin arttığını göstermekte ve bu da işletme giderlerinde beklenen maliyet düşüşlerine yol açmaktadır.

Etik Beyan (Ethical Declaration)

Bu çalışma, özgün bir araştırma makalesi olup daha önce başka bir dergi ve konferansta yayınlanmamıştır.

Yazar Katkıları (Authors Credit)

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) G.N. (%100)

Veri Toplama (CRediT 2) G.N. (%100)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) G.N. (%100)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) G.N. (%100)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) G.N. (%100)

Finansman (Funding)

Bu çalışma kapsamında herhangi bir kurum/kuruluştan finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarın bu çalışma için beyan ettiği herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The author has no conflicts of interest to disclose for this study.)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları 3: Sağlık ve Kaliteli yaşam

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] M. Hacıbeyoğlu, M. Çelik, Ö. Erdaş Çiçek, K en yakın komşu algoritması ile binalarda enerji verimliliği tahmini, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 5(2) (2023), 65–74. doi:10.47112/neufmbd.2023.10
- [2] S. Ata, M.E. Boyacıoğlu, R. Şahin, A. Kahraman, ORÇ ile düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından elektrik üretilmesinde ıslak ve yeni nesil akışkanların çevresel ve termodinamik performanslarının karşılaştırılması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2(1) (2021), 1–13. doi:10.47112/neufmbd.2021.6
- [3] G20 Climate Sustainability Working Group, Country experiences on climate and energy, (2018). https://g20.utoronto.ca/2018/g20_country_experiences_on_climate_and_energy.pdf
- [4] IRENA, Opportunities to accelerate national energy transitions through advanced deployment of renewables, (2018). <https://www.apren.pt/contents/publicationsothers/irena-g20-opportunities-2018.pdf>
- [5] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95(2) (2011), 586–594. doi:10.1016/j.solmat.2010.09.023
- [6] M. Siddiqui, M. Abido, Parameter estimation for five- and seven-parameter photovoltaic electrical models using evolutionary algorithms, *Applied Soft Computing*. 13(12) (2013), 4608–4621. doi:10.1016/j.asoc.2013.07.005
- [7] O. Abdalla, H. Rezk, E.M. Ahmed, Wind driven optimization algorithm based global MPPT for PV system under non-uniform solar irradiance, *Solar Energy*. 180 (2019), 429–444. doi:10.1016/j.solener.2019.01.056
- [8] S.P. Aly, S. Ahzi, N. Barth, An adaptive modelling technique for parameters extraction of photovoltaic devices under varying sunlight and temperature conditions, *Applied Energy*. 236 (2019), 728–742. doi:10.1016/j.apenergy.2018.12.036
- [9] A. Antoniou, W.S. Lu, Practical optimization: Algorithms and engineering applications, Springer International Publishing, 2007. doi:10.1007/978-0-387-71107-2_16
- [10] R. Abbassi, A. Abbassi, A.A. Heidari, S. Mirjalili, An efficient salp swarm-inspired algorithm for parameters identification of photovoltaic cell models, *Energy Conversion and Management*. 179 (2019), 362–372. doi:10.1016/j.enconman.2018.10.069
- [11] D. Allam, D.A. Yousri, M.B. Eteiba, Parameters extraction of the three diode model for the multi-crystalline solar cell/module using Moth-Flame Optimization Algorithm, *Energy Conversion and Management*. 123 (2016), 535–548. doi:10.1016/j.enconman.2016.06.052
- [12] D.S. Pillai, N. Rajasekar, Metaheuristic algorithms for pv parameter identification: A comprehensive review with an application to threshold setting for fault detection in pv systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82 (2018), 3503–3525. doi:10.1016/j.rser.2017.10.107
- [13] L. Sandrolini, M. Artioli, U. Reggiani, Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis, *Applied Energy*. 87(2) (2010), 442–451. doi:10.1016/j.apenergy.2009.07.022
- [14] N. Muangkote, K. Sunat, S. Chiewchanwattana, S. Kaiwinit, An advanced onlooker-ranking-based adaptive differential evolution to extract the parameters of solar cell models, *Renewable Energy*. 134 (2019), 1129–1147. doi:10.1016/j.renene.2018.09.017
- [15] K. Yu, J.J. Liang, B.Y. Qu, X. Chen, H. Wang, Parameters identification of photovoltaic models using an improved JAYA optimization algorithm, *Energy Conversion and Management*. 150 (2017), 742–753. doi:10.1016/j.enconman.2017.08.063
- [16] A.A. Cardenas, M. Carrasco, F. Mancilla-David, A. Street, R. Cardenas, Experimental parameter

- extraction in the single-diode photovoltaic model via a reduced-space search, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 64(2) (2017), 1468–1476. doi: 10.1109/TIE.2016.2615590
- [17] L.H.I. Lim, Z. Ye, J. Ye, D. Yang, H. Du, A linear identification of diode models from single I-V characteristics of PV panels, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 62(7) (2015), 4181–4193. doi: 10.1109/TIE.2015.2390193
- [18] A.A. Elbaset, H. Ali, M. Abd-El Sattar, Novel seven-parameter model for photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 130 (2014), 442–455. doi:10.1016/j.solmat.2014.07.016
- [19] P. Bharadwaj, K.N. Chaudhury, V. John, Sequential optimization for PV panel parameter estimation, *IEEE Journal of Photovoltaics*. 6(5) (2016), 1261–1268. doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2574128
- [20] S. Ali Blaifi, S. Moulahoum, B. Taghezouit, A. Saim, An enhanced dynamic modeling of PV module using Levenberg-Marquardt algorithm, *Renewable Energy*. 135 (2019), 745–760. doi:10.1016/j.renene.2018.12.054
- [21] R. Benkercha, S. Moulahoum, B. Taghezouit, Extraction of the PV modules parameters with MPP estimation using the modified flower algorithm, *Renewable Energy*. 143 (2019), 1698–1709. doi:10.1016/j.renene.2019.05.107
- [22] S. Kumar, H.S. Sahu, S.K. Nayak, Estimation of MPP of a double diode model PV module from explicit I-V characteristic, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 66(9) (2019), 7032–7042. doi: 10.1109/TIE.2018.2877116
- [23] A. Senturk, R. Eke, A new method to simulate photovoltaic performance of crystalline silicon photovoltaic modules based on datasheet values, *Renewable Energy*. 103 (2017), 58–69. doi:10.1016/j.renene.2016.11.025
- [24] S. Ebrahimi, E. Salahshour, M. Malekzadeh, F. Gordillo, Parameters identification of PV solar cells and modules using flexible particle swarm optimization algorithm, *Energy*. 179 (2019), 358–372. doi:10.1016/j.energy.2019.04.218
- [25] B. Subudhi, R. Pradhan, Bacterial foraging optimization approach to parameter extraction of a photovoltaic module, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 9(1) (2018), 381–389. doi: 10.1109/TSSTE.2017.2736060
- [26] G. Xiong, J. Zhang, X. Yuan, D. Shi, Y. He, G. Yao, Parameter extraction of solar photovoltaic models by means of a hybrid differential evolution with whale optimization algorithm, *Solar Energy*. 176 (2018), 742–761. doi:10.1016/j.solener.2018.10.050
- [27] S. Li, W. Gong, X. Yan, C. Hu, D. Bai, L. Wang, L. Gao, Parameter extraction of photovoltaic models using an improved teaching-learning-based optimization, *Energy Conversion and Management*. 186 (2019), 293–305. doi:10.1016/j.enconman.2019.02.048
- [28] Q. Niu, L. Zhang, K. Li, A biogeography-based optimization algorithm with mutation strategies for model parameter estimation of solar and fuel cells, *Energy Conversion and Management*. 86 (2014), 1173–1185. doi:10.1016/j.enconman.2014.06.026
- [29] X. Chen, K. Yu, Hybridizing cuckoo search algorithm with biogeography-based optimization for estimating photovoltaic model parameters, *Solar Energy*. 180 (2019), 192–206. doi:10.1016/j.solener.2019.01.025
- [30] N. Barth, R. Jovanovic, S. Ahzi, M.A. Khaleel, PV panel single and double diode models: Optimization of the parameters and temperature dependence, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 148 (2016), 87–98. doi:10.1016/j.solmat.2015.09.003
- [31] J. Ma, Z. Bi, T.O. Ting, S. Hao, W. Hao, Comparative performance on photovoltaic model parameter identification via bio-inspired algorithms, *Solar Energy*. 132 (2016), 606–616. doi:10.1016/j.solener.2016.03.033
- [32] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, A. Shamsudin, A critical evaluation of computational methods

- for photovoltaic cell parameter extraction based on two diode model, *Solar Energy*. 85(9) (2011), 1768–1779. doi:10.1016/j.solener.2011.04.015
- [33] W. Gong, Z. Cai, Parameter extraction of solar cell models using repaired adaptive differential evolution, *Solar Energy*. 94 (2013), 209–220. doi:10.1016/j.solener.2013.05.007
- [34] L.L. Jiang, D.L. Maskell, J.C. Patra, Parameter estimation of solar cells and modules using an improved adaptive differential evolution algorithm, *Applied Energy*. 112 (2013), 185–193. doi:10.1016/j.apenergy.2013.06.004
- [35] D. Allam, D. Yousri, M. Eteiba, Parameters extraction of the three diode model for the multi-crystalline solar cell/module using moth-flame optimization algorithm, *Energy Conversion and Management*. 123 (2016), 535–548. doi:10.1016/j.enconman.2016.06.052
- [36] D. Alam, D. Yousri, M. Eteiba, Flower pollination algorithm based solar PV parameter estimation, *Energy Conversion and Management*. 101 (2015), 410–422. doi:10.1016/j.enconman.2015.05.074
- [37] M. Ismail, M. Moghavvemi, T. Mahlia, Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm, *Energy Conversion and Management*. 73 (2013), 10–25. doi:10.1016/j.enconman.2013.03.033
- [38] K. El-Naggar, M. AlRashidi, M. AlHajri, A. Al-Othman, Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification, *Solar Energy*. 86(1) (2012), 266–274. doi:10.1016/j.solener.2011.09.032
- [39] A.R. Jordehi, Time varying acceleration coefficients particle swarm optimisation (TVACPSO): A new optimisation algorithm for estimating parameters of PV cells and modules, *Energy Conversion and Management*. 129 (2016), 262–274. doi:10.1016/j.enconman.2016.09.085
- [40] H. Rezk, A. Fathy, A novel optimal parameters identification of triple-junction solar cell based on a recently meta-heuristic water cycle algorithm, *Solar Energy*. 157 (2017), 778–791. doi:10.1016/j.solener.2017.08.084
- [41] A. Askarzadeh, A discrete chaotic harmony search-based simulated annealing algorithm for optimum design of PV/wind hybrid system, *Solar Energy*. 97 (2013), 93–101. doi:10.1016/j.solener.2013.08.014
- [42] A. Askarzadeh, A. Rezazadeh, Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms, *Solar Energy*. 86(11) (2012), 3241–3249. doi:10.1016/j.solener.2012.08.018
- [43] F. Rezaei, H.R. Safavi, M. Abd Elaziz, S. Mirjalili, GMO: geometric mean optimizer for solving engineering problems, *Soft Computing*. 27(15) (2023), 10571–10606. doi:10.1007/s00500-023-08202-z
- [44] A. Ünlü, İ. İlhan, A novel hybrid gray wolf optimization algorithm with harmony search to solve multi-level image thresholding problem, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 5(2) (2023), 230–245. doi:10.47112/neufmbd.2023.21