



Comparative performance analysis on parameter extraction of solar cell models using meta-heuristic algorithms

Zeynep Garip^{1*}, Murat Erhan Çimen², Ali Fuat Boz²

¹Computer Technology Department, Adapazarı Vocational High School, Sakarya University, Serdivan Sakarya, 54500, Turkey

²Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Sciences, Serdivan Sakarya, 54500, Turkey

Highlights:

- Single and double diode models of solar cells
- Parameter Optimization with Meta-Heuristic Algorithms
- IAE and RMSE performance criteria in algorithm

Keywords:

- Solar cell
- Meta-heuristic
- Algoritma
- Optimal Parameters

Article Info:

Research Article
Received:03.07.2019
Accepted:01.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.586269

Correspondence:

Author: Zeynep GARİP
e-mail: zbatik@sakarya.edu.tr
phone: +90 264 295 6735

Graphical/Tabular Abstract

In this comparative study, the optimization solution performances of the PSO, FA, CS and FPA meta-heuristic algorithms for the estimation of parameter values for single and double diode solar cell models are analyzed as shown in Figure 1. The accuracy, consistency, convergence rate and efficiency of each method are evaluated according to the control parameters factors.

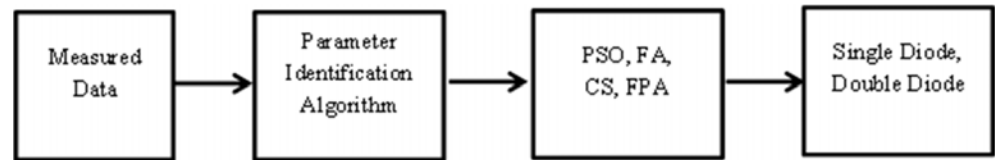


Figure A. Solar Cell Model Process

Purpose: In order to obtain the optimal parameters of single and double diode models of solar cells, meta-heuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO), Firefly Algorithm (FA), Cuckoo Search (CS) and Flower Pollination Algorithm (FPA) were used.

Theory and Methods:

IAE and RMSE objective functions were used to minimize the error between the obtained data of the single and double diode models and the experimental data. In order to evaluate the performance of the developed algorithms, they were compared numerically and graphically with other meta-heuristic algorithms in the literature.

Results:

To showcase the effectiveness, accuracy and performances of developed algorithms, the parameters and results of single diode and double diode model is compared with existing literature like GA, PS, HS and SA. In addition, the results obtained were examined using error and statistical analyzes to demonstrate accuracy.

Conclusion:

Comparative analysis data showed that the convergence rate of FPA is faster, more robust, efficient and has the best performance in terms of accuracy in comparison with other methods.



Meta-sezgisel algoritmalar kullanarak güneş pili modellerinin parametre çıkarımında karşılaştırmalı performans analizi

Zeynep Garip^{1*}, Murat Erhan Çimen², Ali Fuat Boz²

¹Sakarya Üniversitesi, Adapazarı Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, 54050, Serdivan Sakarya, Türkiye

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü 54050, Serdivan Sakarya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Güneş pillerinin tek ve çift diyot modelleri
- Meta-Sezgisel Algoritmalar ile Parametre Optimizasyonu
- Algoritmada IAE ve RMSE performans kriterleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 03.07.2019
Kabul: 01.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.586269

Anahtar Kelimeler:

Güneş pili,
Meta-Sezgisel,
algoritma,
optimal parametre

ÖZET

Güneş pili modellemede parametrelerin optimizasyonu, sistemin farklı çalışma koşulları altında modelin durumunu izlemek ve olası hataları bulmaya imkân sağlar. Tek ve çift diyot güneş pili modellerindeki optimal parametrelerin doğru tahmin etmek amacıyla parçacık sürü optimizasyon (PSO), ateş böceği (FA), guguk kuşu (CS) ve çiçek tozlaşma (FPA) meta-sezgisel algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca bu algoritmalarla hesaplanan ve deneysel diyot parametre değerleri arasındaki hatayı minimize etmek amacıyla IAE ve RMSE amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Bu algoritmaların doğruluklarını ve performanslarını değerlendirmek amacıyla literatürde bulunan genetik algoritma (GA), Benzetimli Tavlama (SA), Harmoni arama (HS) ve Pattern arama (PS) meta-sezgisel algoritmalarla sayısal ve grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar güneş pillerinin parametrelerinin tahmin probleminde FPA'nın diğer yöntemlere göre doğruluk ve güvenilirlik açısından üstün performansa sahip olduğu göstermektedir. Sonuç olarak meta-sezgisel algoritmalarla optimize edilmiş parametreler kullanılarak güneş pilleri modellerinin iyileştirildiği saptanmıştır.

Comparative performance analysis on parameter extraction of solar cell models using meta-heuristic algorithms

H I G H L I G H T S

- Single and double diode models of solar cells
- Parameter Optimization with Meta-Heuristic Algorithms
- IAE and RMSE performance criteria in algorithm

Article Info

Research Article
Received:03.07.2019
Accepted:01.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.586269

Keywords:

Solar cell,
Meta-Heuristic,
algorithm,
optimal parameters

ABSTRACT

Optimization of parameters in solar cell modeling allows monitoring the status of the model under different operating conditions of the system and finding possible errors. In order to accurately predict optimal parameters in single and dual diode solar cell models, meta-heuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO), Firefly Algorithm (FA), Cuckoo Search (CS) and Flower Pollination (FPA) were used. In addition, IAE and RMSE objective functions were used to minimize the error between the experimental diode parameter values calculated by these algorithms. In order to evaluate the accuracy and performance of these algorithms, Genetic algorithm (GA), Simulated Annealing (SA), Harmony Search (HS) and Pattern Search (PS) in the literature were compared numerically and graphically with meta-heuristic algorithms. Comparative results showed that FPA had superior performance in terms of accuracy and reliability compared to other methods in the problem of estimating the parameters of solar cells. Consequently, it was determined that solar cell models were improved by using parameters optimized by meta-heuristic algorithms.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yenilenebilir enerji kaynakları konusu uzun yıllar araştırmacıların ilgisini çekmiş ve güncelliğini koruyan bir çalışma alanı olmuştur. Güneş enerjisi, yakıtların tükenmesi, çevre kirliliği ve iklim değişikliği göz önüne alındığında sürdürülebilir ve çevre dostu olduğu için geleceğin enerji kaynağı olarak düşünülmektedir. Güneş enerjisi doğada kolayca bulunması, düşük maliyeti, kurulum kolaylığı ve çevre dostu gibi özelliklerle ön plana çıkmaktadır.

Güneş enerjisi, güneş pili gibi sistemler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür [1]. Güneş pillerinin verimliliklerini artırmak için uygun modellerin seçilmesi gerekmektedir [2]. Güneş pili modellemede parametrelerin doğru tahmin edilmesi modelin performansı açısından önemlidir. Düşük hassasiyetli bir parametre hem büyük hatalara neden olur hem de maksimum güç noktası takibinin başarısız olmasına da yol açmaktadır [3]. Güneş pilini modelleyebilmek için doğrusal olmayan akım-gerilim (I-V) karakteristiği ile matematiksel modeli çıkarılır. Burada I-V karakteristiği güneş pillerinin fiziksel parametre değerlerinin çıkarımı, performans değerlendirmesi, tasarım ve kontrol çalışmalarında önemlidir [4]. Güneş pili modellerinin farklı çalışma koşullarında davranışını test etmek amacıyla eşdeğer devre modeli kullanılmaktadır. Uygulamada, doğrusal olmayan I-V karakteristiğini tanımlamak amacıyla genellikle iki eşdeğer devre modeli vardır. Bunlar tek ve çift diyotlu güneş pili modelleridir. Güneş pili modellerinin davranışını tanımlayan ana parametreler üretilen fotoakım, doyma akımı, seri direnç, paralel devre direnci (şönt) ve idealite faktörleridir. Bu parametrelerin periyodik ve doğru tahmini, hassas modelleme sağlamak ve güneş pili sisteminin performansının doğru değerlendirilmesi için gereklidir [5]. Literatürde tek ve çift diyotların modellenmesi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Parametreler genellikle geleneksel veya meta-sezgisel yaklaşımlarla tahmin edilmektedir. Son zamanlarda meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri güneş pillerinin parametre çıkarım problemlerinde analitik ve yinelemeli tekniklerin dezavantajlarından kaçınmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri başlangıç kısıtları olmaksızın ve yerel optimum noktalardan kaçınarak doğrusal olmayan problemleri çözmeye yeteneklerini kullanarak global arama süreçlerini tamamlamaktadır [2]. Yakın zamanda güneş pillerinin parametre tahmininde yapılan araştırmalarda Genetik Algoritma (GA), Yapay Sinir Ağı (NN), Bulanık Mantık (FL), Bakteriyel Besin Arama Optimizasyon Algoritması (BFOA), Karınca Koloni Optimizasyonu (ACO), Guduk Kuşu (CS), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Koloni (ABC), Ateş Böceği (FA), Benzetimli Tavlama (SA) gibi meta-sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır [6-15].

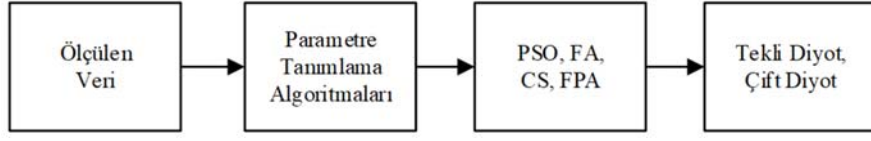
Araştırmacılar tarafından kullanılan meta-sezgisel algoritmalar hem tek diyotlu hem de çift diyotlu güneş pili modellerin parametrelerinin çıkarımında etkili sonuçlar vermektedir. Bu algoritmalar arasındaki fark global optimum

çözümüne ulaşmadaki yakınsama hızlarıdır. Dinamik model olan fotovoltaiik güneş pili kullanılarak yılın farklı günlerine ait belirli zaman dilimlerindeki sıcaklığı tahmin etmek amacıyla Choppe vd. tarafından PSO tekniği kullanılmıştır [16]. Harrag vd. [17] tarafından yapılan başka bir çalışmada ise üç, beş ve yedi parametrelili fotovoltaiik pilin eşdeğer elektrik modelinin karakterizasyonu gerçekleştirmek için PSO tekniği önerilmiştir. Her iki çalışmada da PSO algoritmasının global arama özelliği kullanılmış ve araştırmacıların elde ettikleri sonuçlara göre deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farkın minimuma yaklaştığı gözlenmiştir. Araştırmacıların elde ettikleri sonuçlara göre, çalışmalarında kullanıldıkları PSO algoritmasının global arama özelliği deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farkın birbirine çok yakın olmasına olanak sağlamıştır. Farklı bir çalışmada ise PSO algoritmasına mutasyon parametresi eklenerek yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile erken yakınsama önlenerek arama süreci iyileştirilmiş ayrıca güneş pili ve modül parametresi çıkarımı sağlanmıştır [18]. Louzazni vd. tarafından yapılan çalışmalarda farklı güneş ışınım ve sıcaklık değerleri altında tek, çift diyot güneş pili ve fotovoltaiik modüllerin parametrelerini çıkarmak amacıyla FA algoritmasını kullanmışlardır. Tahmin edilen ve deneysel parametre değerleri arasındaki farkı hesaplamak amacıyla en küçük karekök karesel hata (RMSE), kalan kareler toplamı (SSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) yöntemlerini kullanmışlardır [19-20]. FA'nın kullanıldığı diğer bir çalışmada ise algoritmanın yerel arama özelliği geliştirilerek optimal parametreler Abad tarafından hesaplanmıştır [21]. Geliştirilen FA algoritmasının performansı test etmek amacıyla standart FA, elektromanyetizma benzeri (EM) algoritma ve elektromanyetizma (EMW) yöntemleriyle karşılaştırmışlardır. Ma vd. tarafından yapılan çalışmada tek diyot güneş pili modelinin parametrelerini tahmin etmek amacıyla CS algoritmasını kullanmıştır [22]. Farklı bir çalışmada ise Alam vd. tarafından tekli ve çift diyot güneş pilinin parametrelerini doğru bir şekilde çıkarmak amacıyla FPA algoritmasını kullanmıştır. FPA algoritmasını LMSA (Benzetilmiş Tavlama ile birleştirilen Levenberg-Marquardt Algoritması), MPCOA, CS, ABSO, ABC, Newton ve PS algoritmalarıyla kıyaslayarak performans analizi gerçekleştirmiştir [23].

Bu karşılaştırmalı çalışmada PSO, FA, CS ve FPA meta-sezgisel algoritmaların tek ve çift diyotlu güneş pili modellerinin parametre değerlerinin tahmini Şekil 1'de verilen akış diyagramı kullanılarak optimizasyon performansları incelenmiştir. Her bir yöntemin doğruluğu, tutarlılığı, yakınsama hızı, verimliliği kontrol parametre faktörlerine bağlı olarak değerlendirilmektedir.

2. GÜNEŞ PİLLERİNİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF SOLAR CELLS)

Güneş pillerinin parametrelerini tahmin etmeden önce matematiksel modelin doğru bir şekilde çıkarılması gerekmektedir [5]. Güneş pillerinin performansını



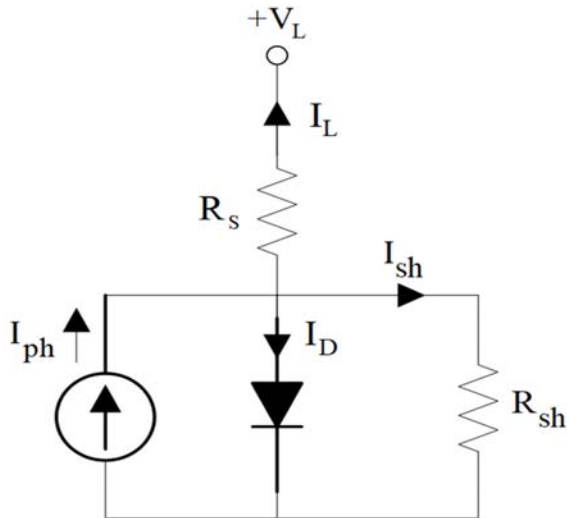
Şekil 1. Güneş Pili Modelleme Süreci (Solar Cell Modeling Process)

tanımlamak için genel olarak iki devre modeli (tek ve çift diyot) kullanılır. Tekli diyot güneş pili modeli normal çalışma koşullarında çift diyotlu güneş pili modeline göre daha iyi performans sağlar diğer taraftan ise düşük ışınımda performansı düşüktür [37].

Güneş pili modelini tahmini için ölçülmüş bir I-V verisi seti göz önüne alındığında, tekli diyot modeli için beş, çift diyotlu modeli için ise yedi tahmin edilecek parametre bulunmaktadır. Bunlar tek diyot için $R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD}, n$, çift diyot için ise $R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD1}, I_{SD2}, n_1, n_2$ bilinmeyen parametrelerdir. Bu denklemlerde I_{ph} fotoakım, R_s seri direnç, R_{sh} paralel devre direnci (şönt, I_{SD} doyma akımı, I_{SD1}, I_{SD2} sırasıyla yayılım ve doyma akımları, n idealite faktörü, n_1 ve n_2 difüzyon ve rekombinasyon diyot idealite faktörleri tahmin edilmektedir. V_L güneş pili çıkış voltajı, V_t (q/nkT) termal voltaj, k Boltzmann sabiti ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K), q ($1,60217646 \times 10^{-19}$ C) elektronik şarj ve T ise Standart test koşullarındaki sıcaklıktır (STC-T= 25°C , A.M 1,5 ve 1000 W/m²). Bu modellerde statik I-V karakteristiğini tanımlanarak simülasyon ortamında başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

2.1. Tekli Diyot Model (Single Diode Model)

Tek diyotlu güneş pili modeli, Şekil 2’de gösterilen eşdeğer devresi kullanılarak temsil edilmektedir. Bu model güneş pillerinin davranışını temsil etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2. Tekli Diyot Modelin Eşdeğer Devresi (Equivalent Circuit of Single Diode Model)

Tek diyotlu güneş hücresi modeli Eş. 1’e indirgenmiştir:

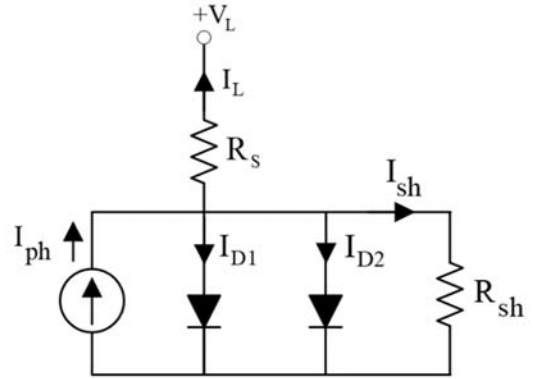
$$I_L = I_{ph} - I_{SD} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \left[\frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \right] \quad (1)$$

Tekli diyot model için amaç fonksiyonu minimum yapan kısıt değerleri Eş. 2’de verilmiştir.

$$\text{tekli diyot} \begin{cases} 0,1 \leq I_{ph} \leq 2 \\ 1e-8 \leq I_{SD} \leq 1e-5 \\ 1,2 \leq n \leq 1,7 \\ 0,001 \leq R_s \leq 0,1 \\ 0 \leq R_{sh} \leq 100 \end{cases} \quad (2)$$

2.2. Çift Diyot Model (Double Diode Model)

Güneş pili ideal olarak bir doğrultucu diyotla paralel bağlanmış bir akım kaynağı olarak modellenmiştir. Çift diyot model için eşdeğer devre Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Çift Diyot Modelin Eşdeğer Devresi (Equivalent Circuit of Double Diode Model)

Çift diyotlu güneş hücresi modeli Eş. 3’te verilmiştir.

$$I_L = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (3)$$

Yayılım ve doyma akımları sırasıyla Eş. 4 ve Eş. 5’te verilmiştir.

$$I_{D1} = I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_{D2} = I_{SD2} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Sızıntı akımı ise Eş. 6’daki gibi formüle edilmiştir.

$$I_{sh} = \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

Eş. 7’de verilen değişkenlerin yerine alt denklemler yerleştirildiğinde devrenin uç akımı bulunmaktadır.

$$I_L = I_{ph} - I_{SD1} \left[\exp\left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_1 k T}\right) - 1 \right] - I_{SD2} \left[\exp\left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_2 k T}\right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (7)$$

Çift diyot modeli için amaç fonksiyonunu minimum yapan kısıt değerleri Eş. 8’de verilmiştir.

$$\text{Çift Diyot} \begin{cases} 0,1 \leq I_{ph} \leq 2 \\ 1e - 8 \leq I_{SD1} \leq 1e - 5 \\ 1e - 8 \leq I_{SD2} \leq 1e - 5 \\ 1,2 \leq n_1 \leq 1,7 \\ 1,2 \leq n_2 \leq 1,7 \\ 0,001 \leq R_s \leq 0,1 \\ 0 \leq R_{sh} \leq 10 \end{cases} \quad (8)$$

2.3. Amaç Fonksiyonu (Objective Function)

Tekli ve çoklu diyot modellerinde parametrelerinin hesaplanması optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Optimizasyon probleminde kullanılan amaç fonksiyonu vasıtasıyla ölçülen ve hesaplanan akım değerleri arasındaki hata değerleri en aza indirgenmektedir [24]. Amaç fonksiyonunu ve kısıtları sağlayan kontrol değişkenleri ile minimum veya maksimum değer elde edilebilir. Burada önemli olan global olarak en minimumu elde etmektir. Bu çalışmada belirlenen amaç fonksiyonu hatanın mutlak integrali (IAE) ve karekök ortalama hata (RMSE) olarak farklı amaç fonksiyonları belirlenmiştir. Bu amaç fonksiyonları ile birlikte problemler minimize edilmeye çalışılmaktadır.

Güneş pili modellerinin parametre olarak çıkarılmasında kullanılan IAE ve RMSE hata fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

Tek diyotlu güneş pili modelinin amaç fonksiyonunu oluşturmak için, Eş. 9-Eş. 10’de verilen I-V ilişkileri kullanılarak aşağıdaki homojen denklemler yeniden yazılmıştır:

$$\text{Tekli diyot için : } f_i(V_L, I_L, R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD}, n) = 0 \quad (9)$$

$$\text{Çift diyot için : } f_i(V_L, I_L, R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD1}, I_{SD2}, n_1, n_2) = 0 \quad (10)$$

Eş. 11’de amaç fonksiyonu bir ölçüm grubu için tek ve çift diyot için sırasıyla IAE toplamı şöyle tanımlanır:

$$IAE = \int |e(t)| dt = \int |y(t) - r(t)| dt \quad (11)$$

$$F_{tek} = \sum_{i=1}^N |f_i(V_L, I_L, R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD}, n)| \quad (12)$$

$$F_{çift} = \sum_{i=1}^N |f_i(V_L, I_L, R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD1}, I_{SD2}, n_1, n_2)| \quad (13)$$

Eş. 14 ’de amaç fonksiyonu bir ölçüm grubu için tek ve çift diyot için sırasıyla RMSE şöyle tanımlanır:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (e(t))^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (y(t) - r(t))^2} \quad (14)$$

$$F_{tek} = \sqrt{\sum_{i=1}^N |f_i(V_L, I_L, R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD}, n)|} \quad (15)$$

$$F_{çift} = \sqrt{\sum_{i=1}^N |f_i(V_L, I_L, R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD1}, I_{SD2}, n_1, n_2)|} \quad (16)$$

Eş. 12-Eş. 16 kullanılan V_L, I_L ölçülen akım ve gerilim değerleridir. PSO, CS, FA ve FPA algoritmaları ile optimizasyon işlemi sırasında, amaç fonksiyonu parametre setine göre minimize edilmektedir. Teorik olarak, optimum parametre değerleri amaç fonksiyonu sıfır değerine sahip olduğu zaman elde edilmektedir.

3. META-SEZGİSEL ALGORİTMA (META-HEURISTIC ALGORITHM)

3.1. Çiçek Tozlaşma Algoritması (Flower Pollination Algorithm)

Yang [25] tarafından geliştirilen Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA) çiçekli bitkilerin tozlaşma sürecini taklit eden yeni bir meta-sezgisel algoritmadır. Çiçek tozlaşma, çiçek polenlerinin aktarılmasıyla ilişkili bir işlemdir. Bu transferi gerçekleştiren ana aktörler kuşlar, yarasalar, böcekler ve diğer hayvanlardır. Bir çiçek tozlaştırıcı ortaklığı olarak adlandırdığımız şeyi yapan bazı çiçekler ve böcekler var. Bu çiçekler sadece bu ortaklığa karışan kuşları çekebilir. Bu böcekler, çiçekler için ana tozlayıcı olarak kabul edilir [26].

FPA’da, tozlaşma sürecinin özelliği, tozlaşma davranışı ve çiçek sabitliğinin dört farklı kuralı göz önünde bulundurulur.

- Biyotik tozlaşma, polenlerin tozlayıcı tarafından taşındığı çapraz tozlaşma işlemidir. Bu durum global bir tozlaşma sürecidir ve tozlayıcıların hareketi Lévy uçuşuna uymaktadır.
- Abiyotik veya kendi kendine tozlaşma aynı bitki veya çiçeğin tozlaştırıcı olmadan yaptığı işlemdir. Polen taşıma mesafesi genellikle biyotik tozlaşmadan daha kısa olduğundan, bu işlem yerel tozlaşma olarak bilinir.
- Tozlayıcılar, belirli çiçek türlerine eğilimi olan çiçek kararlılığı geliştirebilir. Çiçek sabiti üreme olasılığına eşdeğerdir. Bu olasılık, ilişkili çiçeklerin benzerliği ile orantılıdır.
- Bir anahtar olasılığı; $p \in [0, 1]$ tozlaşma tipini kontrol etmek için kullanılır. Bu kurallara göre, iki farklı arama tekniği (yerel ve global) kullanılabilir. Yerel arama uygulayarak, mevcut olanların çevresinde en iyi çözümler bulunur. Buna ek olarak, global tozlaşma esasen yerel bir optimum çözümden sıkışıp kalmayı önler.

Bu kuralların güncellenme denklemlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Örneğin, Global tozlaşma aşamasında, çiçek polen gametleri böcekler gibi tozlayıcılar tarafından taşınır. Polenler uzun mesafeler boyunca seyahat edebilir, çünkü böcekler sıklıkla uçabilir ve çok daha uzun bir alanda hareket edebilir. Bu nedenle, Kural 1 ve çiçek sabitliği (Kural 3) matematiksel olarak Eş. 17 ile temsil edilebilir.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda)(g_* - x_i^t) \quad (17)$$

Burada x_i^t polen i veya t iterasyonda x_i çözüm vektörüdür ve g_* mevcut nesilde/iterasyonda bütün çözümler arasındaki en iyi çözümdür. Burada γ adım boyutunu kontrol etmek için bir ölçeklendirme faktörüdür.

Temelde $L(\lambda)$ Lévy uçuş adım boyut parametresidir. Böceklerin Levy dağılıma göre hareketi uzun mesafeli seyahatte kullanılabilir.

Lévy dağılımın matematiksel ifadesi Eş. 18'de verilmiştir.

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\frac{\pi\lambda}{2})}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}}, (s \gg s_0 > 0) \quad (18)$$

$\Gamma(\lambda)$ standart gama fonksiyonu iken s ise adım büyüklüğüdür. Adım büyüklüğü sıfırdan büyük olduğu durumlarda geçerlidir. Teoride, $s_0 \gg 0$ olmalıdır, fakat uygulamada s_0 0,1 kadar küçük olabilir. Yerel tozlanmada kullanılan matematiksel ifade Eş. 19'da verilmiştir.

$$x^{t+1} = x_i^t + \epsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (19)$$

Eş. 19'da x_j^t, x_k^t aynı bitki türlerinin farklı çiçeklerinden gelen polen türüdür. Levy dağılımı arama uzayında farklı çözüm noktaları sağlamaktadır. Algoritmanın optimizasyon mantığını biyotik tozlaşma modeliyle uzak mesafelerdeki çözüm noktalarının belirlenmesi ve abiyotik tozlaşma modeliyle de çözüm noktalarının komşuluğunun oluşturmaktadır.

3.2. Guguk Kuşu Algoritması (Cuckoo Search Algorithm)

Guguk Kuşu Algoritması (CS), Xin-She ve Suash Deb tarafından guguk kuşunun çoğalma stratejilerinden faydalanılarak geliştirilmiş bir algoritmadır. Guguk kuşlarının kuluçka parazitliğinden esinlenilerek geliştirilmiştir [27]. CS algoritmasında karşılaşılan bu durumlar Yang ve Deb tarafından kurallaştırılmıştır.

- Bir guguk kuşu rastgele seçtiği bir yuvaya bir tane yumurta bırakmaktadır.
- Yuva içerisindeki kaliteli yumurta bir sonraki nesle aktarılmaktadır.
- Yuvanın sahibi guguk kuşu, yuvaya geri döndüğünde bırakılmış olan yabancı yumurtayı belirli bir p_a (0,1) olasılığı ile tanıyabilmektedir. Eğer ev sahibi guguk kuşu bırakılmış olan yabancı yumurtayı tanırsa ya kendine yeni yuva kurmak üzere yuvayı terk edecek ya da yabancı yumurtayı aşağı atacaktır.

CS algoritmasında global aramada rassal yürüyüş Levy uçuşuyla gerçekleştirilmektedir. Eş. 20'de verilen Levy uçuşunun etkisi üretilen rastgele değer olan α gibi bir değişkenle belirlenmektedir. Bir sonraki işlem olarak eski konum bilgisi ile toplanarak guguk kuşlarının yeni konumlarının bulunması sağlanmaktadır. She'nin önermiş olduğu Levy Flight kontrol parametresi λ' dir. Global rassal

yürüyüşü sağlayan λ parametresi genellikle 1 ile 3 arasında değer almaktadır [28].

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \otimes Levy(\lambda) \quad (20)$$

Yerel aramayı gerçekleştiren yerel arama rassal yürüyüş Eş. 21 ile gerçekleştirilmiştir. Bu denklemde bulunan rastgele değer olan α Eş. 20 ile aynı değerleri göstermektedir [29]. $H(u)$ adım fonksiyonu olup, ϵ parametresi ise gauss dağılımdan gelen rassal reel bir sayıdır. x_j^t ve x_k^t ise çözüm uzayındaki vektörlerinin birbiri ile rasgele değişmesini sağlayan permütasyon değerleridir.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha s \otimes H(p_a - \epsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \quad (21)$$

3.3. Ateş Böceği Algoritması (Firefly Algorithm)

Ateş böceği yöntemi K. N. Krishnanand ve D. Ghose tarafından ateş böceklerinin parlamalarından esinlenerek geliştirilmiş olup rastgele sayısal optimizasyon arama yöntemlerinden biridir. FA'da iki temel konu vardır: Bunlar ışık yoğunluğunun değişimi ve çekiciliğin formüle edilmesidir. Ateş böceklerinin çekicilikleri parlaklıkları ile belirlenmektedir. Elde edilen çekicilikle amaç fonksiyonu ilişkilendirilmiştir. Ateş böceklerinin ışık yoğunluğu (I) değeri (Eş. 22) verilmiştir. Bu değer başlangıç ışık yoğunluğuna (I_0), gammaya (γ) ve uzaklığa (r) bağlıdır.

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (22)$$

Eş. 23'de Ateş böceklerinin çekiciliğini (β) veren denklemdeki başlangıç değeri (β_0), aslında iki ateşböceğinin arasındaki uzaklığın sıfır olduğu andaki değeri göstermektedir. Çekicilik, uzaklığın karesi, gamma ve başlangıç değerine bağlıdır.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (23)$$

Eş. 23 kullanarak çekiciliği hesaplama bazen zor olabildiğinden, işlemleri kolaylaştırmak için Eş. 24 kullanılabilir [29]. Eş. 24'teki Ateş böceklerinin çekiciliğini (β) veren denklemdeki (Eş. 23) başlangıç değeri (β_0), aslında iki ateşböceğinin arasındaki uzaklığın sıfır olduğu andaki değeri göstermektedir. Çekicilik, uzaklığın karesi, gamma ve başlangıç değerine bağlıdır.

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^2} \quad (24)$$

Ateş böceklerinin birbirine olan uzaklıkları önem arz etmektedir, çünkü uzaklıkla hem ışık yoğunluğu hem de çekicilik değişmektedir. Dolayısıyla bu değişimler, ateş böceği için hareketi belirleyecektir. Uzaklık, denklemdeki (Eş. 25) gibi hesaplanabilir.

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (25)$$

Ateş böcekleri daha parlak ve daha çekici olan ateş böceklerine doğru hareket ederler. Bu hareket, (Eş. 26) aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Eşitlikte bulunan ikinci ifade çekicilik formülünden gelmektedir. Yani, iki ateş böceği arasındaki uzaklık ve çekiciliğin çarpılması ile ifade edilmektedir. Üçüncü ifadede bulunan α rastlantı parametresi, ε ise gaussian dağılımından gelen bir vektörü ifade etmektedir [29]. α rastlantı parametresi genellikle [0,1] arasında rastgele olarak üretilmektedir.

$$x_i^{t+1} = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^2 ij} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i^t \quad (26)$$

$\beta_0=0$ olduğu zaman hareket sadece rastgele yürüyüşe bağlıdır. Diğer yandan, γ parametresi yakınsama hızı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Bu parametrenin değeri teorik olarak $\gamma \in [0, \infty)$ aralığından herhangi bir değeri alabilir. Optimize edilmesi probleme bağlı olarak değişmektedir. Genellikle 0,1 ve 10 arasında değişebilen değerler alabilmektedir.

3.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)

Parçacık Sürü Optimizasyonu kuş, balık ve havyan sürülerinin çevrelerine adapte olma, zengin yiyecek kaynağı bulabilme ve avcılardan kaçabilme yeteneklerinden esinlenilerek Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilmiş bir algoritmadır [31]. Sürü içerisindeki her birey, parçacık olarak adlandırılmakta ve her parçacığın sürü içerisinde konum (p) ve hız (v) bilgileri bulunmaktadır. Bu konum ve hız bilgileri, parçacığın iterasyon içindeki en iyi pozisyonuna (pbest), sürü içerisindeki en iyi pozisyonuna (gbest) ve o andaki hız bilgisine göre her iterasyon da güncellenmektedir. İterasyonda pozisyon ve hız bilgisi aşağıdaki denklemlerdeki (Eş. 27-Eş. 28) gibi güncellenir [32].

$$v_{t+1} = \nu v_t + c_1 r_1 (p_{best} - p_t) + c_2 r_2 (g_{best} - p_t) \quad (27)$$

$$p_{t+1} = p_t + v_{t+1} \quad (28)$$

4. SİMULASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Bu karşılaştırmalı çalışmada tek ve çift diyotlu güneş pili modelleri için parametre değerlerinin tahmininde PSO, FA, CS ve FPA meta-sezgisel algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen metodun etkinliği göstermek amacıyla simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon çalışmaları Intel (R) Core (TM) i5-5200U CPU @ 2.70 Ghz, 64 Bit, 4GB RAM'e sahip bir bilgisayar üzerinde Ubuntu 14.04.5 LTS işletim sistemi üzerinde çalıştırılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan güneş pillerinin deneysel I-V veri seti 57 mm çaplı ticari bir RTC France silikon güneş pilinden (1000 W/m²) ışınım ve 33°C çalışma sıcaklığından elde edilmiştir. FA, PSO, CS, FPA ve literatürde var olan PS[35], GA[34], SA[36] algoritmaları bu deney setini kullanmaktadır. Bu verilerin ışınım seviyesinden etkilenmediği varsayılmıştır. Güneş pilleri modellemede global optimum sonuçları elde etmek için FA, PSO, CS ve FPA algoritmalarında kullanılan kontrol parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Algoritmaların Parametreleri (Parameters of Algorithm)

Parametreler	Algoritmalar			
	PSO	FA	CS	FPA
Popülasyon Boyutu	40	40	40	40
İterasyon	1000	1000	1000	1000
C ₁	1,8	-	-	-
C ₂	1,8	-	-	-
Omega	0,9	-	-	-
Alfa (α)	-	0,2	-	-
Beta (β)	-	0,8	-	-
Gamma(γ)	-	1	-	-
Olasılık	-	-	-	0,8

RTC France tekli diyot güneş modelinde FA, PSO, CS, FPA ve literatürde var olan PS[35], GA[34], SA[36] algoritmaları kullanılarak elde edilen tahmini parametreleri ve IAE ve RMSE değerleri Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak listelenmiştir.

Tablo 2'de tekli diyot modelde kullanılan FPA, CS, FA ve PSO algoritmalarından elde edilen IAE sırasıyla 0,0202, 0,0237, 0,0340 ve 0,0300 olduğunu göstermektedir. Simülasyondaki FPA, CS, FA ve PSO algoritmaları karşılaştırıldığında, FPA'nın en düşük IAE hata değerine sahip olduğu görülmektedir. RMSE uygunluk fonksiyonunda ise sırasıyla 0,0050, 0,00081, 0,0520 ve 0,00082 değerleri elde edilmiştir ve bunlar içerisinde hata değeri minimum olan algoritma ise CS algoritmasıdır. Literatürde bulunan PS[35], GA[34], SA[36] algoritmalarıyla karşılaştırıldığında ise IAE değeri en düşük FPA iken en düşük RMSE değeri CS algoritmasıdır.

Tablo 2. Tekli Diyot için Tahmin Edilen Parametreler (Estimated Parameters for Single Diode)

Parametreler	Algoritmalar						
	FPA	CS	FA	PSO	PS[35]	GA[34]	SA[36]
I _{ph}	0,760669	0,761599	0,762904	0,760773	0,7617	0,7619	0,7620
I _{SD} (μA)	3,35E-01	3,53E-01	3,62E-01	1,81E-01	0,9980	0,8087	0,4798
R _s (Ω)	0,03615	0,0359	0,035529	0,039109	0,0313	0,0299	0,0345
G _{sh} (S)	54,0197	47,8120	37,31993	45,01311	64,1026	42,3729	43,1034
n	1,484954	1,49042	1,493329	1,425155	1,6000	1,5751	1,5172
IAE	0,0202	0,0237	0,0340	0,0300	-	-	0,0371
RMSE	0,0050	0,00081	0,0052	0,00082	0,0149	0,01908	0,0017

FPA, CS, FA ve PSO algoritmaları tarafından bulunan optimal değerlerin doğruluğunu teyit etmek amacıyla akım parametresinin gerçek ve optimize edilmiş değerleri arasındaki doğrulama, hata analizine dayanarak etkin bir şekilde değerlendirilmektedir. Bundan dolayı, tekli diyot modelinde gerçek ve hesaplanmış değerler arasındaki bağıl hata(RE) Eş. 29 kullanılarak hesaplanmıştır. İstatiksel analizi Tablo 3'de listelenmiştir.

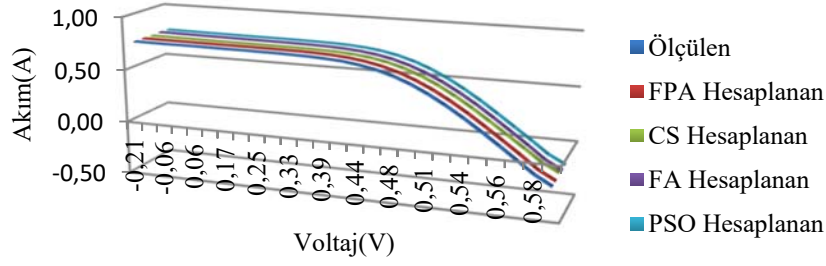
$$RE = \frac{I_{ölçülen} - I_{hesaplanan}}{I_{ölçülen}} \quad (29)$$

Tekli diyot modeli için eğri uydurma Şekil 4'te gösterilmiştir. Tablo 3'deki bağıl hata değerleri incelendiğinde toplam RE değerleri sırasıyla 0,0980, 1,6809, 0,1013 ve 0,1953'tür. Gerçek I-V değerlerine en yakın

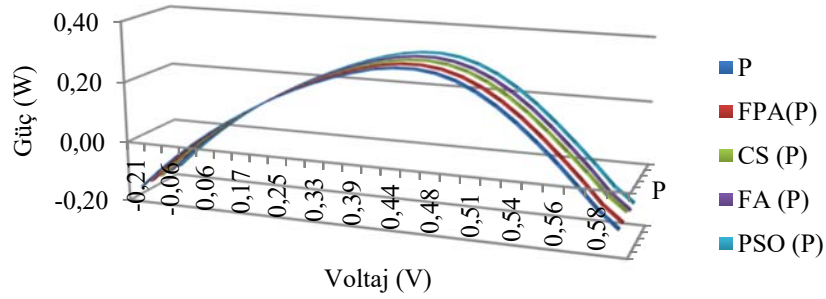
değerleri veren algoritma FPA algoritmasıdır. RTC France güneş pilinin tekli diyot modelinin gerçek ve hesaplanmış değerleri kullanılarak elde edilen I-V eğri uydurması ve P-V karakteristikleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmiştir. RTC France güneş pilinin çift diyot modelinde tanımlanmış yedi parametre vardır ve FA, PSO, CS, FPA ve literatürdeki HS[36], PS[34] ve SA[33] kullanılarak tahmin edilen parametreler ve IAE ve RMSE değerleri Tablo 4'te listelenmiştir. FPA algoritması karşılaştırılan FPA, CS, FA ve PSO algoritmaları arasında en iyi IAE değerini (0,0202) sağladığı açıktır ve CS ise ikinci en iyi IAE değerini (0,0243) elde eder. Tablo 4'e göre, FPA yönteminin diğer tekniklerinden daha iyi bir performansa sahip olduğu kolayca anlaşılmaktadır. Çift diyot modelinde de tekli diyotlarda gerçekleştirildiği gibi gerçek ve hesaplanmış değerler arasında bağıl hata hesaplanmıştır. Bu hesaplanan

Tablo 3. Tek diyot için gerçek ve deneysel değerlerin karşılaştırılması (Comparison of actual and experimental values for single diode)

Ölçülen Parametreler		Tahmin Edilen Parametre								
		FPA		CS		FA		PSO		
NO	V(V)	I(A)	I(A)	RE	I(A)	RE	I(A)	RE	I(A)	RE
1	-0,2057	0,7640	0,7639	0,0002	0,7618	0,0029	0,7678	-0,0049	0,7647	-0,0009
2	-0,1291	0,7620	0,7625	-0,0007	0,7598	0,0028	0,7657	-0,0049	0,7630	-0,0013
3	-0,0588	0,7605	0,7613	-0,0010	0,7580	0,0033	0,7638	-0,0044	0,7614	-0,0012
4	0,0057	0,7605	0,7601	0,0005	0,7563	0,0055	0,7621	-0,0021	0,7600	0,0007
5	0,0646	0,7600	0,7591	0,0012	0,7548	0,0068	0,7605	-0,0007	0,7587	0,0017
6	0,1185	0,7590	0,7582	0,0011	0,7534	0,0074	0,7591	-0,0001	0,7575	0,0020
7	0,1678	0,7570	0,7573	-0,0003	0,7521	0,0065	0,7577	-0,0009	0,7564	0,0009
8	0,2132	0,7570	0,7563	0,0009	0,7509	0,0081	0,7564	0,0008	0,7553	0,0023
9	0,2545	0,7550	0,7553	-0,0004	0,7496	0,0071	0,7550	0,0000	0,7541	0,0012
10	0,2924	0,7540	0,7539	0,0001	0,7482	0,0078	0,7532	0,0010	0,7527	0,0018
11	0,3269	0,7505	0,7516	-0,0015	0,7461	0,0059	0,7506	-0,0002	0,7505	0,0000
12	0,3585	0,7465	0,7475	-0,0014	0,7426	0,0052	0,7463	0,0003	0,7467	-0,0003
13	0,3873	0,7385	0,7402	-0,0023	0,7364	0,0029	0,7388	-0,0004	0,7399	-0,0019
14	0,4137	0,7280	0,7274	0,0009	0,7252	0,0039	0,7258	0,0030	0,7278	0,0003
15	0,4373	0,7065	0,7068	-0,0004	0,7067	-0,0003	0,7052	0,0018	0,7080	-0,0021
16	0,4590	0,6755	0,6750	0,0008	0,6771	-0,0023	0,6735	0,0029	0,6767	-0,0018
17	0,4784	0,6320	0,6304	0,0026	0,6344	-0,0038	0,6292	0,0045	0,6323	-0,0005
18	0,4960	0,5730	0,5715	0,0025	0,5769	-0,0068	0,5707	0,0040	0,5731	-0,0002
19	0,5119	0,4990	0,4993	-0,0006	0,5054	-0,0129	0,4989	0,0003	0,5000	-0,0020
20	0,5265	0,4130	0,4135	-0,0011	0,4200	-0,0168	0,4134	-0,0011	0,4130	0,0000
21	0,5398	0,3165	0,3175	-0,0030	0,3244	-0,0250	0,3178	-0,0040	0,3160	0,0017
22	0,5521	0,2120	0,2122	-0,0009	0,2202	-0,0388	0,2127	-0,0031	0,2102	0,0086
23	0,5633	0,1035	0,1023	0,0119	0,1125	-0,0869	0,1027	0,0075	0,1006	0,0277
24	0,5736	-0,0100	-0,0089	0,1111	0,0054	1,5371	-0,0087	0,1299	-0,0088	0,1249
25	0,5833	-0,1230	-0,1260	-0,0243	-0,1062	0,1362	-0,1263	-0,0268	-0,1230	0,0000
26	0,5900	-0,2100	-0,2094	0,0030	-0,1837	0,1251	-0,2102	-0,0011	-0,2029	0,0337



Şekil 4. Tek diyotlu model için uygun eğri I-V (Curve fit I-V for single diode model)



Şekil 5. Tek diyot modelin P-V özellikleri (P-V characteristics for single diode model)

Tablo 4. Çift Diyot için Tahmin Edilen Parametreler (Estimated Parameters for Double Diode)

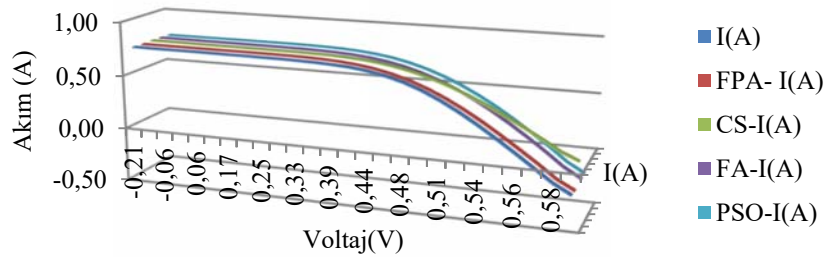
Parametreler	Algoritmalar						
	FPA	CS	FA	PSO	HS[36]	PS[34]	SA[33]
I_{ph}	0,7607	0,7613	0,7612	0,7608	0,76176	0,7002	0,762
$I_{SD1}(\mu A)$	0,3289	0,0408	1,3141	0,6000	0,12545	0,9889	0,476
$I_{SD2}(\mu A)$	0,0100	1,3798566	0,9463	0,4263	0,2547	0,0001	0,01
$R_s(ohm)$	0,0363	0,0381	0,0281	0,0331	0,03545	0,032	0,034
$G_{sh}(S)$	54,2924	60,5498	62,7240	83,2478	46,8269	81,3008	43,10
n_1	1,4832	1,3273	1,6500	1,5518	1,49439	1,6	1,517
n_2	1,9285	1,8044	1,9548	1,9184	1,49989	1,981	2,000
IAE	0,202	0,0243	0,0800	0,0398	-	-	-
RMSE					0,00126	0,0158	0,016

değerler Tablo 5'de listelenmiştir. RE değerleri incelendiğinde karşılaştırmada, algoritmaların en yakın ve doğru değerleri verme sırası FPA, FA, PSO, CS'dir. PSO algoritmasının RE değerleriyle öznelikle tam olarak eşleştiğinde ortaya çıkmıştır. Bağlı hata analizini doğrulamak amacıyla, RTC France güneş pilinin çift diyot modelinin gerçek ve hesaplanmış değerleri kullanılarak elde edilen I-V eğri uydurması ve P-V karakteristikleri sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan

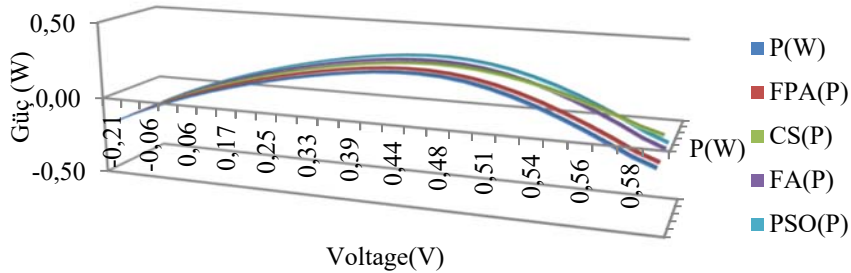
FA, PSO, CS ve FPA algoritmaların doğruluğunu ve güvenilirliği karşılaştırmak amacıyla algoritmalar 30 kere çalıştırılmasıyla elde edilen minimum (min), ortalama (ort), maksimum (mak) ve standart sapma (std) IAE ve RMSE değerleri Tablo 6 ve Tablo 7'de istatistiksel olarak listelenmiştir. Ortalama IAE ve RMSE değerleri çalışmanın doğruluk derecesini yaklaşık olarak göstermektedir. IAE ve RMSE'nin standart sapma değeri de, parametre tahmin yöntemlerinin güvenilirliğini göstermektedir.

Tablo 5. Çift diyot için gerçek ve deneysel değerlerin karşılaştırılması
(Comparison of actual and experimental values for double diode)

NO	Ölçülen Parametreler		Tahmin Edilen Parametreler							
	V(V)	I(A)	FPA		CS		FA		PSO	
			I(A)	RE	I(A)	RE	I(A)	RE	I(A)	RE
1	-0,2057	0,7640	0,7605	0,0035	0,7653	-0,0013	0,7635	0,0005	0,7606	0,0034
2	-0,1291	0,7620	0,7597	0,0023	0,7641	-0,0021	0,7625	-0,0005	0,7606	0,0014
3	-0,0588	0,7605	0,7590	0,0015	0,7629	-0,0024	0,7615	-0,0010	0,7605	0,0000
4	0,0057	0,7605	0,7584	0,0021	0,7619	-0,0014	0,7606	-0,0001	0,7604	0,0001
5	0,0646	0,7600	0,7578	0,0022	0,7609	-0,0009	0,7598	0,0002	0,7603	-0,0003
6	0,1185	0,7590	0,7572	0,0018	0,7600	-0,0010	0,7590	0,0000	0,7602	-0,0012
7	0,1678	0,7570	0,7566	0,0004	0,7591	-0,0021	0,7582	-0,0012	0,7600	-0,0030
8	0,2132	0,7570	0,7559	0,0011	0,7582	-0,0012	0,7573	-0,0003	0,7596	-0,0026
9	0,2545	0,7550	0,7549	0,0001	0,7571	-0,0021	0,7559	-0,0009	0,7587	-0,0037
10	0,2924	0,7540	0,7531	0,0009	0,7555	-0,0015	0,7539	0,0001	0,7569	-0,0029
11	0,3269	0,7505	0,7500	0,0005	0,7529	-0,0024	0,7503	0,0002	0,7536	-0,0031
12	0,3585	0,7465	0,7444	0,0021	0,7485	-0,0020	0,7444	0,0021	0,7475	-0,0010
13	0,3873	0,7385	0,7348	0,0037	0,7412	-0,0027	0,7345	0,0040	0,7374	0,0011
14	0,4137	0,7280	0,7188	0,0092	0,7291	-0,0011	0,7188	0,0092	0,7213	0,0067
15	0,4373	0,7065	0,6949	0,0116	0,7110	-0,0045	0,6955	0,0110	0,6975	0,0090
16	0,4590	0,6755	0,6598	0,0157	0,6843	-0,0088	0,6621	0,0134	0,6634	0,0121
17	0,4784	0,6320	0,6128	0,0192	0,6483	-0,0163	0,6177	0,0143	0,6185	0,0135
18	0,4960	0,5730	0,5529	0,0201	0,6022	-0,0292	0,5612	0,0118	0,5617	0,0113
19	0,5119	0,4990	0,4810	0,0180	0,5466	-0,0476	0,4932	0,0058	0,4934	0,0056
20	0,5265	0,4130	0,3968	0,0162	0,4810	-0,0680	0,4128	0,0002	0,4130	0,0000
21	0,5398	0,3165	0,3032	0,0133	0,4077	-0,0912	0,3221	-0,0056	0,3224	-0,0059
22	0,5521	0,2120	0,2004	0,0116	0,3267	-0,1147	0,2210	-0,0090	0,2215	-0,0095
23	0,5633	0,1035	0,0924	0,0111	0,2412	-0,1377	0,1128	-0,0093	0,1134	-0,0099
24	0,5736	-0,010	-0,0184	0,0084	0,1530	-0,1630	-0,0007	-0,0093	-0,0002	-0,0098
25	0,5833	-0,123	-0,1360	0,0130	0,0590	-0,1820	-0,1234	0,0004	-0,1230	0,0000
26	0,5900	-0,210	-0,2219	0,0119	-0,010	-0,2000	-0,2152	0,0052	-0,2152	0,0052



Şekil 6. Çift diyot modelin uygun eğri I-V (Curve fit I-V for double diode model)



Şekil 7. Çift diyot modelin P-V özellikleri (P-V characteristics for double diode model)

Tablo 6. Tek diyot model için IAE ve RMSE farklı algoritmaların istatistiksel sonuçları
(Statistical results of IAE and RMSE of different algorithms for single diode models)

Model	Algoritma	IAE				RMSE			
		Min	Ort	Mak	Std	Min	Ort	Mak	Std
Tekli Diyot	FPA	0,0202	0,0206	0,0222	0,0006	0,0050	0,0053	0,0075	0,0006
	CS	0,0203	0,0228	0,0315	0,0028	0,0008	0,0009	0,0017	0,0002
	FA	0,0305	0,0721	0,1834	0,0267	0,0008	0,0031	0,0069	0,0013
	PSO	0,0202	0,0933	0,1842	0,0510	0,0008	0,0022	0,0068	0,0013

Tablo 7. Çift diyot model için IAE ve RMSE farklı algoritmaların istatistiksel sonuçları
(Statistical results of IAE and RMSE of different algorithms for double diode models)

Model	Algoritma	IAE				RMSE			
		Min	Ort	Mak	Std	Min	Ort	Mak	Std
Çift Diyot	FPA	0,0203	0,0236	0,0407	0,0045	0,0002	0,0035	0,0134	0,0032
	CS	0,0208	0,0255	0,0457	0,0059	0,0001	0,0004	0,0008	0,0002
	FA	0,0212	0,1207	0,1865	0,0289	0,0000	0,0064	0,0337	0,0103
	PSO	0,0245	0,0968	0,1546	0,0355	0,0000	0,0007	0,0144	0,0026

Geliştirilen algoritmalar arasında tekli ve çift diyot için minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma IAE hata değerlerinde FPA algoritması diğer algoritmalarından daha iyidir. RMSE hata değerinde minimum değerleri veren algoritma CS'dir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada tekli ve çift diyot güneş pili hücre modellerinin parametrelerini etkili ve doğru bir şekilde tahmin etmek amacıyla FPA, CS, FA ve PSO algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmaları değerlendirmek, doğrulukları ve performanslarını test etmek amacıyla literatürde varolan araştırmacılar tarafından bildirilen GA[33], PS[34], SA[35] ve HS[36] algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ve istatistiksel analizlere göre FPA algoritmasının diğer algoritmalara göre daha iyi çözümler sunduğunu ortaya çıkarmıştır. Bunlara ek olarak tahmin edilen ve ölçülen verilerin arasındaki hata değeri diğer algoritmalara göre FPA algoritması tekli diyot modeli için ortalama 0,0206, çift diyot modeli için 0,0236 hatanın mutlak integrali (IAE) en az değere sahiptir, CS algoritması da tekli diyot modeli için ortalama 0,0009, çift diyot modeli için 0,0004 karekök ortalama hata (RMSE) en az değere sahiptir. Sonuç olarak meta-sezgisel algoritmaların tekli ve çift diyotlu güneş pillerinin parametresi çıkarımında etkili oldukları görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kunjie Yu, Liang J.J., Qu B.Y., Chen X., Wang H., Parameters identification of photovoltaic models using an improved JAYA optimization algorithm, Energy Conversion and Management 150, 742-753, 2017.
2. Merchaoui M., Sakly A., Mimouni M.F., Particle swarm optimisation with adaptive mutation strategy for photovoltaic solar cell/module parameter extraction, Energy Conversion and Management 175,151-163, 2018.
3. Wu Z., Yu D., Kang X., Parameter identification of photovoltaic cell model based on improved ant lion optimizer, Energy Conversion and Management 151, 107-115, 2017.
4. Maouhoub N., Photovoltaic module parameter estimation using an analytical approach and least squares method, Journal of Computational Electronics, 17,784-790, 2018.
5. AlHajri M.F., El-Naggar K.M., AlRashidi M.R., Al-Othman, A.K., Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search, Renewable Energy 44, 238-245, 2012.
6. Uçar U., İşleyen S., Gökçen H., Experimental Analysis of Meta-Heuristic Algorithms for Moving Customer Vehicle Routing Problem, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (1), 459-476, 2020.
7. Ölmez Y., Sengur A., Ozmen Koca G., Multilevel thresholding with metaheuristic methods, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (1), 213-224, 2020.
8. Kocakulak T., Solmaz H., Control of pre and post transmission parallel hybrid vehicles with fuzzy logic method and comparison with other power systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (4), 2269-2286, 2020.
9. Hezer S., Kara Y., Solving Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-Up Using an Algorithm Based on Bacterial Foraging Optimization, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (2), 373-382, 2014.
10. Balta M., Özçelik İ., A proposal of SDN based VANET architecture for urban intersection management systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1451-1468, 2019.

11. İnan T., Baba A., Building a hybrid algorithm based decision support system to prevent ship collisions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1213-1230, 2020.
12. Turan O., Oruç R., Baklacioglu T., Optimization of an afterburning turbofan engine with multi objective particle swarm method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35 (4) 1997-2012, 2020.
13. Dağdeviren U., Kaymak B., Investigation of parameters affecting optimum cost design of reinforced concrete retaining walls using artificial bee colony algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 239-253, 2018.
14. Çimen M., Boz A., Parameter identification of a non-minimum phase second order system with time delay using relay test and PSO, CS, FA algorithms, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 461-478, 2019.
15. Bektur G., A hybrid heuristic solution based on simulated annealing algorithm for energy efficient single machine scheduling problem with sequence dependent setup times, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 407-420, 2020.
16. Chopde A., Magare D., Patil M., Gupta R., Sastry O.S., Parameter extraction for dynamic PV thermal model using particle swarm optimisation, *Applied Thermal Engineering* 100, 508-517, 2016.
17. Harrag A., Messalti S., Three, Five and Seven PV Model Parameters Extraction using PSO, *Energy Procedia* 119, 767-774, 2017.
18. Merchaoui M., Sakly A., Mimouni M.F., Particle swarm optimisation with adaptive mutation strategy for photovoltaic solar cell/module parameter extraction, *Energy Conversion and Management* 175, 151-163, 2018.
19. Louzazni M., Crăciunescu A., Aroudam E.H., Dumitrache A., Identification of Solar Cell Parameters with Firefly Algorithm, *Second International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry*, 7-12, 2015.
20. Louzazni M., Khouya, A., Amechnoue K., Gandelli A., Mussetta M., Crăciunescu A., Metaheuristic Algorithm for Photovoltaic Parameters: Comparative Study and Prediction with a Firefly Algorithm, *Appl. Sci.*, 8, 339, 2018.
21. Abed I.A., An Improved Technique Based on Firefly Algorithm to Estimate the Parameters of the Photovoltaic Model, *Iraq J. Electrical and Electronic Engineering* 12, 2, 2016.
22. Ma J., Ting T.O., Man K.L., Zhang N., Guan S.-U., Prudence W.H., Wong, Parameter Estimation of Photovoltaic Models via Cuckoo Search, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics*, 2013.
23. Alam D.F., Yousri D.A., Eteiba M.B., Flower Pollination Algorithm based solar PV parameter estimation, *Energy Conversion and Management* 101, 410-422, 2015.
24. Chellaswamy C., Ramesh R., Parameter extraction of solar cell models based on adaptive differential evolution algorithm, *Renewable Energy* 97, 823-837, 2016.
25. Yang X.S., Flower pollination algorithm for global optimization. In *Unconventional Computation and Natural Computation*, 240- 249, 2012.
26. Glover B., *Understanding flowers and flowering*, Oxford University, 2014.
27. Yang X.S., Deb S., Cuckoo Search via Lévy Flights. *Nature & Biologically Inspired Computing*, 210-214, 2009.
28. Gandomi A.H., Yang X.S., Alavi, A.H., Cuckoo search algorithm: a meta heuristic approach to solve structural optimization problems. *Eng Comput*, 29(1), 17-35, 2013.
29. Yang, X.S., *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 1st Edition Elsevier, 2014.
30. Kaya T., İnce M. C., *Genetik Algoritmaların Aktif Filtrelerde Kullanımı*, ELECO-2008 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 512-515, 2008.
31. Karaarslan E., Zengin, K., Ateş Böceği Algoritması ile Haftalık Ders Programı Hazırlama, *EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 2016.
32. Kennedy, K., Eberhart R., *Particle swarm optimization*, *Neural Networks Proceedings*, 1995.
33. Gao Z., Zeng X., Wang J., Liu J., FPGA implementation of adaptive IIR filters with particle swarm optimization algorithm, 2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, 2009.
34. Ismail M, Moghavvemi M, Mahlia T., Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm. *Energy Convers Manage*, 73, 10-25, 2013.
35. AlHajri M.F, El-Naggar K.M, AlRashidi M.R, Al-Othman AK., Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search. *Renew Energy* 44, 238-45, 2012.
36. El-Naggar KM, AlRashidi MR, AlHajri MF, Al-Othman AK., Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification. *Sol Energy*, 86, 266-74, 2012.
37. Askarzadeh A, Rezaadeh A., An innovative global harmony search algorithm for parameter identification of a PEM fuel cell model. *IEEE Trans Ind Electron* 59, 3473-80, 2012.