



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Fotovoltaik modellerin parametre çıkarımı için geliştirilmiş bir kaotik tabanlı balina optimizasyon algoritması

An enhanced chaotic based whale optimization algorithm for parameter extraction of photovoltaic models

Yazar(lar) (Author(s)): Zeynep B. GARİP¹, Murat Erhan ÇİMEN², Ali Fuat BOZ³

ORCID¹: 0000-0002-0420-8541

ORCID²: 0000-0002-1793-485X

ORCID³: 0000-0001-6575-7678

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Garip B.Z., Çimen M.E. ve Boz A.F., "Fotovoltaik modellerin parametre çıkarımı için geliştirilmiş bir kaotik tabanlı balina optimizasyon algoritması", *Politeknik Dergisi*, 25(3): 1041-1054, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.878934

Fotovoltaik Modellerin Parametre Çıkarımı İçin Geliştirilmiş Bir Kaotik Tabanlı Balina Optimizasyon Algoritması

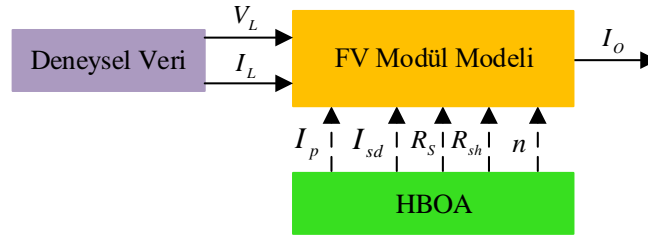
An Enhanced Chaotic Based Whale Optimization Algorithm for Parameter Extraction of Photovoltaic Models

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Balina optimizasyon algoritmasının performansının artırılması amaçlanır. / It is aimed to increase the performance of the whale optimization algorithm.
- ❖ FV modül modellerinin optimal parametreleri tahmin edilmektedir. / The optimal parameters of the FV module models are estimated.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Fotovoltaik modül modellerin parametrelerini çıkarmada etkili bir yaklaşım geliştirilmiştir. / An effective approach has been developed to extract the parameters of photovoltaic module models.



Şekil. Parametre tahmininde kullanılan sistem **Figure**. System used in parameter estimation

Amaç (Aim)

Bu çalışmada FV modellerin bilinmeyen parametrelerini doğru bir şekilde çıkarmada etkili bir yaklaşım geliştirilmiştir. / In this study, an effective approach has been developed to accurately extract unknown parameters of PV models.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bu yaklaşımda standart BOA performansını artırmak amacıyla BOA'nın rastgelelik özellikleri henon kaotik haritayla birleştirilerek henon kaotik harita tabanlı dört farklı versiyon önerilmiştir. / In this approach, four different versions based on Henon chaotic map have been proposed by combining the random features of the WOA with the henon chaotic map in order to increase the performance of the standard WOA..

Özgünlük (Originality)

Bu çalışmanın özgünlüğü fotovoltaik modül modellerinin parametreleri geliştirilen algoritmalarla tahmin edilerek gerçek modele yakın değerler elde edilmesidir. / The originality of this study is that the parameters of the photovoltaic module models are estimated by the developed algorithms to obtain values close to the real model.

Bulgular (Findings)

BOA ve Henon tabanlı kaotik balina optimizasyon algoritmaları kullanılarak tüm FV modül modellerin RMSE ortalama, minimum, maksimum ve standart sapma değerlerinin istatistiksel sonuçları elde edilmiştir. / Statistical results of RMSE mean, minimum, maximum and standard deviation values of all PV module models were obtained using BOA and Henon based chaotic whale optimization algorithms.

Sonuç (Conclusion)

Deneysel sonuçlar üç farklı FV modül modelde RMSE ve IAE performans kriterlerine göre geliştirilen algoritmaların performanslarının daha başarılı olduğu ve gerçeğe daha yakın değerler verdiğini göstermiştir. / Experimental results have shown that the performance of algorithms developed according to RMSE and IAE performance criteria in three different PV module models is more successful and gives more real values.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Fotovoltaik Modellerin Parametre Çıkarımı için Geliştirilmiş Bir Kaotik Tabanlı Balina Optimizasyon Algoritması

Araştırma Makalesi / Research Article

Zeynep Garip^{1*}, Murat Erhan Çimen², Ali Fuat Boz³

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

(Geliş/Received :12.02.2021 ; Kabul/Accepted : 26.03.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 13.04.2021)

ÖZ

Fotovoltaik modül modellerinin parametre doğru tahmini sistemlerin verimliliği üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Fotovoltaik sistemlerde en iyi performansı elde etmek amacıyla parametrelerini tahmin etmede algoritmaların etkinliği kullanılmaktadır. Bu sebepten dolayı bu çalışmada fotovoltaik modül modelinin parametrelerini çıkarmada kaos teorisinin rassallığı ve Balina optimizasyon algoritmasının etkililiği birleştirilerek Henon kaotik tabanlı Balina optimizasyon algoritmaları (HBOA) önerilmiştir. Ayrıca önerilen dört farklı Kaotik Henon tabanlı Balina optimizasyon algoritması, mevcut balina optimizasyon algoritmasına kıyasla doğruluğu ve güvenilirliği arttırdığı görülmüştür. Algoritmaların istatistiksel değerleri göz önünde bulundurularak performansları değerlendirilmiştir. Ayrıca algoritmalarından elde edilen karşılaştırma sonuçlarının güvenilirliklerini test etmek amacıyla Wilcoxon ve Friedman testleri kullanılmıştır. Sonuç olarak deneysel sonuçlara göre önerilen algoritmaların literatürdeki algoritmalara göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balina optimizasyon algoritması, fotovoltaik model, henon kaotik harita.

An Enhanced Chaotic Based Whale Optimization Algorithm For Parameter Extraction of Photovoltaic Models

ABSTRACT

Parameter estimation of model of Photovoltaic model has substantial influence on systems performance. Effectiveness of algorithms has been used to estimate parameters to obtain the best performance of Photovoltaic systems. Therefore, in this study, to acquire parameters of photovoltaic systems, Chaotic Henon based Whale optimization algorithm (HWOA) has been proposed such that randomness of Henon map and whale optimization algorithms is combined and hybridized. Furthermore, the proposed four different Chaotic Henon-based Whale optimization algorithms have been shown to increase accuracy and reliability compared to the current whale optimization algorithm. Performances of algorithms have been evaluated by considering statistical values. In addition, Wilcoxon and Friedman tests have been used to test the reliability of the comparison results obtained from the algorithms. Consequently, it has been determined that experimental results of proposed algorithms have better performance than the algorithms in literature.

Keywords: Whale optimization algorithm, photovoltaic model, henon chaotic map.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güneş enerjisinin doğada bulunması, maliyetinin az olması, sıfır emisyon ve bunlara ek olarak yarı iletken ve güç elektroniği gibi cihazlardaki gelişmeler sayesinde popüler bir yenilebilir kaynak haline gelmiştir. Günümüzde fotovoltaik (FV) sistemler güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürebilir, kurulumu basit ve gürültüsüz olduğu için elektrik güç sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır [1,2]. Bundan dolayı FV sistemlerini yönetmek için ölçülen akım-gerilim verilerine dayalı bir model kullanılması gerekmektedir [3]. FV sistemlerin modellenmesi üzerine çalışmalar genel olarak matematiksel formülasyon ve parametre

tanıma olmak üzere iki gruba ayrılır. En yaygın kullanılan matematiksel modeller ise tek ve çift diyet modelidir [4].

Tekli, çift ve FV modül güneş pili modellerinin performansını en üst düzeye çıkarmada en büyük problem, seçilen modelin deneysel verilerine göre yaklaşık parametre değerlerinin bulunmamasıdır. Bu problemi çözmek amacıyla analitik, deterministik ve meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Analitik yöntemlerde bir dizi matematiksel denklem kullanılarak analizler gerçekleştirilerek FV modellerin parametreleri hesaplanmaktadır. Uygulanması basit ve çözümü hızlı bulmasına rağmen problemlerin çözüm doğruluğu, hassasiyeti, seçilen başlangıç değerleri ve dış ortamdan etkilenmektedir [5]. Deterministik yöntemler

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : zbatik@subu.edu.tr

başlangıç değerlerine ve ilk çözümlere bağlı olduklarından dolayı dışbükeylik, türevlenebilirlik, süreksizlik, doğrusal olmama ve yerel optimuma düşme gibi sorunlara sahiptir [4,5]. Son olarak meta-sezgisel algoritmalarda amaç fonksiyonunun esnek kullanımı ve kolay uygulanabilir olma özelliği sayesinde analitik ve deterministik yöntemlerde karşılaşılan sorunların üstesinden etkin bir şekilde gelmektedir. Son zamanlarda, farksal gelişim (FG) [6], parçacık sürü optimizasyonu (PSO) [5], Geliştirilmiş Harris Şahini Optimizasyonu (EHHO) [7], Geliştirilmiş Adaptif Farksal Gelişim (EJADE) [1], Geliştirilmiş JAYA [4], Memetik uyarlanabilir farksal gelişim (MADE) [8], Rcr-IJADE [9], Kuş Çiftleşme Optimizeri (BMO) [10], Jade tabanlı gibi FV modellerinin parametre tahmini için meta-sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Meta-sezgisel algoritmalar problemlerin çözümünde etkili ve tatmin edici sonuçlar vermesine rağmen bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu gerçek, sezgisel algoritmaların etkinliklerini ve doğruluklarını etkiler. Ayrıca arama alanlarına bağlı olarak algoritmalar yerel arama da takılı kalabilir ve buna bağlı olarak da algoritmanın performansı etkilenir. Son zamanlarda, kaos teorisi, meta-sezgisel algoritmaların performansını iyileştirmede kullanılmaktadır. Kaos teorisi kaotik haritaları kullanarak doğrusal olmayan sistemlerde düzensiz davranışlar olarak tanımlanır. Yüksek rastlantısallığa sahip kaotik dizi, çözümlerin çeşitliliğini ve yakınsama hızını arttırmaktadır [11].

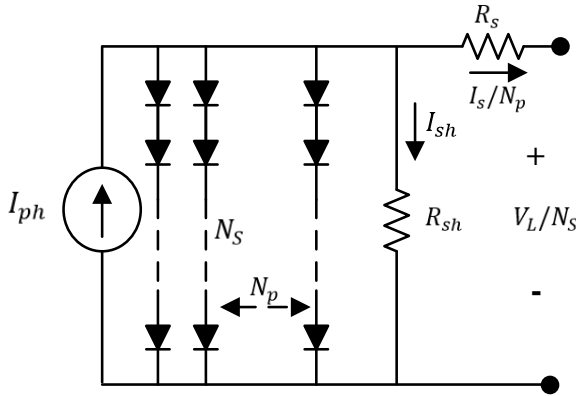
FV modellerin bilinmeyen parametrelerinin doğru çıkarılmasının önemi, sistemin modellenmesi, benzetim edilmesi ve kontrol edilmesi ile yakından ilgilidir. Bundan dolayı FV modellerde parametre tanımlama problemini içeren çeşitli karmaşık problemlerin çözümünde çok sayıda sezgisel, hibrit ve kaotik tabanlı sezgisel yöntemler önerilmiştir. FV hücre modellerinin parametre tahmini için Yang ve ark. tarafından on bir farklı farksal gelişim algoritmalarıyla karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Algoritmaların performansı problemin çözüm doğruluğu, yakınsama hızı ve sağlamlık performans kriterine göre belirlemişlerdir [9]. Farklı mutasyon stratejilerinden en iyi şekilde yararlanmak için, popülasyonda kullanılan mutasyon stratejilerinin oranını ayarlayarak kendi kendine adaptif topluluk tabanlı farksal gelişim algoritması (SEDE) Liang ve ark. tarafından geliştirilmiştir. Tekli, çift ve modül olmak üzere üç farklı FV modelin parametrelerini SEDE algoritması ile elde etmişlerdir [12]. Li ve ark. tarafından da DE'nin memetik uyarlamalı bir çeşidini geliştirmişlerdir [8]. Son olarak çaprazlama oranı sıralama mekanizması ve dinamik popülasyon azaltma stratejisiyle DE algoritmasını geliştirmişlerdir [1]. Liang ve ark. PSO algoritmasını pertürbasyon mutasyonu ile sınıflandırarak FV modellerin parametre çıkarımında kullanmışlardır [5]. FV model modüllerin bilinmeyen parametrelerini verimli bir şekilde tanımlamak amacıyla algoritmadaki Chen ve ark. tarafından en iyi ajanlara

kaotik sapmalar ve karşıt tabanlı keşif stratejisini kullanarak HHO algoritmasını geliştirmişlerdir [3]. Jiao ve ark. tarafından ise Harris şahin optimizasyon algoritmasına ortogonal öğrenme ve genel karşıtlık temelli öğrenme eklenmiştir. Her iki yöntemde de parametrelerin bulunması verimli ve etkili bir şekilde sağlanmıştır [7].

Yukarıdaki yöntemler, PV modellerinin parametrelerinin çıkarılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada fotovoltaiik modül modellerin bilinmeyen parametrelerini doğru bir şekilde çıkarmada etkili bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda standart Balina optimizasyon algoritmasının performansını artırmak amacıyla BOA'nın rastgelelik özellikleri henon kaotik haritayla birleştirilerek çeşitli kaotik Balina optimizasyon algoritmaları (HBOA) önerilmiştir. Bu algoritmalar HBOA 1, HBOA 2, HBOA 3 ve HBOA 4 olarak isimlendirilmiştir. Geliştirilen algoritmalar Fotowatt-PWP201, STM6-40/36 ve STP6 120/36 modellerini içeren üç farklı FV modülüne uygulanmıştır. Her bir algoritma bağımsız olarak 30 kez çalıştırılarak amaç fonksiyonunun minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliklerini test etmek amacıyla Wilcoxon ve Friedman testleri tercih edilmiştir [13-15]. Bu testlerde anlamlılık değeri [16], etki büyüklüğü [17] ve istatistiksel güç [18] değerleri incelenerek ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kaotik haritaların performansını deneysel olarak karşılaştırmak için literatürde bulunan Geliştirilmiş Harris Şahini Optimizasyonu (EHHO) [7], Geliştirilmiş Adaptif Farksal Gelişim (EJADE) [1], Geliştirilmiş JAYA [4], Memetik uyarlanabilir farksal gelişim (MADE) [8], Farksal Gelişim (FG) [9], Kuş Çiftleşme Optimizasyon Algoritması (BMO) [10], Jade tabanlı Rcr-IJADE [9] algoritmaları seçilmiştir. Bu algoritmaların seçilmesinin nedeni, hibrit algoritma olarak çok iyi performans göstermeleridir. Ayrıca istatistiksel sonuçlara bakıldığında geliştirilen HBOA'lar performans bakımından en iyisidir.

2. FOTOVOLTAİK MODÜL MODELİ (PHOTOVOLTAIC MODULE MODEL)

Fotovoltaiik sistemlerin doğrusal olmayan karakteristiklerini belirlemek, özellikle matematiksel modeli doğru bir şekilde tanımlanmasında önemlidir. Fotovoltaiik modül devreye seri veya paralel olarak bağlanmış çoklu güneş pillerinden oluşmaktadır [7]. Tek veya çift diyot modellerine dayanan FV modül modelleri diyotların seri ve paralel yerleştirilmesine izin veren N-diyotlu FV modeline genişletilmiştir [9]. PV modül modelinin eşdeğer devresi Şekil 1'de görülmektedir. N_s ve N_p sırasıyla seri bağlı ve paralel bağlı güneş pillerinin sayısını göstermektedir. Ayrıca tekli diyot tabanlı FV modül modellerinde $N_s=N_p$ değerleri 1'iken çift diyot tabanlı FV modelinde ise 2 değerine sahiptir.



Şekil 1. FV modül modelin eşdeğer devresi (The equivalent circuit of the PV module model)

Tek diyot modellerde doğruluk ve basitlik arasında denge sağlandığı için FV modüllerde de tercih edilmektedir [7]. Tek diyotlu FV modül modelinin akım- gerilim ilişkisinin matematiksel modeli Denklem 1'de verilmiştir.

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

Çift diyotlu FV modül modelinin akım- gerilim ilişkisinin matematiksel modeli Denklem 2'de verilmiştir.

$$I_L = I_{ph}N_p - I_{SD1}N_p \left[\exp\left(\frac{q(V_L + N_s I_L R_s / N_p)}{n_1 k N_s T}\right) - 1 \right] - I_{SD2}N_p \left[\exp\left(\frac{q(V_L + N_s I_L R_s / N_p)}{n_2 k N_s T}\right) - 1 \right] - \left[\frac{V_L + I_L R_s N_s / N_p}{R_{sh} N_s / N_p} \right] \quad (2)$$

Tekli diyot modeline benzer olarak tek diyotlu FV modülünde çıkarılması gereken beş parametre (I_{ph} , n , I_{SD} , R_s , R_{sh}) bulunmaktadır. Denklem 1 ve 2'de bulunan I_{ph} fotoakım, R_s seri direnç, R_{sh} paralel devre direnci, 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 faktörlerini göstermektedir. V_L güneş pili çıkış voltajı, V_t (q/nkT) termal voltaj, k Boltzmann sabiti (1.381×10^{-23} J/K), q ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C) elektronik şarj ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

3. KAOTİK TABANLI BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI (CHAOTIC BASED WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM)

3.1. Balina Optimizasyon Algoritması (Whale optimization algorithm)

Balina optimizasyon algoritması(BOA) kambur balinaların benzersiz avlanma tekniği baz alınarak Mirjalili and Lewis tarafından geliştirilmiştir [19-22]. BOA'da bulunan avı kuşatma ve kabarcık-net saldırı mekanizmaları sezgisel algoritmalarda bulunan sırasıyla keşif ve sömürü aşamasına benzemektedir. Balinaların avlanma sırasında kullandığı yöntem olan spiral

kabarcık-ağ besleme davranışının işlem adımları Algoritma 1'de verilmiştir.

Algoritma 1: BOA'nın sözde kodu (Pseudo code of WOA)

Balina popülasyonunu oluştur X_i ($i=1, 2, \dots, n$)
Her bir ajanın uygunluğunu hesapla
 X^* =en iyi arama ajanı

while ($t <$ maksimum iterasyon sayısı)

for her arama ajanı

a , A , C , I , ve p değerlerini güncelle

if ($p < 0.5$)

if ($|A| < 1$)

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}$$

else if ($|A| \geq 1$)

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}$$

end if

else if ($p \geq 0.5$)

$$\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t)$$

end if

end for

$X(t+1)$ uygunluğunu değerlendir ve

X^* güncelle

end while

3.1.1. Keşif aşaması (Exploration phase)

Kambur balinalar av arama davranışında, avın etrafını sarar ve maksimum iterasyon sağlanana kadar en iyi arama ajanına doğru konumunu güncellemektedir.

$$\vec{D} = |\vec{C} * \vec{X}_{rand}(t) - \vec{X}(t)| \quad (3)$$

$$\vec{X}(t+1) = |\vec{X}_{rand}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}| \quad (4)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (5)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (6)$$

\vec{A} , \vec{C} yakınsama katsayı değerleri, $\vec{X}(t)$ mevcut konumunu göstermektedir. Bunlara ek olarak t iterasyon, \vec{r}_1 ve \vec{r}_2 [0,1] rastgele sayılar, \vec{a} iterasyon boyunca 2'den sifıra doğrusal olarak azalan vektörü ve \vec{A} ise [-1,1] arasında rastgele bir değeri göstermektedir [19-22].

3.1.2. Sömürü aşaması (Exploitation phase)

Kambur balinaların kabarcık-net saldırı aşamasında avı yakalamada kullandığı arama çevresini küçültme ve spiral şekilde yol güzergâhı belirleme bulunmaktadır. Kambur balinalar avlanırken avının yerini bulabilir ve avı çevreleyebilir. WOA algoritması arama alanındaki en uygun tasarımın yeri önceden bilinmediğinden, mevcut en iyi aday çözümün hedef av olduğunu veya optimum duruma yakın olduğunu varsayar. Balinaların \vec{a}

değerinin düşürülmesiyle arama çevrelerini küçülterek avı yakalama davranışlarını sergilerler [19-22]. \vec{A} değeri de \vec{a} değerine bağlı olduğundan dolayı 2'den sıfıra doğru olarak azalır.

Bu davranışın matematiksel modeli şu şekildedir:

$$\vec{D} = |\vec{C}\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (7)$$

$$\vec{X}(t+1) = |\vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}| \quad (8)$$

Kambur balinaların spiral güncelleme davranışında avlara yakın olduklarında beslenmek için sarmalı oluştururlar ve balinaların mevcut konumları arasında spiral bir denklem oluşturulmaktadır. Spiral güncelleme pozisyonu için matematiksel model aşağıdaki gibidir:

$$\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (9)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (10)$$

D' balına ve en iyi av arasındaki mesafe, b logaritmik spiral sabiti, l ise $[-1,1]$ arasında rastgele sayı ve \vec{X}^* en iyi çözümü göstermektedir. Kambur balinalar avına doğru hareket ederken yüzde 50 olasılıkla ya daralan hareket modelini ya da spiral hareket modelinden birini seçmektedir. Bu seçim işlemin matematiksel modeli denklem aşağıda verilmiştir, burada bulunan p parametresi $[0,1]$ aralığında rasgele bir sayıdır [19-22].

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}' & p < 0.5 \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

3.2. Henon Kaotik Haritası tabanlı Balina

Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm based on Henon Chaotic Map)

Meta-sezgisel algoritmaların bir çoğunda optimal çözümü bulmak amacıyla arama alanında yeni alanlar keşfetmek amacıyla olasılığa dayanan rasgele sayı dizilerinden faydalanılmaktadır. Kaotik haritalar kullanılarak rastgeleliği değiştirmek algoritmaları avantajlı hale getirmektedir. Ayrıca bu algoritmaları geliştirmek, lokal minimum noktalardan kaçınmak ve global arama kalitesini artırmak amacıyla rasgele sayı dizilerinin yerine kaotik sayı dizileri kullanılmaktadır [23]. Kaotik sayı dizilerinin tercih edilmesi ise kaos sayı dizilerinde tekrarlamama özelliği bulunduğundan dolayı olasılıklara dayanan stokastik aramalara göre arama daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilirler [24].

Bu çalışmada optimizasyon problemini çözmek amacıyla kaotik sayı dizileri üretmek amacıyla Henon ayrık kaotik haritalar tercih edilmiştir. Bu kaotik haritanın performansı test fonksiyonları üzerinde Garip ve ark. tarafından yapılan çalışmada test edilmiştir ve istatistiksel sonuçlara göre Henon tabanlı balina optimizasyon algoritması etkin olduğu görülmüştür [23]. Bu sebepten dolayı FV modül modelinin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Henon kaotik tabanlı balina optimizasyon algoritması (HBOA) tercih edilmiştir.

Henon kaotik haritanın matematiksel modeli Denklem 12'de verilmiştir. Henon haritasının kaotik davranışı a ve b parametrelerine bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan sistemde $a = 1,4$ ve $b = 0,3$ parametre değerleri seçilmiştir.

$$x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + by_n \quad (12)$$

$$y_{n+1} = x_n$$

HBOA'da orijinal BOA'dan farklı olarak yakınsama parametreleri olan Denklem 5-6'da bulunan \vec{A} ve \vec{C} değişkenlerinde bulunan r rasgele sayısı dizisi ve kambur balinanın avına yaklaşma davranma modelini belirleyen p parametresi henon kaotik diziden alınır. Yani Denklem 5-6'da deki r yerine rasgele kaotik dizi $r=hk(t)$, Denklem 11'deki p yerine rasgele kaotik dizi $p(t)=hk(t)$ güncellemesi yapılır. HBOA'nın güncellenmiş denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\text{HBOA 1: } \vec{A} = 2\vec{a} \cdot hk - \vec{a} \quad (13)$$

$$\text{HBOA 2: } \vec{C} = 2 \cdot hk \quad (14)$$

$$\text{HBOA 3: } \begin{cases} \vec{A} = 2\vec{a} \cdot hk - \vec{a} \\ \vec{C} = 2 \cdot hk \end{cases} \quad (15)$$

Geliştirilen HBOA 1 ve HBOA 2 algoritmalarındaki yakınsama değerlerinin bir arada kullanılmasıyla HBOA 3 elde edilmiştir. Kambur balinanın avına doğru hareket ederken davranış modelini etkileyen p parametresi de Henon kaotik harita fonksiyonlarıyla değiştirilerek Denklem 16 elde edilmiştir.

$$\text{HBOA 4: } \vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}' & hk < 0,5 \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & hk \geq 0,5 \end{cases} \quad (16)$$

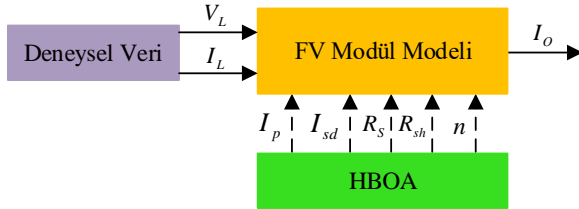
3.3 Amaç Fonksiyonu (Objective Function)

Meta-sezgisel algoritmalarda optimal sonucu seçim aşaması amaç fonksiyon değerine göre yapılmaktadır. Bundan dolayı optimizasyon problemlerin çözümünde amaç fonksiyonunun değeri en aza indirilmesi hedeflenmektedir. FV modüllerinin parametreleri tahmin edilirken ölçülen parametre değerleri ve deneysel veriler arasındaki farkın mümkün olduğunca az olması istenir. Diğer bir deyişle ölçülen ve deneysel veriler arasındaki hatanın olası minimum olmasıdır. Parametre çıkarma probleminde ortalama karekök hatası (RMSE) Denklem 17 ile formülasyonu sağlanarak optimizasyon probleminde kolayca dönüştürülebilir. Denklem 17'de bulunan N ölçülen I-V verilerinin sayısı, $I_{L,hsp}$ hesaplanan akım değerini, $I_{L,ocl}$ ölçülen akım değerlerini temsil etmektedir.

$$\min f(x) = RMSE(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [I_{L,hsp}^k(x) - I_{L,ocl}^k(x)]^2} \quad (17)$$

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Geliştirilen HBOA'ların performanslarını doğrulamak amacıyla FV modüllerin parametre çıkarımı kullanılmıştır. Ayrıca istatistiksel olarak hesaplanan ortalama ve standart sapma RMSE değerleri göz önüne alındığında HBOA'ların performansı, hassasiyeti, doğruluğu ve güvenilirliği ölçülmektedir. HBOA kullanılarak FV modül modeli parametre tahminindeki genel bakış Şekil 2'de verilmiştir. Deneyde tek diyotlu fotovoltaik modül modellerinin bilinmeyen parametrelerini tahmin etmede üç farklı akım-gerilim (I-V) deney seti kullanılmıştır. Bu modüller 45 °C ve 1000W/m² 'de Fotowatt-PWP201 (Ns=36, Np = 1), 51 °C ve 1000W/m²'deki STM6-40/36 (Ns = 36, Np = 1) ve 55 °C ve 1000W/m²'deki STP6 120/36 (Ns = 36, Np = 1) FV modelleridir. Ayrıca bu modüllerin I-V veri setleri [25, 26] nolu kaynaklardan elde edilmiştir. FV modüllerinin bilinmeyen parametrelerini arama aralığı Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Parametre tahmininde kullanılan sistem (System used in parameter estimation)

MATLAB R2019 kullanılarak gerçekleştirilen istatistiksel analizler algoritmalar 30 kere bağımsız çalıştırılarak elde edilmiştir. Literatürde kullanılan farklı algoritmaların popülasyon boyutu, maksimum iterasyon sayıları Çizelge 1'de verilmiştir. Bu çalışmada da kullanılan BOA ve Henon tabanlı BOA'larda sürü boyutu 100 ve iterasyon sayısı maksimum 500 olarak belirlenmiştir. Algoritmalar arasında en iyi olanı bulmak amacıyla performans kriteri olarak RMSE seçilmiştir. Algoritmalar çalıştırılırken FV modül modellerinin bilinmeyen parametrelerinin aralıkları Çizelge 2'de verilmiştir. Önerilen algoritmaların elde ettiği sonuçları ile Geliştirilmiş Harris Şahini Optimizasyonu [7], Geliştirilmiş Adaptif Farksal Gelişim [1], Geliştirilmiş JAYA [4], Memetik uyarlanabilir farksal gelişim [8], Farksal Gelişim [9], Kuş Çiftleşme Optimizasyon

Algoritması [10], Jade tabanlı Rcr-IJADE [9] algoritmaları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1. Literatürde kullanılan algoritmaların parametreleri (Number of independent studies and iteration parameters of different algorithms used in the literature)

Algoritma	Popülasyon Boyutu	İterasyon Sayısı
BOA	100	500
HBOA 1-4	100	500
Geliştirilmiş Harris Şahini Optimizasyonu [7]	30	2000
Geliştirilmiş Adaptif Farksal Gelişim [1]	50	1000
Geliştirilmiş JAYA [4]	20	5e4
Memetik uyarlanabilir farksal gelişim [8]	20	5000
Farksal Gelişim [9]	50	1e4, 3e4
Kuş Çiftleşme Optimizasyon Algoritması [10]	30	5000
Jade tabanlı Rcr-IJADE [9]	50	1e4, 3e4

Orjinal BOA ve Henon kaotik tabanlı BOA'lar kullanılarak çıkarılan FV modüllerinin (Fotowatt-PWP201, STM6-40/36 ve STP6 120/36) optimal parametreleri (I_{ph}, I_{sd}, R_s, R_p, n) ve RMSE değerleri sırasıyla Çizelge 3-5'de verilmiştir. Çizelge 3'e göre Fotowatt-PWP201 FV modül modelinde en iyi RMSE (5,98e-06) değerini HBOA 4 vermiştir. STM6-40/36 FV modülünde ise minimum RMSE (7,80e-04) değerini Çizelge 5'te belirttiği gibi HBOA 4 vermiştir. Son olarak Çizelge 7'de görüldüğü üzere STP6-120/36 FV modülün de ise 9,99e-03 RMSE değeri ile HBOA 2 ve 3'de minimum değer elde edilmiştir.

Fotowatt-PWP201 modülünde önerilen algoritmalar arasında en iyi RMSE değeri veren HBOA 4 'nın performansını karşılaştırmak amacıyla literatürde bulunan EHHO, EJADE, IJAYA, MADE algoritmaları kullanılmıştır. Çizelge 4'de verilen karşılaştırmalı benzetim sonuçlarına göre RMSE (5,98e-06) değeri ile en iyi sonucu vermiştir.

Çizelge 2. FV modül modelinin parametre sınırları (Parameter limits of the PV module model)

FV Modül	Fotowatt-PWP201		STM6-40/36		STP6 120/36	
Parametre	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst
$I_{ph}(A)$	0,1	2	0	2	0	8
$I_{sd}(A)$	1e-6	1e-3	1e-8	1e-5	1e-8	1e-5
$R_s(\Omega)$	1e-2	200	0	1	1e-3	0,1
$R_p(\Omega)$	1e-1	2000	0	40	0	40
n	1,2	1000	1,2	1,7	1,2	1,7

Çizelge 3. HBO algoritmaları tabanlı Fotowatt-PWP201 modülünün karşılaştırmalı parametre sonuçları (Comparative parameter results of Fotowatt-PWP201 module based on HWO algorithms)

Algoritma	I_{ph}	I_{SD}	$R_s(\Omega)$	n	$R_p(\Omega)$	RMSE
BOA	1,0562	1,86e-04	0,3596	7,1243e1	4,02857e2	4,50e-4
HBOA 1	1,0454	1,48e-04	0,5123	6,9260e1	1,15104e3	2,70e-04
HBOA 2	1,0622	1,10e-04	0,5085	6,7172e1	2,90391e2	4,10e-4
HBOA 3	1,0375	4,44e-06	1,1588	4,9609e1	5,60025e2	1,39e-05
HBOA 4	1,0294	3,81e-06	1,1932	4,8970e1	1,182171e3	5,98e-06

Çizelge 4. Fotowatt-PWP201 modülünde farklı algoritmalarla performans karşılaştırması (Performance comparison of Fotowatt-PWP201 module with different algorithms)

Parametre	HBOA 4	EHHO	EJADE	IJAYA	MADE
I_{ph}	1,0294	1,0305	1,0305	1,031	1,0305
$I_{SD}(\mu A)$	3,81	3,4881	3,4823	3,48	3,4823
$R_s(\Omega)$	1,1932	1,201	1,2013	1,201	1,2013
n	48,970	48,6493	48,6428	48,643	48,6428
$R_p(\Omega)$	1182,171	984,4964	981,9824	981,976	981,9823
RMSE	5,98e-06	2,43e-03	2,43e-03	2,43e-03	2,43e-03

Çizelge 5. HBO algoritmaları tabanlı STM6-40/36 FV modülünün karşılaştırmalı parametre sonuçları (Comparative parameter results of STM6-40 / 36 FV module based on HBO algorithms)

Algoritma	I_{ph}	I_{SD}	R_s	n	R_{sh}	RMSE
BOA	1,6576	1,56e-06	5,9e-2	1,5358	27,8172	9,71e-04
HBOA 1	1,6615	6,77e-07	7,7e-2	1,4493	16,2414	8,30e-04
HBOA 2	1,6566	2,94e-06	2,9e-2	1,6091	33,1823	7,80e-04
HBOA 3	1,6558	3,21e-06	2,6e-2	1,6199	38,1279	8,40e-04
HBOA 4	1,6572	3,69e-06	2,6e-2	1,6373	38,4933	8,30e-04

Çizelge 6. STM6-40 / 36 modülünde farklı algoritmalar performans karşılaştırması (Performance comparison of different algorithms in STM6-40 / 36 module)

Parametre	HBOA 2	MADE	DE	BMO	Rcr-IJADE
I_{ph}	1,6566	1,6639	1,6630	1,6646	1,6639
$I_{SD}(\mu A)$	2,94	1,7387	2,3342	1,4311	1,7387
$R_s(\Omega)$	0,0029	0,0043	0,0033	0,0050	0,0043
n	1,6091	1,5203	1,5534	1,4994	1,5203
$R_p(\Omega)$	33,1823	15,9283	17,6907	14,93711	15,9283
RMSE	7,80e-04	7,80e-04	1,73e-03	1,87e-03	1,9e-03

Çizelge 7. HBO algoritmaları tabanlı STP6 120/36 FV modülünün karşılaştırmalı parametre sonuçları (Comparative parameter results of STP6 120/36 FV module based on HWO algorithms)

Algoritma	I_{ph}	I_{SD}	R_s	R_{sh}	n	RMSE
BOA	7,4730	3,79e-06	0,0042	37,8870	1,3015	1,00e-02
HBOA 1	7,4769	4,56e-06	0,0041	38,9948	1,3182	1,00e-02
HBOA 2	7,4744	3,39e-06	0,0043	25,7341	1,2915	9,99e-03
HBOA 3	7,4715	3,51e-06	0,0043	35,9377	1,2946	9,99e-03
HBOA 4	7,5025	3,92e-06	0,0042	8,8041	1,3048	1,01e-02

Çizelge 8. STP6 120/36modülünde farklı algoritmalar performans karşılaştırması (Performance comparison of different algorithms in STP6 120/36 module)

Parametre	HBOA 2	MADE	DE	BMO	Rcr-IJADE
I_{ph}	7,4744	7,4725	7,4715	7,4763	7,4725
$I_{SD}(\mu A)$	3,39e-06	2,3350	2,4257	1,2333	2,3350
$R_s(\Omega)$	4,3e-2	4,6e-2	4,6e-2	4,9e-2	4,6e-2
n	1,2915	1,2601	1,2633	1,2092	1,2601
$R_p(\Omega)$	2,57e1	2,22e1	2,52e1	9,7000	2,22e1
RMSE	9,99e-03	1,66e-02	1,66e-02	1,70e-02	1,66e-02

STM6-40/36 ve STP6-120/36 modüllerinde önerilen algoritmalar arasında en iyi RMSE değeri veren HBOA 2'nin performansını karşılaştırmak amacıyla literatürde bulunan MADE, DE, BMO, Rcr-IJADE algoritmaları kullanılmıştır. Benzetim sonuçları Çizelge 6 ve Çizelge 8'de sırasıyla verilmiştir. Bu sonuçlara göz önünde bulundurulduğunda iki FV modülde de en iyi sonuçları HBOA 2 vermektedir. Genel olarak sonuçlar incelendiğinde önerilen Henon Kaotik Tabanlı Balina Optimizasyon algoritmaları literatürdeki algoritmalarından daha iyi sonuçlar vermiştir ve FV modül modellerin

parametrelerini tahmin etmede etkili bir şekilde uygulanabilir.

Benzetimden elde edilen sonuçların daha net bir şekilde anlaşılması amacıyla FV modüllerde ölçülen ve benzetim edilen akım değerleri arasındaki Eşitlik 18 ile mutlak hata değerleri (IAE) toplamı kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge 9-11'de Fotowatt-PWP201, STM6-40/36 ve STP6 120/36 FV modüllerin sırasıyla ölçülen ve hesaplanan akım değerleri sunulmuştur.

$$IAE = \sum |I_{ölçülen} - I_{simulasyon}| \quad (18)$$

Çizelge 9. Fotowatt-PWP201 modül modeli için algoritmalar tarafından elde edilen hesaplanan akım değerleri (Calculated current values obtained by algorithms for the Photowatt-PWP201 module model).

Fotowatt -PWP201 FV modül							
Sno	Ölçülen Veri		Benzetimden elde edilen akım (I(A)) değerleri				
	V(V)	I(A)	BOA	HBOA1	HBOA2	HBOA3	HBOA4
1	0,1248	1,0315	1,0324	1,0205	1,0211	1,0208	1,0207
2	1,8093	1,0300	1,0317	1,0200	1,0205	1,0203	1,0201
3	3,3511	1,0260	1,0309	1,0194	1,0198	1,0197	1,0196
4	4,7622	1,0220	1,0300	1,0186	1,0191	1,0190	1,0189
5	6,0538	1,0180	1,0286	1,0175	1,0179	1,0179	1,0178
6	7,2364	1,0155	1,0264	1,0155	1,0159	1,0161	1,0159
7	8,3189	1,0140	1,0224	1,0120	1,0124	1,0128	1,0124
8	9,3097	1,0100	1,0156	1,0057	1,0061	1,0069	1,0062
9	10,2163	1,0035	1,0041	0,9950	0,9955	0,9967	0,9957
10	11,0449	0,9880	0,9857	0,9778	0,9783	0,9799	0,9787
11	11,8018	0,9630	0,9580	0,9516	0,9523	0,9541	0,9528

12	12,4929	0,9255	0,9187	0,9140	0,9150	0,9167	0,9157
13	13,1231	0,8725	0,8665	0,8636	0,8649	0,8660	0,8656
14	13,6983	0,8075	0,8003	0,7988	0,8005	0,8006	0,8012
15	14,2221	0,7265	0,7219	0,7210	0,7229	0,7220	0,7234
16	14,6995	0,6345	0,6328	0,6310	0,6332	0,6313	0,6332
17	15,1346	0,5345	0,5353	0,5308	0,5332	0,5308	0,5323
18	15,5311	0,4275	0,4331	0,4236	0,4260	0,4241	0,4239
19	15,8929	0,3185	0,3277	0,3108	0,3131	0,3127	0,3093
20	16,2229	0,2085	0,2220	0,1955	0,1974	0,1998	0,1916
21	16,5241	-0,1010	0,2490	0,2010	0,2012	0,2229	0,1915
22	16,7987	-0,0080	0,0173	-0,0347	-0,0339	-0,0220	-0,0451
23	17,0499	-0,1110	-0,0803	-0,1474	-0,1474	-0,1291	-0,1618
24	17,2793	-0,2090	-0,1738	-0,2575	-0,2583	-0,2325	-0,2761
25	17,4885	-0,3030	-0,2614	-0,3624	-0,3643	-0,3301	-0,3856
IAE Toplam		5,971e-1	6,073e-1	5,878e-1	5,166e-1	6,529e-1	

Çizelge 10. STM6 40/36 PV modül modeli için algoritmalar tarafından elde edilen hesaplanan akım değerleri (Calculated current values obtained by algorithms for STM6 40/36 PV module model).

STM6 40/36 FV modül							
Ölçülen Veri		Benzetimden elde edilen akım (I(A)) değerleri					
Sno	V(V)	I(A)	BOA	HBOA1	HBOA2	HBOA3	HBOA4
1	0	1,663	1,6564	1,6569	1,6617	1,6539	1,6569
2	0,118	1,663	1,6564	1,6568	1,6616	1,6539	1,6568
3	2,237	1,661	1,6557	1,6558	1,6597	1,653	1,6554
4	5,434	1,653	1,6547	1,6541	1,6567	1,6516	1,6532
5	7,26	1,65	1,6538	1,6529	1,6549	1,6507	1,6517
6	9,68	1,645	1,6517	1,6502	1,6515	1,6487	1,6487
7	11,59	1,64	1,6471	1,6452	1,6464	1,6448	1,6435
8	12,6	1,636	1,6418	1,6397	1,6411	1,6403	1,6381
9	13,37	1,629	1,6352	1,6329	1,6346	1,6346	1,6313
10	14,09	1,619	1,6255	1,6231	1,6253	1,626	1,6217
11	14,88	1,597	1,6089	1,6064	1,6095	1,6111	1,6054
12	15,59	1,581	1,5855	1,5833	1,5871	1,5895	1,5826
13	16,4	1,542	1,5435	1,5418	1,5465	1,5496	1,5418
14	16,71	1,524	1,5212	1,5199	1,5248	1,5281	1,5202
15	16,98	1,5	1,4982	1,4973	1,5023	1,5057	1,4979
16	17,13	1,485	1,4837	1,4831	1,4881	1,4915	1,4838
17	17,32	1,465	1,4634	1,4632	1,4682	1,4716	1,4641
18	17,91	1,388	1,3836	1,3849	1,3896	1,3923	1,3864
19	19,08	1,118	1,115	1,1207	1,123	1,1212	1,123
20	21,02	0	0,016	0,0055	0,0401	0,0278	0,0006
IAE Toplam		1,05e-1	7,73e-2	1,22e-1	1,42e-1	5,95e-2	

Çizelge 11. STP6-120/36 FV modül modeli için algoritmalar tarafından elde edilen hesaplanan akım değerleri (Calculated current values obtained by algorithms for the STP6-120 / 36 FV module model.).

STP6 120/36 FV modül							
Sno	Ölçülen Veri		Benzetim				
	V(V)	I(A)	BOA	HBOA 1	HBOA 2	HBOA 3	HBOA 4
1	0,0000	7,4800	7,4882	7,5001	7,4585	7,5139	7,4971
2	9,0600	7,4500	7,4709	7,4797	7,4436	7,4569	7,4616
3	9,7400	7,4200	7,4636	7,4718	7,4386	7,4482	7,4538
4	10,3200	7,4400	7,4540	7,4616	7,4319	7,4381	7,4442
5	11,1700	7,4100	7,4309	7,4375	7,4152	7,4160	7,4219
6	11,8100	7,3800	7,4019	7,4075	7,3931	7,3893	7,3944
7	12,3600	7,3700	7,3639	7,3686	7,3630	7,3548	7,3584
8	12,7400	7,3400	7,3280	7,3320	7,3335	7,3220	7,3243
9	13,1600	7,2900	7,2757	7,2789	7,2892	7,2739	7,2743
10	13,5900	7,2300	7,2038	7,2062	7,2264	7,2071	7,2051
11	14,1700	7,1000	7,0674	7,0690	7,1028	7,0783	7,0726
12	14,5800	6,9700	6,9342	6,9355	6,9780	6,9502	6,9419
13	14,9300	6,8300	6,7888	6,7903	6,8386	6,8086	6,7983
14	15,3900	6,5800	6,5434	6,5459	6,5980	6,5664	6,5540
15	15,7100	6,3600	6,3281	6,3321	6,3830	6,3514	6,3385
16	16,0800	6,0000	6,0318	6,0380	6,0851	6,0542	6,0410
17	16,3400	5,7500	5,7786	5,7871	5,8264	5,7975	5,7854
18	16,7600	5,2700	5,2889	5,3025	5,3226	5,2984	5,2897
19	16,9000	5,2700	5,0585	5,0762	5,0712	5,0545	5,0517
20	17,1000	4,7900	4,8149	4,8335	4,8343	4,8145	4,8095
21	17,2500	4,5600	4,5795	4,6007	4,5916	4,5739	4,5709
22	17,4100	4,2900	4,3132	4,3371	4,3182	4,3023	4,3012
23	17,6500	3,8300	3,8865	3,9142	3,8847	3,8696	3,8705
24	19,2100	0,0000	-0,0481	-0,0031	0,0524	-0,0291	-0,0533
IAE Toplam			7,09e-1	9,09e-1	7,75e-1	7,08e-1	7,45e-1

Çizelge 12. FV modül modelleri için algoritmalar tarafından hesaplanan IAE değerleri (IAE values calculated by algorithms for PV module models).

Modül Adı	BOA	HBOA1	HBOA2	HBOA3	HBOA4
Fotowatt-PWP201	0,5971	0,6073	0,5878	0,5166	0,6529
STM6-40/36	0,1051	0,0773	0,1217	0,1421	0,0595
STP6-120/36	0,7086	0,9098	0,7752	0,7086	0,7455

Çizelge 13. Önerilen algoritmalar kullanılarak hesaplanan uygunluk fonksiyon(RMSE) değerinin ortalama, minimum, maksimum ve standart sapma değerleri (Average, minimum, maximum and standard deviation values of the fitness function (RMSE) value calculated using the proposed algorithms)

FV Modül	Algoritma	BOA	HBOA 1	HBOA 2	HBOA 3	HBOA 4
Fotowatt-PWP201	Ort	9,90e-04	2,90e-04	5,60e-04	2,00e-04	6,70e-04
	Min	4,50e-04	2,79e-05	4,00e-04	1,30e-05	5,97e-06
	Mak	3,50e-03	6,80e-04	7,00e-04	7,00e-04	3,10e-03
	Std	9,10e-04	2,40e-04	8,22e-05	2,20e-04	9,00e-04
STM6-40/36	Ort	3,18e-03	1,69e-03	3,59e-03	1,96e-03	3,80e-03
	Min	9,71e-04	8,34e-04	7,76e-04	8,41e-04	8,30e-04
	Mak	7,82e-03	3,25e-03	7,68e-03	5,26e-03	6,38e-03
	Std	2,37e-03	9,27e-04	2,20e-03	1,44e-03	2,00e-03
STP6 120/36	Ort	1,04e-02	1,06e-02	1,04e-02	1,02e-02	1,20e-02
	Min	1,00e-02	1,00e-02	9,99e-03	9,99e-03	1,01e-02
	Mak	1,11e-02	1,15e-02	1,07e-02	1,05e-02	2,32e-02
	Std	4,16e-04	4,23e-04	2,75e-04	2,33e-04	4,02e-03

Çizelge 12'de Fotowatt-PWP201, STM6-40/36 ve STP6 120/36 FV modüllerinin IAE değerlerini göstermektedir. Bu çizelgeye göre IAE değeri Fotowatt-PWP201 FV modülünde en yükseği $6,529e-1$ değerindedir, STM6-40/36 FV modülünde $5,95e-2$ ile $1,421e-1$ değerleri arasında son olarak STP6 120/36 FV modülünde ise $9,098e-1$ 'den küçüktür. IAE sonuçlarına göre Henon tabanlı kaotik algoritmalar tarafından benzetim edilen FV modül modellerinin gerçek özelliklerini doğru bir şekilde tanımladığını göstermektedir. Ayrıca Çizelge 13'de ise her FV modül için daha ayrıntılı olarak algoritmaların elde ettiği minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir.

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda önerilen algoritmaların performansları ölçülürken her bir bağımsız çalışma sonra elde edilen değerler karşılaştırılmamaktadır. Buradaki eksikliği gidermek amacıyla her bir bağımsız benzetim çalışma sonucunu karşılaştırmak amacıyla istatistiksel güvenilirlik testleri tercih edilmiştir [27]. Bu çalışmada parametrik olmayan Wilcoxon ve Friedman güvenilirlik testleri, optimizasyon sonuçları normal bir dağılımda olmadığından dolayı seçilmiştir. Tercih edilmesinin diğer bir sebebi ise literatürde sıklıkla kullanılmasıdır. Wilcoxon testi farklı optimizasyon algoritmalarını karşılaştırmak amacıyla kullanılabilen performans değerlendirme testidir [28].

Genel olarak Wilcoxon güvenilirlik testinde yokluk hipotezinden H_0 ve alternatif hipotezden H_1 söz edilmektedir. Yokluk hipotezi içerisinde kritik bir değer olan anlamlılık değerini (α) sabit olarak kabul edilmektedir. Yokluk hipotezinin reddedilmesi için bir değer belirlenir ve bu anlamlılık değeri ile karşılaştırılır. Yokluk hipotezinin kabulüne göre veya reddedilmesine

göre sonuç değerlendirilmektedir. Dolayısıyla hipotezin kabul ve reddine göre istatistiksel değerlendirme yapılabilmektedir. Temel olarak doğru bir hipotezin kabul edilmesinde ve yanlış bir hipotezin reddedilmesinde bir problem yoktur. Ama doğru bir hipotezin reddedilmesi tip I hata olarak adlandırılmakta ve bunun için hesaplanan değere anlamlılık değeri (α) olarak adlandırılmaktadır. Bu değer küçük olması elde edilen verilerin tutarlı olduğunu gösteren bir nicelik olarak ifade edilebilir. Diğer bir durumda yanlış bir hipotezin doğru olarak kabul edilmesi ise tip II hata olarak karşılaşılmakta ve bunun için hesaplanan değere istatistiksel güç denilmektedir (β) [18]. Ayrıca bu çalışmada etki büyüklüğü (d) de hesaplanmıştır. Etki büyüklüğü yokluk hipotezinin hatalı olmasının bir ölçüdür ve elde edilen sonuçların sapmasını veren istatistiksel bir değerdir [29]. Literatürde genellikle anlamlılık değeri $1e-2$ veya $5e-2$ olarak alınmaktadır. Bu çalışmada $5e-2$ olarak alınmıştır [13]. Etki büyüklüğü $2e-1$ ise düşük etki büyüklüğü, $5e-1$ ise orta etki büyüklüğüne ve $8e-1$ ise büyük etki büyüklüğü seviyelerini ifade etmektedir. Genel olarak etki büyüklüğünün yüksek olması testin gücü ile yakından ilişkilidir [18].

Bu çalışmada orjinal BOA algoritması ve önerilen HBOA 1, HBOA 2, HBOA 3, HBOA 4 algoritmalarının sonuçlarını ikiyeşerli olarak istatistiksel karşılaştırma yapmak amacıyla ilk aşamada Wilcoxon işaretli sıralama testi yapılmıştır. İkinci aşamada ise tüm sonuçların birbirleriyle ilişkisini incelemeye Friedman testi gerçekleştirilmiştir. Wilcoxon analizinde verilerin farkları alındıktan sonra verinin işaretli ve işaretsiz sıralamaları yapılır. Her iki sıralamadan mutlak değeri büyük olan değer alınır. Elde edilen bu değer T istatistiği

olarak alınır. Ardından dağılımın normal dağılıma uyduğu varsayımı yapılarak anlamlılık değeri belirlenir. Bu doğrultuda SPSS Programı ve G-Power programları kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 14’de verilmiştir.

Çizelge 14’de göre Fotowatt-PWP201 modül modeli için elde edilen sonuçlarda BOA/HBOA 1 ve BOA/HBOA 4 için anlamlılık değerlerinin (α) $5e-2$ ’den küçük olduğundan dolayı H_0 hipotezi red edilerek bu algoritmaların sonuçlarında anlamlı bir fark olduğu görülmüştür. Ayrıca etki büyüklük değerleri $5e-1$ ’ten büyük olduğu için orta etki büyüklüğünden fazladır. Ayrıca güç değeri $8e-1$ ’den büyük olduğu için istatistiksel olarak güçlüdür. BOA/HBOA 2 ve BOA/HBOA 3 analizlerinin anlamlılık değerleri incelendiğinde $5e-2$ ’den büyük olduğu için bu algoritmaların sonuçlarında anlamlı fark olmadığını göstermektedir. Ayrıca etki büyüklüğü BOA / HBOA 2’in yaklaşık olarak orta etki büyüklüğüne sahipken ve BOA / HBOA 3’ün $2e-1$ ’den küçük olduğu için düşük etki büyüklüğüne sahiptir. İstatistiksel güç bakımından incelendiğinde ise BOA / HBOA 2’nin istatistiksel gücü $8e-1$ ’den büyük olduğu için istatistiksel olarak güçlüdür. Fakat BOA / HBOA 3’ün istatistiksel gücü $8e-1$ ’den küçük olduğu için istatistiksel olarak güçlü değildir.

STM6-40/36 modül modeli için Çizelge 14 incelendiğinde elde edilen sonuçlarda BOA/HBOA 1 ve BOA/HBOA 4 anlamlılık değerlerinin $5e-2$ ’den küçük olduğundan H_0 hipotezi red edilerek bu algoritmaların sonuçlarında anlamlı fark olduğu görülmüştür. Ayrıca etki büyüklükleri değerleri $5e-1$ değerinden büyük olduğu için orta etki büyüklüğünden fazladır. Bunun yanı sıra istatistiksel güç değerleri $8e-1$ ’den büyük olduğu için istatistiksel olarak güçlüdür. BOA /HBOA 2 ve BOA/HBOA 3 analizlerinin anlamlılık değerleri incelendiğinde $0,05$ ’den büyük olduğu için bu algoritmaların sonuçlarında anlamlı fark olmadığını göstermektedir. BOA / HBOA 2’in etki büyüklüğü yaklaşık olarak kötü ve orta etki büyüklüğü arasında iken ve BOA / HBOA 3’ün etki büyüklüğü $2e-1$ ’den düşük olduğu için düşük etki büyüklüğüne sahiptir. İstatistiksel güç bakımından incelendiğinde ise BOA / HBOA 2’nin istatistiksel gücü $8e-1$ ’e yakın olduğu için istatistiksel olarak güçlü denilebilir. Son olarak BOA / HBOA 3’ün istatistiksel gücü $8e-1$ ’den küçük olduğu için istatistiksel olarak güçlü değildir.

Çizelge 14’e göre STP6-120/36 modül modeli için BOA/HBOA 1, BOA/HBOA 2 ve BOA/HBOA 3 için anlamlılık değerlerinin $5e-2$ ’den küçük olduğundan H_0 hipotezi red edilerek bu algoritmaların sonuçlarında anlamlı farklar olduğu görülmüştür. Ayrıca etki büyüklük değerleri $5e-1$ değerinden küçük $2e-1$ değerinden büyük olduğu görülmektedir. İstatistiksel güç değerleri $8e-1$ ’den küçük olduğu için istatistiksel olarak güçlü değildir. BOA/HBOA 4 analizinin anlamlılık değerleri incelendiğinde $5e-2$ ’den büyük olduğu için bu algoritmaların sonuçlarında anlamlı fark olmadığını göstermektedir. BOA / HBOA 4’in etki büyüklüğü $2e-$

1 ’den küçük olduğu için düşük etki büyüklüğü vardır. Ancak istatistiksel güç değeri $8e-1$ ’den küçük olduğundan dolayı güçlü değildir.

HBOA 1, HBOA 2, HBOA 3 ve HBOA 4, BOA ile karşılaştırıldığında minimum, beklenen değer ve standart sapma değerleri bakımında istatistiksel kriterlere göre iyi performans gösterirken Wilcoxon testlerinde elde edilen sonuçlara göre anlamlılık ve istatistiksel güç bakımından iyi değerlerden elde edilirken istatistiksel sonuç olarak iyi çıkmamıştır. Bunun sebebi olarak bu algoritmaların rastlantısal olarak çalışmaları gösterilebilir. Bu hipotezi doğrulamak için anlamlılık değeri, etki büyüklüğü ve istatistiksel güç için daha fazla örnek alınabilir. Daha fazla örnek ile istatistiksel gücün artması ve önerilen algoritmaların anlamlı bir şekilde BOA’dan daha başarılı sonuçlar elde ettiği gösterilebilir.

Wilcoxon doğruluk testinden elde edilen sonuçları desteklemek amacıyla ise Friedman analiz testi verilerin varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Friedman testi özellikle bağımsız 2 ’den fazla olan grupları karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Yokluk hipotezi oluşturulurken H_0 : “değişkenler arasında önemli fark yoktur”, “gruplar içindeki verilerin diğer gruplara eşit olduğu, dağılıma sahip olduğu veya aynı ana kütlede geldiği ifade edilebilir” gibi farklı ifadeler ile ama aynı sonuca çıkacak şekilde oluşturulabilir [30]. Eğer veri birbirine benzer değilse o zaman H_0 red edilir ve tersi olan alternatif hipotez H_1 kabul edilir. Bu analizde elde edilen n tane farklı grubun sütun şeklinde, her birinin k tane farklı örneği satırlara yazılarak veriler düzenlenir. Düzenleme ise esasından satırlarda büyükten küçüğe sıralama ile gerçekleştirilir ve sıralamaya göre bu satırların her birine sıra numaraları verilir. Sonraki adımda ise Friedman analizi verilen bu sıra numaralarının sütunlara göre toplamalarının analizine göre gerçekleştirilmektedir. Özellikle sıralama bir satır arasında yapılmaktadır. Yani farklı algoritmaların sonuçları birbiri ile sıralanır ve numaralandırılır. Son olarak da sütunlarda sıra numaralarının toplamı ve ortalamasının alınması işlemleri uygulanır [31]. Bu analizin gerçekleştirilmesi için SPSS programı kullanılmıştır. Elde edilen sıralama sonuçların ortalamaya sıraları Çizelge 15’de verilmiştir. Bu analizde asıl önemli olan verilerin anlamlı olarak ayrı olup olmadığıdır. Çizelge 16’da göre anlamlılık için Ki-kare (Chi-Square) sonucu yani χ^2 dağılımındaki değerler kullanılır. Anlamlılık değeri α değeri ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca Çizelge 16’da algoritmaların bağımsız olarak çalıştırılması ile oluşan verinin sayısı yani örnek sayısını (N) ve bunun yanında serbestlik değerleri (df) de verilmiştir.

Bu sonuçlara göre Fotowatt-PWP201 modül model için yapılan analizde sonuçlar arasında anlamlı bir fark bulunmaktadır. STM6-40/36 modül model için p değeri $5e-2$ ’den küçük olduğu için sonuçlar arasında anlamlı bir fark bulunmaktadır. STP6-120/36 modül model sonuçları incelendiğinde ise p değeri yine $5e-2$ ’den küçük olduğu için anlamlı bir fark bulunmaktadır

Çizelge 14. Fotowatt-PWP201, STM6-40/36 ve STP6 120/36 FV modül modellerin Wilcoxon Testleri, Etki Büyüklükleri ve İstatistiksel Güç Sonuçları (Wilcoxon Tests, Size Effects and Statistical Power Results of Photowatt-PWP201, STM6-40 / 36 and STP6 120/36 FV module models)

Modül		BOA / HBOA1	BOA / HBOA2	BOA / HBOA3	BOA / HBOA4
Fotowatt-PWP201	α	1,1748e-2	1,3590e-1	5,3044e-1	1,4795e-2
	H ₀	Red	Kabul	Kabul	Red
	d	6,2269e-1	4,3183e-1	1,5713e-1	6,1659e-1
	Güç (β)	9,4371e-1	8,5957e-1	6,6259e-1	9,4735e-1
STM6-40/36	α	2,1827e-2	2,80214e-1	4,04835e-1	9,2710e-3
	H ₀	Red	Kabul	Red	Red
	d	7,0689e-1	3,3330e-1	1,5416e-1	7,4534e-1
	Güç(β)	9,9821e-1	7,9980e-1	5,5272e-1	9,9914e-1
STP6-120/36	α	5,1931e-1	4,9498e-2	2,9570e-2	2,8947e-1
	H ₀	Kabul	Red	Red	Kabul
	d	3,0915e-1	3,7040e-1	3,3377e-1	-1,9300e-1
	Güç(β)	4,1179e-1	5,5738e-1	3,7519e-1	5,1964e-1

Çizelge 15. Friedman Test Sonucuna göre Ortalama Sıralaması (Average Ranking According to Friedman Test Result)

Algoritma	Fotowatt-PWP201	STM6-40/36	STP6-120/36
BOA	3,433333	3,533333	3,833333
HBOA 1	2,633333	2,366667	2,633333
HBOA 2	3,300000	3,300000	2,900000
HBOA 3	3,266667	3,100000	2,333333
HBOA 4	2,366667	2,700000	3,300000

Çizelge 16. Algoritmaların Fotowatt-PWP201, STM6-40/36 ve STP6 120/36 FV modül modellerin göre Friedman Testinin Ki-Kare, serbestlik değeri ve anlamlılık değer sonuçları (Chi-square, degrees of freedom and significance value results of Friedman Test according to Fotowatt-PWP201, STM6-40/36 ve STP6 120/36 FV modul models of algorithms)

Parametre	Fotowatt-PWP201 Modül	STM6-40/36 Modül	STP6-120/36 Modül
N	3e1	3e1	3e1
Ki-kare	1,061e1	1,051e1	1,648e1
df	4	4	4
α	3,127e-2	3,271e-2	2,438e-3

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Fotovoltaik sistemlerin verimliliği sistemin parametre tahminlerine bağlıdır. Bu çalışmada Fotowatt-PWP201, STM6-40/36 ve STP6-120/36 FV modül modellerinin optimal parametreleri doğru bir şekilde tahmin etmek amacıyla balina optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Henon kaotik harita dizisi ile BOA'da bulunan rasgele sayı dizileri değiştirilerek kaotik tabanlı algoritmalar önerilmiştir. BOA ve Henon tabanlı kaotik balina optimizasyon algoritmalarından elde edilen RMSE performans parametre değerine göre HBOA 3 algoritması Fotowatt-PWP201 modülünde, HBOA 1 algoritması STM6-40/36 modülünde ve HBOA 3 algoritması STP6 120/36 modülünde diğer algoritmalarla göre daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca geliştirilen HBOA'ların etkinliğini test etmek amacıyla literatürde bulunan algoritmalar ile karşılaştırmalı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmaların istatistiksel güvenilirliklerini test etmek amacıyla Wilcoxon analizleri, etki büyüklükleri, istatistiksel güçleri ve Friedman

analizleri gerçekleştirilmiştir. Wilcoxon testine göre her bir FV modül modelinin parametreleri tahminde kullanılan önerilen algoritmalar ve orijinal BOA'a ile karşılaştırılmasında farklı anlamlılık değerleri, etki büyüklükleri ve istatistiksel güçler ürettiği görülmüştür. Bu sonuçların birçoğu kabul edilebilir olmasına rağmen bazı sonuçlar istatistiksel güç bakımından düşük olduğu tespit edilmiştir. Gelecek çalışmada bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla istatistik gücü 8e-1'in altında hesaplanan sonuçların örnek sayısının yani algoritmaların bağımsız çalıştırılma sayısının artırılarak analizlerin tekrardan yapılmasıdır. Friedman testinde ise algoritmaların sonuçları incelendiğinde FV modül modellerin parametrelerinin belirlenmesinde elde edilen sonuçlar arasında anlamlı bir fark olduğu görülmüştür. Sonuç olarak deneysel sonuçlar 3 farklı FV modül modelde RMSE ve IAE performans kriterlerine göre geliştirilen algoritmaların performanslarının daha başarılı olduğu ve gerçeğe daha yakın değerler verdiğini göstermiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Zeynep B. GARİP: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Murat Erhan ÇİMEN: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Ali Fuat BOZ: Makalenin danışmanlığını yapmıştır. study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Li S., Gu Q., Gong W., and Ning B., "An enhanced adaptive differential evolution algorithm for parameter extraction of photovoltaic models", *Energy Conversion and Management*, 205: 112443, (2020).
- [2] Gümüş Z., Demirtaş M. "Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası Takibinde Kullanılan Algoritmaların Kısmi Gölgeleme Koşulları Altında Karşılaştırılması". *Politeknik Dergisi*, 1-1,(2021).
- [3] Chen H., Jiao S., Wang M., Heidari A.A. and Zhao X., "Parameters identification of photovoltaic cells and modules using diversification-enriched Harris hawks optimization with chaotic drifts", *Journal of Cleaner Production*, 244 :118778, (2020).
- [4] Liang J., Qiao K., Yuan M., Yu K., Qu B., Ge S. and Li Y., "Guanlin Chen, Evolutionary multi-task optimization for parameters extraction of photovoltaic models", *Energy Conversion and Management*, 207:112509, (2020).
- [5] Liang J., Ge S., Qu B., Yu K., Liu F., Yang H., Wei P. and Li Z., "Classified perturbation mutation based particle swarm optimization algorithm for parameters extraction of photovoltaic models", *Energy Conversion and Management*, 203: 112138, (2020).
- [6] Wu H. and Shang Z. "Research on Parameter Extraction Method of Photovoltaic Modul Based on Improved Hybrid Algorithm", *Hindawi International Journal of Photoenergy*, (2020).
- [7] Jiao S., Chong G., Huang C., Hu H., Wang M., Heidari A.A., Chen H. and Zhao X., "Orthogonally adapted Harris hawks optimization for parameter estimation of photovoltaic models", *Energy*, 203: 117804, (2020).
- [8] Li S., Gong W., Yan X., Hu C., Bai D., Wang L., "Parameter estimation of photovoltaic models with memetic adaptive differential evolution", *Solar Energy*, 190:465–474, (2019).
- [9] Yang X., Gong W. and Wang L., "Comparative study on parameter extraction of photovoltaic models via differential evolution", *Energy Conversion and Management*, 201: 112113, (2019).
- [10] Askarzadeh A., Rezazadeh, A. "Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach". *Sol. Energy*, 90 (4), 123–133, (2013).
- [11] Yang D., Li G. and Cheng G. "On the efficiency of chaos optimization algorithms for global optimization". *Chaos, Solitons Fractals*, 34:1366–75, (2007).
- [12] Lianga J., Qiaoa K., Yua K., Gea S., Qub B., Xua R. and Li K., "Parameters estimation of solar photovoltaic models via a self-adaptive ensemble-based differential evolution", *Solar Energy*, 207:336–346, (2020).
- [13] Keseci T., Kocabaş Z., "Biyostatistik.", *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi*, Ankara, (1998).
- [14] Sumbüloğlu K., Sumbüloğlu V., "Biyostatistik (11. baskı)." *Hatipoğlu Yayınevi*, Ankara, (2005).
- [15] Karagöz, Yalçın. "SPSS 21.1 Uygulamalı Biyoistatistik", *Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti*, Ankara, (2014).
- [16] Mohamed A.E., Yousri D, Mirjalili S., "A hybrid Harris hawks-moth-flame optimization algorithm including fractional-order chaos maps and evolutionary population dynamics", *Advances in Engineering Software*, 154: 102973, (2021).
- [17] Şevgin H., Çetin B., "Eğitim araştırmalarında güç analizi ve bir uygulama", *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 14:1462-1480, (2017).
- [18] Özçomak M.S., Çebi K., "İstatistiksel Güç Analizi: Atatürk Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi Üzerine Bir Uygulama", *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 31: 413-431, (2017).
- [19] Mirjalili S. and Lewis A. "The whale optimization algorithm". *Adv Eng Softw.*, 95:51–67, (2016).
- [20] Tabak A. "Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Hız Kontrolünü Gerçekleştirmek İçin PID/PD Kontrolcü Tasarımı ve Performans İncelemesi", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19: 145-155, (2020).
- [21] Çimen M.E., Boyraz Ö.F., Pala M.A., Boz A.F., Yıldız M.Z.. "Ölü Zamanlı Sistemlerde kullanılan Smith Predictor için Balina Sürüsü Optimizasyonu ile PID Tasarımı", *Academic Perspective Procedia*, 2(3): 583-592, (2019).
- [22] Chen H., Yang C., Heidari A.A., Zhao X., "An efficient double adaptive random spare reinforced whale optimization algorithm", *Expert Systems with Applications*, 154: 113018, (2020).
- [23] Garip Z., Çimen, M.E., Karayel, D. and Boz, A.F. "The Chaos based Whale Optimization Algorithms Global Optimization". *Chaos Theory and Applications*, 51–63, (2019).
- [24] Coelho L. and Mariani V.C., "Use of chaotic sequences in a biologically inspired algorithm for engineering design optimization", *Expert Systems with Applications*, 34(3): 1905-1913, (2008).
- [25] Easwarakhanthan T, Bottin J, Bouhouch I, Boutrif C. "Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers". *Int J Solar Energy*, 4(1):1–12,(1986).

- [26] Tong NT and Pora W. A. "Parameter extraction technique exploiting intrinsic properties of solar cells". *Appl Energy*, 176:104–15, (2016).
- [27] Buch H. Trivedi I.N., Jangir P., "Moth flame optimization to solve optimal power flow with non-parametric statistical evaluation validation", *Cogent Engineering*, 4(1): 1286731, (2017).
- [28] Gibbons J. D., Chakraborti S, "Nonparametric statistical inference", *CRC press*, (2020).
- [29] Cohen J., "Statistical power analysis for the behavioral sciences", *Academic press*, (2013).
- [30] Çakır F. "Tek-Yönlü ve iki-yönlü varyans analizinde kullanılan parametrik olmayan yöntemler", *Öneri Dergisi*, 2(12): 225-233, (1999).
- [31] Bülbül S.E., "Kruskal-Wallis testi ve Friedman testinin alternatif parametrik tekniklerle karşılaştırılması ve bazı parametrik ve parametrik olmayan çoklu karşılaştırma yöntemleri ile incelenmesi", *Öneri Dergisi*, 4(15): 89-96, (2001)