



## EKONOMİK EMİSYON YÜK DAĞITIMI PROBLEMİ İÇİN KAOTİK YILDIRIM ARAMA ALGORİTMASI

Serhat DUMAN<sup>1\*</sup>, Bayram YILDIZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

<sup>2</sup>Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği ABD, Düzce, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Yıldırım Arama Algoritması,  
Kaotik Harita,  
Ekonomik Emisyon Yük  
Dağıtımı,  
Modern Güç Sistemleri,  
Optimizasyon.

### Öz

Elektrik enerjisinin üretiminde kullanılan fosil yakıtlı kaynaklar çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu nedenle, termal yakıtlı generatörlerde emisyon salınımının önemi giderek artmaktadır. Ekonomik emisyon yük dağıtımı problemi modern güç sistemlerinin en önemli doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinden biridir. Yıldırım Arama Algoritması (YAA), ışık olayına dayalı lider yayılma mekanizmasından esinlenerek geliştirilen ve doğrusal olmayan optimizasyon problemlerin çözümünde kullanılan sezgisel algoritmalarından biridir. Bu çalışmada, ekonomik emisyon yük dağıtımı problemi YAA ve kaotik YAA algoritmaları kullanılarak çözülmüştür. Önerilen yaklaşımlar iki farklı test sistemine uygulanmış olup, benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşımın doğrusal olmayan mühendislik problemlerin çözümünde başarılı bir şekilde uygulandığı gösterilmiştir.

## CHAOTIC LIGHTNING SEARCH ALGORITHM FOR ECONOMIC EMISSION LOAD DISPATCH PROBLEM

### Keywords

Lightning Search Algorithm,  
Chaotic Map,  
Economic Emission Load  
Dispatch,  
Modern Power Systems,  
Optimization.

### Abstract

The used fossil fuel sources in the production of electrical energy is lead to environmental pollution. For this reason, importance of emission release in the thermal generators has been gradually increased. The economic-emission load dispatch problem is one of the most important nonconvex optimization problems of the modern power systems. Lightning Search Algorithm (LSA) is one of the heuristic algorithms for solving nonconvex optimization problems and it is inspired from the mechanism of step leader propagation and based on the phenomenon of lighting. In this study, the economic-emission load dispatch problem is solved by using the LSA and chaotic LSA algorithms. The proposed approaches are applied to the two different test system and the obtained results from the simulation studies are compared to the other results in the literature. The proposed approach is successfully applied to solve the nonconvex engineering problems.

### Alıntı / Cite

Duman, S., Yıldız, B., (2018). Chaotic Lightning Search Algorithm For Economic Emission Load Dispatch Problem, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(3), 406-417.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Serhat DUMAN, 0000-0002-1091-125X  
Bayram YILDIZ, 0000-0003-2029-0853

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	26.03.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.04.2018
Kabul Tarihi / Accepted Date	26.07.2018
Yayın Tarihi / Published Date	11.09.2018

\* İlgili yazar / Corresponding author: [serhatduman@duzce.edu.tr](mailto:serhatduman@duzce.edu.tr)

## 1. Giriş

Modern güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde en önemli planlama konularından biri olan ekonomik yük dağıtım (EYD) doğrusal olmayan optimizasyon problemi olarak bilinmektedir. EYD problemi, termal yakıtlı elektrik üretim tesislerinde generatörlerin ürettikleri güçlere bağlı olarak yakıt maliyetinin asgari düzeyde tutulması olarak tanımlanmaktadır. Bu işlemi yaparken, generatörlerin belirtilen üretim sınır değerleri içerisinde kalması istenmekte olup, talep edilen güce göre generatörler arasında güç paylaşımının yapılması ve sistemdeki kayıp katsayı matrisinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Başka bir ifadeyle, problem belirtilen eşitlik ve eşitsizlik kısıtları içerisinde yakıt maliyetinin en asgari düzeye indirilmesi olarak da ifade edilebilir. Bu problem, araştırmacılar tarafından ilk olarak ele alındığında geleneksel yaklaşımlardan lineer programlama, kuadratik programlama ve doğrusal olmayan programlama teknikleri ile çözülmeye çalışılmıştır (Fraq vd., 1995; Nabora ve Freris, 1973; Lin vd., 1992; Chen ve Chen, 2003). Son yıllarda geleneksel yaklaşımlara bir alternatif olarak sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmaya başlanmıştır (Kavousi-Fard ve Khosravi, 2016; Duman vd., 2015; Meng vd., 2016; Secui, 2015).

Bahrani ve Patra eylemsizlik katsayılı global parçacık sürü optimizasyonu kullanarak farklı sınırlar altında büyük güçlü termal üretim birimlerinin yakıt maliyetini en asgari düzeye indirmeye çalışmışlardır. Yazarlar önerdikleri algoritmayı, farklı test sistemlerine uygulamışlar elde ettikleri sonuçları literatürdeki diğer sezgisel yaklaşımlarla karşılaştırmışlardır. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre, önerdikleri yaklaşımın çok boyutlu konveks olmayan böyle problemlerin çözümünde etkili olduğunu belirtmişlerdir (Bahrani ve Patra, 2018). Kheshti ve ark. şimşek arama algoritmasını dalga nokta etkili ve çoklu yakıt planlamasını içeren amaç fonksiyonlarının minimum değerini bulmada kullanmayı amaçlamışlardır. Önerilen algoritma 10, 40, 80, 160 ve 640 üretim birimini içeren test sistemlerine uygulanmış olup, kullanılan amaç fonksiyonları için en uygun çözümü bulma ve çözüme hızlı yakınsamasıyla diğer algoritmalara göre daha etkin olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir (Kheshti vd., 2017). Naderi ve ark. önerdikleri bulanık mantık temelli hibrit parçacık sürü optimizasyonu ve diferansiyel evrim algoritmasını farklı test sistemlerinde farklı amaç fonksiyonlarını kullanarak performansını test etmişlerdir. Benzetim sonuçlarına göre, önerilen yaklaşımdan elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer sezgisel algoritmalarından elde edilen sonuçlar göre daha etkin olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir (Naderi vd., 2017).

Ayrıca, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kaynaklı yakıtları kullanan elektrik üretim tesislerinde, nitrojen oksit (NO<sub>x</sub>), sülfür dioksit (SO<sub>x</sub>) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gibi atmosfere zarar veren

gazların ortama salınması, çevresel kirliliğe neden olmasının yanı sıra küresel ısınmaya da sebebiyet vermektedir (Basu, 2014; Shilaja ve Ravi, 2017). Emisyon etkileri ve çevresel etkenlerde göz önünde bulundurulduğunda, ekonomik yük dağıtım problemi çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak modern güç sistemlerinde yerini almaktadır. Çok amaçlı optimizasyon problemi olan ekonomik emisyon yük dağıtım problemi ağırlıklı toplam yöntemi kullanılarak tek amaçlı optimizasyon problemine döndürülür (Aydın vd., 2014; Mason vd., 2017). Qu ve ark. çoklu amaç fonksiyonu kullanılarak modellenmiş çevresel/ekonomik yük dağıtım problemlerinde kullanılan sezgisel algoritmalara yönelik bir araştırma çalışması yapmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışma kapsamında, bu problemin çözümünde kullanılan test sistemleri, sezgisel algoritmalar, amaç fonksiyonları, eşitlik ve eşitsizlik sınırları detaylı bir şekilde verilerle, modern güç sistemlerinde kullanılan dinamiklerinde probleme eklenerek çalışılması gerektiğini belirtmişlerdir (Qu vd., 2018).

Zou ve ark. yeni global parçacık sürü optimizasyon algoritmasını güç sistemlerinin planlama problemlerinden ekonomik emisyon yük dağıtım problemine uygulamışlardır. Yazarlar, beş farklı test sistemi için önerdikleri sezgisel yaklaşım ile minimum toplam yakıt maliyeti ve emisyon salınımını elde etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında, ekonomik yük dağıtım ve emisyon salınımı ayrı ayrı tekil amaç fonksiyonu olarak düşünülmüş olup, bu amaç fonksiyonlarının birleştirilmiş hali de çoklu amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki diğer optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımın güç sistemlerindeki ekonomik emisyon problemini çözüme başarılı sunulmuştur (Zou vd., 2017). Bu güç sistemi planlama problemi literatürde çoklu popülasyon temelli karınca kolonisi (Zhou vd., 2017), gerçek kodlu kimyasal reaksiyon algoritması (Bhattacharjee vd., 2014), ateş böceği algoritması (Younes vd., 2014), iyileştirilmiş bakteri yem arama algoritması (Pandit vd., 2012), Zıt konumlu harmoni arama algoritması (Chatterjee vd. 2012), bulanık mantığa dayalı parçacık sürü optimizasyonu ve yerçekimsel arama algoritması (Duman vd., 2015), su döngüsü algoritması (Elhameed ve El-Fergany, 2017), ortogonal parçacık sürü algoritması (Bahrani ve Patra, 2017) gibi farklı sezgisel algoritmalar kullanılarak araştırmacılar tarafından ele alınmıştır.

Son yıllarda popülasyon temelli algoritmalarından biri olan ve yıldırımın toprağa inmesi doğa olayından esinlenerek Shareef ve ark. (Shareef vd., 2014) tarafından geliştirilen Yıldırım Arama Algoritması (YAA) bir çok mühendislik optimizasyon problemlerine uygulanmıştır. Bu çalışmada, Yıldız ve ark. (Yıldız vd., 2017) tarafından literatüre sunulan Kaotik Yıldırım Arama Algoritmasının (KYAA) modern güç sistemlerinin optimizasyon problemlerinden biri olan ekonomik emisyon yük dağıtım problemine uygulanması sunulmuştur. Benzetim çalışmaları

sonucunda önerilen yaklaşımdan elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırılmış olup, karşılaştırma sonuçları göz önünde bulundurulduğunda önerilen kaotik yıldırım arama algoritmasının doğrusal olmayan ekonomik emisyon yük dağıtım problemini çözmedeki başarısı değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, ikinci bölümde ekonomik emisyon yük dağıtım probleminin tanımlanması, üçüncü bölümde kaotik yıldırım arama algoritması, benzetim sonuçları dördüncü bölümde, beşinci bölümde ise sonuçlar olacak şekilde düzenlenmiştir.

## 2. Ekonomik Emisyon Yük Dağıtım Problemi

Ekonomik emisyon yük dağıtım problemi, termal yakıtlı elektrik üretim birimlerinde yakıt maliyeti ve atmosfere salınan emisyon miktarının birleştirilmiş amaç fonksiyonu olarak minimize edilmesi şeklinde ifade edilebilir. Diğer bir deyişle, termal yakıtlı üretim birimlerinin bağlı olduğu güç sistemlerinde talep edilen yükü karşılamak için üretim birimlerinde fosil yakıtların kullanılmasıyla atmosfere salınan zararlı emisyon miktarının ve toplam yakıt maliyetinin asgari düzeyde olduğu anda belirlenen eşitlik ve eşitsizlik sınırları içerisinde generatörlerin aktif güç değerlerinin belirlenmesi olarak da tanımlanabilir. Güç sistemlerindeki termal yakıtlı generatörlerin toplam yakıt maliyeti, Denklem (1)'deki ikinci dereceden fonksiyonda generatörlerin üreteceği güçlerin yerine konması ile oluşan amaç fonksiyonu olarak ifade edilir (Duman vd., 2015; Aydın vd., 2014; Bhattacharjee vd., 2014; Basu, 2014).

$$F_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (1)$$

Burada,  $F_i(P_{Gi})$   $i$ . generatörün yakıt maliyeti fonksiyonu,  $P_{Gi}$   $i$ . generatörün ürettiği güç değeri,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$   $i$ . generatörün yakıt maliyeti katsayılarıdır. Ayrıca, Denklem (2)'deki gibi valf nokta etkisi dahil edilerek toplam yakıt maliyeti fonksiyonu doğrusal olmayan daha yüksek bileşenlere sahip güç sistemi planlama problemine dönüştürülür.

$$F_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + \left| d_i \times \sin \left( e_i \times \left( P_{Gi}^{\min} - P_{Gi} \right) \right) \right| \quad (2)$$

Denklem (2)'de  $d_i$  ve  $e_i$   $i$ . generatörün maliyet fonksiyonu katsayıları,  $P_{Gi}^{\min}$  ise  $i$ . generatörün üretebileceği en düşük aktif güç değeri olarak tanımlanır. Termal yakıtlı elektrik üretim santrallerinde fosil yakıtların kullanılması ile her bir güç üretim birimi tarafından salınan zararlı gazların toplam miktarı Denklem (3)'deki gibi ifade edilmektedir (Qu vd., 2018; Aydın vd., 2014; Zhou vd., 2017).

$$E_i(P_{Gi}) = (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) + (\zeta_i \exp(P_{Gi} \lambda_i)) \quad (3)$$

Ekonomik, ekonomik-emisyon yük dağıtım problemlerinde, güç sistemi kayıpsız veya kayıplı olarak düşünülürse aktif güç dengesi eşitliği Denklem (4) ve (5)'te gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi} - P_{yük} = 0, \forall_i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi} - P_{yük} - P_{kayıp} = 0, \forall_i \in N \quad (5)$$

$N$  toplam generatör sayısını,  $P_{kayıp}$  sistemin toplam aktif güç kaybını,  $P_{yük}$  sistemin toplam talep edilen aktif güç değerini ifade etmektedir. Güç sisteminin toplam aktif güç kaybı Denklem (6)'da, generatörlerin sınır değerleri ise Denklem (7)'de gösterilmiştir.

$$P_{kayıp} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_{Gi} + B_{00} \quad (6)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (7)$$

Bu çalışmada salınım barasına ait generatörün hesaplanması aktif güç dengesi eşitliğinden yararlanılarak Denklem (8)'de sunulmuştur.

$$P_N = P_{yük} + P_{kayıp} - \sum_{i=1}^{(N-1)} P_{Gi} \quad (8)$$

Salınım barasına ait generatör ve diğer generatör ünitelerini içeren  $P_{kayıp}$  denkleminin matematiksel ifadesi Denklem (9)'da gösterilmektedir.

$$P_{kayıp} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + 2P_N \left( \sum_{i=1}^{N-1} B_{Ni} P_{Gi} \right) + B_{NN} P_N^2 + \sum_{i=1}^{N-1} B_{0i} P_{Gi} + B_{0N} P_N + B_{00} \quad (9)$$

Güç dengesi eşitliği yeniden düzenlenirse Denklem (10) elde edilir.

$$B_{NN} P_N^2 + \left( 2 \sum_{i=1}^{N-1} B_{Ni} P_{Gi} + B_{0N} - 1 \right) P_N + \left( P_{yük} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^{N-1} B_{0i} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{N-1} P_{Gi} + B_{00} \right) = 0 \quad (10)$$

Denklem (10), aşağıdaki denklem formuna dönüştürülerek denklemin pozitif kökü bize salınım barasına ait generatörün değerini vermektedir.

$$XP_N^2 + YP_N + Z = 0 \quad (11)$$

$$X = B_{NN}$$

$$Y = \left( 2 \sum_{i=1}^{N-1} B_{Ni} P_{Gi} + B_{0N} - 1 \right) \quad (12)$$

$$Z = \left( \begin{array}{c} P_{yük} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^{N-1} B_{0i} P_{Gi} - \\ \sum_{i=1}^{N-1} P_{Gi} + B_{00} \end{array} \right)$$

$$P_N = \frac{-Y \pm \sqrt{Y^2 - 4XZ}}{2X} \quad (13)$$

$$Y^2 - 4XZ \geq 0$$

Ekonomik emisyon yük dağıtımına ait uygunluk fonksiyonu Denklem (14)'te ifade edilmektedir.

$$AF = w \times \sum_{i=1}^N F_i(P_{Gi}) + (1-w) \times \varepsilon \times \left( \sum_{i=1}^N E_i(P_{Gi}) \right) \quad (14)$$

Termal yakıtlı generatörlerin yakıt maliyeti  $F_i(P_{Gi})$ , termal yakıtlı generatörlere ait emisyon fonksiyonu ise  $E_i(P_{Gi})$  ile ifade edilmektedir.  $w$  0 ile 1 arasında değişen ağırlık faktörü,  $\varepsilon$  ölçekleme faktörü olup, Denklem (14)'te  $w$ 'nin 1 değerini alması sadece generatör ünitelerinin yakıt maliyetini,  $w$ 'nin 0 değerini alması ise sadece generatör ünitelerinin emisyon miktarının minimumun olduğu duruma karşılık gelen uygunluk fonksiyonunu ifade etmektedir.

### 3. Yıldırım Arama Algoritması

Yıldırım Arama Algoritması (YAA) yıldırımın toprağa inmesi doğa olayından esinlenerek Shareef ve ark. (Shareef vd., 2014) geliştirilen son yıllardaki popülasyon temelli optimizasyon algoritmalarından biridir. Algoritma üç ana kısımdan oluşmaktadır.

#### 3.1. Roket ve Adım Lideri Yayılımı

YAA'da gök gürültüsü doğa olayı göz önünde bulundurularak, gök gürültüsü hücresinden her bir roketin bir adım lideri ve bir kanal oluşturduğu varsayılmaktadır. Başka bir ifadeyle, roket belirtilen sınır değerleri içerisinde başlangıçtaki popülasyonun boyutunu temsil etmekte olup, optimizasyon probleminin çözümü için rasgele çözümler önermektedir (Shareef vd., 2014).

#### 3.2. Roketlerin Özellikleri

Normal koşullar altında atmosferde dolaşan bir roket, havadaki moleküller ve atomlarla yaptığı esnek çarpışmalar sırasında kinetik enerjisini kaybetmekte

buna bağlı olarak, roketin hızı Denklem (15)'e göre ifade edilir (Shareef vd., 2014).

$$v_p = \left[ 1 - \left( 1 / \sqrt{1 - (v_0/c)^2} - sF_i/mc^2 \right)^{-2} \right]^{-1/2} \quad (15)$$

$v_p$  ve  $v_0$  roketin şundaki ve başlangıç hızları,  $c$  ışığın hızı,  $F_i$  sabit iyonizasyon oranı,  $m$  roketin kütlesi olarak tanımlanmaktadır. Denklem (15), roketin kütlesi ve lider uç pozisyonunun bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Ayrıca YAA'nın en uygun noktayı araştırma özellikleri adım liderinin enerjileri ile tanımlanmaktadır (Shareef vd., 2014).

#### 3.3. Roket Modellemesi ve Adım Liderinin Hareketi

Bu algoritmada, geçiş roketi, konum roketi ve öncü roketi olmak üzere üç roket türü tanımlanmaktadır. Burada, geçiş roketi ilk adım liderinin (N) popülasyonunu, uzay roketleri en iyi lider konuma ulaşmaya çalışanı ve öncü roketi ise N sayıda adım lideri arasından en iyi konuma sahip olanı ifade etmektedirler (Shareef vd., 2014)..

##### Geçiş Roketi:

Bu bölümde, gök gürültüsü hücresinden rastgele bir geçiş roketi fırlatılmak üzere bir lider uç oluşturulur. Bu yüzden, düzgün olasılık dağılımının matematiksel ifadesi, rasgele sayıdaki lider ipucu modelini oluşturmak için kullanılmaktadır. Düzgün olasılık dağılımı aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Shareef vd., 2014):

$$f(x^T) = \begin{cases} 1/b - a & \text{for } a \leq x^T \leq b \\ 0 & \text{for } x^T < a \text{ or } x^T > b \end{cases} \quad (16)$$

$sl_i$  adım liderinin başlangıç uç enerjisini ( $E_{sl_i}$ ) ve bir çözümü sağlayan rasgele sayı  $x^T$  olarak tanımlanır.  $a$  ve  $b$  çözüm uzayının minimum ve maksimum sınır değerleri şeklinde ifade edilir.  $SL = [sl_1, sl_2, \dots, sl_N]$ ,  $N$  adet adım liderinin popülasyonu,  $P^T = [p_1^T, p_2^T, \dots, p_N^T]$   $N$  adet rasgele roket olarak gösterilir (Shareef vd., 2014).

##### Uzay Roketi:

Bu bölümde uzay roketlerinin bir sonraki adım için pozisyonu  $P^S = [p_1^S, p_2^S, \dots, p_N^S]$ ,  $\mu$  biçimlendirme parametresi kullanılarak üstel dağılımdan üretilen rasgele bir sayı olarak ifade edilir (Shareef vd., 2014).

$$f(x^S) = \begin{cases} \frac{1}{\mu} e^{-x^S/\mu} & \text{for } x^S \geq 0 \\ 0 & \text{for } x^S \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$\mu$  biçimlendirme parametresi bir sonraki iterasyonda yönü veya uzay roketinin pozisyonunu kontrol etmek

için kullanılır. Bir sonraki adımda  $p_i^S$ 'nin pozisyonu Denklem (18)'deki gibi ifade edilir (Shareef vd., 2014).

$$p_{i\_new}^S = p_i^S \pm \text{exprand}(\mu_i) \quad (18)$$

$p_{i\_new}^S$  ve  $p_i^S$  yeni ve eski roketleri ifade ederken, exprand üstel rasgele sayıyı temsil eder.

**Öncü Roketi:**

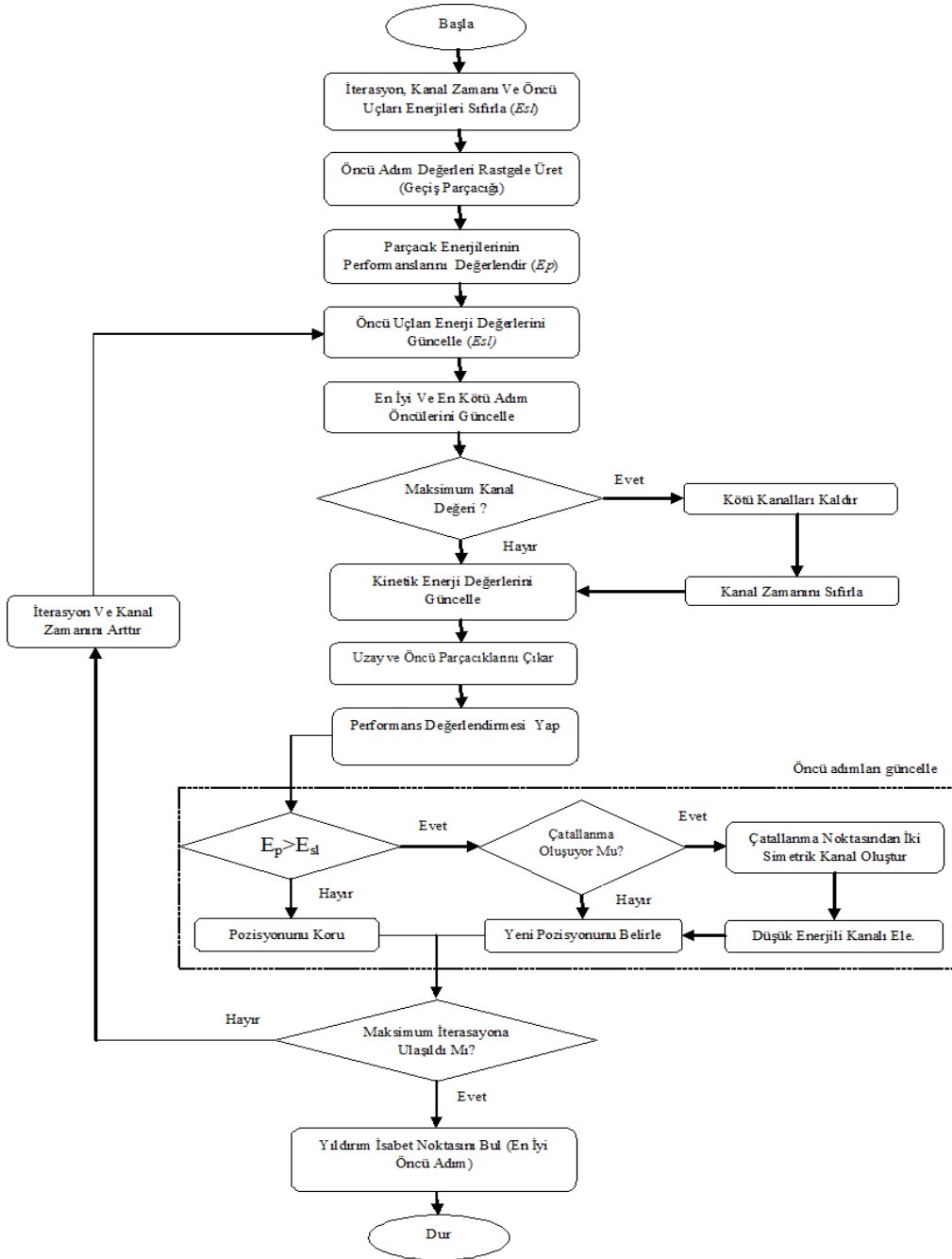
Bu bölümde öncü roketi, normal dağılım ifadesi ile biçim ( $\mu$ ) ve ölçeklendirme ( $\sigma$ ) parametreleri kullanılarak üretilen rasgele sayı olarak tanımlanır. Normal olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki matematiksel ifade ile gösterilir (Shareef vd., 2014).

$$f(x^L) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x^L - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (19)$$

Ölçeklendirme parametresi en iyi çözüme doğru üssel olarak azalmaktadır. Bir sonraki adımda  $p^L$ 'nin pozisyonu Denklem (20)'deki gibi ifade edilir (Shareef vd., 2014).

$$p_{new}^L = p^L + \text{normrand}(\mu_L, \sigma_L) \quad (20)$$

$p^L$  ve  $p_{new}^L$  eski ve yeni öncü roketlerini ifade ederken, normrand dağılım fonksiyonu tarafından üretilen rasgele sayıyı temsil eder (Shareef vd., 2014). YAA'nın akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.

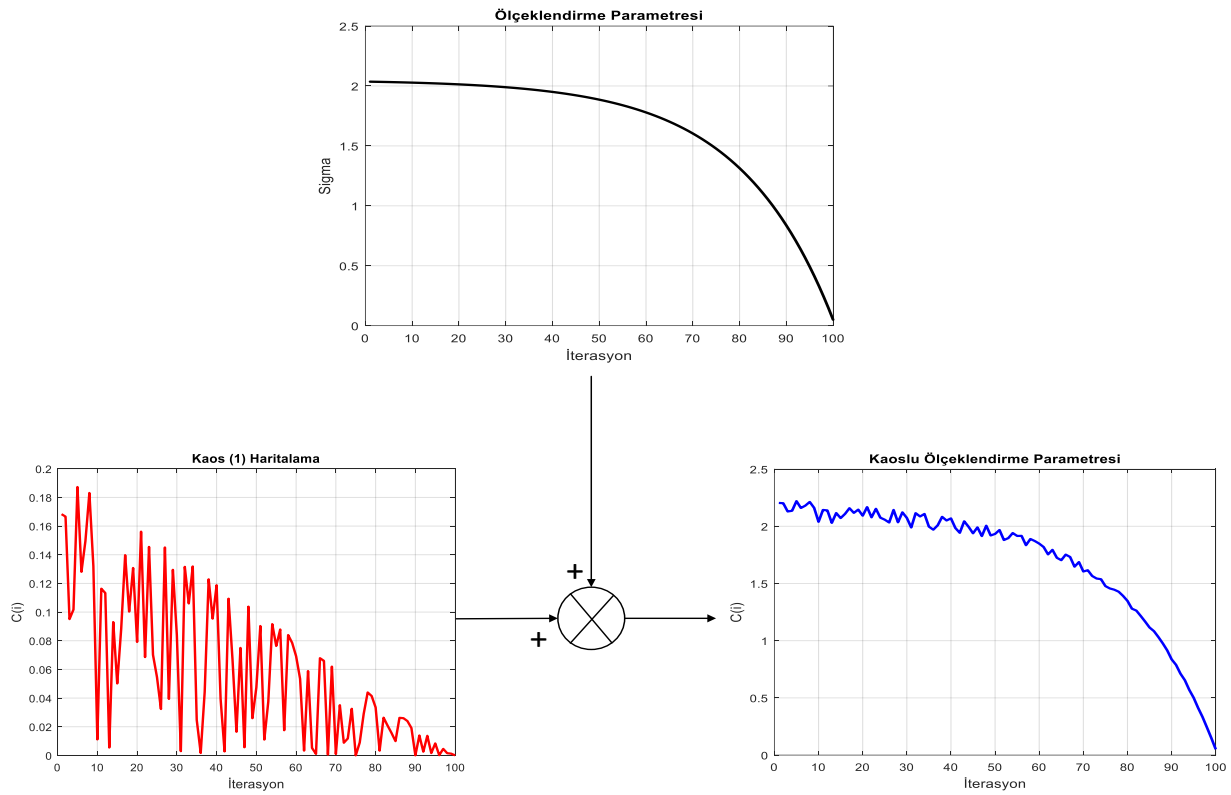


Şekil 1. Yıldırım arama algoritmasının akış diyagramı

### 3.4. Kaotik Yıldırım Arama Algoritması

Başlangıç koşullarına son derece hassas ve gürültü gibi geniş güç aralığına sahip olan kaos, düzensizlik sırasına göre ifade edilebilir. Kaos, bilimsel anlamda ilk kez astronomi çalışmalarında karmaşık bir sistemin kararlılığı üzerine kullanılmasına karşın, son yıllarda birçok araştırmacı tarafından farklı bilimsel çalışmalarda da kullanılmıştır (Bingöl vd., 2017; Pamuk, 2013). Optimizasyon algoritmaları incelendiğinde, rasgele sayı dizileri hemen hemen hepsinde kullanılmaktadır. Rasgele üretilen sayılar optimizasyon süresince kendilerini tekrar etme veya birbirlerine yakın değerler alması algoritmaların yerel minimum ya da maksimum değerleri bulmasına neden olabilir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için kaotik haritalandırma yöntemleri kullanılmaktadır (Tanyıldızı ve Cigal, 2017). Alatas ve ark. kaotik

haritaları kullanarak parçacık sürü optimizasyonu amaçlamışlar (Alatas vd., 2009), Yang ve ark. kaos optimizasyon algoritmasını (Yang vd., 2014), Alatas kaotik harmoni arama algoritmasını (Alatas, 2010), Gandomi ve Yang kaotik yarıya algoritmasını (Gandomi ve Yang, 2014) Mirjalili ve Gandomi kaotik yerçekimi arama algoritmasını (Mirjalili ve Gandomi, 2017), literatüre sunmuşlardır. Bu çalışmada, optimizasyon algoritmasının en iyi çözüme doğru hareket etmesini sağlayan ölçeklendirme parametresi Mirjalili ve Gandomi tarafından literatüre sunulan kaotik haritalandırma yöntemi kullanılarak Şekil 2'deki gibi kaotik ölçeklendirme parametresi elde edilmiş, algoritmanın yerel minimum veya maksimuma takılma dezavantajı ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.



Şekil 2. Kaoslu ölçeklendirme parametresi

Tablo 1. Kaotik harita denklemleri

Harita Adı	Fonksiyon
Chebyshev (Kaos (1))	$x_{i+1} = \cos(i \cos^{-1}(x_i))$
Circle (Kaos (2))	$x_{i+1} = \text{mod} \left( x_i + b - \left( \frac{\alpha}{2\pi} \right) \sin(2\pi x_i), 1 \right)$ $\alpha = 0.5, b = 0.2$
Gauss/Mouse (Kaos (3))	$x_{i+1} = \begin{cases} 1 & x_i = 0 \\ \frac{1}{\text{mod}(x_i, 1)} & \text{otherwise} \end{cases}$
Iterative (Kaos (4))	$x_{i+1} = \sin \left( \frac{\alpha\pi}{x_i} \right)$ $a = 0.7$

#### 4. Benzetim Sonuçları

Bu çalışmada, farklı yakıt maliyeti ve emisyon katsayılarına sahip iki test sistemi algoritmanın performansını değerlendirmek için düşünülmüştür. Tüm test durumları için Tablo 1'de verilen kaotik haritalar kullanılmış olup ekonomik emisyon yük dağıtım problemi çözmedeki performansları değerlendirilmiştir.

##### Test Sistemi 1

Önerilen Kaotik Yıldırım Arama Algoritması (KYAA), 6 generatörlü, iletim hattı kayıplarının ihmal edilmediği ve 283.4 MW'lık yük talebini karşılarken, minimum yakıt maliyetini elde edebilmek için ekonomik yük dağıtım problemine uygulanmıştır. Test sistemine ait veriler (Malik vd., 2010; Yaşar ve Özyön, 2011; Duman vd., 2015) referanslarından elde edilmiştir. Önerilen algoritma, bu test sistemi için 30 kez çalıştırılmış, elde edilen minimum, ortalama ve maksimum yakıt maliyeti değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** 6 Generatörlü sistemin sonuçları (Test 1)

Yöntem	Min.	Ort.	Maks.
YAA	925.4154	932.9568	963.0069
K1YAA	925.4158	935.4442	962.9992
K2YAA	925.4147	936.707	963.0008
K3YAA	925.4143	934.1951	963.0209
K4YAA	925.4146	935.4579	963.0028

Tablo 2'den de görüldüğü gibi, 30 deneme sonunda Kaos 3 olarak isimlendirilmiş (Gauss/Mouse) haritalandırma yöntemi ile en iyi sonuç bulunmuştur. K3YAA'dan elde edilen sonuç, literatürdeki diğer optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında GA, GA-APO, NSOA, PSO ve MSG-HP algoritmalarından daha iyi sonuç bulduğu, FPSOGSA ve SOS algoritmalarından 0.0006 \$/h daha fazla sonuç bulduğu görülmüştür. Test sistemi 1 için, önerilen kaotik haritalandırma yöntemiyle elde edilen minimum toplam yakıt maliyetlerinin yakınsama eğrileri Şekil 3(a)'da gösterilmektedir. Şekil 3(a) detaylı bir şekilde incelendiğinde önerilen algoritma yaklaşık olarak 70'inci iterasyondan sonra minimum değere yakınsadığı görülmektedir.

**Tablo 3.** Önerilen K3YAA ve diğer optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Test sistemi 1)

Generatörler	Yöntemler							
	GA (Malik vd., 2010)	GA-APO (Malik vd., 2010)	NSOA (Malik vd., 2010)	PSO (Yaşar ve Özyön, 2011)	MSG-HP (Yaşar ve Özyön, 2011)	FPSOGSA (Duman vd., 2015)	SOS (Güvenç vd., Baskıda)	K3YAA
P <sub>G1</sub>	150.724	133.9816	182.478	197.8648	199.6331	199.5997	199.5997	199.5997
P <sub>G2</sub>	60.8707	37.2158	48.3525	50.3374	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
P <sub>G3</sub>	30.8965	37.7677	19.8553	15.0000	23.7624	23.9896	23.9768	23.9626
P <sub>G4</sub>	14.2138	28.3492	17.1370	10.0000	18.3934	18.8493	18.8679	18.8063
P <sub>G5</sub>	19.4888	18.7929	13.6677	10.0000	17.1018	18.2153	18.2212	18.1726
P <sub>G6</sub>	15.9154	38.0525	12.3487	12.0000	15.6922	13.8506	13.8402	13.9666
Toplam Güç (MW)	292.1096	294.1600	293.8395	295.2022	294.5829	294.5045	294.5058	<b>294.5078</b>
Yakıt Maliyeti (\$/h)	996.0369	1101.491	984.9365	925.7581	925.6406	925.4137	925.4137	<b>925.4143</b>
Kayıp (MW)	8.7060	10.7563	10.4395	11.8022	11.1830	11.1044	11.1058	<b>11.1078</b>

##### Test Sistemi 2

Önerilen algoritma, IEEE 6 generatörlü 30 baralı ekonomik ve emisyon yük dağıtım problemine 2.834 pu yük talebiyle iletim hattı kayıplarının ihmal edilmediği, ihmal edilmesi durumunda, yakıt maliyetinin valf nokta etkili ve valf nokta etkisiz koşulları altında 30 kez çalıştırılmış ve elde edilen minimum, ortalama ve maksimum değerleri Tablo 4 ve Tablo 5'de gösterilmiştir. Denklem (14)'te gösterilen amaç fonksiyonuna göre  $w=1.0$  olduğu durumda sistemin toplam yakıt maliyeti,  $w=0.0$  olduğu durumda ise toplam emisyon değeri hesaplanmaktadır. Ekonomik ve emisyon yük dağıtım probleminin çözümünde kullanılan kaotik haritalandırılmış yıldırım arama algoritmasının iterasyon sayısı 100 olarak alınmıştır. Tablo 6'da sistem ilk olarak valf nokta etkisi ve kayıplı olarak düşünülmüş olup, sisteme ait generatör verileri, kayıp matrisi (Hemamalini ve Simon, 2008) referansından alınmıştır. Önerilen yaklaşımdan elde edilen sonuç

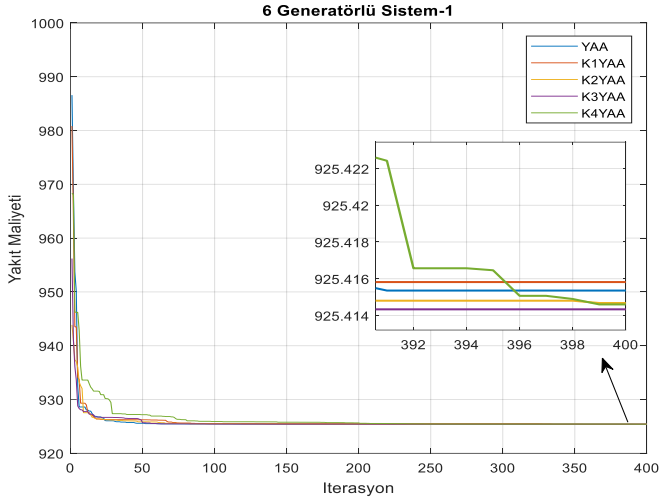
literatürdeki PSO algoritmasından elde edilen sonuçtan 13.6213 \$/h daha azdır. Test sistemi 2 için, önerilen algoritmadan elde edilen minimum toplam valf nokta etkili yakıt maliyeti yakınsama eğrileri Şekil 3(b)'de gösterilmektedir.

**Tablo 4.** 6 Generatörlü valf nokta etkili sistemin sonuçları (Test sistemi 2)

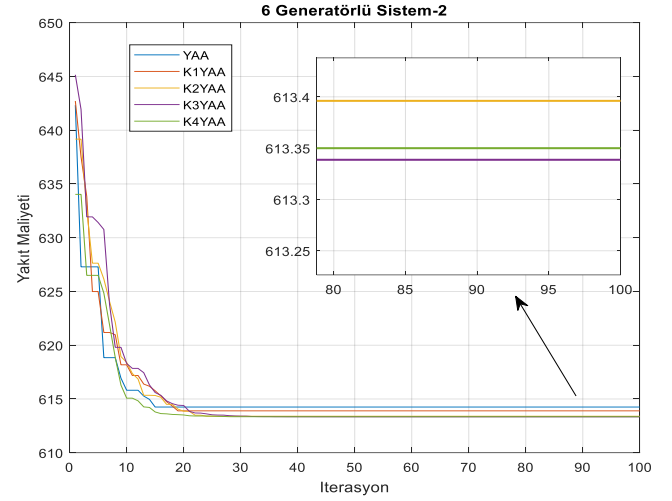
Yöntem	Min.	Ort.	Maks.
YAA	614.2507	618.0967	630.0553
K1YAA	613.8961	616.7009	630.2594
K2YAA	613.3961	616.874	630.9807
K3YAA	613.3387	616.3131	622.2219
K4YAA	613.3500	617.0027	627.3591

**Tablo 5.** 6 Generatörlü valf nokta etkisiz sistemin sonuçları (Test sistemi 2)

Yöntem	Min.	Ort.	Maks.
YAA	600.1145	600.1278	600.1598
K1YAA	600.1134	600.1269	600.1715
K2YAA	600.1125	600.1259	600.1523
K3YAA	600.11	600.1223	600.1455
K4YAA	600.114	600.1274	600.1835



(a)



(b)

**Şekil 3.** Yakıt maliyeti yakınsama eğrisi 6 generatörlü sistem (a) Test sistemi 1 (b) Test sistemi 2 (Valf nokta etkili)

**Tablo 6.** Yakıt maliyeti minimizasyonu için optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Test sistemi 2)

Valf Nokta Etkili ve kayıplı										
Yöntem	P <sub>G1</sub>	P <sub>G2</sub>	P <sub>G3</sub>	P <sub>G4</sub>	P <sub>G5</sub>	P <sub>G6</sub>	Toplam Güç (pu)	Yakıt Maliyeti (\$/h)	Kayıp (pu)	Emisyon (ton/h)
PSO (Hemamalini ve Simon, 2008)	0.099441	0.36248	0.48349	0.87359	0.66428	0.39004	2.873321	626.96	0.039321	0.21392
<b>K3YAA</b>	<b>0.05000</b>	<b>0.4000</b>	<b>0.6875</b>	<b>0.9500</b>	<b>0.5500</b>	<b>0.2310</b>	<b>2.8685</b>	<b>613.3387</b>	<b>0.03445</b>	<b>0.22337</b>
Valf Nokta Etkisiz ve kayıpsız										
NSGA (Abido, 2006)	0.1038	0.3228	0.5123	1.0387	0.5324	0.3241	2.8341	600.34	-	0.2241
NPGA (Abido, 2006)	0.1116	0.3153	0.5419	1.0415	0.4726	0.3512	2.8341	600.31	-	0.2238
SPEA (Abido, 2006)	0.1009	0.3186	0.5400	0.9903	0.5336	0.3507	2.8341	600.22	-	0.2206
MBFA (Hota vd., 2010)	0.1133	0.3005	0.5202	0.9882	0.5409	0.3709	2.834	600.17	-	0.2200
NSGA-II (Zhang vd., 2012)	0.1059	0.3177	0.5216	1.0146	0.5159	0.3583	2.834	600.155	-	0.2219
BB-MOPSO (Zhang vd., 2012)	0.1090	0.3005	0.5234	1.0170	0.5238	0.3603	2.834	600.112	-	0.2222
DE (Guerrero ve Maldonado, 2005)	0.110	0.300	0.524	1.016	0.524	0.360	2.834	600.11	-	0.2231
OHS (Chatterjee vd., 2012)	0.1086	0.2995	0.5315	1.0121	0.5230	0.3591	2.8338	600.00	-	0.2219
PSO (Jiang vd., 2014)	0.1066	0.2996	0.5243	1.0164	0.5262	0.3609	2.834	600.11	-	0.2223
GSA (Jiang vd., 2014)	0.0947	0.2650	0.5418	0.9819	0.5070	0.4435	2.8339	601.06	-	0.2204
HPSO-GSA (Jiang vd., 2014)	0.1096	0.2998	0.5243	1.0162	0.5243	0.3598	2.834	600.11	-	0.2221
İYAA (Duman vd., 2014)	0.1096	0.3000	0.5240	1.0163	0.5243	0.3598	2.834	600.11	-	0.22215
<b>K3YAA</b>	<b>0.1102</b>	<b>0.3022</b>	<b>0.5243</b>	<b>1.0161</b>	<b>0.5221</b>	<b>0.3591</b>	<b>2.834</b>	<b>600.11</b>	<b>-</b>	<b>0.22208</b>

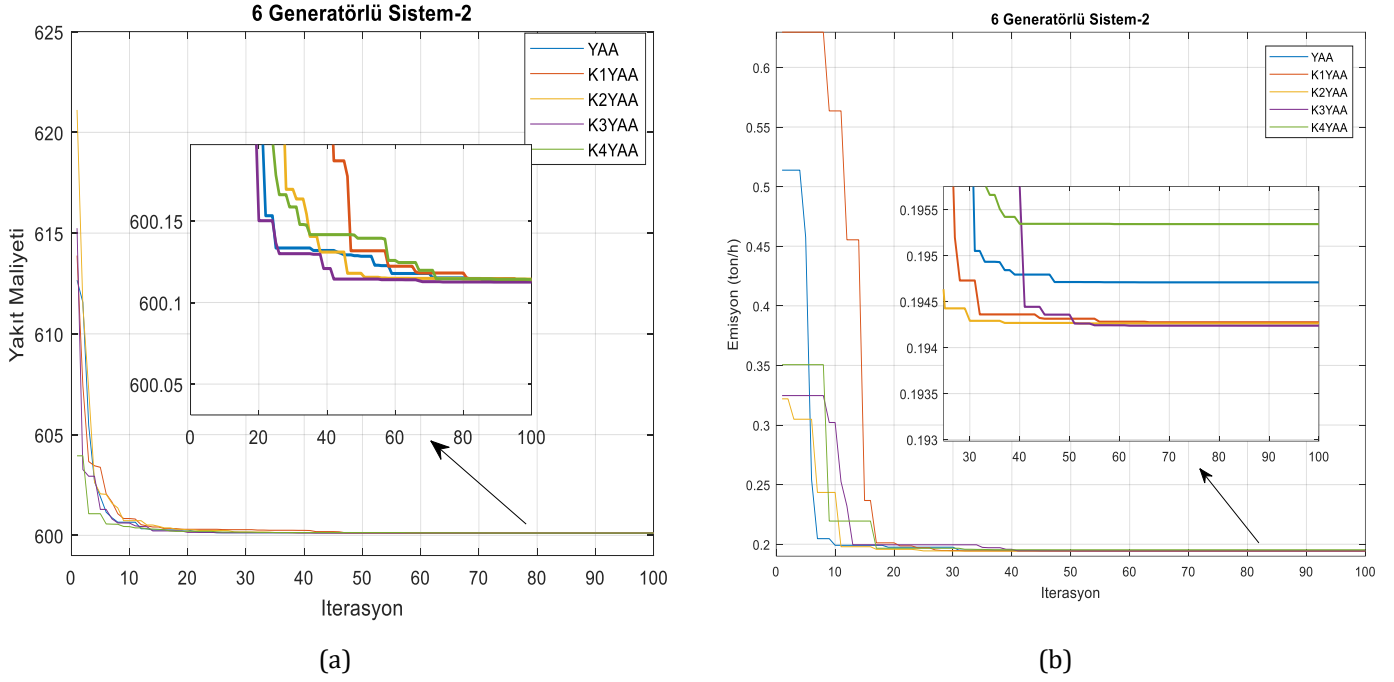


Şekil 3(b) detaylı bir şekilde incelendiğinde önerilen algoritma yaklaşık olarak 30'uncu iterasyondan sonra minimum değere yakınsadığı görülmektedir. Tablo 6'da, ikinci olarak sistem valf nokta etkisiz ve kayıpsız olarak düşünülmüş olup, sisteme ait generatör verileri (Chatterjee vd., 2012) referansından alınmıştır. Önerilen yaklaşımdan elde edilen sonucun, karşılaştırılan optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlara benzer olduğu görülmüştür. Tablo 7'de sistem ilk olarak valf nokta etkisi ve kayıplı olarak düşünülmüş olup, minimum emisyon değeri elde edilmiştir. Önerilen yaklaşımdan elde edilen sonuç literatürdeki PSO algoritmasından elde edilen sonuçtan 0.00144 ton/h daha az olduğu ifade edilebilir.

Test sistemi 2 için, önerilen algoritmadan elde edilen minimum toplam valf nokta etkisiz yakıt maliyeti yakınsama eğrileri Şekil 4(a)'da gösterilmektedir. Şekil 4(a) detaylı bir şekilde incelendiğinde önerilen algoritma yaklaşık olarak 60'uncu iterasyondan sonra minimum değere yakınsadığı görülmektedir. Test sistemi 2 için valf nokta etkisiz ve kayıpsız olarak 30 deneme yapılarak, önerilen algoritma ile emisyon salınımının en aza indirgeme benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar, literatürden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında en son elde edilen sonuçlara uygun sonuçlar olduğu Tablo 7'de gösterilmiştir. Şekil 4(b)'de valf nokta etkisiz ve kayıpsız sistem koşulları altında önerilen algoritma ile emisyon değerinin yakınsama eğrileri gösterilmektedir.

**Tablo 7.** Minimum emisyon için optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Test sistemi 2)

Valf Nokta Etkili ve kayıplı (Emisyon)										
Yöntem	P <sub>G1</sub>	P <sub>G2</sub>	P <sub>G3</sub>	P <sub>G4</sub>	P <sub>G5</sub>	P <sub>G6</sub>	Toplam Güç (pu)	Yakıt Maliyeti (\$/h)	Kayıp (pu)	Emisyon (ton/h)
PSO (Hemamalini ve Simon, 2008)	0.37883	0.39323	0.49948	0.53439	0.57341	0.48651	2.86585	659.44	0.03185	0.19567
<b>K3YAA</b>	<b>0.3923</b>	<b>0.4700</b>	<b>0.5278</b>	<b>0.4008</b>	<b>0.5536</b>	<b>0.5229</b>	<b>2.8674</b>	<b>677.8597</b>	<b>0.0334</b>	<b>0.19423</b>
Valf Nokta Etkisiz ve kayıpsız										
NSGA (Abido, 2006)	0.4072	0.4536	0.4888	0.4302	0.5836	0.4707	2.8341	633.83	-	0.1946
NPGA (Abido, 2006)	0.4146	0.4419	0.5411	0.4067	0.5318	0.4979	2.834	636.04	-	0.1943
SPEA (Abido, 2006)	0.4240	0.4577	0.5301	0.3721	0.5311	0.5190	2.834	640.42	-	0.1942
MBFA (Hota vd., 2010)	0.3943	0.4627	0.5423	0.3946	0.5346	0.5056	2.8341	636.73	-	0.1942
NSGA-II (Zhang vd., 2012)	0.4074	0.4577	0.5389	0.3837	0.5352	0.5110	2.8339	638.249	-	0.1942
BB-MOPSO (Zhang vd., 2012)	0.4071	0.4591	0.5374	0.3838	0.5369	0.5098	2.8341	638.262	-	0.1942
DE (Guerrero ve Maldonado, 2005)	0.406	0.459	0.538	0.383	0.538	0.510	2.834	638.27	-	0.1952
OHS (Chatterjee vd., 2012)	0.412116	0.466949	0.547454	0.3711771	0.534693	0.501016	2.833999	639.5493	-	0.1942
PSO (Jiang vd., 2014)	0.4017	0.4604	0.5403	0.3875	0.5360	0.5081	2.834	637.67	-	0.1942
GSA (Jiang vd., 2014)	0.5000	0.5643	0.4435	0.4429	0.4818	0.4014	2.8339	643.96	-	0.1969
HPSO-GSA (Jiang vd., 2014)	0.4062	0.4591	0.5379	0.3829	0.5379	0.5100	2.834	638.27	-	0.1942
İYAA (Duman vd., 2014)	0.4097	0.4563	0.5244	0.3930	0.5310	0.5196	2.834	637.9112	-	0.1942
<b>K3YAA</b>	<b>0.4004</b>	<b>0.4578</b>	<b>0.5268</b>	<b>0.3723</b>	<b>0.5551</b>	<b>0.5216</b>	<b>2.834</b>	<b>639.093</b>	<b>-</b>	<b>0.1942</b>



**Şekil 4.** Yakıt maliyeti ve emisyon yakınsama eğrileri 6 generatörlü sistem (a) Valf nokta etkisiz test sistemi 2 (b) Emisyonlu test sistemi 2 (Valf nokta etkisiz)

## 5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, son zamanlarda geliştirilen ve literatüre sunulan sezgisel algoritmalarından biri olan yıldırım arama algoritmasının Yıldız ve ark. tarafından kaotik haritalandırma denklemleri kullanılarak iyileştirme yapılan KYAA algoritması ekonomik ve emisyon yük dağıtım probleminin çözümü için iki farklı test sistemine uygulanmıştır. Bu test sistemlerinde dört farklı kaotik haritalandırma yöntemi ve yıldırım arama algoritmasının kendisi kullanılmıştır. Test sistemi kayıplı, kayıpsız, valf nokta etkili, etkisiz koşullar altında minimum toplam yakıt maliyeti ve emisyon değeri 30 kez benzetim çalışması yapılarak elde edilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre, kaotik harita yöntemlerinden üçüncüsü (K3YAA) kullanılarak elde edilen sonuçların literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırıldığında daha iyi ve benzer sonuçlar olduğu görülmüştür. Yıldız ve ark. tarafından literatüre sunulan kaotik yıldırım arama algoritmasının, modern güç sistemleri optimizasyon problemlerinden biri olan ekonomik emisyon yük dağıtımına başarılı bir şekilde uygulandığı gösterilmiştir.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

- Abido, M.A., 2006. Multiobjective Evolutionary Algorithms for Electric Power Dispatch Problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 10(3), 315-329.
- Alatas, B., Akin, E., Ozer, A.B., 2009. Chaos Embedded Particle Swarm Optimization Algorithms. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(4), 1715-1734.
- Alatas, B., 2010. Chaotic Harmony Search Algorithms. *Applied Mathematics and Computation*, 216, 2687-2699.
- Aydin, D., Özyön, S., Yaşar, C., Liao, T., 2014. Artificial Bee Colony Algorithm with Dynamic Population size to Combined Economic and Emission Dispatch Problem. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 54, 144-153.
- Bahrani, L. T. A., Patra, J. C., 2017. Orthogonal PSO Algorithm for Economic Dispatch of Thermal Generating Units under Various Power Constraints in Smart Power Grid. *Applied Soft Computing*, 58, 401-426.
- Basu, M., 2014. Fuel Constrained Economic Emission Dispatch using Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II. *Energy*, 78, 649-664.
- Bhattacharjee, K., Bhattacharya, A., Nee Dey, S. H., 2014. Solution of Economic Emission Load Dispatch Problems of Power Systems by Real Coded Chemical Reaction Algorithm. *International*

- Journal of Electrical Power and Energy Systems, 59, 176-187.
- Bingöl, O., Güvenç, U., Duman, S., Paçacı, S., 2017. Stochastic Fractal Search Algorithm with Chaos. International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP17).
- Chatterjee, A., Ghoshal, S.P., Mukherjee, V., 2012. Solution of Combined Economic and Emission Dispatch Problems of Power Systems by an Opposition-Based Harmony Search Algorithm. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 39, 9-20.
- Chen, S.D., Chen, J.F., 2003. A Direct Newton-raphson Economic Emission Dispatch. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 25(5), 411-417.
- Duman, S., Yorukeren, N., Altas, I.H., 2015. A Novel Modified Hybrid PSO-GSA based on Fuzzy Logic for non-convex Economic Dispatch Problem with Valve-point Effect. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 64, 121-135.
- Duman, S., Altaş, I.H., Yörükeren, N., 2014. Çevresel Ekonomik Yük Dağıtım Probleminin İyileştirilmiş Yerçekimsel Arama Algoritması ile Çözümü. Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu, 176-181.
- Elhameed, M.A., El-Fergany, A.A., 2017. Water Cycle Algorithm-based Economic Dispatcher for Sequential and Simultaneous Objectives Including Practical Constraints. Applied Soft Computing, 58, 145-154.
- Frag, A., Al-Baiyat, S., Cheng, T.C., 1995. Economic Load Dispatch Multiobjective Optimization Procedures using Linear Programming Techniques. IEEE Transactions on Power Systems, 10(2), 731-738.
- Gandomi, A. H., Yang, X. S., 2014. Chaotic Bat Algorithm. Journal of Computational Science, 5(2), 224-232.
- Güvenç, U., Duman, S., Sonmez, Y., Kahraman, H.T., Dosoglu, M.K., in press(2018). Symbiotic Organisms Search Algorithm for Economic Load Dispatch Problem with Valve-point Effect. Scientia Iranica, DOI: 10.24200/SCI.2017.4378.
- Hemamalini, S., Simon, S.P., 2008. Emission Constrained Economic Dispatch with Valve-Point Effect using Particle Swarm Optimization. 2008 IEEE Region 10 Conference TENCON 2008.
- Hota, P. K., Barisal, A. K., Chakrabarti, R., 2010. Economic Emission Load Dispatch through Fuzzy based Bacterial Foraging Algorithm. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 32, 794-803.
- Jiang, S., Ji, Z., Shen, Y., 2014. A Novel Hybrid Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm for Solving Economic Emission Load Dispatch Problems with Various Practical Constraints. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 55, 628-644.
- Kavousi-Fard, A., Khosravi, A., 2016. An intelligent  $\theta$ -Modified Bat Algorithm to solve the Non-convex Economic Dispatch Problem Considering Practical Constraints. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 82, 189-196.
- Kheshti, M., Kang, X., Bie, Z., Jiao, Z., Wang, X., 2017. An Effective Lightning Flash Algorithm Solution to Large Scale Non-convex Economic Dispatch with Valve-point and Multiple Fuel Options on Generation Units. Energy, 129, 1-15.
- Lin, C.E., Chen, S.T., Huang, C.L., 1992. A Direct Newton-raphson Economic Dispatch. IEEE Transactions on Power System, 7(3), 1149-1154.
- Malik, T. N., Ul Asar, A., Wyne, M. F., Akhtar, S., 2010. A New Hybrid Approach for the Solution of Nonconvex Economic Dispatch Problem with Valve-Point Effects. Electric Power Systems Research, 80, 1128-1136.
- Mason, K., Duggan J., Howley, E., 2017. Multi-objective Dynamic Economic Emission Dispatch using Particle Swarm Optimisation Variants. Neurocomputing, 270, 188-197.
- Meng, A., Li, J., Yin, H., 2016. An Efficient Crisscross Optimization Solution to Large-scale non-convex Economic Load Dispatch with Multiple Fuel Types and Valve-point Effects. Energy, 113, 1147-1161.
- Mirjalili, S., Gandomi, A. H., 2017. Chaotic Gravitational Constants for the Gravitational Search Algorithm. Applied Soft Computing, 53, 407-419.
- Nabona, N., Freris, L.L., 1973. Optimisation of Economic Dispatch through Quadratic and Linear Programming. Proceedings of the Institution of Electrical Engineering, 120(5), 574-580.
- Naderi, E., Azizivahed, A., Narimani, H., Fathi, M., Narimani, M.R., 2017. A Comprehensive Study of Practical Economic Dispatch Problems by a new Hybrid Evolutionary Algorithm. Applied Soft Computing, 61, 1186-1206.
- Pamuk, N., 2013. Dinamik Sistemlerde Kaotik Zaman Dizilerinin Tespiti. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15(1), 78-92.
- Pandit, N., Tripathi, A., Tapaswi, S., Pandit, M., 2012. An Improved Bacterial Foraging algorithm for Combined Static/Dynamic Environmental Economic Dispatch. Applied Soft Computing, 12, 3500-3513.
- Perez-Guerrero, R. E., Cedeno-Maldonado, J. R., 2005. Differential Evolution based Economic Environmental Power Dispatch. Proc. 37th Annual North American Power Symp., 191-197.
- Qu, B.Y., Zhu, Y.S., Jiao, Y.C., Wu, M.Y., Suganthan, P.N., Liang, J.J., 2018. A Survey on multi-objective

- Evolutionary Algorithms for the Solution of the Environmental/Economic Dispatch Problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, 1-11.
- Secui, D.C., 2015. A New Modified Artificial Bee Colony Algorithm for the Economic Dispatch Problem. *Energy Conversion and Management*, 89, 43-62.
- Shareef, H., Ibrahim, A. A., Mutlag, A. H., 2015. Lightning Search Algorithm. *Applied Soft Computing*, 36, 315-333.
- Shila, C., Ravi, K., 2017. Optimization of Emission/Economic Dispatch using Euclidean Affine Flower Pollination Algorithm (eFPA) and Binary FPA (BFPA) Photovoltaic Generation. *Renewable Energy*, 107, 550-566.
- Tanyıldızı, E., Cigal, T., 2017. Kaotik Haritalı Balina Optimizasyon Algoritmaları. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1), 309-319.
- Yang, D., Liu, Z., Zhou J., 2014. Chaos Optimization Algorithms based on Chaotic Maps with Different Probability Distribution and Search Speed for Global Optimization. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 19, 1229-1246.
- Yaşar, C., Özyön, S., 2011. A New Hybrid Approach for Nonconvex Economic Dispatch Problem with Valve-Point Effect. *Energy*, 35, 5838-5845.
- Yıldız, B., Duman, S., Yıldız T.K., 2017. Kaotik Yıldırım Arama Algoritması. IV. International Multidisciplinary Congress of Eurasia (IMCOFE 2017).
- Younes, M., Khodja F., Kherfane, R.L., 2014. Multi-objective Economic Emission Dispatch Solution using hybrid FFA (Firefly Algorithm) and Considering Wind Power Penetration. *Energy*, 67, 595-606.
- Zhang, Y., Gong, D. W., Ding, Z., 2012. A Bare-Bones Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm for Environmental/Economic Dispatch. *Information Sciences*, 192, 213-227.
- Zhou, J., Wang, C., Li, Y., Wang, P., Li, C., Lu, P., Mo, L., 2017. A Multi-objective Multi-Population Ant Colony Optimization for Economic Emission Dispatch Considering Power System Security. *Applied Mathematical Modelling*, 45, 684-704
- Zou, D., Li, S., Li, Z., Kong, X., 2017. A New Global Particle Swarm Optimization for the Economic Emission Dispatch with or without Transmission Losses. *Energy Conversion and Management*, 139, 45-70.