



# Dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırılması problemine PSO algoritmasının uygulanması

## Application of PSO algorithm to reconfiguration problem of distribution systems

H. Lale Zeynelgil<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, zeynelgil@itu.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8327-9259>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 9 Ocak 2023  
Revizyon 31 Mart 2023  
Kabul 21 Nisan 2023  
Online 20 Haziran 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Dağıtım sistemi, Yeniden yapılandırma, Optimizasyon, PSO (parçacık sürüsü) algoritması.

### ÖZ

Bu çalışmada, dağıtım sistemlerinin kayıplar minimum olacak şekilde yeniden yapılandırılması amaçlanmıştır. Dağıtım sistemindeki farklı karakterli yükler nedeniyle şebekedeki hatlar günün puant saatlerinde ağır yüklenir ama geri kalan saatlerde hafif yüklenir. Bu durum güç kayıplarının büyük ve gerilim profilinin düşük olmasına yol açar. Şebekenin bu değişken yük durumundan olumsuz etkilenmemesi için, gün içinde yüklerin optimal olarak dağıtılması istenir. Bu amaçla, ağır yüklenmiş hatlardan hafif yüklenmiş hatlara yük aktarılır ve şebeke yeniden yapılandırılmış olur. Bu şekilde, hem şebekedeki kayıplar azaltılmış ve hem de baraların gerilim seviyesi de yükseltilmiş olur. Şebekenin yeniden yapılandırılması, bütün yüklerin beslenmesi koşuluyla, şebekede bulunan anahtarların konumlarının (açık/kapalı) değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu makalede dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması için ikili parçacık sürüsü optimizasyonu (IPSO) algoritması kullanılmıştır, çünkü PSO algoritması güç sistemlerinde doğrusal olmayan amaç fonksiyonlarını çözmek için sıklıkla kullanılan bir algoritma olup, ikili PSO algoritmasının kullanımı daha hızlı yakınsama sağlamaktadır. Algoritma için amaç fonksiyonu şebekedeki aktif güç kaybının minimum olmasını sağlayan anahtar kombinasyonu olarak belirlenmiş ve bilgisayar simülasyonları sonucunda, yeni şebeke yapısı için, şebekedeki kayıpların büyük oranda azaltıldığı ve şebekenin gerilim profilinin de iyileştirildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatürde gelişmiş genetik algoritma, çekirge optimizasyon algoritması, harmoni arama algoritması, havai fişek algoritması ve guguk kuşu arama algoritması kullanılarak bulunmuş olan sonuçlarla karşılaştırılarak önerilen PSO algoritmasının üstünlüğü gösterilmiştir.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 9 January 2023  
Received in revised form 31 March 2023  
Accepted 21 April 2023  
Available online 20 June 2023

#### Keywords:

Distribution Systems, Reconfiguration, Optimization, Particle swarm optimization (PSO) algorithm

Doi: 10.24012/dumf.1231678

\* Sorumlu Yazar

### ABSTRACT

In this study, it is aimed that the distribution network is reconfigured such that losses are minimized, Lines in the network are heavily loaded at the peak hours of the day but they are lightly loaded in other hours owing to different characterized loads. This state results that power losses are high and voltage profile is low. Since the network is not affected negatively from this variable loading situation, it is desired that the loads are optimally distributed during the day. For this purpose, the loads are transferred to lightly loaded lines from heavily loaded lines and the network is reconfigured. Therefore, both the losses in the network are reduced and the voltage level at the buses is increased. Reconfiguration of the network is realized with the status of the switches (on/off) are changed in the network, provided that all of the loads are supplied. In this paper, particle swarm optimization (BPSO) algorithm is used for reconfiguration of the distribution network because particle swarm optimization (PSO) algorithm is a frequently used algorithm to solve nonlinear objective functions in power systems and using of binary PSO algorithm provides faster convergence. Objective function for the algorithm is determined as the switch combination provided that real power losses are minimized and, it is seen that losses in the network are considerably decreased and voltage profile of the network is also improved for the reconfiguration of network, from the computer simulations. Superiority of the proposed algorithm is shown by comparing the obtained results with the results obtained by using enhanced genetic algorithm, grasshopper optimisation algorithm, harmony search algorithm, fireworks algorithm and cuckoo search algorithm in literature.

## Giriş

Enerji ihtiyacı, sürekli artan nüfus ve sanayileşmeye bağlı olarak hızla artmaktadır. Günümüzde ülkelerin gelişmişlik seviyesini gösteren ölçütlerden biri de kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi olmaktadır. Santrallarda üretilen elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemleri üzerinden tüketicilere ulaşmakta ve bu esnada sistemin yapısına bağlı olarak elektrik enerjisinde kayıplar ve bozulmalar oluşmaktadır. Elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen özellikler aşağıdaki gibidir [1]:

- Gerilimin sabit genlikli ve sabit frekanslı olması
- Faz gerilimlerinin ve faz akımlarının dengeli olması
- Sürekli enerjilendirme
- Büyük (1'e yakın) güç faktörü
- Belirli sınırları aşmayan harmonikler

Elektrik enerjine olan talebin hızla artması nedeniyle, hem temiz enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak ve hem de var olan sistemin verimliliğini arttırmak amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların amacı hem ekonomiklik ve hem de verimlilik açısından sistemdeki kayıpların azaltılmasıdır.

Kentsel dağıtım sistemlerindeki kayıp enerji genellikle tüketilen enerjinin % 3-4' ü mertebesinde [2]. Kırsal dağıtım sistemlerinde, daha geniş alanlara yayıldıkları için, enerji kayıpları bu değer iki katına çıkabilmektedir. Sistemdeki kayıpların azalmasıyla, tüketilemeyen enerji miktarı azalır ve parasal tasarruf ta sağlanır. Kayıpları azaltmak için aşağıda sıralanan bazı yöntemler kullanılabilir [3]:

- Mevcut donanımın yenilenmesi
- Transformatörlerin doğru seçilmesi
- Fazların dengelenmesi
- Talrp yönetimi
- Şebeke yapılandırması
- Kapasitör grupları kullanılması
- Dağıtık üretim
- Şebekenin yeniden yapılandırılması

Şebekenin yeniden yapılandırılması ile kayıpların azaltılması fikri ilk olarak Merlin ve Back tarafından ortaya konulmuştur [4]. Burada önce halka şebeke yapısı oluşturmak için şebekedeki bütün anahtarlar kapatılmış ve daha sonra anahtarlar art arda açılarak radial şebeke elde edilmiştir. Shirmohammadi ve Hong tarafından Merlin ve Back [4] yöntemine dayanan sezgisel bir algoritma önerilmiştir [5]. Bu algoritmanın sakıncası, şebekenin yeniden yapılandırılması esnasında anahtar konumlarının eşzamanlı değiştirilmemesidir. Civanlar ve ark., dağıtım sisteminin hat kayıplarını azaltacak şekilde yapılandırılması için sadece sezgisel algoritmayı ve anahtarlama işleminde dal değişimi yöntemini kullanmışlardır [6]. Bu yöntemin en büyük sakıncası, bir defada sadece bir çift anahtarlama işleminin yapılabilmesi olup, kayıplar azaltılmakta ama minimuma indirilememektedir. Baran ve Wu tarafından yapılan çalışmada, sezgisel algoritmadan yararlanılarak dal değişimi yöntemi kullanılmıştır [7]. Goswami ve Basu tarafından önerilen yöntemde, radyal bir şebeke oluşturmak için bir anahtarın kapanması başka bir anahtarın açılmasıyla tamamlanmaktadır [8]. Bu yöntem küçük sistemler için

uygun olmakla beraber büyük şebekelerde kullanışlı değildir, çünkü çok sayıda hesaplama içermektedir. Nara ve ark. tarafından, şebekenin yeniden yapılandırılması problemi için genetik algoritmaya (GA) dayanan bir yöntem önerilmiştir [9]. Bu yöntemle elde edilen çözümde, anahtarlama durumu, uygunluk fonksiyonu, gerilim düşümü ve mevcut kapasite limiti ile ilgili ceza değerleri bulunmaktadır. Sonuç olarak, kayıplar minimize edilmekle beraber çözüm çok uzun sürmektedir. Zhu, çaprazlama ve mutasyonları kullanarak genetik algoritmayı geliştirmiştir [10]. Literatürde, dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması probleminin çözümünde GA' nın kullanıldığı başka çalışmalar da bulunmaktadır [11-14]. Bazı araştırmacılar tarafından, benzetilmiş tavlama (SA) yöntemi şebeke yapılandırılması probleminin çözümü için önerilmiştir [15-17]. Bu algoritma, teorik olarak kabul edilmiş olmakla beraber, herhangi bir pratik problemin çözümü için çok zaman almaktadır.

Bu çalışmada, dağıtım şebekesindeki kayıpları azaltmak ve gerilim profilini iyileştirmek için ikili parçacık sürüşü optimizasyonu (PSO) kullanılarak şebeke yeniden yapılandırılmıştır. Önerilen yöntem IEEE 33 baralı [7] ve IEEE 69 baralı [13] sistemlerde denenmiştir. Her iki sistem için bilgisayar simülasyonları ile elde edilen sonuçlar literatürdeki gelişmiş genetik algoritma, çekirge optimizasyon algoritması, harmoni arama algoritması, havai fişek algoritması ve guguk kuşu arama algoritması kullanılarak bulunmuş olan sonuçlarla karşılaştırılarak önerilen algoritmanın başarısı gösterilmiştir.

## Elektrik Dağıtım Şebekeleri

Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'nde, Türkiye'de nominal gerilimi 36 kV ve altında olan şebekelerin dağıtım şebekesi olarak kabul edildiği belirtilmektedir [18]. Dağıtım şebekeleri planlanırken, bölgenin coğrafi ve sosyoekonomik yapısı, sanayileşme hızı ile güncel enerji tüketim verilerinin de göz önüne alınması gerekir. Ayrıca, bölgede var olan veya potansiyel enerji kaynaklarının durumu da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, tüketicilere kaliteli elektrik enerjisi sağlanması amacıyla farklı şekillerde dağıtım şebekeleri tasarlanmaktadır. Dağıtım sistemleri yapılarına göre

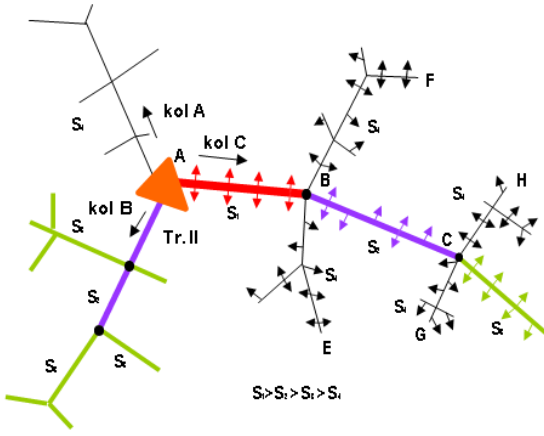
- Radyal (Dallı) Şebekeler
- Halka (Ring) Şebekeler
- Gözlu (Ağ) Şebekeler
- Enterkonnekte Şebekeler

olarak sınıflandırılır [19].

### Radyal (Dallı) Şebekeler

Bu şebekeler genellikle bir transformatörden beslenir. Radyal şebekede, dağıtım transformatörü yük yoğunluğunun en fazla olduğu yerdedir ve ağaç dalları gibi önce kalın, daha sonra ince kollara ayrılan şebeke ile elektrik enerjisi tüketicilere kadar ulaştırılır. Bu nedenle, bu tip şebekeler dallı şebeke olarak ta adlandırılır [19].

Şekil 1'de verilen örnek şebeke göz önüne alındığında, A, B ve C olarak gösterilen ve dağıtım transformatörüne yakın yerlerde kullanılan hatlara ana hat ve E, F, G ve H ile gösterilen ve dağıtım transformatöründen uzaklaştıkça incelen hatlara branşman hattı adı verilir [19].



Şekil 1. Radyal şebeke yapısı [19].

Radyal şebekenin üstünlükleri:

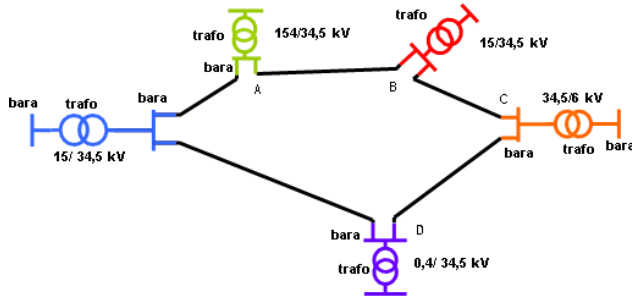
- Tesis masrafı diğer şebekelere göre daha azdır,
- Bakımı ve işletilmesi kolaydır,
- Şebekede oluşan bir arıza kolay tespit edilir.

Radyal şebekenin sakıncaları:

- Arıza giderilinceye kadar birçok abone enerjisz kalabilir,
- Transformatörden uzaklaştıkça gerilim düştüğü için hatlarda gerilim eşitliliği sağlanamaz.

### Halka Şebekeler

Bu tip şebekelerde, tüketiciler birden fazla transformatör üzerinden beslenirler ve bütün transformatörler kapalı bir halka oluşturulur (Şekil 2) [19].



Şekil 2. Halka şebeke yapısı.

Halka şebekenin üstünlüğü:

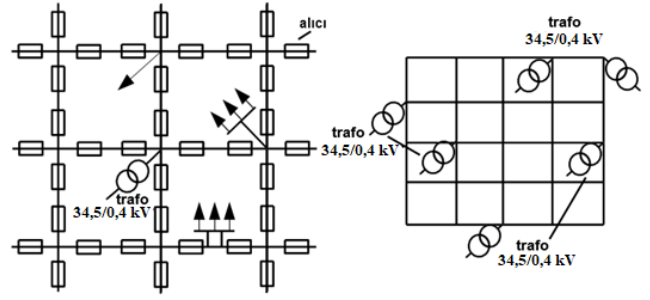
- Halka içinde herhangi bir yerde arıza olması durumunda, sadece arızalı kısım enerjisz kalır ve arızadan dallı şebekeye göre daha az tüketici etkilenir.

Halka şebekenin sakıncası:

- Beslenen bölgenin enerji ihtiyacı arttığında, halka şebekedeki hatlar, gerekli olan akımı taşıyamaz ve bütün hatların değiştirilmesi gerekir. Bu nedenle, halka şebeke radyal şebekeye göre daha masraflıdır [19].

### Gözlü Şebekeler

Bu tip şebekelerde hatlar bir veya daha fazla transformatörden beslenebilirler [19]. Şekil 3'teki örnek şebekeden de görüldüğü gibi, hatlar bir ağ oluşturacak şekilde birbirine bağlanmıştır.



Şekil 3. Gözlü şebeke yapısı.

Gözlü şebekenin üstünlükleri:

- Bir arıza meydana geldiğinde, halka şebekede olduğu gibi, sadece arızalı kısım enerjisz kalır.
- Diğer şebekelere göre gerilim düşümü daha azdır.

Gözlü şebekenin sakıncaları:

- Ttek bir transformatör ile beslenen şebekede transformatör arızası durumunda bütün şebeke enerjisz kalır,
- Kısa devrenin etkisi diğer şebeke türlerine göre daha fazladır.
- Bakımı ve işletilmesi daha zordur.

### Enterkonnekte Şebekeler

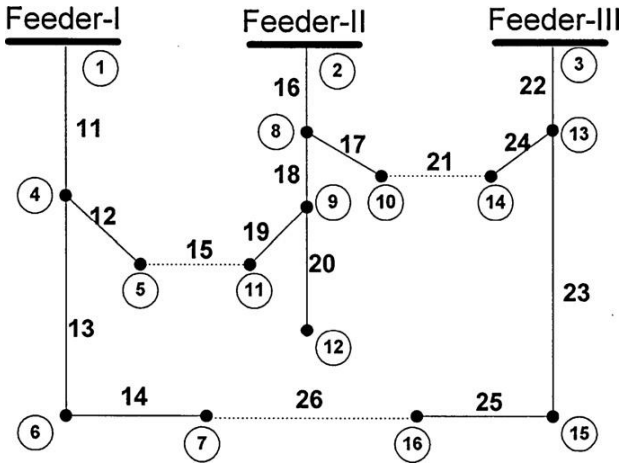
Enterkonnekte şebekeler özellikle büyük miktardaki enerji alışverişlerinin söz konusu olduğu bölgeler veya uluslararası enerji akışını sağlamak amacıyla oluşturulan şebekelerdir [19]. Bu tip şebekeler bölgelerdeki bütün üretim ve tüketim birimlerini içerir. Şebekede herhangi bir arıza durumunda, diğer bölgeler bu arızadan etkilenmez ve tüketicileri beslemeye devam ederler, dolayısıyla enerji kesintisi yaşanmaz. Her ülkenin kendi enterkonnekte sistemleri vardır ve aynı zamanda komşu ülkelerin enterkonnekte şebekeleri de birbirine bağlanabilmektedir

### Yeniden Yapılandırma Problemi

Son zamanlarda, giderek artan elektrik enerjisi talebi nedeniyle, dağıtım sistemleri daha geniş ve daha karmaşık hale gelmektedir, ki bu durum daha yüksek sistem kayıplarına ve düşük gerilim profiline yol açmaktadır. Yapılan çalışmalar, dağıtım sisteminde Joule kayıplarının üretilen toplam gücün yaklaşık % 10-13'üne ulaştığını, bu durumun da hem dağıtım hatları boyunca enerji maliyetini arttırdığını ve hem de gerilim profilinin düşük olmasına yol açtığını göstermektedir. Bu nedenle, dağıtım şebekelerinin güvenilirliğini arttırmak giderek daha da önemli olmaktadır. Şebekenin yeniden yapılandırılması, dağıtım sistemlerinde gerilim kararlılığının artırılması ve kayıpların azaltılması için en çok kullanılan yöntemlerden biridir [20, 21].

Dağıtım şebekelerinin yeniden yapılandırılmasının amacı, genellikle, aktif güç kaybını azaltmak ve şebekedeki aşırı yükü hafifletmektir. Bunların yanısıra, arıza kaynaklı kesintilerde ve bakım nedeniyle yapılan planlı kesintilerde de yeniden yapılandırma kullanılmaktadır. Dağıtım şebekeleri, tüketicilerin sürekli beslenebilmesini sağlamak amacıyla gözlü şebeke olarak tasarlanırlar, ancak işletilmesi daha kolay olduğu için radyal şebeke olarak işletilirler.

Şebekenin yeniden yapılandırılması, anahtarların açık/kapalı durumları değiştirilerek kayıpları minimuma indiren ve gerilim kararlılığını arttıran radyal şebeke yapısının elde edilmesidir. Dağıtım sistemlerinde, genellikle, bağlayıcı (normalde açık) anahtar ve ayırıcı (normalde kapalı) anahtar olmak üzere iki çeşit anahtar kullanılır. Şekil 4' te verilen örnek şebekede, 10–14, 5–11 ve 7–16 no.lu düğümler arasındaki kesikli çizgiyle gösterilen dallarda bağlayıcı anahtarlar ve diğer dallarda ise ayırıcı anahtarlar vardır [12]. Çalışma koşulları değiştiğinde, hatlardaki omik kayıpları azaltmak için bu anahtarların açılması/kapatılması ile şebekenin yeniden yapılandırılması sağlanır. Burada önemli olan, dağıtım şebekesinin radyal yapısını korumak amacıyla, yükleri başka hatlara aktarmak için bir ayırıcı anahtar açıldığında, bir bağlayıcı anahtarın kapatılmasıdır.



Şekil 4. 16 baralı dağıtım şebekesi [12].

Yeniden yapılandırma sorunu matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir []:

Amaç fonksiyonu:

$$\min P_L = \sum_{i=1}^N r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (1)$$

Kısıtlamalar:

$$g(x) < 0 \quad (2)$$

$$V_{\min} < V_n < V_{\max} \quad (3)$$

$$I_i^{\min} < I_i < I_i^{\max} \quad (4)$$

$$\det(A) = 1 \text{ veya } -1 \quad (5)$$

Bu denklemlerde,  $P_L$  toplam aktif güç kaybını,  $L$  dal sayısını,  $P_i$  ve  $Q_i$ , sırasıyla,  $i$  dalından çekilen aktif ve reaktif güçleri,  $V_i$   $i$  dalının gerilimini,  $r_i$   $i$  dalının direncini,  $g(x)$  güç akışı denklemlerini,  $V_n$   $n$  düğümündeki gerilimi,  $I_i$   $i$  dalındaki akımı,  $V_{\min}$  ve  $V_{\max}$ , sırasıyla, gerilim için alt ve üst sınır değerleri,  $I_i^{\min}$  ve  $I_i^{\max}$ , sırasıyla,  $i$  dalının akımı için alt ve üst sınır değerleri ve  $I$  bara bağlantı matrisini göstermektedir.

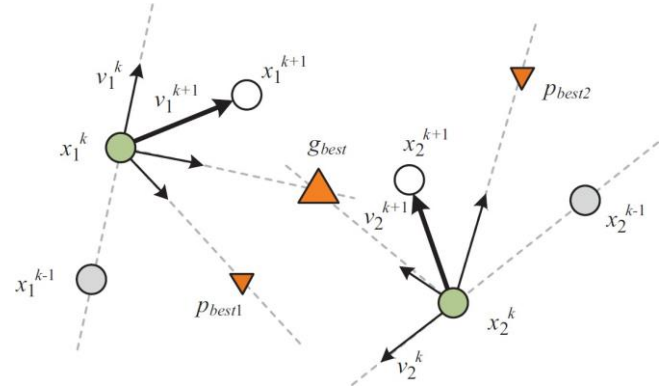
## Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) bir sezgisel yöntem olarak ilk defa Kennedy ve Eberhart tarafından 1995'te ortaya konulmuştur [22]. PSO başlangıçta lineer olmayan sürekli problemlerin çözümünde kullanılmış, ancak bugün karmaşık problemlerin çözümünde çok kullanılan bir algoritma haline gelmiştir. Mevcut optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında, PSO algoritması aşağıda sıralanan birçok önemli üstünlüğe sahiptir [23]:

- Türev içermez.
- Başka optimizasyon yöntemleriyle birlikte kullanılabilir.
- Amaç fonksiyonunun dışbükeylik veya süreklilik gibi özelliklerine duyarlılığı daha azdır.
- Düzeltilecek parametre sayısı daha az olduğu için, uygulanması ve programlanması daha kolaydır.
- Bölgesel minimumdan kaçma yeteneği vardır.
- Rastgele bir başlangıç çözümüyle iterasyona başlanabilir.

PSO algoritmasının mantığı, kuş sürüsünün hareketlerine dayanmaktadır: sürüdeki kuşlar yiyeceğe en yakın konumdaki kuşu takip ederler. PSO algoritmasında, popülasyondaki parçacıklar rastgele atanan başlangıç konumu ve hızıyla hareket etmeye başlar. Parçacıkların konumları ve hızları her iterasyonda güncellenir ve bulunan yeni koordinatlar bir fonksiyona gönderilerek parçacıkların hedefe olan uzaklıkları kaydedilir. En iyi çözümü elde etmek amacıyla, her iterasyonda parçacıkların konumları parçacığın en iyi değeri olan  $p_{best}$  ve popülasyondaki en iyi değer olan  $g_{best}$  büyüklükleriyle karşılaştırılarak güncellenir. Durdurma kriteri sağlandığında ya da maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında algoritma sonlandırılır [23].

Parçacıkların çözüm uzayındaki hareketi Şekil 5' te gösterilmiştir.



Şekil 5. PSO algoritmasında parçacıkların hareketi [24,25].

Probleme ilişkin çözüm uzayında  $n$  boyuttan oluşan  $m$  adet parçacık olduğu varsayıldığında, parçacık matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (6)$$

Popülasyon matrisinde  $i$ . parçacık aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3} \ \dots \ x_{in}] \quad (7)$$

$i$ . parçacığın önceki en iyi uygunluk değerini veren konumu ve sürüdeki en iyi parçacığın konumu sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$pbest_i = [p_{i1} \ p_{i2} \ p_{i3} \ \dots \ p_{in}] \quad (8)$$

$$gbest_i = [g_{i1} \ g_{i2} \ g_{i3} \ \dots \ g_{in}] \quad (9)$$

Sürüdeki  $i$ . parçacığın hızı da aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$v_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ v_{i3} \ \dots \ v_{in}] \quad (10)$$

Buna göre, parçacıkların hızı ve konumu sırasıyla Denklem (11) ve Denklem (12) kullanılarak güncellenir:

$$v_{ij}^{k+1} = w * v_{ij}^k + c_1 * rand_1(.)_{ij} * (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 * rand_2(.)_{ij} * (gbest_{ij}^k - x_{ij}^k) \quad (11)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (12)$$

Denklem (11) ve Denklem (12)' de;  $i=1, \dots, m$  ve  $j=1, \dots, n$  olup,  $m$  popülasyonun büyüklüğü ve  $n$  arama uzayının boyutudur. Denklem (11)' de,  $rand(.)$  [0, 1] aralığında rastgele bir sayıyı,  $x_{ij}^k$ ,  $v_{ij}^k$ ,  $pbest_{ij}^k$  ve  $gbest_{ij}^k$ , sırasıyla,  $k$ . iterasyonda  $j$ . boyuttaki  $i$  parçacığının konumunu, hızını, en iyi konumunu ve bütünsel en iyi konumunu göstermektedir.

Denklem (11)' de,  $c_1$  ve  $c_2$  öğrenme katsayıları olup,  $c_1$  katsayısı bir parçacığın kendi deneyimlerine göre hareket etmesini ve  $c_2$  katsayısı ise popülasyondaki diğer parçacıkların kendi deneyimlerine göre hareket etmesini sağlamaktadır. Eğer öğrenme katsayıları küçük seçilirse, parçacıklar hedef bölgeden uzaklaşır ve arama uzayını genişletirler, dolayısıyla arama süresi uzar. Eğer öğrenme katsayıları büyük seçilirse, parçacıkların hedefe ulaşma süresi kısalmış olur, ancak ulaşmak istenen bölge gözden kaçırılabilir. Çalışmalar, dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması probleminin çözümünde  $c_1=c_2=2,0$  değerlerinin iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Denklem (11)' de,  $w$  atalet ağırlığı olup, değeri genellikle 0 ile 2 arasındadır. Atalet ağırlığının büyük olması bütünsel aramayı ve atalet ağırlığının küçük olması ise bölgesel aramayı kolaylaştırır. Dolayısıyla, atalet ağırlığı bölgesel ve bütünsel arama arasında bir denge sağlamaktadır. Bu nedenle,  $w$  değerinin incelenen probleme uygun olarak seçilmesi çok önemlidir.  $w$  atalet ağırlığının  $k$ . iterasyondaki değeri

$$w(k) = \frac{w_{max} - w_{min}}{max. iter} \times k \quad (13)$$

bağıntısı ile belirlenir; burada  $w_{max}$  ve  $w_{min}$ , sırasıyla, atalet ağırlığının maksimum ve minimum değerleri olup,  $k$  ise o andaki iterasyon numarasıdır.

## Benzetim Çalışmaları

Bu çalışmada, PSO algoritmasının dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması problemine uygulanmış ve algoritmanın etkisini göstermek için IEEE 33 ve IEEE 69 baralı radyal test şebekeleri göz önüne alınmıştır.

Şebeke incelemesine başlanmadan önce aşağıdaki kabuller yapılmıştır [9]:

- Sistemdeki bütün yükler dengelidir.
- Analizler sürekli hal için yapılmıştır.
- Baralar arasında paralel hatlar yoktur ve her bir hatta bir anahtar vardır.
- Test edilen dağıtım şebekelerinin açık halka (radyal) şebeke olarak çalıştırıldığı varsayılmıştır.
- Sistem modelinde hatların süseptans değerleri sıfır alınmıştır, çünkü kısa hatlar söz konusudur.

PSO algoritmasının dağıtım şebekelerine uygulanmasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir [26]:

*Adım 1:* PSO algoritması için gerekli olan ve aşağıda sıralanan parametrelerin değerleri belirlenir:

$N$  : Maksimum iterasyon sayısı (50)

$m$  : Popülasyon büyüklüğü (20)

$n$  : Arama uzayının boyutu (bağlayıcı anahtar sayısı) (5)

$c_1$  ve  $c_2$  : Öğrenme katsayıları ( $c_1=c_2=2,0$ )

$w_{max}$  ve  $w_{min}$  Atalet ağırlığı için en büyük ve en küçük değerler ( $w_{max}=0,9$ ,  $w_{min}=0,4$ )

*Adım 2:* Rastgele bir başlangıç konum matrisi ( $x_{ij}$ ) ve bölgesel en iyi konum matrisi ( $pbest_{ij}$ ) oluşturulur. Ayrıca,  $rand(.)_{ij}$  fonksiyonu ile bir başlangıç hızları matrisi tanımlanır. Bu çalışmada, bu matrisler  $20 \times 5$  mertebelidir.

*Adım 3:* Algoritmanın uygulanacağı şebekeye ilişkin veriler programa girilir ve güç akışı analizi yapılır. Şebekenin radyallığını korumak için, aralarında bağlayıcı anahtar olan baralara 0 ve aralarında ayırıcı anahtar olan baralara 1 değeri atanarak bara bağlantı matrisi oluşturulur:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

*Adım 4:* Her bir parçacık için hız ve konum belirlenir. Bu amaçla, parçacıklara ilişkin konum ve hız bilgileri aşağıdaki döngü kullanılarak her iterasyonda güncellenir ve  $20 \times 5$  mertebeli matris biçiminde kaydedilir.

for  $j = 1:N$

$$v_{ij}^{k+1} = w \times v_{ij}^k + c_1 \times rand_1(.)_{ij} \times (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 \times rand_2(.)_{ij} \times (gbest_{ij}^k - x_{ij}^k)$$

if  $rand < S(v_{ij})$

$x_{id} = 1$

else

$x_{id} = 0$

end

end



Burada önerilen algoritma “İkili PSO” adını alır, çünkü Denklem (15) ile verilen  $S(x)$  fonksiyonu yardımıyla, hız 0 ile 1 arasında değer alabilmektedir. Bu fonksiyonun kullanılması ile parçacıkların hareketleri tamamen rastgele olmamakta ve sonuç olarak algoritma en iyi çözüme daha hızlı yakınsamaktadır.

$$S(v_{ij}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}}} \quad (15)$$

**Adım 5:** Her iterasyonda, amaç fonksiyonu yenilenen anahtar konumları için tekrar hesaplanır. Algoritma, şebekenin yenilenen anahtarlama durumuna ilişkin şebeke ve yük bilgilerini kullanarak güç akışı analizi ile şebekedeki kayıpları hesaplar.

**Adım 6:**  $i$  parçacığı için, uygunluk fonksiyonu ile kısıtlamaların sağlanıp sağlanmadığı ve bara bağlantı matrisinin koşulları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Eğer son bulunan konum önceki iterasyonda bulunmuş olan konumdan daha iyi ise, bu konum yeni  $pbest$  değeri olur. Eğer bu  $pbest$  değeri  $gbest$ 'ten de daha iyi ise, bu konum yeni  $gbest$  değeri olur.

**Adım 7:** Durdurma kriterinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Eğer bu kriter sağlanıyorsa  $gbest$  problemin en uygun çözümü olur ve algoritma sonlandırılır. Eğer durdurma kriteri sağlanmıyorsa **Adım 4'e** geri dönlür. Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa algoritma sonlandırılır.

Bu çalışmada, dağıtım şebekesinin güç akışı analizinde MATPOWER [27] programı ve PSO algoritması için MATLAB 2016a programı kullanılmıştır.

### IEEE 33 Baralı Radyal Dağıtım Şebekesinin Yeniden Yapılandırılması

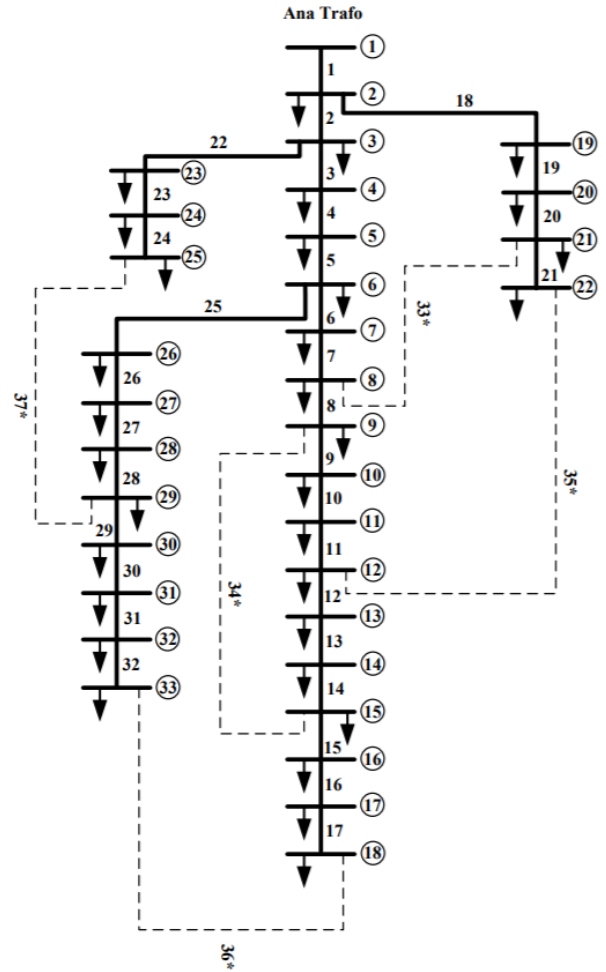
IEEE 33 baralı test sisteminde 32 ayırıcı anahtar ve 5 bağlayıcı anahtar bulunmaktadır (Şekil 6). Şebekeye ilişkin hat ve yük bilgileri Ek A' da verilmiştir. Şebeke için gerilim değeri 12,66 kV olup, şebekedeki toplam aktif ve reaktif yükler sırasıyla 3,72 MW ve 2,3 MVar olup, normal çalışma koşullarında 33, 34, 35, 36, 37 nolu anahtarlar açıktır.

PSO algoritması kullanılarak, mevcut 33 baralı şebekedeki kayıpların minimuma indirilmesi için en uygun anahtarlama kombinasyonu

- 2 ve 3 no.lu baralar arasındaki 2 no.lu anahtarın
- 13 ve 14 no.lu baralar arasındaki 13 no.lu anahtarın
- 16 ve 17 no.lu baralar arasındaki 16 no.lu anahtarın
- 8 ve 21 no.lu baralar arasındaki 33 no.lu anahtarın
- 25 ve 29 no.lu baralar arasındaki 37 no.lu anahtarın

açık ve diğer anahtarların kapalı olduğu durum olarak belirlenmiştir

Bu kombinasyona göre elde edilen sonuçlar Tablo 1' de verilmiştir. Tablodan, şebekenin yeniden yapılandırılması ile kayıpların % 45,94 azaltılmış ve gerilim profilinin genel olarak iyileştirilmiş olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 33 baralı test şebekesi [7]

Algoritma Intel Core™ i5-2410M 2,30 GHz işlemcili ve 8 GB RAM' li dizüstü bilgisayarda çalıştırılmış olup, bir döngü süresi 77,26 s' dir. Sonuçların geçerliliğini kontrol etmek için algoritma 20 kere çalıştırılmıştır. Algoritmanın yetkinliğini göstermek amacıyla, elde edilen sonuçların literatürdeki diğer algoritmalarla karşılaştırılması Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2' de, GGA gelişmiş genetik algoritma, GOA çekirge optimizasyon algoritması, HSA harmoni arama algoritması, FWA havai fişek algoritması ve CSA guguk kuşu arama algoritmasıdır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, önerilen algoritmanın güç kayıplarının azaltılması açısından en iyi sonucu verdiği, ancak gerilim profili açısından diğer algoritmaların önerilen algoritmadan daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

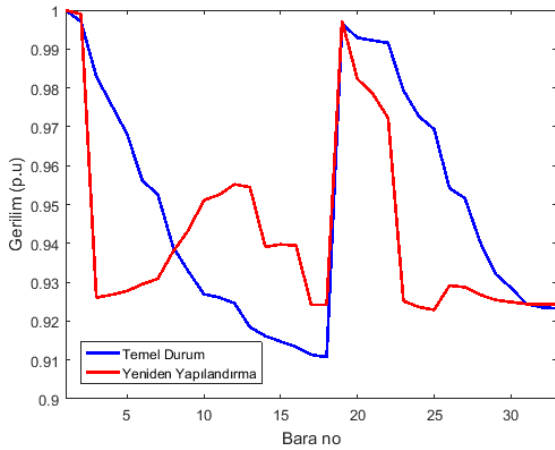
Şekil 7'deki grafikten, yapılandırmadan önce 18 no'lu bara en düşük gerilim seviyesine sahip iken, şebekenin yeniden yapılandırılmasıyla 25 no'lu baranın en düşük gerilim seviyesine sahip bara olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, yüklerin kaydırılması ile yükler şebekede daha eşit dağıtılmış ve hem güç kayıpları azaltılmış ve hem de baraların gerilim seviyeleri yükseltilmiştir

Tablo 1. 33 baralı şebeke için elde edilen sonuçlar.

| Durumlar             | Açık Anahtarlar | Güç Kaybı (kW) | Minimum Gerilim (p.u.) – Bara No. | Kayıp Azaltma Oranı (%) |
|----------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Temel Durum          | 33-34-35-36-37  | 208,4592       | 0,91075 – (18)                    | –                       |
| Yeniden Yapılandırma | 2-13-16-33-37   | 112,6833       | 0,9229 – (25)                     | 45,9447                 |

Tablo 2. 33 baralı şebeke için literatür karşılaştırması.

| Durumlar             | Açık Anahtarlar | Güç Kaybı (kW) | Minimum Gerilim (p.u.) |
|----------------------|-----------------|----------------|------------------------|
| Temel Durum          | 33-34-35-36-37  | 208,4592       | 0,91075                |
| Yeniden Yapılandırma | 2-13-16-33-37   | 112,6833       | 0,9229                 |
| GGA [11]             | 7-9-14-32-37    | 139,55         | –                      |
| GOA [28]             | 4-14-15-22-33   | 130,8164       | –                      |
| HSA [20]             | 07-14-09-32-37  | 138,06         | 0,9342                 |
| FWA [29]             | 07-14-09-32-28  | 139,98         | 0,9413                 |
| CSA [21]             | 7-9-14-32-37    | 138,87         | 0,94235                |



Şekil 7. 33 baralı test şebekesindeki gerilim profili.

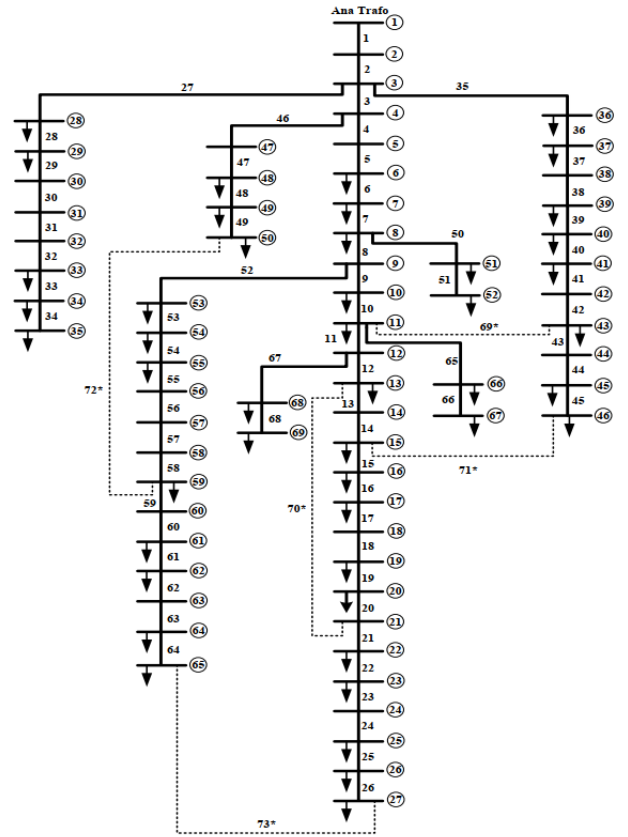
### IEEE 69 Baralı Radyal Dağıtım Şebekesinin Yeniden Yapılandırılması

IEEE 69 baralı radial dağıtım şebekesinde 68 ayrııcı anahtar ve 5 bağlayıcı anahtar vardır (Şekil 8). Şebekeye ilişkin hat ve yük bilgileri Ek B' de verilmiştir. 69 baralı test şebekesindeki toplam aktif ve reaktif yükler sırasıyla 3,80 MW ve 2,69 MVAR olup, normal çalışma koşullarında 69, 70, 71, 72, 73 nolu anahtarlar açıktır.

Önerilen PSO algoritması kullanılarak, IEEE 69 baralı test şebekesindeki kayıpların minimum indirilmesi için en uygun anahtarlama kombinasyonu

- 14 ve 15 no.lu baralar arasındaki 14 no.lu anahtarın
- 58 ve 59 no.lu baralar arasındaki 58 no.lu anahtarın
- 61 ve 62 no.lu baralar arasındaki 61 no.lu anahtarın
- 11 ve 43 no.lu baralar arasındaki 69 no.lu anahtarın
- 13 ve 21 no.lu baralar arasındaki 70 no.lu anahtarın

açık ve diğer anahtarların kapalı olduğu durum olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. 69 baralı test şebekesi [13]

Bu kombinasyon için elde edilen sonuçlar Tablo 3' te verilmiştir. Tablodan, şebekenin yeniden yapılandırılması ile kayıpların % 55,72 azaltılmış ve gerilim profilinin büyük ölçüde iyileştirilmiş olduğu görülmektedir.

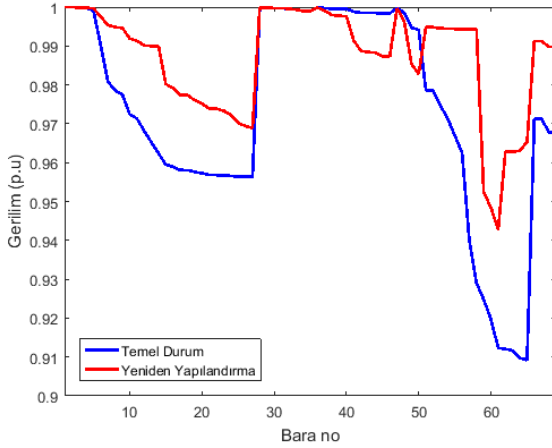
Şekil 9' daki grafikten, başlangıçta 65 no'lu bara en düşük gerilim seviyesine sahip iken, şebekenin yeniden yapılandırılmasıyla 62 no'lu baranın en düşük gerilim seviyesine sahip bara olduğu görülmektedir.

Tablo 3. 69 baralı şebeke için elde edilen sonuçlar.

| Durumlar             | Açık Anahtarlar | Güç Kaybı (kW) | Minimum Gerilim (p.u.) – Bara No. | Kayıp Azaltma Oranı (%) |
|----------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Temel Durum          | 69-70-71-72-73  | 225,0007       | 0,90919                           | –                       |
| Yeniden Yapılandırma | 14-58-61-69-70  | 99,62          | 0,94275                           | 55,72                   |

Tablo 4. 69 baralı şebeke için literatür karşılaştırması.

| Durumlar             | Açık Anahtarlar | Güç Kaybı (kW) | Minimum Gerilim (p.u.) |
|----------------------|-----------------|----------------|------------------------|
| Temel Durum          | 69-70-71-72-73  | 225,0007       | 0,90919                |
| Yeniden Yapılandırma | 14-58-61-69-70  | 99,62          | 0,94275                |
| HSA [20]             | 13-18-56-61-69  | 99,35          | 0,9428                 |
| FWA [29]             | 14-56-66-69-70  | 98,59          | 0,9495                 |
| CSA [21]             | 14-57-61-69-70  | 98,568         | 0,9495                 |
| GGA [11]             | 15-59-62-70-71  | 99,62          | –                      |



Şekil 9. 33 baralı test şebekesindeki gerilim profili

69 baralı test şebekesi için elde edilen sonuçların literatürdeki diğer algoritmalarla karşılaştırılması Tablo 4' te verilmiştir. Tablodan, bütün algoritmalarla bulunan anahtar kombinasyonlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Önerilen PSO algoritması ile GGA algoritmasıyla aynı güç kaybı değeri bulunmuştur. Gerilim profili açısından ise, geliştirilen PSO algoritması ile HSA algoritmasıyla aynı gerilim değerinin bulunduğu görülmektedir.

## Sonuçlar

Bu çalışmada, dağıtım şebekelerinin yeniden yapılandırılması probleminin çözümü için ikili parçacık sürüsü optimizasyonu (İPSO) algoritması kullanılmıştır. Yeniden yapılandırmanın amacı hem şebekedeki aktif güç kayıplarının azaltılması ve hem de baraların gerilim seviyelerinin yükseltilmesidir. Önerilen yöntem, IEEE 33 baralı ve IEEE 69 baralı radyal test şebekelerine uygulanmış olup, her iki test şebekesi için elde edilen sonuçlar literatürde gelişmiş genetik algoritma, çekirge optimizasyon algoritması, harmoni arama algoritması, havai fişek algoritması ve guguk kuşu arama algoritması kullanılarak bulunmuş olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre,

- Yeniden yapılandırma için önerilen PSO algoritması ile elde edilen en uygun anahtarlama kombinasyonu IEEE 33 baralı test şebekesi için diğer algoritmalarla elde edilen kombinasyonlardan oldukça farklıdır. Ancak, IEEE 69 baralı test şebekesi için bütün algoritmalarla birbirine yakın anahtarlama kombinasyonları elde edilmiştir
- Önerilen PSO algoritmasının uygulanmasıyla, kayıplar IEEE 33 baralı test şebekesinde % 45,94 ve IEEE 69 baralı test şebekesinde ise % 55,72 oranında azaltılmıştır. Literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen PSO algoritmasının güç kaybı açısından IEEE 33 baralı test şebekesinde açık ara en iyi sonucu, IEEE 69 baralı test şebekesinde ise en iyi değere yakın sonuç verdiği görülmüş olup, güç kaybı değeri bütün algoritmalar için birbirine çok yakın değerlerde elde edilmiştir.
- Önerilen PSO algoritmasının uygulanmasıyla, baraların gerilim seviyeleri hem IEEE 33 baralı test şebekesinde ve hem de IEEE 69 baralı test sisteminde büyük ölçüde yükseltilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması probleminin çözümü için, diğer algoritmalarla göre daha basit yapıya sahip olması, daha az parametre ile en iyi sonucu bulabilmesi ve kullanımının kolay olması gibi üstünlükleri nedeniyle, PSO algoritması tercih edilmiştir. Simülasyon sonuçlarından, önerilen PSO algoritması ile şncelenen her iki şebeke için de en uygun veya en uygunu yakın çözümün elde edilebildiği görülmüştür.

## Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makale A. Çakır'ın yürütücüsü olduğum yüksek lisans tezinden türetilmiş olup, herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.



**Kaynaklar**

- [1] R. C. Dugan, *Electrical Power Systems Quality*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
- [2] "Reducing technical loss in the distribution grid. 201". Retrieved March 25, 2019. [Online] Available: <https://www.gridcure.com/reducing-technical-loss-in-the-distribution-grid/>
- [3] G. Turan, *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*, 2nd ed, CRC Pres, 2014.
- [4] A. Merlin, H. Back, "Search for a minimum-loss operating spanning tree reconfiguration in an urban power distribution", *Proceedings of the 5th Power System Conference*, Cambridge, U.K., Sept., 1975, DOI: 77A0175768.
- [5] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1492-1498, 1989, DOI: 10.1109/61.25637.
- [6] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 3, no. 3, pp. 1217-1223, 1988, DOI: 10.1109/61.193906.
- [7] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss loss reduction and load balancing", *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, 1989, DOI: 10.1109/61.25627
- [8] S. K. Goswami, S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1484-1491, 1992, DOI: 10.1109/61.141868
- [9] K. Nara, A. Shiose, M. Kiagawa, T. Ishihara, "Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration", *IEEE Trans. on Power System*, vol. 7, no. 3, pp. 1044- 1051, 1992, DOI: 10.1109/59.207317
- [10] J. Z. Zhu, "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm". *Electric Power Systems Research*, vol 62, no. 1, pp. 37-42, 2002, DOI: 10.1016/S0378-7796(02)00041-X
- [11] D. I. Duan, X. D. Ling, X. Y. Wu, B. Zhong, "Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on an enhanced genetic algorithm". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 88-95, 2015, DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.07.036
- [12] M. Abdelaziz, "Distribution network reconfiguration using a genetic algorithm with varying population size". *Electric Power Systems Research*, vol. 142, pp. 9-11, 2017.
- [13] D. Das, "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, no. 6-7, pp. 361-367, 2008, DOI: 10.1016/j.ijepes.2007.08.004
- [14] S. Das, D. Das, A. Patra, "Reconfiguration of distribution networks with optimal placement of distributed generations in the presence of remote voltage controlled bus". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 772-781, 2017, DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.055
- [15] V. Jayaraman, A. Ross, "A simulated annealing methodology to distribution network design and management". *European Journal of Operational Research*, vol. 144, no. 3, pp. 629-645, 2003, DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00153-4
- [16] H. D. Chiang, R. Jean-Jumeau, "Optimal network reconfigurations in distribution systems. II. Solution algorithms and numerical results". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1568-1574, 1990, DOI: 10.1109/61.58002
- [17] V. Parada, J. A. Ferland, M. Arias, K. Daniels, "Optimization of electrical distribution feeders using simulated annealing". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1135-1141, 2004, DOI: 10.1109/TPWRD.2004.829091
- [18] *Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği*, Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu, T.C. Resmi Gazete, 25001, 22 Ocak 2003.
- [19] *Enerji Üretimi*, MEGEP, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011.
- [20] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, S. V. I. Narasimham., "Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 317-325, 2013, DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- [21] T. T. Nguyen, A. V. Truong, T. A. Phung, "A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 801-815, 2016, DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.12.030
- [22] J. Kennedy, "Particle swarm optimization", *Encyclopedia of Machine Learning*, pp. 760-766, 2010.
- [23] Y. Del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez, R. G. Harley, "Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(2), 171-195, 2008, DOI: 10.1109/TEVC.2007.896686
- [24] C. Wang, Y. Liu, Y. Zhao, "Application of dynamic neighborhood small population particle swarm optimization for reconfiguration of shipboard power system", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(4), 1255-1262, 2013.:
- [25] A. Çakır, "Dağıtım Sistemlerinin PSO Kullanılarak

- Yeniden Yapılandırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Turkey, 2019.
- [26] X. Jin, J. Zhao, Y. Sun, K. Li, B. Zhang. “Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization”. *International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004*, vol. 1, pp. 507-510. IEEE, November, 2004, DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460047
- [27] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, D. Gan, "Matpower. PSERC". 1997. [Online] Available: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>.
- [28] A. M. Imran, M. Kowsalya, D. Kothar, “A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution Networks”. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 461-472, 2014, DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.06.011.
- [29] H. Hamour, S. Kamel, H. Abdel-mawgoud, A. Korashy, “Distribution network reconfiguration using grasshopper optimization algorithm for power loss minimization”. *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1-5, IEEE, September, 2018, DOI: 10.1109/SEST.2018.8495659.

**Ek A**

33 baralı test sistemi hat ve yük değerleri

| Hat no | İlk bara | Son bara | Hat parametreleri |                | Son baradaki yük    |                       |
|--------|----------|----------|-------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
|        |          |          | R ( $\Omega$ )    | X ( $\Omega$ ) | P <sub>L</sub> (kW) | Q <sub>L</sub> (kVAr) |
| 1      | 1        | 2        | 0.0922            | 0.0477         | 100                 | 60                    |
| 2      | 2        | 3        | 0.4930            | 0.2511         | 90                  | 40                    |
| 3      | 3        | 4        | 0.3660            | 0.1840         | 120                 | 80                    |
| 4      | 4        | 5        | 0.3811            | 0.1941         | 60                  | 30                    |
| 5      | 5        | 6        | 0.8190            | 0.0700         | 60                  | 20                    |
| 6      | 6        | 7        | 0.1872            | 0.6188         | 200                 | 100                   |
| 7      | 7        | 8        | 1.7114            | 1.2351         | 200                 | 100                   |
| 8      | 8        | 9        | 1.0300            | 0.7400         | 60                  | 20                    |
| 9      | 9        | 10       | 1.0400            | 0.7400         | 60                  | 20                    |
| 10     | 10       | 11       | 0.1966            | 0.0650         | 45                  | 30                    |
| 11     | 11       | 12       | 0.3744            | 0.1238         | 60                  | 35                    |
| 12     | 12       | 13       | 1.4680            | 1.1550         | 60                  | 35                    |
| 13     | 13       | 14       | 0.5416            | 0.7129         | 120                 | 80                    |
| 14     | 14       | 15       | 0.5910            | 0.5260         | 60                  | 10                    |
| 15     | 15       | 16       | 0.7463            | 0.5450         | 60                  | 20                    |
| 16     | 16       | 17       | 1.2890            | 1.7210         | 60                  | 20                    |
| 17     | 17       | 18       | 0.7320            | 0.5740         | 90                  | 40                    |
| 18     | 2        | 19       | 0.1640            | 0.1565         | 90                  | 40                    |
| 19     | 19       | 20       | 1.5042            | 1.3554         | 90                  | 40                    |
| 20     | 20       | 21       | 0.4095            | 0.4784         | 90                  | 40                    |
| 21     | 21       | 22       | 0.7089            | 0.9373         | 90                  | 40                    |
| 22     | 3        | 23       | 0.4512            | 0.3083         | 90                  | 50                    |
| 23     | 23       | 24       | 0.8980            | 0.7091         | 420                 | 200                   |
| 24     | 24       | 25       | 0.8960            | 0.7011         | 420                 | 200                   |
| 25     | 6        | 26       | 0.2030            | 0.1034         | 60                  | 25                    |
| 26     | 26       | 27       | 0.2842            | 0.1447         | 60                  | 25                    |
| 27     | 27       | 28       | 1.0590            | 0.9337         | 60                  | 20                    |
| 28     | 28       | 29       | 0.8042            | 0.7006         | 120                 | 70                    |
| 29     | 29       | 30       | 0.5075            | 0.2585         | 200                 | 600                   |
| 30     | 30       | 31       | 0.9744            | 0.9630         | 150                 | 70                    |
| 31     | 31       | 32       | 0.3105            | 0.3619         | 210                 | 100                   |
| 32     | 32       | 33       | 0.3410            | 0.5302         | 60                  | 40                    |
| 33*    | 21       | 8        | 2.0000            | 2.0000         |                     |                       |
| 34*    | 9        | 15       | 2.0000            | 2.0000         |                     |                       |
| 35*    | 12       | 22       | 2.0000            | 2.0000         |                     |                       |
| 36*    | 18       | 33       | 0.5000            | 0.5000         |                     |                       |
| 37*    | 25       | 29       | 0.5000            | 0.5000         |                     |                       |

\*: bağlantı hatları

**Ek B**

69 baralı test sistemi hat ve yük değerleri

| Hat no | İlk bara | Son bara | Hat parametreleri |                | Son baradaki yük    |                       |
|--------|----------|----------|-------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
|        |          |          | R ( $\Omega$ )    | X ( $\Omega$ ) | P <sub>L</sub> (kW) | Q <sub>L</sub> (kVAr) |
| 1      | 1        | 2        | 0.0005            | 0.0012         | 0                   | 0                     |
| 2      | 2        | 3        | 0.0005            | 0.0012         | 0                   | 0                     |
| 3      | 3        | 4        | 0.0015            | 0.0036         | 0                   | 0                     |
| 4      | 4        | 5        | 0.0251            | 0.0294         | 0                   | 0                     |
| 5      | 5        | 6        | 0.3660            | 0.1864         | 2.6                 | 2.2                   |
| 6      | 6        | 7        | 0.3811            | 0.1941         | 40.4                | 30                    |
| 7      | 7        | 8        | 0.0922            | 0.0470         | 75                  | 54                    |
| 8      | 8        | 9        | 0.0493            | 0.0251         | 30                  | 22                    |
| 9      | 9        | 10       | 0.8190            | 0.2707         | 28                  | 19                    |
| 10     | 10       | 11       | 0.1872            | 0.0619         | 145                 | 104                   |
| 11     | 11       | 12       | 0.7114            | 0.2351         | 145                 | 104                   |
| 12     | 12       | 13       | 1.0300            | 0.3400         | 8                   | 5                     |
| 13     | 13       | 14       | 1.0440            | 0.3450         | 8                   | 5.5                   |
| 14     | 14       | 15       | 1.0580            | 0.3496         | 0                   | 0                     |
| 15     | 15       | 16       | 0.1966            | 0.0650         | 45.5                | 30                    |
| 16     | 16       | 17       | 0.3744            | 0.1238         | 60                  | 35                    |
| 17     | 17       | 18       | 0.0047            | 0.0016         | 60                  | 35                    |
| 18     | 18       | 19       | 0.3276            | 0.1083         | 0                   | 0                     |
| 19     | 19       | 20       | 0.2106            | 0.0690         | 1                   | 0.6                   |
| 20     | 20       | 21       | 0.3416            | 0.1129         | 114                 | 81                    |
| 21     | 21       | 22       | 0.0140            | 0.0046         | 5                   | 3.5                   |
| 22     | 22       | 23       | 0.1591            | 0.0526         | 0                   | 0                     |
| 23     | 23       | 24       | 0.3463            | 0.1145         | 28                  | 20                    |
| 24     | 24       | 25       | 0.7488            | 0.2475         | 0                   | 0                     |
| 25     | 25       | 26       | 0.3089            | 0.1021         | 14                  | 10                    |
| 26     | 26       | 27       | 0.1732            | 0.0572         | 14                  | 10                    |
| 27     | 3        | 28       | 0.0044            | 0.0108         | 26                  | 18.6                  |
| 28     | 28       | 29       | 0.0640            | 0.1565         | 26                  | 18.6                  |
| 29     | 29       | 30       | 0.3978            | 0.1315         | 0                   | 0                     |
| 30     | 30       | 31       | 0.0702            | 0.0232         | 0                   | 0                     |
| 31     | 31       | 32       | 0.3510            | 0.1160         | 0                   | 0                     |
| 32     | 32       | 33       | 0.8390            | 0.2816         | 14                  | 10                    |
| 33     | 33       | 34       | 1.7080            | 0.5646         | 9.5                 | 14                    |
| 34     | 34       | 35       | 1.4740            | 0.4873         | 6                   | 4                     |
| 35     | 3        | 36       | 0.0044            | 0.0108         | 26                  | 18.55                 |
| 36     | 36       | 37       | 0.0640            | 0.1565         | 26                  | 18.55                 |
| 37     | 37       | 38       | 0.1053            | 0.1230         | 0                   | 0                     |
| 38     | 38       | 39       | 0.0304            | 0.0355         | 24                  | 17                    |
| 39     | 39       | 40       | 0.0018            | 0.0021         | 24                  | 17                    |
| 40     | 40       | 41       | 0.7283            | 0.8509         | 1.2                 | 1                     |
| 41     | 41       | 42       | 0.3100            | 0.3623         | 0                   | 0                     |
| 42     | 42       | 43       | 0.0410            | 0.0478         | 6                   | 4.3                   |
| 43     | 43       | 44       | 0.0092            | 0.0116         | 0                   | 0                     |

|     |    |    |        |        |       |       |
|-----|----|----|--------|--------|-------|-------|
| 44  | 44 | 45 | 0.1089 | 0.1373 | 39.22 | 26.3  |
| 45  | 45 | 46 | 0.0009 | 0.0012 | 39.22 | 26.3  |
| 46  | 46 | 47 | 0.0034 | 0.0084 | 0     | 0     |
| 47  | 47 | 48 | 0.0851 | 0.2083 | 79    | 56.4  |
| 48  | 48 | 49 | 0.2898 | 0.7091 | 384.7 | 274.5 |
| 49  | 49 | 50 | 0.0822 | 0.2011 | 384.7 | 274.5 |
| 50  | 50 | 51 | 0.0928 | 0.0473 | 40.5  | 28.3  |
| 51  | 51 | 52 | 0.3319 | 0.1114 | 3.6   | 2.7   |
| 52  | 52 | 53 | 0.1740 | 0.0886 | 4.35  | 3.5   |
| 53  | 53 | 54 | 0.2030 | 0.1034 | 26.4  | 19    |
| 54  | 54 | 55 | 0.2842 | 0.1447 | 24    | 17.2  |
| 55  | 55 | 56 | 0.2813 | 0.1433 | 0     | 0     |
| 56  | 56 | 57 | 1.5900 | 0.5337 | 0     | 0     |
| 57  | 57 | 58 | 0.7837 | 0.2630 | 0     | 0     |
| 58  | 58 | 59 | 0.3042 | 0.1006 | 100   | 72    |
| 59  | 59 | 60 | 0.3861 | 0.1172 | 0     | 0     |
| 60  | 60 | 61 | 0.5075 | 0.2585 | 1244  | 888   |
| 61  | 61 | 62 | 0.0974 | 0.0496 | 32    | 23    |
| 62  | 62 | 63 | 0.1450 | 0.0738 | 0     | 0     |
| 63  | 63 | 64 | 0.7105 | 0.3619 | 227   | 162   |
| 64  | 64 | 65 | 1.0410 | 0.5302 | 59    | 42    |
| 65  | 11 | 66 | 0.2012 | 0.0611 | 18    | 13    |
| 66  | 66 | 67 | 0.0047 | 0.0014 | 18    | 13    |
| 67  | 12 | 68 | 0.7394 | 0.2444 | 28    | 20    |
| 68  | 68 | 69 | 0.0047 | 0.0016 | 28    | 20    |
| 69* | 11 | 43 | 0.5000 | 0.5000 |       |       |
| 70* | 13 | 21 | 0.5000 | 0.5000 |       |       |
| 71* | 15 | 46 | 1.0000 | 1.0000 |       |       |
| 72* | 50 | 59 | 2.0000 | 2.0000 |       |       |
| 73* | 27 | 65 | 1.0000 | 1.0000 |       |       |

\*: bağlantı hatları