



## THEVENİN TEMELLİ GERİLİM KARARLILIK İNDEKSİ KULLANILARAK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN YENİDEN YAPILANDIRILMASI

<sup>1</sup>Talha Enes GÜMÜŞ , <sup>2</sup>Selçuk EMİROĞLU , <sup>3</sup>Selim MERİÇ , <sup>4</sup>Mustafa TURAN 

<sup>1,2,4</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Araştırma ve Uygulama Merkezi, Sakarya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>tgumus@sakarya.edu.tr, <sup>2</sup>selcukemiroglu@sakarya.edu.tr, <sup>3</sup>smeric@sakarya.edu.tr,

<sup>4</sup>turan@sakarya.edu.tr

Geliş/Received: 25.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.07.2022

**ÖZ:** Dağıtım sistemleri elektrik enerjisinin son tüketiciye ulaştığı sistemler olduğundan, sistemlerin optimal çalışması büyük önem taşımaktadır. Dağıtım sistemlerinin maksimum fayda ile çalışabilmesi; sistemin yeniden yapılandırılması, dağıtık üretim (DÜ) tesislerinin optimal bağlantı noktaları ve boyutlarının belirlenmesi gibi amaçları olan bir optimizasyon problemini ortaya çıkarır. Bu problemin uygun çözümü şebeke kayıplarının azaltılması, gerilim profilinin iyileştirilmesi ve sistemin daha kararlı çalışması gibi faydaların maksimize edilmesinde çok önemli bir rol oynar. Bu amaçla problem; kayıpların azaltılması, gerilim profilinin iyileştirilmesi ve kararlılığın artırılması için çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak modellenmiştir. Gerilim kararlılığını arttırmak için Thevenin eşdeğer devre modeline dayalı bir gerilim kararlılık indeksi uyarlanmıştır. Oluşturulan denklemler cıvık mantar optimizasyon algoritması ile çözümlenerek, Radyal Dağıtım Sistemi (RDS) yeniden yapılandırılmış ve DÜ tesislerinin bağlantı noktaları ile boyutları belirlenmiştir. Önerilen yaklaşım IEEE 33 baralı test sistemine uygulanarak sistem kayıplarının azaldığı, sistemin bara gerilim değerlerinin arttığı ve sistemin daha kararlı hale geldiği doğrulanmıştır. Önerilen yaklaşım, farklı kararlılık indeksi kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmaları ile karşılaştırılmış ve sonuçların diğer yaklaşımlardan daha iyi çıktığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Dağıtık üretim (DÜ) tesisleri, cıvık mantar algoritması (SMA), Thevenin temelli gerilim kararlılık indeksi, Dağıtım sistemleri optimizasyonu, Optimal Dağıtık üretim yerleşimi ve boyutlandırılması

### Reconfiguration of Distribution Systems Using Thevenin Based Voltage Stability Index

**ABSTRACT:** The optimal operation of distribution systems is of great importance since the distribution systems are ended with consumers. It generates an optimization problem to determine the ideal distribution system reconfiguration, as well as the optimal location and size of distributed generation (DG) facilities so that distribution systems can benefit the most. The optimal solution of the problem plays a significant role in maximizing benefits such as reducing power losses, improving voltage profile, and more stable operation of the system. So, the problem is formulated as a multi-objective optimization problem to decrease power losses, improve voltage profile and increase stability. A voltage stability index based on Thevenin equivalent circuit model has been adapted to improve voltage stability. The multi-objective optimization problem has been solved by using the Slime Mould Optimization algorithm to obtain the optimal location and size of DGs along with the reconfiguration of the radial distribution system. The proposed approach has been tested on IEEE 33 bus test system. By applying the proposed approach to the IEEE 33 bus test system, it has been verified that the power losses are reduced, the voltage profile of the system is improved, and the system becomes more stable. The proposed approach has also been compared with several studies using different optimization techniques and stability indexes. The results show that

the proposed approach gives better results than the compared studies in terms of power loss, improvement of voltage profile, and stability.

**Keywords:** *Distributed Generations (DG), Slime mould algorithm (SMA), Thevenin-based voltage stability index, Distribution systems optimization, Optimal distributed generation placement and sizing*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik dağıtım sistemleri, elektrik enerjisinin son tüketiciye ulaştırılan sistemlerdir. İletim sistemleri ağ yapıda olmasına rağmen dağıtım sistemleri radyal olarak işletilir. Dağıtım sistemlerinde normalde açık ve normalde kapalı olmak üzere iki çeşit anahtarlama vardır. Sistemin radyal olarak çalıştırılabilmesi ve yeniden yapılandırılması mevcut anahtarların pozisyonları değiştirilerek yapılır (Syahputra ve diğ., 2016).

Dağıtım sisteminin yeniden yapılandırması belirli amaç fonksiyonları ve kısıtlar ile yapılır. Aktif güç kayıplarının azaltılması, gerilim dalgalanmalarının azaltılması, sistem kararlılığının artırılması ve bara gerilim değerlerinin belirli sınırlar içinde tutulması bunlardan bazılarıdır (Mishra ve diğ., 2017, Mahdavi ve diğ., 2021). Analitik çözüm yöntemlerinin, en iyi çözüme yakınsamayı küçük bir arama uzayıyla basit ve doğrusal optimizasyon problemlerini çözmede etkili olduğu bilinmektedir. Bazı çalışmalarda yeniden yapılandırma problemleri analitik çözüm yöntemleri kullanılarak çözülmüştür [4]. Fakat analitik çözüm yöntemleri lineer olmayan problemlerin çözümünde daha az verimli olduğundan (Khodr ve diğ., 2009), sezgisel yöntemler yeniden yapılandırma problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sezgisel yöntemler lineer olmayan problemlerin çözümünde hızlı olması, bulunan sonuçların yüksek doğrulukta olması ve kolay uygulanabilirliği nedenleri ile yeniden yapılandırma problemlerinin çözümünde sıkça kullanılmaktadır (Arun ve Aravindhababu 2009; McDermott ve diğ., 1999). Dağıtım sistemlerine yenilenebilir enerji kaynakları eklenmesi durumunda da belirli amaç fonksiyonları ve kısıtlar ile yeniden yapılandırma problemi sezgisel algoritmalar kullanılarak çözülmektedir (Imran ve diğ., 2014). Dağıtım sistemlerinde yeniden yapılandırma problemlerinde sistemin kararlılık durumu VSI (Ranjan, ve diğ., 2003) indeksi ile belirlenmiştir (Nguyen ve Truong 2015; Rawat ve Vadhera 2019).

Bu çalışmada dağıtım sistemlerinde yeniden yapılandırma problemi SMA optimizasyon algoritması kullanılarak çözülmüştür. Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olarak aktif güç kayıplarının azaltılması, bara gerilim profilinin iyileştirilmesi ve sistemin kararlılığın iyileştirilmesi için Thevenin eşdeğer devresi temelli gerilim kararlılık indeksi kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım IEEE 33 baralı test sistemine uygulanmıştır. Önerilen yaklaşımın sistemin aktif güç kayıplarını azalttığı, gerilim profilini iyileştirdiği ve sistemin daha kararlı hale getirdiği görülmüştür. Önerilen yaklaşım ile elde edilen sonuçların farklı optimizasyon teknikleri ve farklı gerilim kararlılık indeksi kullanılarak elde edilen sonuçlara göre daha iyi olduğu görülmüştür.

## Cıvık Mantar Algoritması (Slime Mould Algorithm - SMA)

(Li ve diğ., 2020)'de önerilen cıvık mantar algoritması (SMA), dağıtım sistemlerinde yeniden yapılandırma ile dağıtık üretimlerin (DÜ) boyutlandırma ve bağlantı yerinin bulunarak kayıpları ve gerilim profilini optimize etmek için bu çalışmada kullanılan yeni bir meta-sezgisel yöntemdir.

Doğadaki cıvık mantarların hava kokuları yardımıyla besine erişmesine dayalı cıvık mantar algoritması (SMA) yeni bir stokastik optimizasyon algoritmasıdır (Abid ve diğ., 2022). Cıvık mantarlar genel olarak Soğuk ve nemli bölgelerde yaşayan Physarum polycephalum adı verilen tek hücreli bir mantar türünün besin arama ve beslenme aşamalarından esinlenerek geliştirilmiştir.

Bu bölümde, SMA'nın temel prosedürü açıklanmıştır. Algoritma, cıvık mantarın yiyecek arama işlemi sırasında davranışsal ve morfolojik özellikleri-değişiklikleri simüle ederek çalışır (Li ve diğ., 2020).

Algoritmanın akış şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. SMA'nın ilk adımı, diğer meta-sezgisel optimizasyonlar gibi, rastgele bir popülasyon seti oluşturmaktır. Bu durum aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

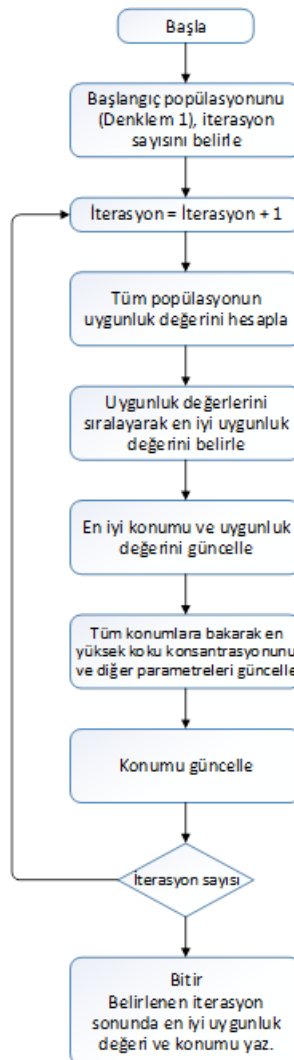
$$X = rand(UB - LB) + LB \quad (1)$$

burada LB ve UB, parametre setindeki her parametrenin alt ve üst sınırlarını belirtir ve *rand*, [0,1] arasındaki tek tip rasgele sayıları temsil eder. Sonraki adım, popülasyon setindeki her birey için uygunluk fonksiyon değerini hesaplamak ve başlangıç konumlarını güncellemektir.

$$S = Amaç(X)$$

$$Kokuİndeksi = Sırala(S) \quad (2)$$

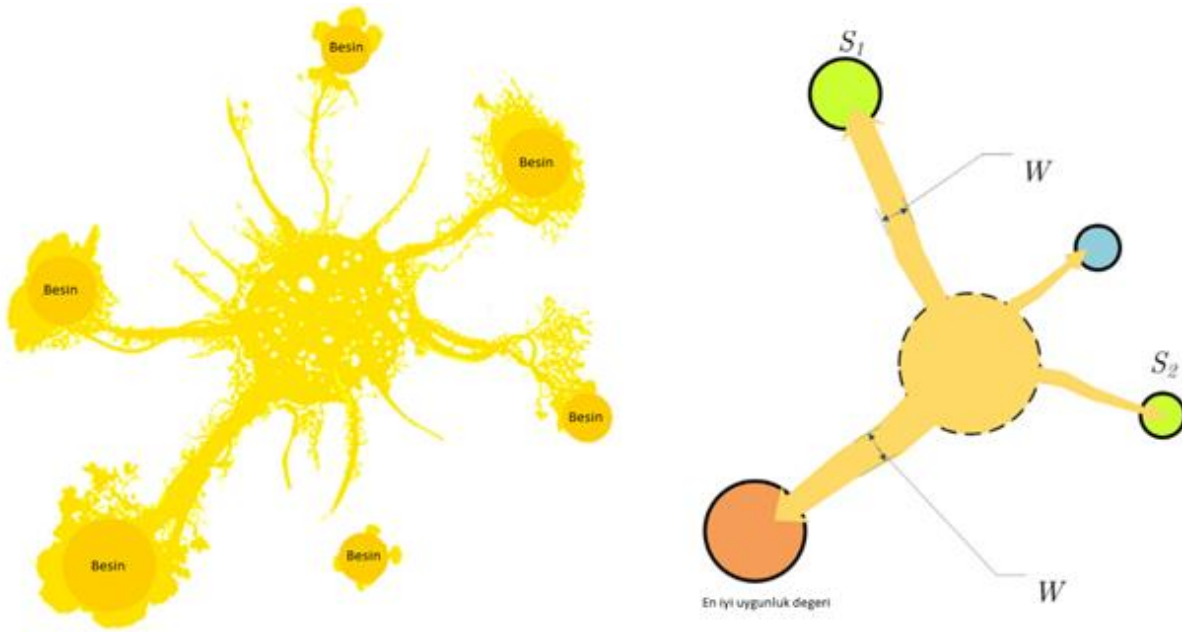
Şekil 2. de görüldüğü gibi bir damar bir besin kaynağına yaklaştığında, biyo-osilatörün damar boyunca sitoplazmik akışı artıran yayılan bir dalga (Nakagaki ve diğ., 2000) ürettiğini ve sitoplazma ne kadar hızlı akarsa damar o kadar kalınlaşmaktadır. Böylelikle Cıvık mantarlar, damarlardaki sitoplazmik akışı düzenlemek için biyolojik osilatörün yayılma dalgasına son derece bağımlıdır ve onları besin alımı için daha iyi bir konuma yerleştirir (Li ve diğ., 2020).



Şekil 1. Cıvık Mantar Algoritması

Figure 1. Slime Mold Algorithm

Cıvık mantarların damar genişliğindeki varyasyonları modelleyebilmek için, ince ayar parametreleri  $W$ ,  $v_b$  ve  $v_c$  değişiklikleri gerçekleştirmek için kullanılır.  $W$ , çeşitli gıdaların yakınında cıvık mantarın salınım hızını taklit ederek, onların daha kaliteli yiyecek bulduğunda yiyecekleri daha hızlı takip etmesine olanak tanır, dolayısıyla optimal yiyecek kaynaklarını keşfetmedeki verimliliğini artırır.



Şekil 2. Cıvık mantarın yiyecek arama morfolojisi ve algoritmada uygunluk değerinin elde edilmesi (Li ve diğ., 2020)

Figure 2. Foraging morphology of slime mold and obtaining the fitness value in the algorithm (Li et al. 2020)

Gıda yoğunluğu  $W$  aşağıdaki ifade ile gösterilir:

$$\vec{W}(Koku\text{indeksi}(j)) = \left\{ \begin{array}{l} 1 + rand * \log\left(\frac{bF-S(j)}{bF-wF} + 1\right) \\ 1 + rand * \log\left(\frac{bF-S(j)}{bF-wF} + 1\right) \end{array} \right\} Koşul\ Değer \quad (3)$$

Koşul üst yarıda yer alan bireyleri belirtir.  $bF$  ve  $wF$  sırasıyla mevcut popülasyonda en iyi uygunluğu ve en kötü uygunluk değerini gösterir.

Cıvık mantarların besine yaklaşma davranışını matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_t^b + vb \cdot (W \cdot X_t^A - X_t^B) & rand < p \\ vc \cdot X_t & rand \geq p \end{cases} \quad (4)$$

burada  $t$ , parametresi mevcut iterasyonu temsil eder,  $X_t^b$  optimal bireyi- şimdiye kadarki en yüksek koku konsantrasyonuna sahip olan bireyi-yeri ifade eder.  $X_t^A$  ve  $X_t^B$ ,  $t$ . iterasyonda popülasyondan rastgele seçilen iki bireydir.  $vb$  ise  $-a$  ile  $a$  aralığındaki bir parametredir.  $vc$ , 1'den 0'a azalan bir değişkendir.  $W$ , cıvık mantarın ağırlığını gösterir.  $p$ , aşağıdaki şekilde hesaplanan bir değişkendir.

$$p = \tanh|S(j) - DF|, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

burada  $S(j)$ ,  $X$ 'in uygunluk fonksiyonu değeridir.  $n$ , popülasyon sayısıdır.  $DF$  şu ana kadarki en iyi uygunluk fonksiyonu değeridir.  $a$  için formül aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} vb &= [-a, a] \\ a &= artanh\left(-\frac{t}{t_{max}} + 1\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Burada  $t$  mevcut iterasyon,  $t_{max}$  maksimum iterasyon sayısıdır.

Koşul yiyecek kalitesine göre arama örüntüsünü ayarlamak için cıvık mantarı simüle eder. Besin konsantrasyonu yeterli olduğunda, bölgeye yakın ağırlık daha fazladır; gıda konsantrasyonu düşük olduğunda, bölgenin ağırlığı azalacaktır, bu nedenle diğer bölgeleri keşfetmeye yönelecektir. Böylelikle cıvık mantar, gıda kaynağının kalitesine göre dinamik olarak daha iyi bir gıda kaynağı seçecektir, bu da algoritmada en uygun çözümü arayan cıvık mantara eşdeğerdir (Abid ve diğ., 2022; Li ve diğ., 2020).

Yukarıdaki prensibe dayanarak, matematiksel formül cıvık mantar yerini güncellemek aşağıdaki gibidir:

$$\vec{X}^* = \begin{cases} rand \cdot (UB - LB) + LB & rand < z \\ X_t^b + vb \cdot (W \cdot X_t^A - X_t^B) & rand < p \\ vc \cdot X_t & rand \geq p \end{cases} \quad (7)$$

SMA temel olarak sırasıyla başlatma, uygunluk fonksiyonu değerlendirme ve sıralama, ağırlık güncelleme ve konum güncelleme bileşenlerinden oluşmaktadır.

#### DAĞITIM SİSTEMİ YENİDEN YAPILANDIRMA PROBLEMİNİN TANIMLANMASI (DEFINING THE DISTRIBUTION SYSTEM RECONFIGURATION PROBLEM)

Dağıtım sistemlerinde bulunan anahtarların pozisyon seçimi ve sisteme yenilenebilir enerji kaynakları eklenerek dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması mümkündür. Yeniden yapılandırma problemi belirli amaç ve kısıtlar kullanılarak optimizasyon algoritmaları ile çözülmektedir. Bu çalışmada sistem aktif güç kayıplarının ve bara gerilimlerinde oluşabilecek dalgalanmaların azaltılması, bara gerilim kararlılık indekslerinin maksimum yapılması çoklu amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Kısıt olarak sisteme eklenecek yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasitesinin mevcut yüklerden küçük olması ve bara gerilim değerlerinin belirli seviyede tutulması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırılması problemlerinde sistemin radyal işletilmesi şartı minimum örten ağaç algoritması (Li ve Chang, 2011) ile sağlanmıştır. En az güç kaybına sahip olan hatlar seçilerek sistem radyal hale getirildikten sonra optimizasyon problemi çözülmüştür.

#### Çoklu Amaç Fonksiyonu (Multi-objective Function)

DÜ'lerin dağıtım sistemine eklenmesi ana trafo merkezinden gelen akımın azalmasına neden olur, bu da güç kaybının azalmasını ve gerilim profilinin gelişmesini sağlar. Ama eklenen DÜ'lerin gücünün sürekli artması başta güç kaybının azalmasını sağlarken belirli bir güçten sonra artış devam ettiği takdirde güç kaybı azalmadan artış durumuna geçebilmektedir (Aliman, 2011). Bu sebeple bu çalışmada güç kaybını azaltan ( $f_1$ ), gerilim profilini iyileştiren ( $f_2$ ) ve gerilim kararlılık indeksini ( $f_3$ ) iyileştiren çoklu amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Üç adet DÜ kaynağının boyutu sürekli değişken ve bağlantı baraları tam sayılı değişken olmak üzere çoklu amaç fonksiyonu ile formüle edilen optimizasyon problemi aşağıda verilmiştir. Optimizasyon problemindeki tüm amaç fonksiyonları pu olarak alınmıştır.

$$\min F = \min(f_1 + f_2 + f_3) = \min \left\{ \frac{P_{Kayip}}{P_{KayipBaz}} + \sum_{k=1}^n (V_k - V_{Ref})^2 + \frac{1}{V_{SMV}} \right\} \quad (8)$$

Kısıtlar:

Güç akışı denge denklemleri eşitlik kısıtı olarak,

Baraların gerilim limitleri ve eklenen DÜ'lerin kapasitesi eşitsizlik kısıtı olarak dikkate alınmalıdır.

### Aktif güç kayıplarının minimize edilmesi (Minimization of active power losses)

Dağıtım sistemlerinde bulunan anahtarların pozisyon seçimi ve sisteme yenilenebilir enerji kaynakları eklenerek dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması mümkündür. Yeniden yapılandırma problemi belirli amaç ve kısıtlar kullanılarak optimizasyon algoritmaları ile çözülmektedir. Bu çalışmada birinci amaç fonksiyonu olarak sistem aktif güç kayıplarının azaltılması amaçlanmaktadır. Birinci amaç fonksiyonu Denklem 9'da verildiği gibi formüle edilir.

$$f_1 = \min\left(\frac{P_{Kayıp}}{P_{KayıpBaz}}\right) \quad (9)$$

Burada  $P_{Kayıp} = \sum_{k=1}^{N_{Line}} R_{Line} \cdot I_{Line}^2 \cdot P_{KayıpBaz}$  dağıtım sisteminin optimizasyon öncesi kayıp değeri olan 203 kW olarak alınmıştır.

### Bara gerilim dalgalanmalarının azaltılması (Reduction of bus voltage deviation)

İkinci amaç fonksiyonu olarak optimizasyon probleminin sonucunda sistem baralarına ait gerilim değerlerinin 1 pu 'e olabildiğince yakın olması amaçlanmaktadır. Bara gerilim değerlerinin iyileştirilmesi için Denklem 10 kullanılmıştır.

$$f_2 = \sum_{k=1}^n (V_k - V_{Ref})^2 \quad (10)$$

Denklem 10 'da k bara numarasını  $V_{Ref}$  ise referans alınan bara gerilim değeri olan 1 pu 'dir.

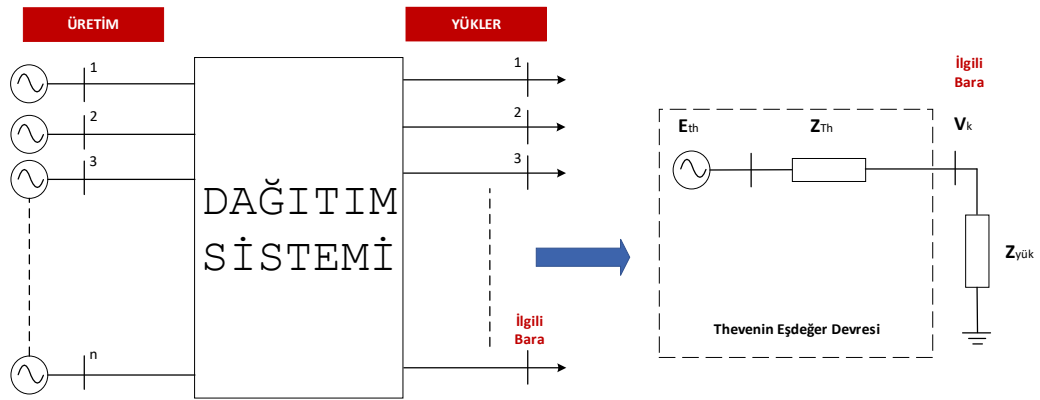
### Gerilim Kararlılık İndeks (VSMV) Değerinin İyileştirilmesi (Improvement of the Voltage Stability Index Value)

Üçüncü amaç fonksiyonu olarak dağıtım sisteminde sistemin tüm baralarındaki Thevenin Eşdeğer devresi temelli gerilim kararlılık indeks (VSM<sub>v</sub>) değerlerinin artırılması amaçlanmıştır. VSM<sub>v</sub> değerinin maksimize etmek için çoklu amaç fonksiyonu minimizasyon mantığı ile çalıştığından 3. amaç fonksiyonu Denklem 11 de verildiği gibi kullanılmıştır.

$$f_3 = \min\left(\frac{1}{VSM_v}\right) \quad (11)$$

### THEVENİN EŞDEĞER DEVRESİ TEMELLİ GERİLİM KARARLILIK İNDEKSİ (THEVENIN EQUIVALENT CIRCUIT BASED VOLTAGE STABILITY INDEX)

Güç sisteminin herhangi bir yük barasından görünen Thevenin eşdeğeri, baradan yapılan ölçümler ile kestirilmesi mümkündür (Hashmi ve diğ., 2015; Tobón ve diğ., 2014; Vu ve diğ., 1999; Yuan ve Li 2014). Şekil 3'de güç sistemine ilgili baradan bakıldığında görülen Thevenin eşdeğeri verilmiştir.



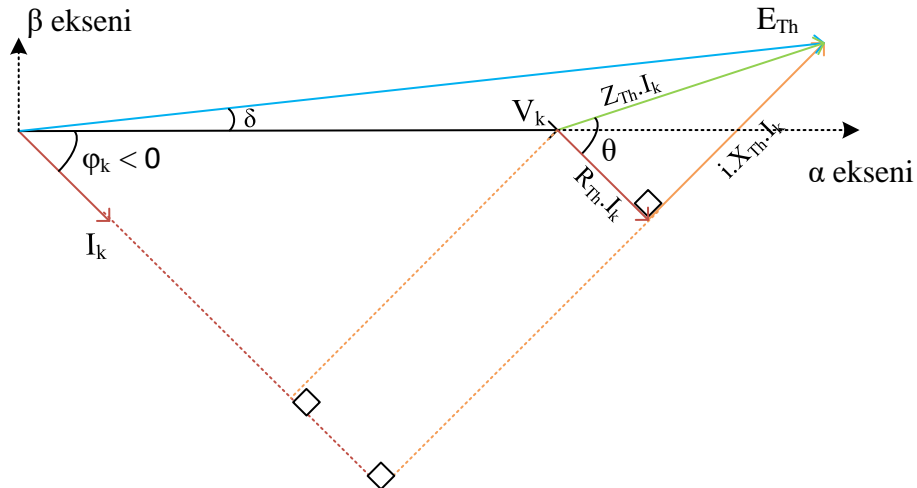
Şekil 3. Güç sistemi ve Thevenin eşdeğer devresi

Figure 3. Power system and Thevenin equivalent circuit

Şekil 3’de verilen Thevenin eşdeğerine ait Kirchhoff çevre denklemi yazılırsa;

$$E_{Th} \angle \delta = V_k + I_k \angle \varphi \cdot (R_{Th} + jX_{Th}) \quad (12)$$

Denklem 12 elde edilir. Denklem 12 ‘ye ait fazör diyagramı Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Thevenin Eşdeğer Devresi Fazör diyagramı

Figure 4. Thevenin Equivalent Circuit Phasor Diagram

Şekil 4’te verilen fazör diyagramından Thevenin geriliminin ( $E_{Th}$ )  $\alpha$  ve  $\beta$  eksenlerine iz düşümleri yazılırsa;

$$V_k + I_k \cdot R_{Th} \cdot \cos(\varphi_k) + I_k \cdot X_{Th} \cdot \sin(\varphi_k) - E_\alpha = 0 \quad (13)$$

$$I_k \cdot X_{Th} \cdot \cos(\varphi_k) - I_k \cdot R_{Th} \cdot \sin(\varphi_k) - E_\beta = 0 \quad (14)$$

Denklem 13 ve Denklem 14 elde edilir. Elde edilen denklemlerde  $E_\alpha$ ,  $E_\beta$ ,  $R_{Th}$  ve  $X_{Th}$  bilinmeyenler olup, iki denklem ile dört bilinmeyenlerin hesaplanması mümkün değildir. Çözüm için k. baradan ardışık iki ölçüm yapılarak aşağıda verilen denklem sistemi elde edilir.

$$\begin{aligned} V_{k1} + I_{k1} \cdot R_{Th} \cdot \cos(\varphi_{k1}) + I_{k1} \cdot X_{Th} \cdot \sin(\varphi_{k1}) - E_\alpha &= 0 \\ I_{k1} \cdot X_{Th} \cdot \cos(\varphi_{k1}) - I_{k1} \cdot R_{Th} \cdot \sin(\varphi_{k1}) - E_\beta &= 0 \\ V_{k2} + I_{k2} \cdot R_{Th} \cdot \cos(\varphi_{k2}) + I_{k2} \cdot X_{Th} \cdot \sin(\varphi_{k2}) - E_\alpha &= 0 \\ I_{k2} \cdot X_{Th} \cdot \cos(\varphi_{k2}) - I_{k1} \cdot R_{Th} \cdot \sin(\varphi_{k2}) - E_\beta &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Denklem 15 ‘teki bilinmeyenleri hesaplamak için matris formunda yazılırsa Denklem 16 elde edilir;

$$\begin{bmatrix} -I_1 \cos(\varphi_1) & I_1 \sin(\varphi_1) & 1 & 0 \\ -I_2 \cos(\varphi_2) & I_2 \sin(\varphi_2) & 1 & 0 \\ -I_1 \sin(\varphi_1) & -I_1 \cos(\varphi_1) & 0 & 1 \\ -I_2 \sin(\varphi_2) & -I_2 \cos(\varphi_2) & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{Th} \\ X_{Th} \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Denklem 16 ters matris yöntemi kullanılarak çözümlerse, bilinmeyen vektörü hesaplanır.

$$A \cdot x = b \quad ; \quad x = A^{-1} \cdot b \quad (17)$$

Denklem 17 ile hesaplanan parametreler kullanılarak Thevenin eşdeğer devresi parametreleri aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanır.

$$E_{Th} = \sqrt{E_\alpha^2 + E_\beta^2} \quad ; \quad \delta = \text{atan}\left(\frac{E_\alpha}{E_\beta}\right) \quad (18)$$

$$Z_{Th} = \sqrt{R_{Th}^2 + X_{Th}^2} \quad ; \quad \theta = \text{atan}\left(\frac{X_{Th}}{R_{Th}}\right) \quad (19)$$

Denklem 16 verilen matrisin hesaplanması neticesinde elde edilen  $E_{Th}$  değerinin gerçek değerine çok yakın olarak hesaplandığı fakat  $Z_{Th}$  değerinin gerçek değerden uzaklaştığı görülmüştür (Demircioğlu, 2006). Bu nedenle  $Z_{Th}$  değerini doğru elde edebilmek için ilave denklemlere ihtiyaç vardır. Şekil 4'de verilen fazör diyagramı yardımıyla  $E_{Th}$  denklemi yazılırsa;

$$E_{Th} = \sqrt{(V_k \cdot \cos(\varphi_k) + I_k \cdot Z_{Th} \cdot \cos(\theta))^2 + (V_k \cdot \sin(\varphi_k) + I_k \cdot Z_{Th} \cdot \sin(\theta))^2} \quad (20)$$

Denklem 20 elde edilir. Denklem 20'de bilinmeyen  $Z_{Th}$  ve  $\theta$  'dır. Dağıtım sistemlerinde hatların  $X/R$  oranı 1'den küçüktür (Alizadeh ve diğ., 2016; Tonso ve diğ., 2005). Bu çalışmada  $X/R$  oranı 1'den küçük alınmıştır. Dağıtım sistemleri için  $\theta$  değeri 1' den küçük alındıktan sonra Denklem 20'de tek bilinmeyen  $Z_{Th}$  kalır. Denklem 20 'nin çözümünden elde edilen pozitif kök  $Z_{Th}$ 'ı verir. Denklem 16'yı kullanarak maksimum %1 hata ile elde edilen  $E_{Th}$  Denklem 20'de yerine koyulduğunda gerçek  $Z_{Th}$  değeri bulunur (Demircioğlu, 2006).

$$Z_{Th} = \frac{\sqrt{4 \cdot E_{Th}^2 - 2 \cdot V_k^2 + 2 \cdot V_k^2 \cdot \cos(2\varphi_k - 2\theta) - 2 \cdot V_k \cdot \cos(\varphi_k - \theta)}}{2 \cdot I_k} \quad (21)$$

İlgili baradan görülen  $\delta$  açısı, Denklem 22 kullanılarak hesaplanır.

$$\delta = \text{acos}\left(\frac{E_{Th}^2 - I_k^2 \cdot Z_{Th}^2 + V_k^2}{2 \cdot E_{Th} \cdot V_k}\right) \quad (22)$$

Thevenin eşdeğer devresine dair bilinmeyenler hesaplandıktan sonra, maksimum güç teoremi yardımı ile baradan çekilebilecek maksimum güç hesaplanabilir. Yükün empedansı ( $Z_{Yük}$ ), Thevenin empedansına ( $Z_{Th}$ ) eşit olduğunda, ilgili baradan maksimum güç çekilir maksimum gücün çekildiği esnada ilgili baranın gerilim ve akım değerleri kritik sınır değerleridir. Kritik anda bara gerilimi (Sun, Zhou, and Li 2005);

$$V_{k,cr} = \frac{E_{Th}}{2 \cos \delta} \quad (23)$$



Denklem 23 ile hesaplanan kritik gerilim ve bara gerilimi kullanılarak baraya ait gerilim kararlılık indeksi gerilim kararlılık indeksi (Modarresi ve diğ., 2016))  $VSM_V$  Denklem 24 kullanılarak hesaplanabilir.

$$VSM_V = \frac{V_k - V_{k,kr}}{V_{k,kr}} \quad (24)$$

### Kısıtlar (Constraints)

Optimizasyon çözülürken amaç fonksiyonunun hesaplanması için güç akışı yapılması gerekmektedir. Bu yüzden güç akışı denklemleri optimizasyon problemine eşitlik kısıtı olarak eklenmelidir. Aktif ve reaktif güç akışı denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=0}^{N_b} V_j (\cos \theta_{ij} G_{ij} + \sin \theta_{ij} B_{ij}) = 0 \quad (25)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=0}^{N_b} V_j (\sin \theta_{ij} G_{ij} - \cos \theta_{ij} B_{ij}) = 0 \quad (26)$$

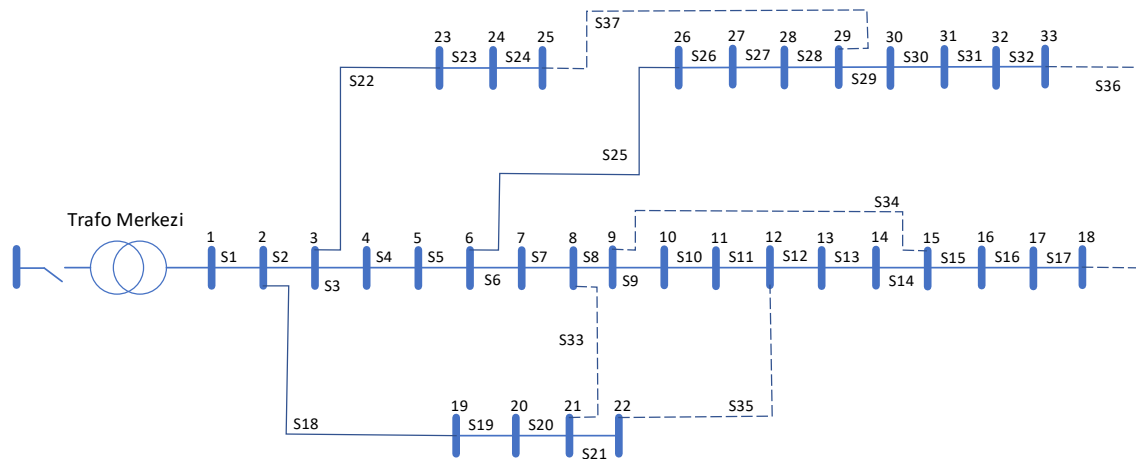
Burada  $i$ . baradaki yükün aktif ve reaktif güç değerleri  $P_{Li}$  ve  $Q_{Li}$ 'dir.  $P_{Gi}$  ve  $Q_{Gi}$  ise  $i$ . baradaki aktif ve reaktif güç üretim değerleridir.  $G_{ij}$  and  $B_{ij}$  ise admitans matrisi  $Y_{ij}'$  nin reel ve imajiner kısımlarıdır.

Optimizasyon probleminin çözümünde kısıt olarak bara gerilim değerlerinin belirlenen aralıklarda kalması ve dağıtım sistemine eklenecek yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam gücünün mevcut yüklerden küçük olması amaçlanmıştır. Denklem 27 ve 28' de eşitsizlik kısıtları verilmiştir.

$$V_{Min} \leq V_i \leq V_{Maks} \quad (27)$$

$$\sum P_{DÜ} \leq \sum P_{Yük} \quad (28)$$

$V_{Min}$  0.95 pu ve  $V_{Maks}$  1.05 pu olarak alınmıştır.  $P_{DÜ}$  sisteme eklenecek yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasitesini,  $P_{Yük}$  sistemin yüklerinin kapasitesini simgelemektedir.



Şekil 5. IEEE 33 baralı dağıtım sistemi

Figure 5. IEEE 33 bus distribution system

## BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Bu çalışmada önerilen yaklaşım IEEE 33 baralı dağıtım test sisteminde üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar farklı optimizasyon tekniği ve farklı gerilim kararlılık indeksi kullanılarak yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te IEEE 33 baralı test sistemine ait tüm hatlar görülmektedir. Kesikli çizgi ile gösterilen hatlar dağıtım sistemindeki yedek hatları (devrede olmayan) göstermektedir.

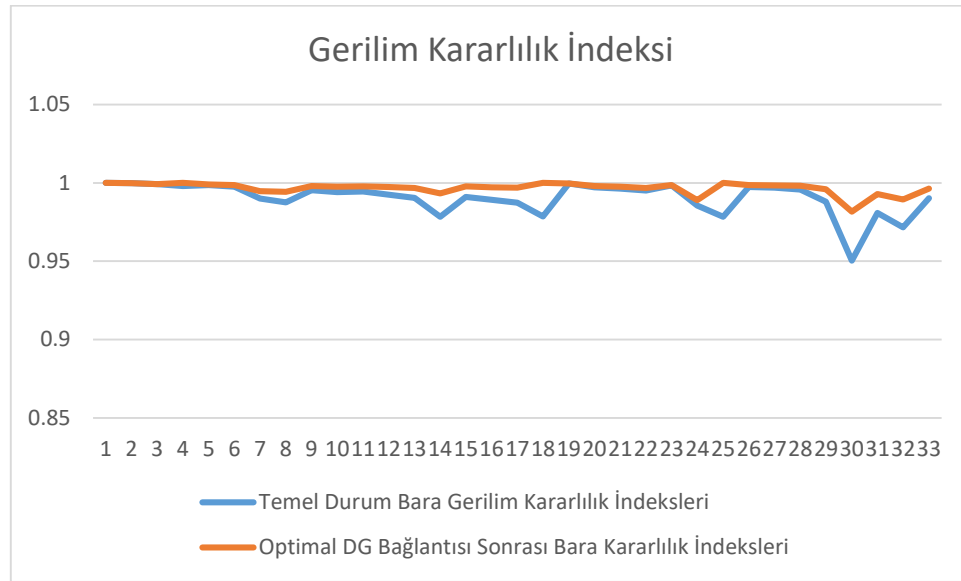
Önerilen yaklaşım ile IEEE 33 baralı dağıtım sisteminin yeniden yapılandırma ve yeni eklenecek dağıtık üretim (DÜ) tesislerinin boyut ve bağlantı noktalarının belirlenmesi problemleri aynı anda çözülmüş ve sonuçları diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Bazı dağıtım sistemleri için DÜ kapasitesi ve sayısının aktif güç kaybı ve gerilim profili üzerindeki etkisi araştırılmış (Rao 2013; Imran 2018). IEEE 33 baralı test sistemi için ekonomik açıdan da incelenerek 3 adet DÜ kullanmanın optimal güç kaybına yakın sonuç verdiği belirtilmiştir (Mahmoud 2017; Imran 2018). DÜ sayısı Çizelge 1'de karşılaştırma yapılan çalışmalarda da olduğu gibi 3 olarak belirlenmiştir. Çizelge 1'de optimizasyon öncesi durum, önerilen yaklaşım ve karşılaştırılan yöntem sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 1.** Yeniden yapılandırma için karşılaştırmalı sonuçlar

*Table 1. Comparative results for reconfiguration*

Yöntem	Açık Anahtarlar	Bara/DÜ (MW)	Kayıp			Amaç fonksiyonu
			Güç (kW)	V <sub>Min</sub> (pu)	V <sub>Maks</sub> (pu)	
Optimizasyon Öncesi Durum	s33,s34,s35 s36,s37	-	203	0,913	1,0	-
FWA(Fireworks Algorithm) (Imran ve diğ., 2014)	s7, s11, s14, s28, s32	18/0,5315 29/0,6158 32/0,5367	66,89	0,971	1,0	1- Aktif kayıp minimizasyonu 2- Bara gerilimlerinin iyileştirilmesi 3- Voltage Stability Index (VSI) maksimizasyonu
UVDA (Bayat, Bagheri, and Noroozian 2016)	s7, s10, s13, s27, s32	15/0,649 21/0,486 29/1,554	57,28	0,976	1,0	1- Aktif kayıp minimizasyonu 2- Bara gerilimlerinin iyileştirilmesi 3- Voltage Stability Index (VSI) maksimizasyonu
Önerilen Yaklaşım	s14, s20, s21, s28, s32	4/0,833 8/1,236 31/1,071	47,5	0,984	1,0	1- Aktif kayıp minimizasyonu 2- Bara gerilimlerinin iyileştirilmesi 3- Thevenin Temelli indeks (VSM <sub>v</sub> )maksimizasyonu

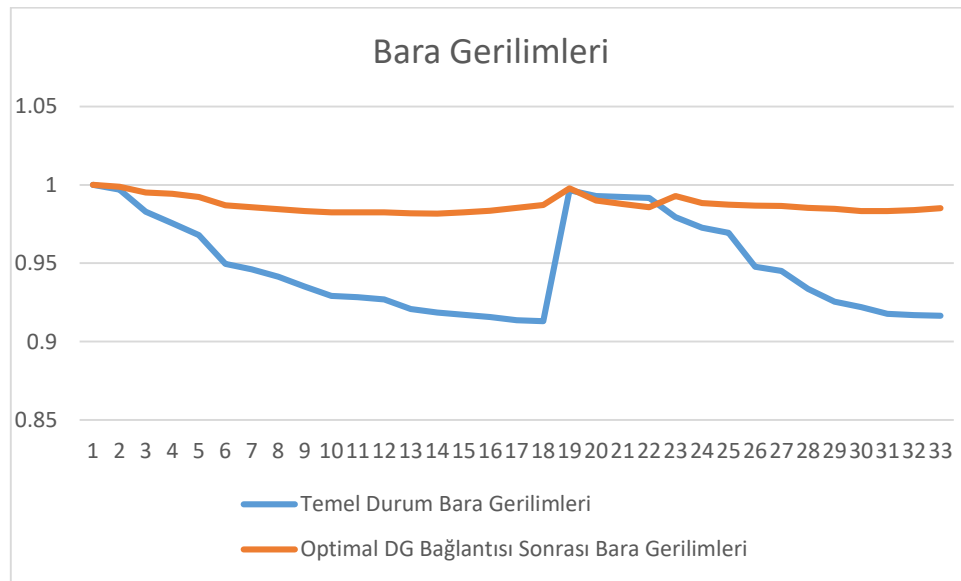
Çizelge 1'de optimizasyon öncesi durumdaki kayıplar 203 kW'tan önerilen yaklaşımın uygulanması ile 47,5 kW a düşerek %76,6 oranında azalmıştır. Ayrıca en düşük bara gerilim değeri 0,913 pu'dan 0,984 pu değerine yükselmiştir. Önerilen yaklaşımın Çizelge 1'de verilen diğer yaklaşımlara göre daha iyi sonuç verdiği, hem güç kaybı hem de gerilim seviyesinden görülmektedir.



Şekil 6. Temel durum ve önerilen yaklaşım sonrası bara gerilim kararlılık indeks değerleri

Figure 6. Bus voltage stability index values for base case and proposed method

Şekil 6'da önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra sistem baralarına ait gerilim kararlılık indeks değerleri verilmiştir. Sistem baralarına ait gerilim kararlılık indeks değerleri 1'e yaklaştıkça sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. Önerilen yaklaşımın uygulanması ile sistemin kararlılığının arttığı görülmektedir.

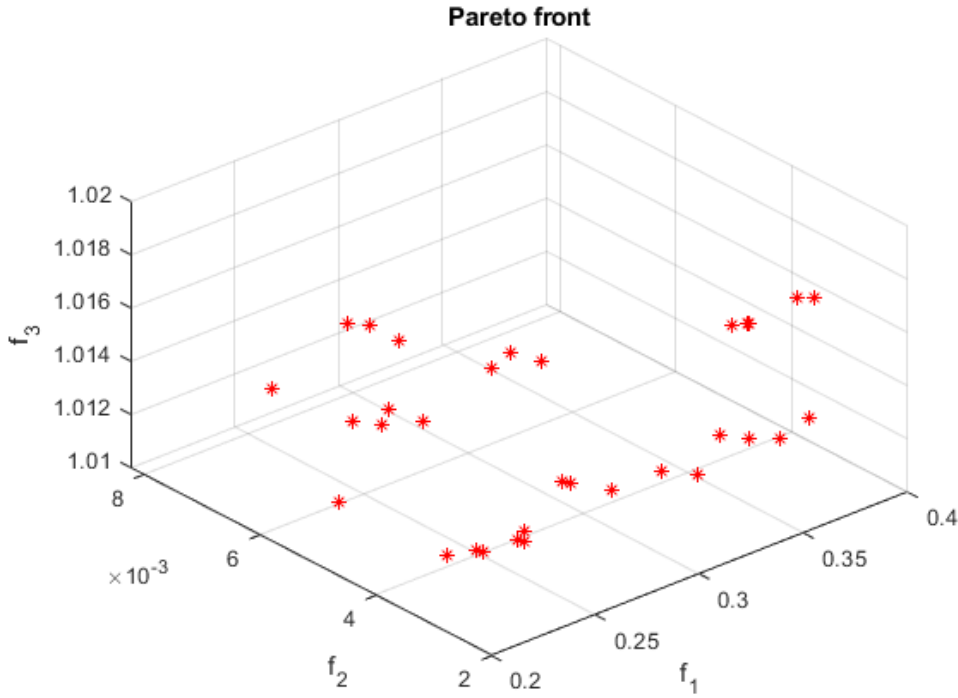


Şekil 7. Optimizasyon öncesi ve sonrası bara gerilim değerleri

Figure 7. Bus voltage profile for base case and proposed method

Şekil 7'de optimizasyon öncesi ve sonrasına ait bara gerilim değerleri verilmiştir. Optimizasyon sonrası bara gerilim değerlerinin 1 pu 'e yaklaştığı ve optimizasyon öncesi duruma göre gerilim dalgalanmalarının azaldığı ve limitler içinde olduğu görülmektedir.

Her amaç fonksiyonunun ağırlığı karşılaştırma yapılan çalışmalarda olduğu gibi aynı ve bir olarak alınmıştır. Eşit ve bir olan ağırlık değerleri ile elde edilen üç amaç fonksiyonunun pareto çözümleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Pareto front grafiği  
Figure 8. Pareto front Graph

## SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırması, DÜ tesislerin optimal yerleşimi ve boyutlandırılması problemi aynı anda ele alınarak SMO algoritması kullanılarak çözülmüştür. Önerilen yaklaşımın dağıtım sisteminin güç kayıplarını ve bara gerilim dalgalanmalarını azalttığı görülmüştür. Ayrıca önerilen yaklaşımda Thevenin temelli kararlılık indeksi kullanılarak farklı kararlılık indeksi kullanan yaklaşımlara göre dağıtım sisteminin daha kararlı çalışması sağlanmıştır. Dağıtım sistemi bara gerilim değerlerinin optimizasyon öncesi duruma göre daha yüksek değerler aldığı benzetim çalışması sonucunda görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan DÜ tesislerinin güç faktörü 1 alınmıştır. Çalışmanın sonraki aşamalarında farklı güç faktörüne sahip DÜ tesisleri ve farklı optimizasyon teknikleri kullanılarak problemin çözülmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdelkader, Mohamed A., Zeinab H. Osman, and Mostafa A. Elshahed. 2021. "New Analytical Approach for Simultaneous Feeder Reconfiguration and DG Hosting Allocation in Radial Distribution Networks." *Ain Shams Engineering Journal* 12(2): 1823–37. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.024>.
- Abid, Md Shadman, Hasan Jamil Apon, Ashik Ahmed, and Khandaker Adil Morshed. 2022. "Chaotic Slime Mould Optimization Algorithm for Optimal Load-Shedding in Distribution System." *Ain Shams Engineering Journal* 13(4): 101659. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101659>.
- Alizadeh, Seyed Morteza, Cagil Ozansoy, and Tansu Alpcan. 2016. "The Impact of X/R Ratio on Voltage Stability in a Distribution Network Penetrated by Wind Farms." *Proceedings of the 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2016*.
- Arun, M., and P. Aravindhababu. 2009. "A New Reconfiguration Scheme for Voltage Stability Enhancement of Radial Distribution Systems." *Energy Conversion and Management* 50(9): 2148–51.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.022>.
- Bayat, A., A. Bagheri, and R. Noroozian. 2016. "Optimal Siting and Sizing of Distributed Generation Accompanied by Reconfiguration of Distribution Networks for Maximum Loss Reduction by Using a New UVDA-Based Heuristic Method." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 77: 360–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.039>.
- Demircioğlu, S., 2006, *Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Sınırlarının Yerel Bara Parametreleri Kullanılarak Gerçek Zamanlı Değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Georgilakis, Pavlos S., and Nikos D. Hatziargyriou. 2013. "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research." *IEEE Transactions on Power Systems* 28(3): 3420–28.
- Hashmi, Md Umar, Rahul Choudhary, and Jayesh G. Priolkar. 2015. "Online Thevenin Equivalent Parameter Estimation Using Nonlinear and Linear Recursive Least Square Algorithm." *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, ICECCT 2015* (July).
- Imran Ahmad Quadri, S. Bhowmick, D. Joshi. 2018 "A comprehensive technique for optimal allocation of distributed energy resources in radial distribution systems." *Applied Energy*, 211; 1245-1260.
- Khodr, H M, J. Martinez-Crespo, M A Matos, and J Pereira. 2009. "Distribution Systems Reconfiguration Based on OPF Using Benders Decomposition." *IEEE Transactions on Power Delivery* 24(4): 2166–76. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5235762/>.
- Li Shimin, Huiling Chen, Mingjing Wang, Ali Asghar Heidari, Seyedali Mirjalili. 2020. "Slime Mould Algorithm: A New Method for Stochastic Optimization." *Future Generation Computer Systems* 111: 300–323.
- Mahdavi, Meisam, Hassan Haes Alhelou, Nikos D. Hatziargyriou, and Francisco Jurado. 2021. "Reconfiguration of Electric Power Distribution Systems: Comprehensive Review and Classification." *IEEE Access* 9: 118502–27.
- Mahmoud Pesaran H.A, Phung Dang Huy, Vigna K. Ramachandaramurthy. 2017. "A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75: 293-312
- McDermott, T. E., I. Drezga, and R. P. Broadwater. 1999. "A Heuristic Nonlinear Constructive Method for Distribution System Reconfiguration." *IEEE Transactions on Power Systems* 14(2): 478–83.
- Mishra, Sivkumar, Debapriya Das, and Subrata Paul. 2017. "A Comprehensive Review on Power Distribution Network Reconfiguration." *Energy Systems* 8(2): 227–84.
- Modarresi, Javad, Eskandar Gholipour, and Amin Khodabakhshian. 2016. "A Comprehensive Review of the Voltage Stability Indices." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63: 1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.010>.
- Mohamed Imran, A., M. Kowsalya, and D. P. Kothari. 2014. "A Novel Integration Technique for Optimal Network Reconfiguration and Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 63: 461–72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.011>.
- Nakagaki, Toshiyuki, Hiroyasu Yamada, and Tetsuo Ueda. 2000. "Interaction between Cell Shape and Contraction Pattern in the Physarum Plasmodium." *Biophysical Chemistry* 84(3).
- Nguyen, Thuan Thanh, and Anh Viet Truong. 2015. "Distribution Network Reconfiguration for Power Loss Minimization and Voltage Profile Improvement Using Cuckoo Search Algorithm." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 68: 233–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.075>.
- Ranjan, R., B. Venkatesh, and D. Das. 2003. "Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks." *Electric Power Components and Systems* 31(5): 501–11.
- O. Aliman, I. Musirin, M. M. Othman and M. H. Sulaiman, "Heuristic based placement technique for distributed generation," 2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference, 2011, pp. 83-87, doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970454.
- Rao R. S., Ravindra, K., K. Satish and Narasimham, S. V. L., 2013. "Power Loss Minimization in

- Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power Systems* 28(1): 317-325. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- Rawat, Mahiraj Singh, and Shelly Vadhera. 2019. "Heuristic Optimization Techniques for Voltage Stability Enhancement of Radial Distribution Network with Simultaneous Consideration of Network Reconfiguration and DG Sizing and Allocations." *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* 27(1): 330-45.
- Sun, Huadong, Xiaoxin Zhou, and Ruomei Li. 2005. "Accuracy Analysis of Static Voltage Stability Indices Based on Power Flow Model." *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference* 2005: 1-7.
- Syahputra, Ramadoni, Indah Soesanti, and Mochamad Ashari. 2016. "Performance Enhancement of Distribution Network with Dg Integration Using Modified PSO Algorithm." *Journal of Electrical Systems* 12(1): 1-19.
- Tobón V., Jorge Esteban, Rosa E Correa Gutiérrez, and Juan M. Ramirez. 2014. "27-Voltage Collapse Detection Based on Local Measurements." *Electric Power Systems Research* 107: 77-84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2013.09.013>.
- Tonso, Matteo, Johan Morren, Sjoerd W.H. De Haan, and J. A. Ferreira. 2005. "Variable Inductor for Voltage Control in Distribution Networks." *2005 European Conference on Power Electronics and Applications* 2005.
- Vu, Khoi, M.M. Begovic, D. Novosel, and M.M. Saha. 1999. "Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin." *IEEE Transactions on Power Systems* 14(3): 1029-35. <http://ieeexplore.ieee.org/document/780916/>.
- Yuan, Haoyu, and Fangxing Li. 2014. "A Comparative Study of Measurement-Based Thevenin Equivalents Identification Methods." *2014 North American Power Symposium, NAPS 2014*
- Y. Li and X. Chang, "A MST-based and new GA supported distribution network planning," 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 2011, pp. 2534-2538, doi: 10.1109/MEC.2011.6026009.