

## Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı Parametrelerinin Uygunluk Mesafe Dengesi Tabanlı Parçacık Sürü Optimizasyonu Kullanılarak Belirlenmesi

### Determination of Power System Stabilizer Parameters Using Fitness Distance Balance Based Particle Swarm Optimization

<sup>1</sup>Enes KAYMAZ , <sup>2</sup>Uğur GÜVENÇ , <sup>3</sup>M. Kenan DÖŞOĞLU 

<sup>1,2,3</sup>Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

<sup>1</sup>eneskaymaz@duzce.edu.tr, <sup>2</sup>ugurguven@duzce.edu.tr,

<sup>3</sup>kenandosoglu@duzce.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 3 April 2024

Accepted : 21 May 2024

##### Keywords:

Fitness Distance Balance,  
Particle Swarm Optimization,  
Power System Stabilizer

#### ABSTRACT

Operating synchronous generators in power systems at maximum limits in order to meet the requested power causes line failures or various mechanical problems. This situation leads to low-frequency oscillations on the rotor side of the generators. Power system stabilizers are among the controller structures frequently used to dampen oscillations in the system. Determining the optimum parameter values of these controllers is extremely important in terms of effectively damping oscillations and ensuring system stability. In this study, fitness distance balance-based particle swarm optimization was used to determine the optimum parameter values of the power system stabilizer. In order to test the effect of the proposed algorithm on a multi-machine power system, comparisons were made based on the system responses and performance indices obtained for different fault scenarios. Results show that the power system stabilizer parameters obtained by fitness distance balance-based particle swarm optimization provide more effective system stability than those obtained with other algorithms.

© 2024 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 3 Nisan 2024

Kabul : 21 Mayıs 2024

##### Anahtar Kelimeler:

Uygunluk Mesafe Dengesi,  
Parçacık Sürü Optimizasyonu,  
Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı

#### ÖZET

Güç sistemlerinde yer alan senkron generatörlerin talep edilen gücün karşılanabilmesi amacıyla maksimum limitlerde çalıştırılması, hat arızaları veya çeşitli mekanik problemlere neden olur. Bu durum, generatörlerin rotor tarafında düşük frekanslı salınımlar meydana gelmesine yol açar. Sistemde oluşan salınımların sönümlenmesi amacıyla sıklıkla kullanılan denetleyici yapılarının başında, güç sistemi kararlı kılıcısı gelmektedir. Bu denetleyicilerin en uygun parametre değerlerinin belirlenmesi, salınımların etkili bir şekilde sönümlenmesi ve sistem kararlılığının sağlanması açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, güç sistemi kararlı kılıcısı parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi amacıyla uygunluk mesafe dengesi tabanlı parçacık sürü optimizasyonu kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın çok makineli bir güç sistemindeki etkisini test edebilmek amacıyla, farklı arıza senaryoları için elde edilen sistem yanıtlarına ve performans indekslerine bağlı olarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçlar, uygunluk mesafesi dengesi dayalı parçacık sürü optimizasyonu ile elde edilen güç sistemi kararlı kılıcısı parametrelerinin, diğer algoritmalarla belirlenen parametrelere göre sistem kararlılığı açısından daha etkili sonuçlar verdiğini göstermektedir.

© 2024 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: <sup>1</sup>0000-0002-4774-077

<sup>2</sup>0000-0002-5193-7990

<sup>3</sup>0000-0001-8804-7070

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, teknolojik gelişmeler ve ekonomik faktörlere bağlı olarak artan güç talebi güç sistemlerinde yer alan senkron generatörlerin maksimum limitlerde çalıştırılmasına yol açar. Bu duruma bağlı olarak sistemde meydana gelen ani yük değişimleri veya hat arızaları gibi problemler elektriksel ve mekanik güç arasında bir dengesizlik oluşur. Bundan dolayı, senkron generatörlerin rotor tarafında düşük frekanslı elektromekanik salınımlar meydana gelir. Düşük frekanslı salınımların sönümlenmesi sistem kararlılığı açısından son derece önemli olup, bu amaçla Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (Power System Stabilizer, PSS) kullanılır. Güç sistemlerinde, PSS'lerin kullanım amacı makine hızı, terminal frekansı veya güç gibi ilave bir yardımcı sinyal ile uyarımı kontrol ederek generatörlerin rotor salınımlarına sönüm eklemektir [1-3]. PSS ile ilgili olarak yapılan ilk çalışmalarda daha çok sabit parametreler kullanılmıştır. İlk olarak, De Mello ve Concordia [4] tarafından, PSS'nin temel yapısı sunulmuş, ardından, [5,6]'da Larsen ve Swann tarafından çeşitli sinyallerle PSS'nin uygulama ve ayarlama yöntemleri ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır. [7]'de Gibberd tarafından, farklı çalışma koşulları için sabit kazançlı PSS'nin ayarlanması hakkında bir çalışma sunulmuştur. Daha sonra, yerel ve alanlar arası salınım modlarında geçici kararlılığı artırmak için geleneksel PSS'lerin parametrelerinin belirlenmesine ilişkin ayrıntılı analitik çalışmalar Kundur ve diğerleri [8] tarafından tartışılmıştır. Güç sistemlerinin dinamik ve doğrusal olmayan bir yapıya sahip olması nedeniyle geleneksel PSS'ler ilerleyen yıllarda salınımların sönümlenmesinde en uygun performansı sağlama konusunda yetersiz kalmıştır. Bir güç sisteminin çalışma koşullarında beklenmeyen bir arıza olması durumunda, PSS'nin etkili bir performans sağlaması zorunludur ve performansı iyileştirebilmek amacıyla PSS parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi önemlidir [7,8]. Bunun yanı sıra, en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi, sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale gelmesi ve sistemde oluşan salınımların hızlı bir şekilde sönümlenmesi açısından çok önemli bir yere sahiptir. Son yıllarda, geleneksel yöntemlerin çok makineli güç sistemlerinde özellikle hesaplama zamanı açısından sundukları dezavantajlara istinaden araştırmacılar arasında Meta-Sezgisel Arama (MSA) algoritmalarının kullanımı yaygınlaşmıştır. MSA algoritmaları canlıların doğadaki davranışlarından veya fiziksel yasalardan ilham alır ve sürü tabanlı veya evrimsel tabanlı olarak sınıflandırılabilir [9].

MSA algoritmaları güç sistemlerinde çok sayıda farklı alana uygulandığı gibi PSS'lerin kontrol parametrelerinin optimizasyonunda da kullanılır. Bu sayede, en uygun PSS parametreleri belirlenerek sistemde herhangi bir arıza durumunda meydana gelen düşük frekanslı salınımlar sönümlenir. Örneğin, [10,11]'de Genetik Algoritma (GA) kullanılarak çok makineli bir güç sisteminde PSS parametrelerinin en uygun değerleri belirlenmiştir. Ancak GA'nın özellikle arama uzayı büyük olduğunda yerel optimum noktaya takılma konusunda olumsuz bir özelliği olup, en uygun çözüme ulaşma süresi uzundur. [12]'de elektromekanik salınımların sönümlenmesini sağlamak amacıyla PSS parametrelerinin Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile belirlenmesi üzerine bir çalışma sunulmuştur. Ancak PSO'nun performansı önemli ölçüde kendi parametrelerine bağlıdır ve genellikle yakınsama sorunları vardır. [13]'te farklı yüklenme koşulları altında tek makineli sonsuz baralı ve çok makineli test sistemlerinde sistem kararlılığını artırmak için Bakteriyel Arama Algoritması (Bacterial Foraging, BF) ile PSS parametrelerinin optimizasyonu sunulmuştur. Bununla birlikte, algoritmanın rastgele bir aramaya bağımlı olması, global çözümün elde edilmesinde gecikmelere neden olmuştur. [14]'te, Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyonu (Honey Bee Mating Optimization, HBMO), sönümün maksimum olduğu amaç fonksiyonu kullanılarak 10-makineli 39-baralı ve 16-makineli 68-baralı değiştirilmiş test sistemleri için PSS tasarımına uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Mutlak Hata İntegrali (The Integral of the Absolute magnitude of the Error, IAE), Kare Hata İntegrali (The Integral of Square of the Error, ISE), Mutlak Hatanın Zamanla çarpımının İntegrali (The Integral of Time multiplied by Absolute Error, ITAE), Zamanın Karesinin Hatası İntegrali (The Integral of Time multiplied by the Squared Error, ITSE) performans indeksleri kullanılarak test edilmiştir. [15]'te, 3-makineli 9 baralı güç sisteminin en uygun PSS tasarımı için Guguk Kuşu Arama Algoritması (Cuckoo Search, CS) önerilmiştir. Önerilen yöntem, sönüm özelliklerinin yanı sıra IAE ve ITAE performans indeksleri açısından GA'ya kıyasla daha etkili sonuçlar vermiştir. [16]'da, özdeğer ve zaman tanım bölgesi tabanlı amaç fonksiyonunu kullanılarak tek makineli sonsuz baralı ve 3 makineli-9 baralı güç sistemi için Sinüs-Kosinüs Algoritması (Sine-Cos Algorithm, SCA) yardımıyla en uygun PSS tasarımı sunulmuştur. [17]'de, WSCC 3 makineli-9 baralı test sistemi, 2 alanlı 4 makineli enterkonnekte sistem ve 10-makineli 39-baralı New England test sisteminde Geliştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritması (Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA) kullanılarak düşük frekanslı salınımların sönümü PSS parametrelerinin optimizasyonu ile gerçekleştirilmiştir. [18]'de, düşük frekanslı salınımların sönümlenmesinde 2 alanlı ve 4 makineli test sisteminin PSS parametrelerini ayarlamak için Değiştirilmiş Gri Kurt Optimizasyonu (Amended Grey Wolf Optimization AGWO) algoritmasının farklı hibrit varyantları önerilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda da görüldüğü gibi PSS parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi için çok sayıda farklı MSA algoritması kullanılmıştır. Ancak her geçen gün yeni MSA algoritmaları geliştirilmeye devam etmekte ve bu algoritmalarından bir kısmı güç sistemleri problemlerinde beklenen etkiyi sağlayamamaktadır. Ayrıca herhangi bir algoritmanın başarısı problemin türüne göre farklılıklar gösterebilmektedir. MSA algoritmalarının, çözümlerin keşif ve sömürü görevleri arasında uygun bir denge sağlandığında daha iyi performans sağladığı ve global optimuma yakınsama sağlayabileceği çok sayıda araştırmacı tarafından kabul edilmektedir [19, 20]. MSA algoritmalarında keşif ve sömürü görevlerinden oluşan arama işleminin başarısı arama operatörlerinin yanı sıra seçim yöntemi ile belirlenen çözüm adaylarının arama uzayındaki referans konumuna da bağlıdır [21]. MSA algoritmalarında, arama sürecine rehberlik eden referans konumlarının verimli seçimi için

sağlam ve etkili seçim yöntemlerinin başında Uygunluk Mesafe Dengesi (Fitness-Distance Balance, FDB) gelmektedir [22]. FDB yönteminde seçim süreci için her adayın puanı hesaplanır ve bu puanın hesaplanmasında adayların uygunluk ve mesafe değerleri kullanılır. Uygunluk değeri çözüm adaylarının başarısını, mesafe değeri ise en iyi çözüm adayları arasındaki farkı göstermektedir. Arama sürecinin başarılı olmasının koşulu adayın hem uygunluk değerinin hem de mesafe değerinin yüksek olmasıdır [22].

Bu çalışmanın amacı, güç sistemlerinde meydana gelen arıza durumlarında oluşan düşük frekanslı salınımların sönümlenmesi ve sistemde kararlılığın sağlanması amacıyla kullanılan PSS'lerin en uygun parametre değerlerini FDBPSO algoritması kullanarak belirlemektir. PSO uzun yıllardır çok sayıda optimizasyon problemi için tercih edilen bir çözüm yöntemi olmasına karşın, bu çalışmada önerilen problemin çözümü için yerel çözüm tuzaklarına yakalanmıştır. Bu nedenle, algoritmanın en uygun çözüme yakınsayabilmesi amacıyla klasik PSO yöntemi FDB tabanlı seçim yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Çalışmada FDBPSO, belirlenen amaç fonksiyonu için farklı arıza senaryolarında WSCC 3-makinelili 9-baralı güç sistemi kullanılarak çeşitli simülasyonlar ve performans indekslerine bağlı olarak Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) ve PSO yöntemleriyle karşılaştırılmıştır [23]. Buna göre, çalışmanın devamı şu şekilde ilerlemektedir: Bölüm 2'de generatör ve uyarım sisteminin matematiksel modeli, doğrusallaştırılmış güç sistemi modeli, en uygun PSS tasarım problemi ve amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bölüm 3'te PSO'nun matematiksel modeli ile FDB seçim yönteminin matematiksel modeli sunulmuş ve önerilen FDBPSO yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır. Bölüm 4'te FDBPSO algoritması kullanılarak dört farklı arıza senaryosu altında en uygun PSS parametreleri belirlenmiştir. Önerilen yöntem, sistem yanıtları ve performans indekslerine bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Son olarak, Bölüm 5'te, çalışmadan çıkarılan sonuçlar değerlendirilmektedir.

## 2. GÜÇ SİSTEMİ MODELİ

### 2.1. Generatör ve Uyarım Sistemi Modeli

Doğrusal olmayan bir elektrik güç sisteminin matematiksel modeli, çeşitli diferansiyel ve cebirsel denklemlerle ifade edilmektedir. Çok makinelili güç sisteminde, her bir generatör, Heffron-Philips modeli ile ifade edilebilir [17]. Bu çalışmada, geçici durum kararlılık statik uyarımalı akı sönümlü model kullanılmıştır. Her bir makinenin lineer olmayan dinamik denklemleri aşağıdaki gibidir [36]:

$$\delta_i = \omega_b(\omega_i - 1) \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i}(P_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - 1)) \quad (2)$$

$$E'_{qi} = \frac{1}{T'_{do}}(E_{fdi} - (x_{di} - x'_{di})i_{di} - E'_{qi}) \quad (3)$$

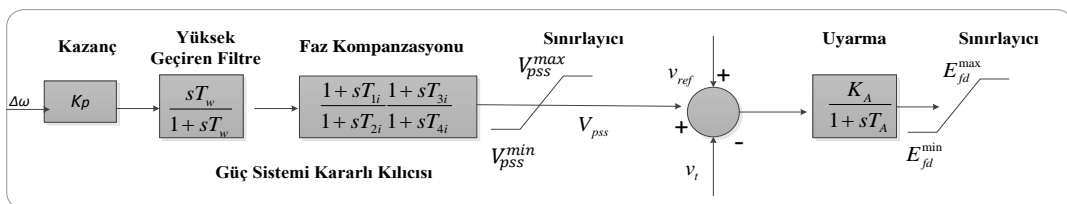
$$\dot{E}_{fdi} = \frac{K_{Ai}(v_{ref,i} - v_{t,i} + v_{pss,i}) - E_{fdi}}{T_{Ai}} \quad (4)$$

$$T_{ei} = E'_{qi}i_{qi} - (x_{qi} - x'_{di})i_{di}i_{qi} \quad (5)$$

Denklem (1) - (5)'te  $\delta_i$  ve  $\omega_i$  ifadeleri  $i$  makinesinin rotor açısı ve açısal hızıdır.  $\omega_b$  temel frekans değeri,  $P_{mi}$  ve  $P_{ei}$  sırasıyla  $i$  makinesinin mekanik giriş ve elektriksel çıkış gücüdür.  $D_i$  ve  $M_i$  sırasıyla  $i$  makinesinin sönümleme kat sayısı ve eylemsizlik sabitidir.  $E_{fd}$  ve  $E'_q$  ifadeleri uyarım ve iç gerilim ifadeleridir.  $i_{di}$  ve  $i_{qi}$  ifadeleri d-q eksen endüvi akımlarıdır.  $x'_{qi}$  ve  $x'_{di}$  ifadeleri ise d-q eksen geçici reaktanslarını belirtir.  $K_{Ai}$  ve  $T_{Ai}$  uyarım sistemine ait kazanç ve zaman sabitleri olup;  $V_{ref}$ ,  $V_{pss}$ , ve  $V_t$  ifadeleri referans gerilim, PSS giriş gerilimi ve uç gerilimi ifade eder.

### 2.2. Güç Sistemi Kararlı Kılıcı

Bir güç sisteminde PSS kullanmanın öncelikli amacı, yardımcı bir kararlı kılıcı sinyal kullanarak generatör rotor salınımlarına sönüm eklemektir [25]. Bir PSS; kazanç bileşeni, temizleme bileşeni ve faz kompanzasyonu bileşeni olmak üzere üç temel kısımdan oluşur. Bunlardan kazanç bileşeni salınımları sönümlemek için sisteme kazanç değeri sağlarken, temizleme bileşeni yüksek geçiren filtre görevi görür. Faz kompanzasyonu bileşeni ise faz gecikmesini sağlar. PSS'nin blok şeması Şekil 1'de ve çok makinelili sistem için transfer fonksiyonu Denklem (6)'da verilmiştir:



Şekil 1. PSS dahil edilen IEEE Tip-St1 uyarım sistemi.

$\Delta\omega$  giriş sinyali için PSS'nin transfer fonksiyonu ve  $v_{pss}$  çıkış gerilimi aşağıdaki gibidir:

$$v_{pss}(s) = K_p \frac{sT_w}{1+sT_w} \left[ \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right] \Delta\omega \quad (6)$$

Bu denklemde  $K_p$ , kontrol kazancı,  $T_w$  temizleme bloğu zaman sabiti,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  ve  $T_4$  zaman sabitleridir. Burada zaman sabiti  $T$  genellikle 1-20 saniye aralığındadır. Yüksek geçiren filtreli temizleme bloğu, 0.2-2 Hz aralığındaki sinyallerin değişmeden geçmesine izin verir.

### 2.3. Doğrusallaştırılmış Güç Sistemi Modeli

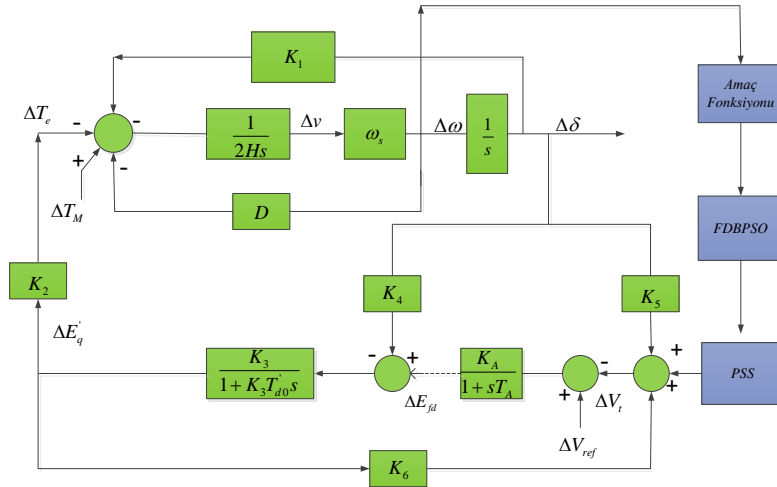
Çok makineli bir güç sisteminde uyarım sistemi ve PSS içeren doğrusallaştırılmış güç sistemi modeli için durum denklemi Denklem (7)'de verilmiştir [1]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ -\frac{K_i}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ -\frac{K_A}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} \Delta v_{pss} \quad (7)$$

Buna göre, güç sisteminin doğrusallaştırılmış modeli Denklem (8)'de verildiği gibi ifade edilir:

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (8)$$

Burada,  $A$  ve  $B$  durum değişkenleri ve giriş matrisini ifade ederken,  $\Delta x$  ve  $\Delta u$  durum değişkenleri ve giriş matrisine ait vektörlerdir. Bu çalışmada,  $\Delta x = [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E'_q \ \Delta E_{fd}]^T$  ve  $\Delta u$  PSS'nin çıkış sinyalidir. Şekil 2'de, Heffron-Phillips modelinin kullanıldığı doğrusallaştırılmış güç sisteminin blok diyagramı sunulmaktadır.  $K_1$ - $K_6$  sabitlerinin ifadeleri [1]'de verilmiştir.



Şekil 2. FDBPSO ile en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan Heffron-Phillips modeli.

Şekil 2'de yer alan Heffron-Phillips modeli şekilden de görüldüğü gibi, elektriksel ve mekaniksel modellemelerden oluşmaktadır. Bu modelde senkron generatör açı değişimi, elektriksel moment değişimi, mekaniksel moment ifadeleri, mekaniksel moment değişimi ifadesinden çıkarılarak hesaplama yapılmaktadır. Bunun sonucunda PSS parametreleri belirlenmektedir.

### 2.4. Problemin Amaç Fonksiyonu

PSS'ler, güç sistemlerinde herhangi bir arıza sonrasında güç açıları, rotor hızları ve elektriksel güçlerindeki sapmalardan kaynaklanan salınımları en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır. PSS tasarımında, bu sapmalardan herhangi birinin minimize edilmesi, güç sistemi kararlılığının sağlanması için amaç fonksiyonu olarak seçilebilir. Bu çalışmada, amaç fonksiyonu hatanın karesinin zamanın karesi ile çarpımının integralidir (ISTSE) [23].

Burada,  $NS$  toplam arıza senaryosu sayısı,  $m$  generatör sayısı,  $t_{sim}$  simülasyon zamanı,  $i$  generatörünün referans olarak seçilen birinci generatöre göre bağlı hızını ifade eder.  $\omega_{i-1} = \omega_i - \omega_1$  olarak ifade edilir. Sistemin yerleşme zamanı ve aşımına bağlı olarak daha kararlı hale gelmesi için  $J$  amaç fonksiyonunun minimum olması gerekir. Tasarım probleminde, PSS parametrelerinin kısıtları optimizasyon probleminin kısıtlarını oluşturur.

$$\begin{aligned} \text{Minimum } J, \quad J &= \sum_{j=1}^{NS} ISTSE, \quad NS = 4 \\ ISTSE &= \sum_{i=1}^m \int_0^{t_{sim}} (t\omega_{i-1})^2 dt \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{Problem Kısıtları } g(x): \quad \begin{aligned} 0.1 \leq K_p \leq 100 \\ 0.01 \leq T_i \leq 1; \quad i=1,2,3,4 \end{aligned}$$

### 3. YÖNTEM

#### 3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), kuş ve balık sürülerinde yer alan bireylerin sosyal davranışlarından ilham alan metasezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır [26]. Sürülerdeki bireyler parçacık olarak adlandırılır ve  $i$  parçacığının  $D$  boyutlu durum için hız ve konum ifadeleri Denklem (11)'de yer aldığı gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} V_i &= \{V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{iD}\} \\ X_i &= \{X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{iD}\} \end{aligned} \quad (10)$$

PSO'nun optimizasyon sürecinde sürüler arasındaki etkileşim parçacığın en iyi değeri ( $pbest$ ) ve tüm parçacıkların en iyi değeri ( $gbest$ ) ile sağlanır. PSO, başlangıç ve hesaplama olmak üzere iki aşamadan oluşur. Başlangıç aşamasında, tüm parçacıklar belirlenen sınırlar içinde arama uzayında rastgele dağılır. Hesaplama aşamasında ise parçacıkların hızları ve konumları güncellenir. Bir parçacığın hızı şu şekilde hesaplanır [26]:

$$V_{i,d}^{t+1} = V_{i,d}^t + c_1 rand_1 (pbest_{i,d}^t - x_{i,d}^t) + c_2 rand_2 (gbest_d^t - x_{i,d}^t) \quad (11)$$

Denklem (12)'de yer alan  $V_{i,d}^t$  ifadesi  $D$ -boyutlu bir arama uzayı için,  $i$  parçacığının  $t+1$  iterasyondaki hızını ifade eder.  $x_{i,d}^t$ ,  $i$  parçacığının  $D$ -boyutlu bir arama uzayı için konum değeridir.  $c_1$  bilişsel ağırlık ve  $c_2$  sosyal ağırlık faktörleri ivme katsayılarıdır,  $r_1$  ve  $r_2$  değerleri algoritmanın  $[0, 1]$  aralığındaki rastlantısal bileşenleridir.  $c_1$  ve  $c_2$  değerleri genelde 2 olarak ayarlanır ancak bu değer değiştirilerek parçacıkların yerel veya global olarak daha fazla etkilenmesi sağlanabilir. İvme katsayılarının büyük değerler alması parçacıkların birbirinden uzaklaşmasına ve ayrılmasına neden olurken, küçük değerler almaları parçacıkların hareketlerinin sınırlandırılmasına ve çözüm uzayının yeterince taranamamasına neden olur. Keşif ve sömürü arasındaki dengeyi sağlamak için Shi ve Eberhart tarafından PSO'ya eylemsizlik ağırlığı eklenmiştir [27]:

$$V_{i,d}^{t+1} = w^t V_{i,d}^t + c_1 rand_1 (pbest_{i,d}^t - x_{i,d}^t) + c_2 rand_2 (gbest_d^t - x_{i,d}^t) \quad (12)$$

Eylemsizlik ağırlığı, parçacıkların önceki hız artışlarının hız değeri üzerindeki etkisini kontrol eder ve global arama ile yerel arama arasındaki dengenin sağlanmasında görev alır. Eylemsizlik ağırlığı büyük değerler aldığı anda, global arama daha uygundur ve küçük bir eylemsizlik ağırlığı yerel aramayı kolaylaştırır [28]. Eylemsizlik ağırlığının güncellemesi Denklem (13)'te verildiği gibi yapılır:

$$w = \frac{(Max\_iter - iter)}{Max\_iter} \quad (13)$$

Bu denklemde  $Max$ , maksimum yineleme sayısını ifade eder. Denklem (14)'te verilen formülle belirlenen hız güncellemelerinin parçacıklara eklenmesiyle yeni konum değerleri elde edilir:

$$X_{i,d}^{t+1} = X_{i,d}^t + V_{i,d}^{t+1} \quad (14)$$

Hızın güncellenmesinin ardından parçacıkların yeni uygunluk değeri hesaplanır ve eğer gerekirse  $pbest$  ve  $gbest$  güncellenir.

#### 3.2. Uygunluk Mesafe Dengesi Seçim Yöntemi

Uygunluk-Mesafe Dengesi (FDB), popülasyondaki arama sürecine rehberlik edecek en etkili çözüm adayının elde edilmesini ve aramanın yönünün belirlenmesini sağlayan bir seçim yöntemidir [29]. Bu yöntem kullanılarak, çözüm adaylarının arama sürecine katkılarına göre skor değerleri hesaplanmaktadır. Skor değerinin hesaplanmasında, uygunluk değerleri ve popülasyonda anlık olarak en iyi çözüm adayı olan uzaklık değerleri dikkate alınmaktadır. MSA algoritmalarında çözüm adayları vektörü ( $P$ ) ve uygunluk değerleri vektörü ( $F$ ) Denklem (15)'te matematiksel olarak ifade edilmektedir:

$$P \equiv \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad F \equiv \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} \quad (15)$$

Çözüm adaylarının FDB skorlarının hesaplanması aşağıdaki adımlarda yer aldığı gibidir:

- (i). Popülasyonda bulunan  $i$ . çözüm adayının ( $x_i$ ),  $t$ . zamandaki en iyi çözüm adayı olan  $x_{best}$  çözümüne olan



öklid uzaklığının hesaplanması Denklem (16)'da verilmiştir:

$$D_{Pi} = \sqrt{(x_{1[i]} - x_{1[best]})^2 + (x_{2[i]} - x_{2[best]})^2 + \dots + (x_{n[i]} - x_{n[best]})^2} \quad (16)$$

(ii). Bireylerin  $x_{best}$ 'e olan uzaklığını ifade eden  $D_p$  vektörü Denklem (17)'de verilmiştir:

$$D_p \equiv \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (17)$$

(iii). Çözüm adaylarına ait FDB skorları hesaplanırken, Denklem (15) ve (17)'de verilen  $F$  ve  $D_p$  vektörleri kullanılır. Bu parametrelerin skor hesaplamasında birbirlerine üstünlük sağlamaması için normalize edilmesi gerekir. Buna göre, çözüm adaylarının FDB skorları ( $S_{Pi}$ ) Denklem (18)'de verilmiştir:

$$S_{Pi} = \omega * normfv_i + (1 - \omega) * normD_{Pi} \quad (18)$$

(iv). Buna göre, çözüm adaylarının FDB skorlarına ait vektör Denklem (19)'da yer aldığı gibidir:

$$S_p \equiv \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (19)$$

### 3.3. Uygunluk Mesafe Dengesi Tabanlı Parçacık Sürü Optimizasyonu

Bu bölümde, FDB tabanlı seçim yönteminin PSO algoritmasına uygulanması ve önerilen FDBPSO algoritmasının matematiksel modelinden bahsedilmektedir. FDB seçim yöntemi ve PSO algoritması bundan önceki bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır. PSO, literatürde uzun yıllardır mevcut olan etkili bir algoritma almasına karşın en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesinde yerel çözüm tuzaklarına sıklıkla yakalanmıştır. Bu durum PSO'nun performansında kararsızlıklara yol açmış ve PSO'nun arama sürecindeki çeşitliliği sağlama konusunda yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, optimizasyon sürecinde yaşanan erken yakınsama problemlerinin üstesinden gelebilmek amacıyla PSO algoritması FDB tabanlı seçim yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Bir MSA algoritmasının geliştirilmesinde öncelikli olarak keşif ve sömürü dengesindeki başarı önemlidir. FDB yöntemi, MSA sürecinde rehber arama ajanının referans pozisyonunun belirlenmesinde etkili bir seçim yöntemidir. FDB yöntemi sayesinde çözüm adayları arasından  $X_{best}$ 'e en yüksek katkıyı sağlayan aday elde edilir. FDB seçim yönteminde çözüm adaylarının uygunluk değeri ve çözüm adaylarının arasındaki mesafe değeri dikkate alınır [22]. Buna göre FDB seçim yönteminin PSO'ya uygulanmasıyla Denklem (13) ve (15)'in güncellenmiş hali Denklem (20) ve (21)'de verildiği gibidir:

$$V_{i,d}^{t+1} = w^t V_{i,d}^t + c_1 rand_1(pbest_{i,d}^t - x_{f_{db,d}}^t) + c_2 rand_2(gbest_d^t - x_{f_{db,d}}^t) \quad (20)$$

$$X_{f_{db,d}}^{t+1} = X_{f_{db,d}}^t + V_{f_{db,d}}^{t+1} \quad (21)$$

Buna göre, PSO'da yapılan geliştirmenin ardından önerilen FDBPSO algoritmasının etkisi bir sonraki bölümde gerçekleştirilen benzetim çalışması ile incelenmiştir.

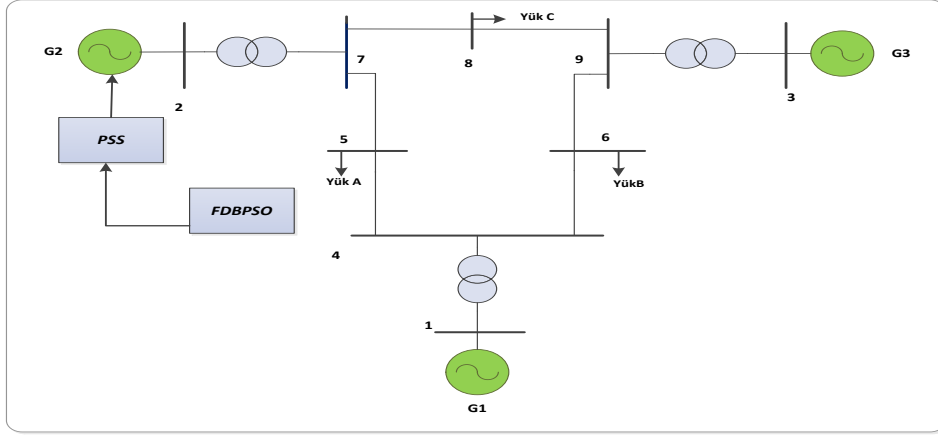
## 4. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde, en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi için önerilen FDBPSO yönteminin etkisi belirlenen amaç fonksiyonuna göre Şekil 3'te yer alan WSCC 3-makineli 9-baralı güç sisteminde test edilmiştir. Benzetim çalışmasında, lineer olmayan güç sisteminin zaman tanım bölgesindeki analizi, Matlab/Simulink programında oluşturulan bir model üzerinde 4 farklı arıza senaryosuna bağlı olarak gerçekleştirilmiştir [23]. Sistem bileşenlerinin yük akışından elde edilen başlangıç değerleri, generatör, hat ve uyarım sistemi verileri detaylı olarak [23]'te verilmiştir. [23]'te gerçekleştirilen katılım faktörü analizine göre PSS'nin dahil edilebileceği en uygun konumu Generatör-2 ( $G_2$ ) olarak belirlenmiştir. Buna göre  $G_2$ 'de yer alan PSS için optimize edilmesi gereken parametre sayısı 5'tir ( $K_p$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  ve  $T_4$ ). Denklem (9)'da verilen amaç fonksiyonuna göre, farklı arıza durumları altında generatörlerin rotor hızları arasındaki sapmanın minimum olması amaçlanmaktadır. Bundan dolayı, arıza durumlarının tamamı için en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

WSCC 3-makineli 9-baralı güç sisteminin geçici kararlılık analizinde, diferansiyel denklemlerin nümerik entegrasyonu için *Runge-Kutta 4* tekniği seçilmiş ve entegrasyon adımı  $\Delta t = 0.005$  saniye olarak kabul edilmiştir. Benzetim çalışmasında, optimizasyon süreci boyunca aşağıda yer alan dört farklı arıza senaryosu gerçekleştirilmiştir.

### 4.1. Arıza Meydana Gelen Hattın Devreden Çıkarılması

Bu arıza senaryosunda  $t = 1$  saniyede 6 numaralı barada ve 6-9 hattının sonunda üç fazlı bir arıza olduğu düşünülmüştür. Sonrasında, 6-9 hattı devre dışı bırakılarak arıza giderilmiştir. Sistemde PSS kullanılmadan kritik temizleme zamanı  $t_{cr} = 0.202$  saniye iken sistem kararlılık sınırındadır.



Şekil 3. WSCC 3 makineli- 9 baralı test sistemi.

- **Senaryo 1:** Bu senaryo için kritik temizleme zamanı arıza temizleme zamanından büyük olarak düşünülmüştür. Arıza temizleme zamanı  $t_f=0.15$  saniye (9 devir) olarak belirlenmiştir. Bir başka deyişle arıza 1.15. saniyede giderilmiştir.
- **Senaryo 2:** Bu senaryo için kritik temizleme zamanı arıza temizleme zamandan küçük olarak düşünülmüştür.  $t_f=0.25$  saniye (15 devir) olarak belirlenmiştir. Bir başka deyişle arıza 1.25. saniyede giderilmiştir.

#### 4.2. Arıza Meydana Gelen Hattın Eski Durumuna Dönmesi

Bu arıza senaryosunda  $t=1$  saniyede 7 numaralı barada ve 7-5 hattının sonunda üç fazlı bir arıza olduğu düşünülmüştür. Sonrasında 7-5 hattı yeniden devreye alınarak arıza giderilmiştir. Sistemde PSS kullanılmadan kritik temizleme zamanı  $t_{cr}=0.167$  saniye iken sistem kararlılık sınırındadır.

- **Senaryo 3:** Bu senaryo için kritik temizleme zamanı arıza temizleme zamanından büyük olarak düşünülmüştür. Arıza temizleme zamanı  $t_f=0.10$  saniye (6 devir) olarak belirlenmiştir. Bir başka deyişle arıza 1.10. saniyede giderilmiştir.
- **Senaryo 4:** Bu senaryo için kritik temizleme zamanı arıza temizleme zamandan küçük olarak düşünülmüştür.  $t_f=0.20$  saniye (12 devir) olarak belirlenmiştir. Bir başka deyişle arıza 1.20. saniyede giderilmiştir.

Buna göre, PSS parametrelerinin optimizasyon süreci Denklem (9)'da yer alan amaç fonksiyonuna göre senaryoların tamamı için belirlenmiştir. Benzetim çalışmasında test edilen ve karşılaştırılan PSO, ABC ve FDBPSO algoritmaları ile optimize edilen PSS parametrelerinin değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. En uygun PSS parametreleri.

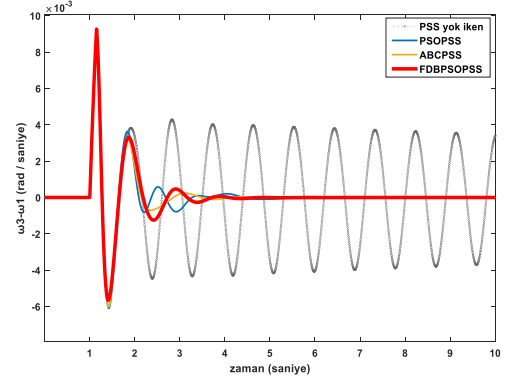
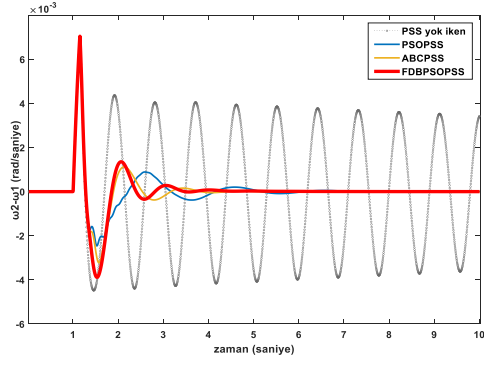
Method	$K_p$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	J uygunluk fonksiyonu minimum değeri
PSO-PSS [23]	11.5714	0.8778	0.4070	0.8695	0.0100	0.108032
ABC-PSS [23]	7.7360	0.2948	0.1852	0.5240	0.0100	0.100634
FDB-PSO	<b>20.7181</b>	<b>0.1016</b>	<b>0.0141</b>	<b>0.1466</b>	<b>0.0193</b>	<b>0.097258</b>

Buna göre, benzetim çalışmasında FDBPSO, ABC [23] ve PSO [23] algoritmaları tarafından elde edilen minimum uygunluk değerleri sırasıyla **0.097258**, 0.100634 ve 0.108032'dir. Dolayısıyla, FDBPSO algoritmasının PSO [23] ve ABC [23] algoritmalarına kıyasla amaç fonksiyonunun minimum değeri açısından daha etkili sonuç verdiği görülmektedir.

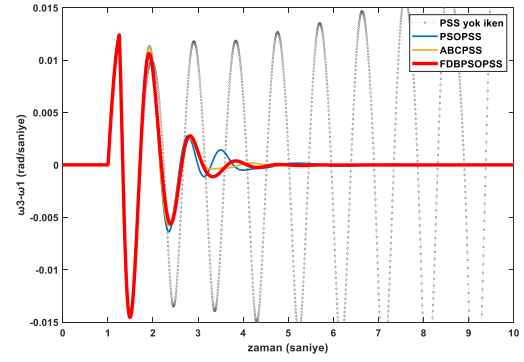
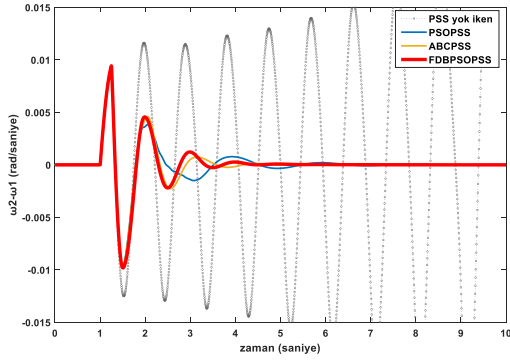
#### 4.3. Benzetim Çalışması ile Elde Edilen Sistem Yanıtları

Çalışmada, gerçekleştirilen simülasyonlar için  $t_{sim}=10$  saniye olarak belirlenmiştir. Denklem (9)'a ait açıklamadan da anlaşılacağı üzere güç sisteminde referans olarak belirlenen makine Generatör-1 ( $G_1$ )'dir. Buna göre, Senaryo 1, Senaryo 2, Senaryo 3 ve Senaryo 4 arıza durumları için  $G_2$  ve  $G_3$  generatörlerinin  $\omega_2-\omega_1$  ve  $\omega_3-\omega_1$  rotor hızı sapma yanıtları Şekil 4-Şekil 7 arasında sunulmuştur.

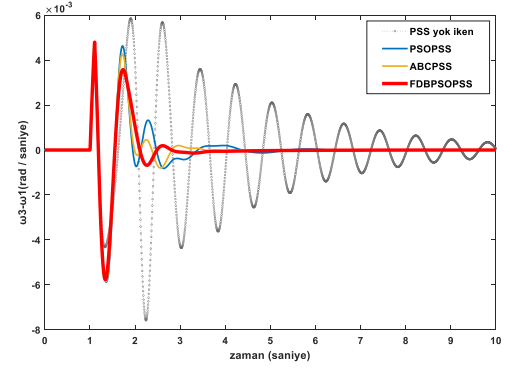
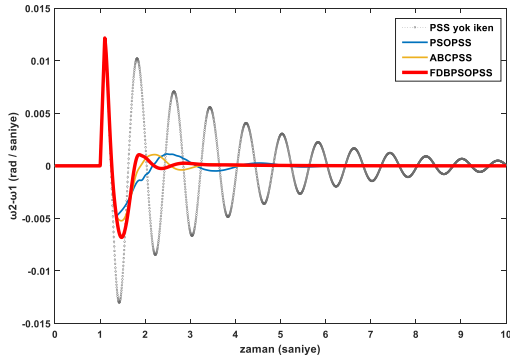
Benzetim çalışması sonuçları, geliştirilen algoritmanın salınımlar üzerindeki etkisi açısından incelenmiştir. Şekil 4. (a)'da, FDBPSO ile en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi salınımlar açısından incelenmiştir. Şekil 4 (a)'da salınım aralığı  $-3.9*10^{-3}$  ile  $8.2*10^{-3}$  arasında, şekil 4 (b)'de salınım aralığı  $-9.5*10^{-3}$  ile  $5.8*10^{-3}$  arasında, şekil 5 (a)'da salınım aralığı  $-0.015$  ile  $0.009$  arasında, şekil 5 (b)'de salınım aralığı  $-0.01$  ile  $0.012$  arasında, şekil 6 (a)'da salınım aralığı  $-0.007$  ile  $0.0125$  arasında, şekil 6 (b)'de salınım aralığı  $-6*10^{-3}$  ile  $4.8*10^{-3}$  arasında, 7 (a)'da salınım aralığı  $-0.007$  ile  $0.031$  arasında, şekil 7 (b)'de salınım aralığı  $-0.025$  ile  $0.0022$  arasındadır. WSCC 3 makineli 9 –baralı test sisteminde meydana gelen 4 farklı arıza senaryo için değerlendirme yapıldığında ve



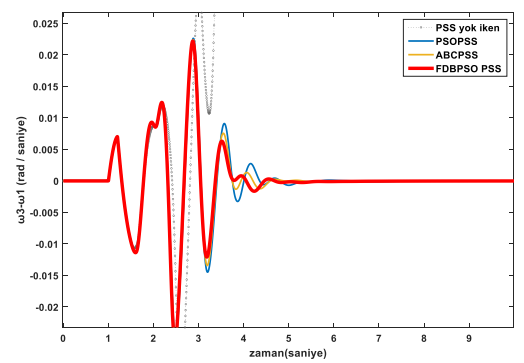
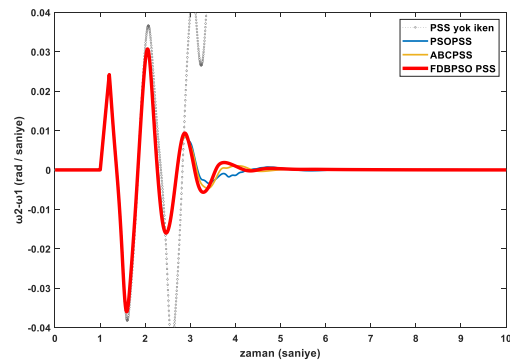
Şekil 4. Senaryo 1 için rotor hızı sistem cevapları (a)  $\omega_2-\omega_1$ , (b)  $\omega_3-\omega_1$ .



Şekil 5. Senaryo 2 için rotor hızı sistem cevapları (a)  $\omega_2-\omega_1$ , (b)  $\omega_3-\omega_1$ .



Şekil 6. Senaryo 3 için rotor hızı sistem cevapları (a)  $\omega_2-\omega_1$  (b)  $\omega_3-\omega_1$ .



Şekil 7. Senaryo 4 için rotor hızı sistem cevapları (a)  $\omega_2-\omega_1$  (b)  $\omega_3-\omega_1$ .



senkron generatörlerin rotor hızları arasındaki değişimler detaylı olarak incelendiğinde sistemin kararsız olduğu ve PSS kullanılmadığında sistemdeki salınımların sönümlenmediği görülmektedir. PSS kullanılması durumunda, en uygun çalışma değerlerinin belirlenmesi için daha önce kullanılmış olan PSO ve ABC yöntemlerinin yanı sıra bu çalışmada FDB tabanlı PSO (FDBPSO) kullanılmasıyla sistemin kararlı hale geldiği ve sistemdeki salınımların sönümlendiği gözlemlenmiştir. Kullanılan algoritmalar maksimum-minimum değerler ve yerleşme süreleri açısından incelendiğinde, geliştirilen FDBPSO algoritmasının, kullanılan diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar verdiği ve salınımları yeterince sönümlediği görülmektedir. Bu değerlendirmelerin tamamı performans indekslerine göre yapılmaktadır.

#### 4.4. Performans İndeksleri Değerlendirmesi

Bu çalışmada, önerilen kontrol yönteminin etkisini daha belirgin bir şekilde gösterebilmek amacıyla Denklem (22)-(25) arasında yer alan çeşitli performans indeksleri kullanılmıştır:

$$PI_1 = 10^4 \times ISE = 10^4 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} (\omega_i - \omega_1)^2 dt \quad (22)$$

$$PI_2 = 10^2 \times IAE = 10^2 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} |\omega_i - \omega_1| dt \quad (23)$$

$$PI_3 = 10^2 \times ITAE = 10^2 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} t |\omega_i - \omega_1| dt \quad (24)$$

$$PI_4 = 10^4 \times ITSE = 10^4 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} t (\omega_i - \omega_1)^2 dt \quad (25)$$

Tablo 2'ye göre, tüm algoritmalar performans indeksleri açısından değerlendirildiğinde geliştirilen FDBPSO algoritmasının Senaryo 1 ve Senaryo 2 durumları açısından genel olarak etkili sonuçlar verdiği, ancak özellikle Senaryo 3 ve Senaryo 4'ün arıza durumları açısından ve amaç fonksiyonunda belirtilen senaryo durumlarının genel toplamı açısından en iyi sonuçları verdiği görülmektedir.

**Tablo 2.** Farklı senaryo durumlarında algoritmalar ile elde edilen performans indeksi değerleri.

	<i>Algoritma</i>	<i>PI<sub>1</sub></i>	<i>PI<sub>2</sub></i>	<i>PI<sub>3</sub></i>	<i>PI<sub>4</sub></i>
<b>Senaryo 1</b>	PSO [23]	0.2639	0.7719	0.6687	0.0981
	ABC [23]	0.2632	0.7075	0.4396	0.0915
	<b>FDBPSO</b>	0.2782	0.7595	0.5057	0.1043
<b>Senaryo 2</b>	PSO [23]	1.3941	2.0468	2.0739	0.8716
	ABC [23]	1.3888	1.9186	1.5785	0.8437
	<b>FDBPSO</b>	1.3821	1.9497	1.6620	0.8379
<b>Senaryo 3</b>	PSO [23]	0.4306	0.9999	0.8642	0.1810
	ABC [23]	0.4247	0.8948	0.5616	0.1677
	<b>FDBPSO</b>	0.4164	0.8558	0.5078	0.1569
<b>Senaryo 4</b>	PSO [23]	8.0540	5.3767	6.6603	7.6757
	ABC [23]	7.9705	5.1613	5.8611	7.4584
	<b>FDBPSO</b>	7.8953	5.1084	5.7569	7.3008

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, PSS parametrelerinin en uygun parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, yeni ve etkili bir çözüm yöntemi olarak FDBPSO metasezgisel optimizasyon algoritması önerilmiştir. Bu gerçek dünya mühendislik probleminin çözümünde, PSO algoritmasının arama performansı, yeni ve etkili bir yöntem olan FDB seçim yöntemi ile geliştirilmiştir. FDB yöntemi sayesinde PSO algoritmasının keşif yeteneği geliştirilmiş ve dengeli bir arama mekanizması sağlanmıştır. Önerilen yöntemin etkisi en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi amacıyla literatürde yer alan etkili yöntemlerden olan ABC ve PSO algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen amaç fonksiyonuna göre, WSCC 3-makine 9-baralı test sisteminde kapsamlı bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen minimum uygunluk değeri sonuçlarına göre, önerilen FDBPSO algoritması karşılaştırılan diğer metasezgisel algoritmalara kıyasla daha etkili sonuçlar sunmuştur. Öte yandan optimize edilen PSS parametrelerine bağlı olarak gerçekleştirilen simülasyonlara göre dört farklı senaryonun genelinde maksimum ve minimum aşım değerleri ve yerleşme zamanları açısından performans indekslerine bağlı olarak değerlendirme yapıldığında FDBPSO'nun ABC ve PSO yöntemlerine kıyasla daha etkili sonuçlar sunduğu görülmektedir. Bu çalışma ile güç sistemlerinde kullanılan otomatik gerilim regülatörü ve Esnek AC iletim sistemi cihazları gibi farklı denetleyici modellerinin en uygun parametrelerinin bulunmasına ve geliştirilen FDB seçim yönteminin diğer metasezgisel optimizasyon algoritmaları ile optimizasyon problemlerinin çözümlerine uygulanabilmesine zemin hazırlanmaktadır.

## Yazar Katkıları

Tüm yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (Proje No:2022.06.03.1281 ) tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] D. Mondal, A. Chakrabarti, and A. Sengupta, "Power system small signal stability analysis and control", Academic Press, 2020.
- [2] D. Chitara, K.R. Niazi, A. Swarnkar and N. Gupta, "Cuckoo search optimization algorithm for designing of a multimachine power system stabilizer," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no.4, pp. 3056-3065, 2018..
- [3] M. Jokarzadeh, M. Abedini, and A. Seifi, "Improving power system damping using a combination of optimal control theory and differential evolution algorithm," ISA transactions, vol. 90, pp. 169-177, 2019.
- [4] F.P. Demello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control," IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. 88, no. 4, pp. 316-329, 1969.
- [5] E. Larsen and D. Swann, "Applying power system stabilizers part I: general concepts," IEEE Trans Power Appar Syst., vol.100, no.6, pp. 3017-3024,1981.
- [6] E. Larsen and D. Swann, "Applying power system stabilizers part III: practical considerations," IEEE Trans Power Appar Syst., vol.100, no.6, pp. 3034-3046, 1981.
- [7] M.J. Gibbard, "Coordinated design of multimachine power system stabilisers based on damping torque concepts," IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution., vol.135, no.4, pp.276,1988.
- [8] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers and M.S. Zywno, "Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 4, no. 2, pp. 614-626, 1989.
- [9] L.Abualigah, D. Yousri, and M.A Elaziz, "Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm," Comput Ind Eng. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107250>, 2021.
- [10] L.H. Hassan , M. Moghavvemi, H.A. Almurib, K.M. Muttaqi, V.G. Ganapathy, "Optimization of power system stabilizers using participation factor and genetic algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 55, pp. 668-679, 2014.
- [11] K. Sebaa and M. Boudour, "Optimal allocations and tuning of robust power system stabilizer using genetic algorithms," Electr Power Syst Res.,vol.79, no.2, pp. 406-416, 2009.
- [12] M.A. Abido, "Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization," IEEE transactions on energy conversion, vol.17, no. 3, pp. 406-413, 2002.
- [13] S.M. Abd-Elazim and E.S. Ali, "Power system stability enhancement via bacteria foraging optimization algorithm," Arabian Journal for Science and Engineering, vol.38, no. 3, pp.599-611, 2013.
- [14] M. Mohammadi and N. Ghadimi, "Optimal location and optimized parameters for robust power system stabilizer using honeybee mating optimization," Complexity, vol.21, no.1,pp. 242-258, 2015.
- [15] S.M. Abd-Elazim and E.S. Ali, "Optimal power system stabilizers design via cuckoo search algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.75, pp. 99-107, 2016.
- [16] S. Ekinci, "Optimal design of power system stabilizer using sine cosine algorithm," J Fac Eng Archit Gazi Univ., vol.34, no.3, pp. 1329-1350, 2019.
- [17] D. Butti, S.K. Mangipudi, and S.R. Rayapudi, "An improved whale optimization algorithm for the design of multi-machine power system stabilizer," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 30, no. 5, pp. e12314, 2020.
- [18] R. Devarapalli, B. Bhattacharyya, N.K. Sinha, and B. Dey, "Amended GWO approach based multi-machine power system stability enhancement," ISA transactions, vol. 109, pp. 152-174, 2021.
- [19] B. Morales-Castañeda, D.Zaldivar, E. Cuevas, F. Fausto and A. Rodríguez, "A better balance in metaheuristic algorithms: Does it exist?," Swarm and Evolutionary Computation, vol. 54, pp. 100671, 2020.
- [20] J. Xu and J. Zhang, "Exploration-exploitation tradeoffs in metaheuristics: survey and analysis," in: Proc. 33rd Chinese Control Conf, (CCC), pp. 8633-8638, 2014.
- [21] M.Z. Ali, N.H. Awad, R.G. Reynolds, and P.N. Suganthan, "A balanced fuzzy cultural algorithm with a modified levy flight search for real parameter optimization," Inform. Sci. vol. 447, pp. 12-35, 2018.
- [22] H.T Kahraman, S.Aras, and E.Gedikli, "Fitness-distance balance (FDB): a new selection method for meta-heuristic search algorithms," Knowledge-Based Systems, vol. 190, pp. 105169, 2020.
- [23] S Ekinci, "Çok makinalı güç sisteminde açısız kararlılık analizi ve kontrolör parametre Optimizasyonu," (Doktora tezi Fen Bilimleri Enstitüsü), 2015.
- [24] A. Farah, T.Guesmi, H.H. Abdallah, and A. Ouali. "A novel chaotic teaching-learning-based optimization algorithm for multi-machine power system stabilizers design problem," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 77, pp. 197-209, 2016.
- [25] P.W.Sauer and M.A. Pai, "Power System Dynamics and Stability," Urbana: Pearson Education, 1998.
- [26] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in: Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, pp. 39-43, 1995.
- [27] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in: The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, Anchorage, pp. 69-73, 1998.
- [28] J.J. Liang, A.K. Qin, P.N. Suganthan, and S. Baskar, "Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions," IEEE Trans.Evol. Comput., pp. 281-295, 2006.
- [29] H.T Kahraman, S. Aras, and E.Gedikli, "Fitness-distance balance (FDB): a new selection method for meta-heuristic search algorithms," Knowledge-Based Systems, vol. 190, pp. 105169, 2020.