

# Rüzgâr Üretimini Yoğun Olduğu Bölgede Kısıt Yönetimi için Faz Kaydırıcı Transformatörün Meta-Sezgisel Yöntemlerle Optimal Yerleşimi

## *Optimal Placement of Phase Shifting Transformer for Congestion Management in High Wind Generation Areas using Meta-Heuristics*

Erdi DOĞAN<sup>1</sup>, İnanç Özge AKSU<sup>2</sup>, Abdussamet KANDEMİR<sup>1</sup>, Ahmet Kerem KÖSEOĞLU<sup>3</sup>, Tuğçe DEMİRDELEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

erdi.dogan.teias@gmail.com, abdussamet.kandemir@teias.gov.tr

<sup>2</sup>Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

oaksu@atu.edu.tr, tugcedemirdelen@gmail.com

<sup>3</sup>BEST Transformatör A.Ş.

kerem.koseoglu@besttransformer.com

### Özet

Bu çalışmada Türkiye Elektrik İletim Sisteminin Batı Anadolu Bölgesinde Faz Kaydırıcı Transformatör (FKT) ihtiyacı analiz edilmiştir. Bu bölgede rüzgâr kurulu gücünün yüksek olması nedeniyle 400 kV ile 154 kV gerilim seviyesi arasında irtibatı sağlayan 400/154 kV Ototransformatörlerde (OTR) rüzgâr üretimlerinin seviyesine bağlı olarak aşırı yüklenmelerin gerçekleşeceği öngörülmektedir. Bu nedenle OTR kullanımı yerine şebekeye 400/154 kV FKT entegrasyonunun esnek kontrol ve arz güvenliği açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda ilgili bölgede hangi Transformatör Merkezine hangi açıyla FKT yerleştirmenin daha doğru olacağını tespit edebilmek amacıyla Meta-sezgisel algoritmalar olan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Ateş Böceği Algoritması kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler göz önüne alındığında OTR yerine FKT kullanılmasının sistem arz güvenliği açısından önemli olduğu görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Faz Kaydırıcı Transformatör, Yoğun Rüzgâr Üretimi, Esnek Kontrol, Kısıt Analizi, Sistem Güvenliği.

### Abstract

This paper investigates the necessity of Phase Shifting Transformer (PST) at West-Anatolian Area of Turkish Electricity Transmission System. It is predicted that the 400/154 kV Autotransformers (Aut.) connecting between 400 kV and 154 kV voltage levels will experience overloads depending on the level of wind generation due to the high wind installed power in this region. Therefore,

it is thought that the integration of 400/154 kV FKT into the grid instead of using OTR will be beneficial in terms of flexible control and security of supply. In this direction, Meta-heuristic algorithms, Particle Swarm Optimization and Firefly Algorithm, were used in order to determine which substation and at which angle to place PST would be more accurate in the relevant region, and the results were compared. Considering the analyzes made, it is seen that the use of PST instead of Aut. is important in terms of system security.

**Keywords:** Phase Shifting Transformer, High Wind Generation, Flexible Control, Contingency Analysis, System Security.

### 1. Giriş

Faz Kaydırıcı Transformatörler (FKT) hem şebekeler arası bağlantı hatlarında hem de şebeke içi aktif güç akışı kontrolünde kullanılan bir geleneksel Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (EAİS) teçhizatıdır. Genellikle ülkeler arası ticarete enerji alış-veriş dengesini kurabilmek amacıyla kullanılan FKT'ler, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla birlikte şebeke içi kullanımlarda da gündeme gelmeye başlamıştır.

FKT iletim sistemi transfer kapasitesini iyileştirmek, meydana gelebilecek kısıtlara önlem almak, işletme maliyetlerini düşürmek ve sistem kararlılığını artırmak gibi birçok farklı amaç doğrultusunda kullanılmaktadır [1]. Örneğin 2002 yılında Hollanda'nın 5 farklı dış bağlantısı olmasına rağmen coğrafik ve elektroteknik pozisyonundan dolayı Hollanda'ya Almanya üzerinden daha yüksek miktarda güç akışı meydana gelmekte ve bu durum toplam transfer kapasitesini sınırlandırmaktadır. Alternatif iletim yatırımlarının görece daha fazla zaman

alması nedeniyle 380 kV 1000 MVA FKT yatırımıyla iletim kapasitesi başarıyla artırılmıştır [2]. Şebekede FKT kullanımının faydalı olması için konumu ve açısının farklı çalışma koşulları göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekir. Bu noktada FKT'nin şebekeye entegrasyonu bir optimizasyon problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Son yıllarda lineer olmayan karmaşık problemlerin çözümünde, meta-sezgisel yöntemlerin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) [3] ve Ateşböceği Algoritması (AA) [4] metotları da doğal esinli tekniklere dayanan meta-sezgisel algoritmalarıdır. PST alanında yapılan birçok çalışmada, bu optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Korab ve ark., 2021 yılında, PST'lerin güç akışlarını kabul edilebilir sınırlarda tutmak için çalışma yapmışlardır [5]. Yapılan bu çalışmada, bireysel PST'lerin optimum ayarı PSO yöntemi kullanılarak sağlanmıştır. Çalışma sonunda, programlanmamış akışlarda önemli bir azalma görülmüştür. 2018 yılında, Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)- Tristör Kontrollü Faz Kaydırmalı Transformator (TCPST) üzerinde çalışma yapılmıştır [6]. Gerilim profilini iyileştirmek ve sistemin güç kayıplarını azaltmak amacıyla kapasitör banklarının ve TCPST-TCSC kombinasyonunun optimum konumunu ve boyutlandırmasını belirlemek için PSO algoritması araştırılmıştır. Çalışma sonunda, PSO ile elde edilen sonuçlar, Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması ile elde edilen çözümlerle karşılaştırılmıştır ve PSO algoritması ile daha iyi sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir. Bir diğer çalışmada AA, bir sistemin gerçek güç kaybının ve gerilim kararlılık sınırının eşzamanlı optimizasyonu için hibrit FACTS cihazının kontrol değişkenlerini optimize etmek için kullanılmıştır [7]. Çalışma sonunda farklı iki kontrolörden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yöntemin başarısı gösterilmiştir.

Çeşitli şebekelerde birçok başarılı projede kullanılan FKT'nin ülkemizdeki potansiyel kullanım alanlarının araştırılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, çalışmamızın amacı Türkiye Elektrik İletim Sisteminde rüzgar santrallerinin yoğunlaştığı Batı Anadolu Bölgesinde rüzgardan elde edilen enerjiden kaynaklanan dengersiz yüklenmeleri ortadan kaldıracak 400/154 kV FKT'nin optimal yeri ve açısının bulunmasıdır.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde sıralanmıştır: Bölüm 2'de problemin tanımı yapılmış ve problemin çözümü için uygulanan yaklaşımlar açıklanmıştır, Bölüm 3'te Meta-sezgisel yöntemler olan PSO ve AA algoritmaları hakkında genel bilgiler verilmiştir, Bölüm 4'te kullanılan verinin neden ve çalışılan bölgenin seçim nedeni verilmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur, Bölüm 5'te ise çalışmanın sonuçları paylaşılmıştır.

## 2. Problem Tanımı

Problemin amacı ilgili bölgede kısıt durumunda yaşanan aşırı yüklenmelerin, yerleştirilecek FKT ile ortadan kaldırılması veya hafifletilmesidir. Arz güvenliğini esas alan kısıt analizi kapsamında N-1 durumunda meydana gelen aşırı yüklenmeleri ortadan kaldıracak FKT'nin

tespiti noktasında Meta-sezgisel yaklaşımlar uygulanmıştır.

### 2.1. Faz Kaydırıcı Transformator (FKT)

FKT'ler şebekenin doğal empedansı ve potansiyel farklılara göre oluşan aktif güç akışını değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Bu anlamda adeta şebekede bir vana gibi çalışarak iletim sistemi operatörüne ileri seviye kontrol imkânı sunmaktadır. Şebekeler arası bağlantı (farklı gerilim), paralel hatların yüklenmesi ve yük akış kontrolü (yönü ve seviyesi) sağlayabilmesi en uygun çözümlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışma mantığında; hattaki faz açısını ayarlayarak, iki uç arasındaki açı farkından dolayı vektörel gerilim farkı ile akış yönünü değiştirmek yatmaktadır [8].

FKT'ler ototransformatör olarak da üretilebilmektedir. Bu tasarım boyutsal açıdan avantaj sağlamaktadır. Bu tip transformatörlerde Yük Altında Kademe Değiştiriciler (On Load Tap Changer - OLTC) ile sarım eklemeyi çıkarma yapılarak gerilim değiştirme ve faz açısı değiştirme işlemleri yapılabilmektedir. Gerilim yüzdesine göre sarım adedi devreye alınarak istenilen açı elde edilir [9]. Çift aktif kısımlı FKT'ler olduğu gibi ayar aralığına göre tek aktif kısımda da çözüm sunulabilmektedir. Gerilim seviyeleri 765kV seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Quadrature Booster teknolojisi ile 1200MVA gücünde FKT'ler Almanya'da kullanılmaktadır.

Ototransformatör FKT tasarımında karşılaşılan en önemli zorluk, kademe değişimiyle meydana gelen Değişken Akıyı (Variable Flux) dikkate alacak kombinasyonun oluşturulmasıdır. Ancak çeşitli çalışmalarda Ototransformatör FKT'nin başarıyla uygulandığı görülmektedir. Bu doğrultuda ototransformatör yerine FKT kullanımına Belçika ve Fransa arasında gerçekleşen enerji alış-verişi nedeniyle kısıt durumunda meydana gelen aşırı yüklenmelerin önüne geçebilmek için uygulanan 220/154 kV 400 MVA FKT örnek gösterilebilir [10].

### 2.2. Amaç Fonksiyonu

Problemin güç sistemini termal sınırlar dahilinde işletmeye yönelik FKT lokasyonu ve açısının belirleneceği tek amaçlı bir optimizasyon problemidir.

$$\text{Min. } \Rightarrow A_y \quad (1)$$

Meta-sezgisel algoritmaların Eşitlik-1'de verilen  $A_y$  amaç fonksiyonunu minimize etmesi beklenmektedir.

$$A_y = T_{ay} + K_{ay} \quad (2)$$

Denklem-3'te  $A_y$  değişkeninin içeriği sunulmaktadır.  $T_{ay}$ , temel durumda sistemde meydana gelen aşırı yüklenmeleri temsil etmektedir. Başka bir ifadeyle, sistemde herhangi bir kısıt oluşmamışken aşırı yüklenen teçhizatların da amaç fonksiyonunda yeri bulunmaktadır,  $K_{ay}$  ise iletim hatları, ototransformatör ve jeneratörlerde meydana gelen kısıtların neden olduğu aşırı yüklenmeleri temsil eden değişkendir. Bu doğrultuda  $A_y$  amacının minimize edilmesi, hem temel durumda hem de N-1

durumunda sistemde görülen aşırı yüklenmelerin minimize edilmesi anlamına gelmektedir.

### 2.2.1. Temel Durum Aşırı Yüklenme

Şebekede bulunan iletim hatları ve ototransformatörlerin temel durumda aşırı yüklenmesi durumu amaç fonksiyonuna Eşitlik-3'te verilen  $T_{ay}$  bileşeniyle aktarılmaktadır.

$$T_{ay} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{a_i^y}{n} \right)^2 \quad (3)$$

Burada  $a_i^y$  i. ekipmanın temel durum yüzdesel yüklenme miktarını temsil etmektedir. Temel durum yüklenme analizinde teçhizatların maksimum termik yüklenme oranları dikkate alınmıştır. Denklemde verilen n ise görece daha önemli olan ekipmanların amaç fonksiyonundaki ağırlığını artırabilmek için kullanılan bir katsayıdır.

### 2.2.2. Kısıt Durumu Aşırı Yüklenme

Temel durumda iletim sistemi operatörleri iletim hatları veya ototransformatörleri termal sınırın (hatların bahar yükü taşıma kapasiteleri) üzerinde işletmekten kaçınır. Ancak N-1 durumunda asıl dikkat edilen nokta termal sınırın geçilip geçilmediği değil, aşırı akımdan servis harici edilip edilmeyeceğidir (kış yükü taşıma kapasitesi). Kısıt durumunda aşırı yüklenen teçhizat servis harici olmazsa ilgili ekipmanın yükünü termal limitlerin altına çekecek aksiyonlar arıza sonrası risk yönetimi kapsamında alınmaktadır. Dolayısıyla kısıt durumunda kısa süreliğine de olsa hatların termal sınırların üzerinde yüklenmesine müsaade edilebilir. Başka bir ifadeyle kısıt durumunda bir iletim hattı %100 yükleniyorsa aşırı akım röleleri vasıtasıyla servis harici edilmektedir ve bu senaryo engellenmelidir. Temel durumda ise bahsedilen %100 yüklenme ekipmanların servis harici olma sınırı değil termal yüklenme sınırır. Örneğin, 477 MCM bir iletim hattı için termal sınır 132 MVA iken aşırı akımdan açma sınırı 180 MVA'dır. Eşitlik-4'te verilen  $K_{ay}$  içeriğiyle kısıt durumunda meydana gelen aşırı yüklenmelerin amaç fonksiyonuna aktarılması sağlanmaktadır.

$$K_{ay} = \left( \sum_{c=1}^{K_S} \sum_{i=1}^N \frac{a_{ci}^y}{n} \right)^2 \quad (4)$$

Burada  $a_{ci}^y$  c. kısıtta i. hattın yüzdesel yüklenme oranını temsil ederken, n katsayısı Eşitlik-3'te olduğu gibi bazı ekipmanların ağırlığını artırmak için kullanılmaktadır.

### 2.2.3. Aşırı Yüklenmede Kademe Yaklaşımı

Çalışmamız kapsamında temel durum ve N-1 durumunda meydana gelen aşırı yüklenmelerin amaç fonksiyonundaki etkileri kademelendirilmiştir. Temel durumda termal sınıra göre %90'ın üzerinde yüklenen bir teçhizat varsa bu durum maliyet fonksiyonuna yansıtılmaktadır. Temel durum yüklenme miktarı %90 ile %92 arasındaysa yüzdesel yüklenme miktarının 10'a bölümünün karesi maliyete eklenmiştir. Başka bir ifadeyle n katsayısı 10 seçilmiştir. Eğer temel durumda %92 üzerinde bir yüklenme söz konusu ise yüzdesel yüklenme miktarının iki katının 10'a bölümü karesi alınarak maliyete eklenmektedir. Dolayısıyla ikinci

durumda yüklenme miktarının maliyet fonksiyonunda gösterdiği etki yüksek olmaktadır.

Kısıt durumu için hazırlanan senaryoda yüzdelik dilimler 4 kademeye ayrılmıştır. Özellikle N-1 durumunda %97 üzerinde yüklenen bir teçhizat bulunuyorsa bu yüklenme miktarının 4 katı 10'a bölünerek karesi alınıp maliyet fonksiyonuna eklenmektedir.

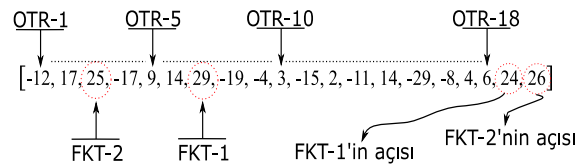
### 2.3. Kısıt Analizinde Yöntem Seçimi

Problemin çözümü için iteratif teknikler olan Meta-sezgisel algoritmaların her yinelemede sistemin kısıt analizini gerçekleştirmesi gerekir. N-1 kısıt analizi, ilgili bölgede bulunan ve bu bölgede bulunmasa dahi hedef bölgedeki güç akışlarını etkileyebilecek olan iletim hatları, ototransformatörler (OTR) ve jeneratörlerin teker teker servis harici edilerek hedef bölgedeki diğer yüksek gerilim teçhizatları üzerindeki etkilerinin analiz edildiği yaklaşımdır.

Alternatif akım (AA) güç eşitliklerine göre yapılacak bir N-1 analizinde bir teçhizat servis harici edilir, AA güç akışına göre gerçekleşen yüklenme durumlarına bakılır, servis harici edilen ekipman servise alınır ve kısıt listesinde bulunan tüm teçhizatlara aynı işlem uygulanana kadar süreç devam eder. Sezgi-üstü algoritmaların on binlerce kısıt analizi uygulayacağını düşündüğümüzde bu yaklaşımın zaman alacağı açıktır. Çözüm süresini kısaltacak şekilde problemi vektörize edebilmek için bazı ihmallerin yapıldığı doğru akım güç akışlarına dayalı veya kesinti dağılım faktörlerine dayalı kısıt analizi kullanılabilir. Özellikle reaktif güç rezervlerinin yeterli olduğu düşünülüyorsa lineer yöntemlerin uygulanması mümkündür. Her ne kadar lineer yöntemlerde aktif güç akışlarında da sapmalar yaşansa da bunlar ihmal edilebilecek düzeydedir. Yine de lineer kısıt analizleriyle elde edilen çıktıların lineer olmayan analizlerle test edilmesinde fayda vardır.

### 2.4. Sezgi-üstü Algoritmaların için Oluşturulmuş Birey Yapısı

Batı Anadolu Bölgesinde FKT yerleşimi mevcut durumda işletilen ototransformatörler yerine uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. Yani sezgi-üstü algoritmalar her yinelemede OTR veya banklardan 2 tanesi yerine FKT yerleştirip açma ayarı yaparak sistemin kısıt analizi performansını iyileştirmeye çalışmaktadır.



**Şekil 1.** Meta-sezgisel algoritmalar için oluşturulmuş birey yapısı

Şekil 1'de tasarlanan örnek bir birey yapısı gösterilmektedir. Liste içerisinde ilk 18'i OTR veya bankları ve son 2'si FKT açılarını temsil eden 20 veri bulunmaktadır. Verilerin tamamı +32 ile -32 arasında değişmektedir. Liste içerisinde bulunan ilk 18 veriden en



büyük değere sahip iki OTR veya bank yerine FKT yerleştirilerek açılı ayarları listenin son iki hanesinde belirtilen verilere göre gerçekleştirilmektedir. Örnek birey yapımızda listenin 7. sırasında bulunan OTR yerine 1. FKT yerleştirilerek açısı 24 dereceye ayarlanmaktadır. Benzer şekilde listenin 3. sırasında yer alan 25 sayılı en büyük 2. sayı olduğu için 2. FKT bu sıradaki OTR yerine eklenerek açısı 26 yapılmaktadır. Oluşturulan bu senaryo kısıt analizinden geçirilerek sistemin N-1 performansında herhangi bir iyileşme olup olmadığı test edilmektedir. Yinelemeler tamamlandığında en iyi sonucun elde edilmesi amaçlanmaktadır. Burada eklenen FKT'lerin gücü çıkarılan OTR'lerin gücüyle aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Örneğin yerine FKT eklenecek bir bankın gücü 500 MVA ise ilgili FKT'nin de gücü 500 MVA yapılmaktadır. Sezgi-üstü algoritmalar liste içerisinde bulunan ve OTR konumlarını temsil eden değişkenlerin pozisyonlarını güncelleyerek daha iyi işletme koşullarının oluşmasını sağlayacaktır.

### 3. Meta-Sezgisel Yöntemler

Bu çalışmada değişken rüzgâr üretiminin yoğun olduğu Türkiye Şebekesi Batı Anadolu bölgesinde sistem kısıtlarını azaltacak, aşırı yüklenmeleri hafifletecek FKT konumu ve açısının tespit edilebilmesi amacıyla Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Ateş Böceği Algoritması kullanılmıştır.

#### 3.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

Sinirbilim, bilişsel psikoloji, sosyal etoloji ve davranış bilimleri alanındaki çalışmalardan esinlenerek, sürü zekâsı kavramı, 1989 yılında tanıtılmıştır. Sürü zekâsı yaklaşımı genel olarak bilgi işlem ve yapay zeka alanındaki problemlerin optimizasyon mantığıyla çözülebileceği durumlarda kullanılmaktadır. PSO algoritması da sürü tabanlı bir algoritmadır. Bu algoritma çalışması sırasında, türev bilgisine ihtiyaç duymaması ve hem kendi en iyi konumlarını hem de sürüdeki en iyi konum değerlerini hatırlamaları açısından iyi olmasından dolayı, problem çözümlerine diğer optimizasyon algoritmalarına göre daha kolay uygulanmaktadır.

PSO algoritması, global arama özelliğine sahip ve kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş, evrimsel hesaplama tekniğine dayalı optimizasyon algoritmasıdır [3]. Temel PSO, balık yetiştirme ve kuş sürüleri gibi sürü üzerine yapılan araştırmalardan geliştirilmiştir.

PSO algoritması, başlangıçta her biri bir konum ve hız ile ilişkili olan rastgele parçacıklarla oluşturulmuş bir popülasyon ile çalışmaya başlar. Hızlar, her bir parçacığın ve komşularının arama uzayında uçarken tarihsel davranışına göre ayarlanır. Pozisyonlar, mevcut pozisyona ve bir sonraki adımdaki hızlara göre güncellenir. Bu nedenle, parçacıklar, arama süreci rotası üzerinde daha iyi olana doğru uçuş eğilimindedir.

PSO algoritması ilk olarak çözüm uzayına rastgele dağıtılmış parçacıklar ile çalışmaya başlar. Bu

parçacıklar algoritmanın çalışma sırasında kendi elde ettiği en iyi değer 'pbest' ve sürüdeki en iyi 'gbest' değeri olan 'gbest' değerlerine göre hız ve konum güncellemesi yaparlar. Bu şekilde çözüm uzayında dolaşarak en iyi çözümü ararlar. PSO algoritmasında parçacıkların arama uzayındaki hareketini gösteren denklemler şu şekildedir:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 * r_1 * (p_{ibest} - x_i(t)) + c_2 * r_2 * (g_{best} - x_i(t)) \quad (5)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (6)$$

Eşitlik-5 parçacık hızının güncellenmesinden sorumluyken; Eşitlik-6 güncellenen hız değerine göre parçacığın arama uzayında hareket etmesini sağlamaktadır. Bu denklemlerde  $t$  iterasyon sayısını,  $v_i$  ve  $x_i$  i. parçacığın hızını ve konumunu ifade etmektedir.  $c_1$  ve  $c_2$  hızlandırma katsayılarıdır. Bu katsayılar genellikle  $[0, 2]$  aralığında seçilirler ve PSO'nun yakınsama oranını etkilerler.  $r_1$  ve  $r_2$  ( $[0, 1]$  aralığında seçilen rastgele sayılardır.  $p_{ibest}$  i. parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi çözümü temsil ederken  $g_{best}$  sürünün ilgili iterasyona kadar elde edebildiği en iyi çözümdür.

#### 3.2. Ateşböceği Algoritması (AA)

Ateşböceği algoritması [4], doğadaki ateşböceklerinin birbirleriyle haberleşmeleri ve yaşamlarını devam ettirebilmeleri için ortaya koydukları davranışlardan esinlenerek geliştirilmiş bir sürü tabanlı optimizasyon algoritmasıdır. Ateşböceği algoritması çalışma sırasında az parametre kullanımı, problemlere uyarlanmasının kolay olması ve algoritma adımlarının anlaşılabilir olması nedeniyle birçok uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Algoritmanın çalışma mantığında 3 disiplin bulunmaktadır: 1-) Ateşböceklerinin cinsiyet ayrımı olmaksızın birbirlerini etkiledikleri kabul edilmektedir, 2-) Ateşböceklerinin etkinlik değeri parlaklık derecesine göre belirlenmektedir, 3-) Ateşböceğinin çekicilik değerleri de etkinlik değerine göre değişmektedir.

AA yönteminin çalışma adımlarında 2 önemli parametre bulunmaktadır: ışık yoğunluğu (I) ve çekicilik ( $\beta$ ). Ateşböceklerinin çekiciliği, diğer ateşböceğine olan mesafelerine göre değişir. Bu nedenle ilk olarak iki ateşböceği arasındaki mesafenin bilinmesi gerekmektedir.  $x_i$  ve  $x_j$  değişkenlerinin  $i$ . ve  $j$ . ateşböceklerinin konumları olduğunu varsayarsak, iki ateşböceği arasındaki mesafe şu şekilde hesaplanır:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| \quad (7)$$

Ateşböceklerine ait ışık yoğunluğu fonksiyonu ise aşağıda verildiği gibi ifade edilmektedir:

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (8)$$

Burada  $I_0$  başlangıç ışık yoğunluğunu,  $\gamma$  ışık soğurma katsayısını,  $r$  iki ateşböceği arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. İdealleştirilmiş kurallardan, simülasyonumuzda varsaydığımız ateşböceğinin çekiciliği ışık yoğunluğu  $I$  ile orantılıdır. Dolayısıyla ateşböceğinin ışık çekme katsayısı  $\beta$  ışık yoğunluğu

katsayısına benzer şekilde tanımlanır. Ateşböcekleri arasındaki mesafe bilindiğine göre, ateşböceğinin çekiciliği ( $\beta$ ) şu şekilde hesaplanır:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (9)$$

Buradaki  $\beta_0$  ( $r = 0$ )'daki maksimum çekicilik parametresi ve  $\gamma$  ışık soğurma katsayısıdır. Bu parametre ateşböceğine ait olan çekicilik değerinin değişimini göstermektedir. Bu parametrenin alacağı değere göre algoritmanın yakınsama hızı etkilenmektedir. Işığın soğurma katsayısı için kullanılan parametre değeri sıfır ile sonsuz arasında değişmektedir. Bu katsayı sıfır olduğunda sabit bir çekicilik derecesi ile çalışılmakta, sonsuz olduğunda ise çekicilik derecesinin olmadığı bir ortamda çalışılmaktadır.

Arama uzayındaki ateşböcekleri daha çekici olan ateşböceğine doğru hareket ederler. i. ateşböceğinin j. ateşböceğine göre hareketi şu şekilde olmaktadır:

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} * (x_j - x_i) + \alpha * (rand - 0.5) \quad (10)$$

Burada rand [0,1] aralığında random üretilen bir reel değeri ifade ederken  $\alpha$  rastgele seçim parametresidir.

Bu eşitlik üç kısımda incelenebilir. İlk kısım; i. ateşböceğinin mevcut pozisyonu ifade etmektedir. İkinci kısım; ateşböceğinin çekiciliğini göstermektedir. Son kısım ise rastgeleliği yansıtmaktadır. Üçüncü kısımdaki rastgelelik, o an ortamda daha parlak bir böcek yok ise o adımdaki ateşböceğinin rastgele olarak hareket etmesini sağlamaktadır.

#### 4. Analiz Sonuçları

Benzetim çalışmaları kapsamında kısıtları minimize edecek en uygun FKT konumu ve açısı PSO ve AA algoritması teknikleriyle çözülmüştür. Analizleri gerçekleştirmek için Python programlama dili kullanılmış olup, şebeke modeli PSS/E programıyla oluşturulmuştur. Hem PSO hem de AA algoritması için popülasyon sayısı 30 iterasyon sayısı 300 olarak seçilmiştir. FKT'lerin açısı +32 ile -32 derece arasında değişecek şekilde kurgulanmıştır.

##### 4.1. Kullanılan Veri

Bu çalışmada Türkiye Elektrik İletim Sisteminin 5 yıllık orta vadeli sistem planlama modeli kullanılmıştır. Söz konusu model PSS/E programında kullanılabilmesi için “.sav” formatında oluşturulmuştur. Bu model mevcut iletim şebekesinin üzerine şunları içermektedir: 1-) 5 yıl içerisinde tamamlanması öngörülen TEİAŞ iletim yatırımları (hat, transformatör merkezi, güç trafosu, ototransformatör, reaktör vb.), 2-) 5 yıl içerisinde tamamlanması öngörülen bağlantı anlaşması kapsamında yapılan iletim yatırımları (hatlar), 3-) 5 yıl içerisinde tamamlanması öngörülen iletim sistemi tüketicileri yatırımları, 4-) 5 yıl içerisinde tamamlanması öngörülen iletim ve dağıtımdan bağıli üretim santrali yatırımları, 5-)

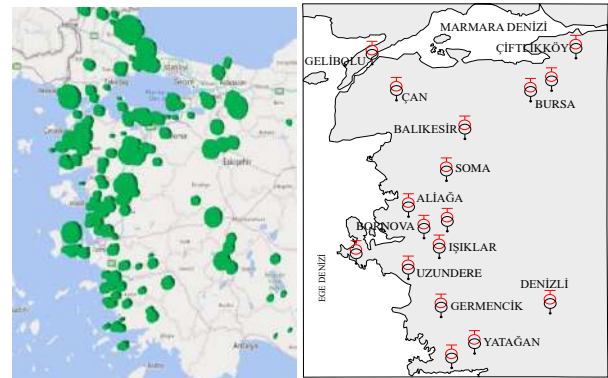
5 yıllık transformatör merkezi düzeyinde talep tahmin değerleri.

Yukarıda ifade edilen verileri içeren modelin oluşturulması, modelin doğrudan kullanılabilmesi anlamına gelmemektedir. Hazırlanan modelin yapılacak çalışmanın amacına yönelik olarak düzenlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada 400/154 kV FKT'nin rüzgâr yoğun bölgede aşırı yüklenmeye maruz kalan konvansiyonel ototransformatörlere göre kısıtları ortadan kaldırıp kaldıramayacağı incelendiğinden, RES kurulu gücünün yoğunlaştığı bölgede, görece üretimlerin yüksek olduğu ve tüketimlerin düşük olduğu İlkbahar mevsimi, benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere seçilmiştir. Sistem modeli bütünsel olsa da çalışmanın amacı doğrultusunda modelin Batı Anadolu bölümüne odaklanılmıştır. Mevsim seçiminde Çanakkale ve Balıkesir illerinde gerçekleşen rüzgâr üretimi ile yük arasındaki ilişki dikkate alınmıştır. Son 2 yılda gerçekleşen veriler incelendiğinde bahar aylarındaki yüksek rüzgâr üretimi ile düşük yük senaryosunun ilgili bölgede bulunan ototransformatörlerde kısıt oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Gerçekleşen bu veriler Yük Tevzi Bilgi Sistemi üzerinden elde edilmiştir.

Çalışılacak bölge ve mevsim seçildikten sonra ana sistem modeli yüksek rüzgâr üretimi ile düşük yükü yansıtan bahar modeli olacak şekilde düzenlenmiştir. Transformator merkezi bazında yükler düzenlenmiş, rüzgâr üretimleri içinse farklı ölçekler denlenmiştir. Rüzgâr üretimi bölgesel ve santral düzeyinde eş zamanlı %100 kapasite faktörüne erişebilse de bölgesel düzeyde bu saatler sınırlı olmaktadır. Bu nedenle modelde yüksek rüzgâr üretimi için %80 kapasite faktörü seçilmiştir.

##### 4.2. Rüzgâr Yoğun Bölgeye Genel Bakış

Rüzgâr yoğun bölge olarak ifade edilen Batı Anadolu Bölgesi hem mevcut durumda hem de planlama faaliyetleri kapsamında kurulması öngörülen yeni yatırımlarla diğer bölgelerimize nazaran daha yoğun kurulu güce sahiptir. Şekil 2 (a)'da kapasitesine göre boyutlandırılmış rüzgâr kurulu güçleri incelendiğinde Batı Anadolu'nun yoğun rüzgâr bölgesi olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 2. a) Kapasitesine göre boyutlandırılmış rüzgâr kurulu güçleri b) Potansiyel FKT pozisyonları Batı Anadolu Bölgesinde potansiyel FKT lokasyonları Şekil 2 (b)'de gösterilmektedir. Toplam 2 adet 400/154

kV FKT, mevcut durumda şebekede bulunan 2 adet 400/154 kV ototransformatör yerine yerleştirilmektedir. Bu bölgeden seçtiğimiz toplam 18 farklı ototransformatör veya bank (iki ototransformatörün birlikte işletildiği teçhizat) yerine eş zamanlı olarak yerleştirilecek 2 adet FKT'nin rüzgâr üretiminden kaynaklanan kısıtların önüne geçmesi amaçlanmaktadır.

#### 4.3. PSO ve AA ile Elde Edilen Optimal FKT konumu ve Açısı

Sezgi-üstü algoritmalar amaç fonksiyonunu minimize etmek için kısıt analizi yapılan bölgedeki yüklenmelerin tamamını %90'ın altına çekmeye çalışmaktadır. Sadece FKT'nin uygun lokasyona yerleştirilmesi ve uygun açı ayarının yapılmasıyla yüzdesel yüklenmeler arzu edilen seviyelere çekilemiyorsa, en azından %97 üzerinde yüklenen teçhizat sayısını minimum seviyeye indirmeye çalışarak sistemin kısıt performansını iyileştirecek şekilde kurgulanmıştır.

Bölüm 4.1'de sunulan veriler üzerinde Bölüm 2.2'de detayları açıklanan matematiksel yaklaşımın uygulanmasıyla birlikte henüz herhangi bir FKT yerleştirilmeden önce amaç fonksiyonun değeri 23757.80 olmuştur.

**Tablo 1.** Kısıt performansında başlangıç koşulları ile PSO ve AA sonuçlarının karşılaştırılması

	FKT Türü	Güç (MVA)	Açı (Derece)	Kısıt Sonucu
Başlangıç	-	-	-	23757.80
PSO	1.FKT	500	-6.69	5146.53
	2.FKT	500	-6.63	
AA	1.FKT	500	-6.71	4988.36
	2.FKT	500	-6.77	

PSO sonuçlarına göre Çan Havza TM'ye 2 adet 500 MVA FKT yerleştirilmiştir. FKT'lerden birinin açısı -6.69 derece olurken diğeri -6.63 bulunmuştur. PSO ile yerleştirilen FKT'ler kısıt performansında %78 oranında iyileşme sağlamıştır.

AA algoritmasından elde edilen sonuçlarda ise 2 adet 500 MVA FKT -6.71 ve -6.77 derecelik açılara ayarlanmıştır. Bu çalışma koşullarında kısıt performansında başlangıç durumuna göre %79 iyileşme sağlanırken, PSO'nun sunduğu sonuçlara göre %3 daha iyi performans elde edilmiştir.

#### 5. Sonuçlar

Bu çalışmada Türkiye Elektrik İletim Sisteminin Batı Anadolu Bölgesinde 400/154 kV ototransformatörler yerine 400/154 kV FKT kullanımının sistem kısıtlarında iyileşme açısından fayda analizi gerçekleştirilmiştir. Seçilen bölgede hali hazırda rüzgâr santrali kurulu gücü oldukça yüksektir ve bölgenin potansiyeline dayanarak bu kurulu gücün giderek artacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla rüzgâr üretimlerinin değişkenliğine paralel olarak 400 kV ile 154 kV gerilim seviyeleri arasında köprü olan ototransformatörlerin de kontrol edilebilir özellikte olmasının, sistem arz güvenliği açısından kıymetli bir kazanım olacağı düşünülmektedir.

Belirtilen nedenler doğrultusunda gelecek perspektifini yansıtan ve özenle seçilen sabit bir veri üzerinde

ototransformatörler üzerinde oluşan baskıyı azaltacak optimal FKT konumu ve açısının bulunması amaçlanmıştır. Belirlenen hedefleri gerçekleştirmek için birçok farklı alanda başarılı sonuçlar sunan PSO ve BA algoritmaları kullanılmıştır.

Mevcut şebeke modelini incelediğimizde Çanakkale ilimizde bulunan rüzgâr enerji santrallerindeki üretimin büyük bir bölümünün Çan Havza TM'de yer alan 4 adet 250 MVA ototransformatör üzerinden iletim sistemine aktarıldığı görülmektedir. Ayrıca ilgili bölgede rüzgâr enerji santralleri kurulu gücünün 5 yıl içerisinde 2 katına çıkması beklenmektedir. Dolayısıyla Meta-sezgisel algoritmalar beklediğimiz çıktı, Çan Havza TM'de yaşanan aşırı yüklenmelerin bölgede bulunan herhangi bir TM'ye yerleştirilecek FKT'ler marifetiyle sonlandırılmasıdır. Nitekim algoritmalar elde edilen sonuçlarla Çan Havzaya yerleştirilen 2 adet 500 MVA FKT'nin (veya 4 adet 250 MVA FKT'nin) kısıt performansını %79 oranında iyileştirdiği görülmektedir.

#### 6. Kaynaklar

- [1] Dakhare R., Chandrakar V. K., "Congestion Management by Phase Shifting Transformer Using Fuzzy Logic Control", *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2021.
- [2] Kling W.L., Klaar D.A.M. vd., "Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity", *Cigre Paris Session C2-207*, 2004.
- [3] Eberhart, R. ve Kennedy, J., "A new optimizer using particle swarm theory", *IEEE Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, 1995, 39-43.
- [4] Yang X.S. "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms", *Luniver Press*, 2008, 52-57.
- [5] Korab, R., Połomski, M. ve Owczarek, R., "Application of particle swarm optimization for optimal setting of Phase Shifting Transformers to minimize unscheduled active power flows", *Applied Soft Computing*, 105, 107243, 2021.
- [6] Suyono, H., Hasanah, R. N. ve Putri Pranyata, P. D., "Optimization of the Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer Using PSO Algorithm", *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, 8(6), (2088-8708), 2018.
- [7] Balachennaiah, P. ve Nagendra, P., "Firefly algorithm based multi-objective optimization using OUPFC in a power system", *TENCON 2017 IEEE Region 10 Conference*, 2017, 2901-2906.
- [8] Tümay, M., Demirdelen, T., Bal, S., Doğru, B., Cicibaş, A., Köseoğlu, A. K., Aksoy, M., "Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Dünyadaki Durumu ve Uygulama Alanlarının Literatür İncelemesi", *Güç Sistemleri Konferansı (CIGRE TÜRKİYE)*, 2016.
- [9] Ilceto, F., Marton, F., ve Darku, C., "EHV/HV Autotransformers with in-Phase And in-Quadrature Voltage Regulation, Applications in Ghana", *Cigre - Session Papers & Proceedings - A2-104*, 2012.
- [10] Rimez J., Van Der Planken R. vd., "Grid implementation of a 400MVA 220/150kV  $-15^{\circ}/+3^{\circ}$  phase shifting transformer for power flow control in the Belgian network: specification and operational considerations.", *Cigre Paris Session A2-202*, 2006.