

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını İçeren Optimal Güç Akışı için Uygunluk Mesafe Dengesi Tabanlı Üçgenleme Topolojisi Toplama İyileştiricisi

Ali YAZICI*¹, Uğur GÜVENÇ²

¹Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

(Alınış / Received: 18.07.2024, Kabul / Accepted: 23.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Optimal Güç Akışı,
Üçgenleme Topoloji Toplama
İyileştiricisi,
Güneş enerjisi,
Rüzgar enerjisi

Özet: Günümüzde talep edilen ve tüketilen enerji miktarında çok yoğun artışların olması ile birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminde artışlar olmaktadır. Bir elektrik şebekesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının dahil edilerek kullanılması ile birlikte ağı ekonomik ve verimli çalışabilmesi için en uygun şekilde planlanması problemi de ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr ve gücü entegreli güç sistemleri problemlerinden olan optimal güç akışı problemi ele alınmıştır. Optimal güç akışı problemi doğrusal olmayan yapıya ve çeşitli kısıtlamalara sahip olan, kontrol parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlendiği bir optimizasyon problemidir. Ayrıca, güneş ve rüzgar enerjisinin doğasını birleştirmek problemin karmaşıklığını artırmaktadır. Bu tür problemlerin çözümünde yapay zeka tekniklerinden olan sezgisel arama algoritmaları tercih edilmektedir. Bu çalışmada optimal güç akışı probleminin çözümü için Üçgenleme topolojisi toplama iyileştiricisi (ÜTTİ) algoritmasının öncelikle mesafe uygunluk dengesi tabanlı geliştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen algoritma rüzgar ve güneş enerji kaynaklarının dahil edildiği optimal güç akışı probleminde uygulanmış olup, literatürdeki farklı algoritmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edile sonuçlar, önerilen algoritmanın bu güç sistemi probleminde etkili olduğunu açık bir şekilde göstermektedir.

Fitness Distance Balance Based Triangulation Topology Aggregation Optimizer for Optimal Power Flow Including Renewable Energy Sources

Keywords

Optimal Power Flow,
Triangulation Topology
Aggregation Optimizer,
Solar Power,
Wind Power

Abstract: With the substantial increase in the amount of energy demanded and consumed today, there is also an increase in energy generation from renewable energy sources. Including renewable energy sources in an electrical grid and using them introduces the problem of planning the network in the most economical and efficient way. This thesis addresses the optimal power flow problem, which is one of the power system problems integrated with wind and solar power, both renewable energy sources. The optimal power flow problem is an optimization problem with a nonlinear structure and various constraints, where the best values of control parameters are determined. Additionally, combining the nature of solar and wind energy increases the complexity of the problem. Heuristic search algorithms, which are a type of artificial intelligence technique, are preferred in solving such problems. In this paper, the Triangulation Topology Aggregation Optimizer (TTAO) algorithm was first developed based on distance adequacy balance for the solution of the optimal power flow problem. The developed algorithm was applied to the optimal power flow problem including wind and solar energy sources and compared with the results of different algorithms in the literature. The obtained results clearly show that the proposed algorithm is effective in this power system problem.

1. Giriş

Teknolojinin sürekli olarak gelişmesiyle birlikte talep edilen ve tüketilen enerji miktarında çok yoğun artış olmaktadır. Ayrıca elektrik enerjisinin üretiminde fosil yakıt kullanımının elektriksel güç talebinin artışıyla doğru orantılı olarak artması, doğaya verilen zararın da artmasına neden olmuştur. Günümüzde elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması ve doğaya verilen zararın azaltılması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile enerji üretiminde artış durumu söz konusu olmuştur [1]. Dünyada en çok kullanılan ve tercih edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının başında rüzgar gücü ve güneş enerjisi gelmektedir. Bir elektrik şebekesine yenilenebilir enerji kaynaklarının dahil edilmesi ile birlikte şebekenin ekonomik ve verimli çalışabilmesi için en uygun şekilde planlanması problemini de ortaya çıkarmaktadır. Güç sistemlerinde en uygun işletim ve planlama süreçleri için en önemli problemlerden biri Optimal Güç Akışı (OGA) problemi olmuştur [2]. OGA probleminde temel amaç, çeşitli kısıtlar dikkate alınarak ve sistem güvenliği de ön planda tutularak, istenilen amaç doğrultusunda çalışmasını sağlayacak sistemin en uygun değişken parametrelerinin belirlenmesidir [3].

OGA problemi, yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmiş ve problemin en iyi çözümünü bulmak için çok sayıda farklı yöntem uygulanmıştır. İlk olarak araştırmacılar OGA problemini çözmek için çeşitli matematiksel yöntemler uygulamışlardır. Bunlar özellikle, iç nokta yöntemi [4] lineer ve lineer olmayan programlama [5], kuadratik programlama [6] gibi yöntemler olduğu görülmektedir. Ancak, OGA probleminin lineer olmayan ve kompleks özelliklerinden dolayı bu tür yöntemlerden başarılı sonuçlar alınamamaktadır. Matematiksel yöntemlerle en uygun çözüm bulunamamasından dolayı ve dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla, yapay zekanın alt dallarından olan sezgisel arama algoritmaları OGA probleminin çözümünde kullanılmaya başlamıştır. Bu algoritmaların temellerini genetik algoritma [7], geliştirilmiş genetik algoritma [8], tabu arama [9], parçacık sürüsü [10] ve diferansiyel evrim algoritması [11] oluşturmaktadır.

Bununla birlikte, son yıllarda, artan ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının dahil edildiği OGA probleminin çözülmesi için birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır [12-30]. Özellikle 2017 yılında Partha P. Biswas ve arkadaşlarının [31] yapmış rüzgar ve güneş enerjisinin dahil edilmiş olduğu öncü bir çalışma bulunmaktadır. Araştırmacılar bu çalışmalarında, rüzgar dağılımını Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile güneş ışınımı ise lognormal PDF kullanarak modellemişlerdir. IEEE-30 bara sistemi, reaktif güç özelliklerine sahip rüzgar

jeneratörlerini ve güneş enerjisi PV'sini barındıracak şekilde değiştirmişlerdir. OGA probleminin çözümü için de uygun kısıtlama işleme yönteminin dahil edildiği uyarlanabilir diferansiyel evrim algoritmasını (SHADE-SF) önermişlerdir.

Günümüzde, sezgisel arama algoritmalarının optimizasyon problemlerinde kullanılması amacıyla yeni algoritmaların geliştirilmesi devam etmektedir. 2024 yılında Zhao ve arkadaşları tarafından, üçgen topolojik benzerlikten ilham alan ve farklı boyutlara sahip benzer üçgen topolojik birimlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan Üçgenleme Topolojisi Toplama İyileştiricisi (ÜTTİ) [32] ismi verilen yeni bir algoritma önerilmiştir. Yapılan çalışmada, ÜTTİ algoritması yenilenebilir enerji kaynaklarının dahil edildiği OGA probleminin çözümü için önerilmiştir. Ayrıca, algoritma arama uzayında tuzaklara takıldığı için, algoritmadaki keşif ve sömürü dengesinin iyileştirilmesi amacıyla Kahraman ve arkadaşları tarafından geliştirilen Uygunluk Mesafe Dengesi (UMD) [33] tabanlı iyileştirme yöntemi kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları IEEE-30 bara sisteminde güneş ve rüzgar enerjilerinin dahil edilmesiyle elde edilen sistemde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın bu güç sistemi probleminde etkili olduğunu açık bir şekilde göstermektedir.

2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Entegreli Optimal Güç Akışı

Teknolojik gelişmelerin ilerlemesiyle birlikte elektrik enerjisi üretiminin talep edilen miktarı karşılaması ve üretilen enerjinin kullanıcılarla buluşturulması karmaşık bir sistem oluşturmaktadır. Güç sistemlerinin yüksek verimde çalışması için güç akışı hesaplamalarının yapılması ve en uygun parametrelerin elde edilmesi, çözülmesi gereken önemli bir optimizasyon problemi haline gelmiştir. Bu optimizasyon problemi, Optimal Güç Akışı (OGA) problemi olarak adlandırılır. Bu bölümde OGA problemi, rüzgar gücü ve güneş enerjisi tanıtılmış; rüzgar gücünün ve güneş enerjisinin optimal güç akışına dahil edilmesiyle oluşturulan farklı problem çeşitleri açıklanmıştır.

2.1. Optimal güç akışı problemi

Bir sistemde en verimli güç akışını sağlamak ve bu doğrultuda uygun yöntemi bulmak, oldukça uğraştırıcı ve önem arz eden bir konudur. Bu problemi aşmak, sistemle ilgili verilen parametreler ve kısıtlamalar dahilinde en iyi sonuca varmak için yapılan çalışmaların bütünüyle mümkündür. Sistemde, doğrusal ve konveks olmayan iyileştirme problemini, verilen belirli parametrelere göre, eşitlik ve eşitsizlik sınırlamalarına bağlı kalarak en iyi kontrol parametrelerinin belirlenmesi işlemine Optimal Güç Akışı (OGA) problemi denilmektedir [11]. OGA

problemi genel olarak aşağıda yer alan denklemler ile ifade edilir:

$$\text{Min } F(x,u) \quad (1)$$

$$g(x,u)=0 \quad (2)$$

$$h(x,u)\leq 0 \quad (3)$$

Yukarıda yer alan formüllerde mevcut olan x ve u ifadeleri sırasıyla bağımlı ve bağımsız değişkenlerin oluşturduğu vektörleri ifade etmektedir. $F(x,u)$, minimum değeri elde edilmek istenilen amaç fonksiyonunu, $g(x,u)$ ve $h(x,u)$ fonksiyonları ise sırasıyla eşitlik sınırlarını ve eşitsizlik kısıtlarını tanımlayan fonksiyonlardır. x vektörü; salınım barasında yer alan generatörün aktif gücü P_{G1} , yük bara gerilimini V_L , generatörün reaktif gücü Q_G ve iletim hattı yükü S_i şeklinde tanımlanan bağımlı değişkenlerden oluşur ve Denklem (4)'teki gibi ifade edilir:

$$x = [P_{G1}, V_{L1} \dots V_{LN}, Q_{G1} \dots Q_{GNG}, S_{11} \dots S_{1NL}] \quad (4)$$

Yük bara sayısı, gerilim kontrollü generatör bara sayısı ve iletim hattı sayısı sırasıyla LN , NG ve NL şeklinde ifade edilmiştir.

Aynı şekilde u vektörü de; PV baralarındaki generatörlerin aktif gücü P_G , generatör bara gerilimleri V_G , şönt kapasiteleri Q_C ve transformatör kademe ayarları T şeklinde tanımlanan bağımsız değişkenlerden oluşur ve Denklem (5)'teki gibi ifade edilir:

$$u = [P_{G2} \dots P_{GNG}, V_{G1} \dots V_{GNG}, Q_{C1} \dots Q_{CNC}, T_1 \dots T_{NTL}] \quad (5)$$

Gerilim kontrollü generatör bara sayısı, kapasitanslı bara sayısı ve transformatörlü bara sayısı sırasıyla NG , NC ve NT şeklinde ifade edilmiştir.

2.1.1 Kısıtlamalar

Sistemin istenen düzeyde verimli çalışması için, sistemde kullanılan elemanların belirlenen kurallar çerçevesinde çalışması esastır. Bu kurallar, eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları olmak üzere ikiye ayrılır.

2.1.1.1 Eşitlik kısıtlamaları

Denklem (2)'de g olarak genel bir formülle belirtilen eşitlik kısıtlamaları aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] = 0 \quad (6)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] = 0 \quad (7)$$

2.1.1.2 Eşitsizlik kısıtlamaları

Denklem (3)'te h ifadesiyle sembolize edilen eşitsizlik kısıtlamaları, güç sistemlerinin çalışmasında etken olan generatör, transformatör, şönt kapasite ve iletim hattına bağlı gerilim ve yük değerlerinin belirlenen sınır aralıkları içinde kalması şeklinde ifade edilebilir. OGA'nın en verimli sağlanabilmesi için, sistem elemanları için belirlenen değerler sınırlarında çalışması zorunludur. Dört ana başlık altında saydığımız sistem elemanlarının kısıtlamalarını şöyle tanımlayabiliriz.

2.1.1.2.1 Generatör kısıtlamaları

Aktif ve reaktif güçlerinin sınırlamaları:

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, NG \quad (8)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, NG \quad (9)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, NG \quad (10)$$

şeklinde tanımlanır. V_{Gi}^{min} ve V_{Gi}^{max} i generatörünün minimum ve maksimum bara gerilimi değerini, P_{Gi}^{min} ve P_{Gi}^{max} i generatörünün sırasıyla minimum ve maksimum aktif güç değerlerini, Q_{Gi}^{min} ve Q_{Gi}^{max} i generatörünün minimum ve maksimum reaktif güç değerlerini ifade eder.

2.1.1.2.2 Transformatör kısıtlamaları

Kademe ayar sınırlamaları:

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, NT \quad (11)$$

şeklinde tanımlanır. T_i^{min} ve T_i^{max} i transformatörünün minimum ve maksimum kademe değerlerini ifade eder.

2.1.1.2.3 Şönt kapasite kısıtlamaları

Şönt kapasite sınırlamaları:

$$Q_{Ci}^{min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, NC \quad (12)$$

şeklinde tanımlanır. Q_{Ci}^{min} ve Q_{Ci}^{max} i barasının şönt kapasite değerinin minimum ve maksimum kademe değerlerini ifade eder.

2.1.1.2.4 Güvenlik kısıtlamaları

Bu kısımda, yük baralarının gerilim değerleri ve iletim hattının akış değerlerinin limit sınırları belirlenir:

$$V_{Li}^{min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, LN \quad (13)$$

$$S_{li} \leq S_{li}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, NL \quad (14)$$

şeklinde tanımlanır. V_{Li}^{min} ve V_{Li}^{max} i barasının minimum ve maksimum gerilimlerini, S_{Li}^{max} i iletim hattının maksimum akış limitini ifade eder.

2.2. Rüzgar enerjisi

Rüzgar hareketinin sahip olduğu kinetik enerjiye bağlı olarak ortaya çıkan enerji, rüzgar enerjisi olarak adlandırılır. Ortaya çıkan enerji, mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülür ve yaygın olarak kullanılır. Rüzgar enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Çevreye zararlı bir atık yaymayan temiz bir enerjidir. Günümüzde rüzgar enerjisi genellikle elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Fosil yakıtların doğaya ciddi şekilde zarar vermesi ve küresel ısınmanın etkilerini arttırması ve bu kaynağın rezervleri tükenmesi ile birlikte daha temiz ve tükenmeyen güneş, rüzgar, su, biyogaz gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi yaygınlaşmıştır. Rüzgar enerjisi de günümüz enerji sistemleri arasında bu bakımdan önemli bir konumdadır.

2.2.1 Rüzgar gücü maliyeti

Genel olarak OGA problemleri sistemde termal generatör olduğunda uygulanır. Termal generatörlü sistemlerde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yakıtlar, optimal güç akışı problemleri arasında en önemlilerinden biri olan maliyet hesabına doğrudan etkilidir. Son zamanlarda çevresel faktörlerin de etkisiyle termal generatörlere alternatif olarak büyük enerji sistemlerine entegre edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar türbinleri de kullanılabilir. Termal generatörlerin aksine rüzgar türbinleri enerji üretiminde herhangi bir yakıt kullanmadıkları için, maliyet hesaplamaları farklı parametreler yardımıyla yapılmaktadır [31]. Rüzgar santrallerinin maliyet hesabı yapılırken rüzgar santrallerinden gelen asıl gücün tahmin edilenden daha az olması durumu, fazla tahmin (overestimation) maliyeti ve rüzgar santrallerinden gelen asıl gücün tahmin edilenden daha fazla olması durumu, az tahmin (underestimation) maliyeti olarak iki farklı durum göz önünde bulundurulur [34].

Rüzgar gücünün maliyet hesaplama formülü Denklem (15)'teki gibi tanımlanabilir:

$$C_W = \sum_{j=1}^{NW} (P_W \text{Cost}_{dir,j} + P_W \text{Cost}_{oe,j} + P_W \text{Cost}_{ue,j}) \quad (15)$$

Formüldeki $P_W \text{Cost}_{dir,j}$ ifadesi rüzgar gücünün maliyetini, $P_W \text{Cost}_{oe,j}$ ve $P_W \text{Cost}_{ue,j}$ ifadeleri ise j . rüzgar gücü generatörünün fazla ve az tahmin maliyetlerini diğer bir deyişle ayrılmış ve ceza maliyetini temsil eder. Rüzgar gücü maliyeti Denklem (16)'daki gibi tanımlanabilir:

$$P_W \text{Cost}_{dir} = \sum_{j=1}^{NW} (q_j \times w_j) \quad (16)$$

q_j ve w_j simgeleri sırasıyla elektrik enerjisi maliyet katsayısını (\$/MW) ve j . rüzgar generatörünün üretilen gerçek gücünü (MW) temsil eder [34]. Fazla tahmin maliyeti Denklem (17)'deki gibi tanımlanabilir:

$$P_W \text{Cost}_{oe} = \sum_{j=1}^{NW} (C_{rvj} \times E(Y_{oe,j})) \quad (17)$$

C_{rvj} ve $E(Y_{oe,j})$ ifadeleri j . rüzgar generatörünün fazla tahmin maliyet katsayısını ve beklenen değerini temsil eder. Fazla tahmin için rüzgar generatörünün beklenen değeri daha ayrıntılı olarak:

$$E(Y_{oe,j}) = w_j \left[1 - \exp\left(-\frac{v_{in,j}^{K_j}}{C_j^{K_j}}\right) + \exp\left(-\frac{v_{out,j}^{K_j}}{C_j^{K_j}}\right) \right] + \left(\frac{w_{r,j} v_{in,j}}{v_{r,j} - v_{in,j}} + w_j \right) \left[\exp\left(-\frac{v_{in,j}^{K_j}}{C_j^{K_j}}\right) - \exp\left(-\frac{v_{out,j}^{K_j}}{C_j^{K_j}}\right) \right] + \left(\frac{w_{r,j} C_j}{v_{r,j} - v_{in,j}} \right) \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{K_j}, \left(\frac{v_{in,j}}{C_j}\right)^{K_j}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{K_j}, \left(\frac{v_{out,j}}{C_j}\right)^{K_j}\right) \right] \quad (18)$$

şeklinde ifade edilir [34].

Az tahmin maliyeti Denklem (19)'daki gibi tanımlanabilir:

$$P_W \text{Cost}_{ue} = \sum_{j=1}^{NW} (C_{pvj} \times E(Y_{ue,j})) \quad (19)$$

C_{pvj} ve $E(Y_{ue,j})$ ifadeleri j . rüzgar generatörünün az tahmin maliyet katsayısını ve beklenen değerini temsil eder. Burada, az tahmin rüzgar generatörünün beklenen değeri Denklem (20)'deki gibi ifade edilir:

$$E(Y_{ue,j}) = (w_{r,j} - w_j) \left[\exp\left(-\frac{v_{r,j}^{K_j}}{C_j^{K_j}}\right) - \exp\left(-\frac{v_{out,j}^{K_j}}{C_j^{K_j}}\right) \right] + \left(\frac{w_{r,j} v_{in,j}}{v_{r,j} - v_{in,j}} + w_j \right) \left[\exp\left(-\frac{v_{r,j}^{K_j}}{C_j^{K_j}}\right) - \exp\left(-\frac{v_{out,j}^{K_j}}{C_j^{K_j}}\right) \right] + \left(\frac{w_{r,j} C_j}{v_{r,j} - v_{in,j}} \right) \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{K_j}, \left(\frac{v_{in,j}}{C_j}\right)^{K_j}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{K_j}, \left(\frac{v_{out,j}}{C_j}\right)^{K_j}\right) \right] \quad (20)$$

Denklem (18) ve Denklem (20)'de geçen ifadeler:

$\Gamma(\cdot)$ tamamlanmamış gama fonksiyonunu, K_j , C_j j . rüzgar generatörünün Weibull dağılımına ait biçim ve ölçek çarpanını, v_r , v_{in} , v_{out} rüzgarının nominal, devreye girme ve devreden çıkma hızlarını, v_1 aracı parametreyi $v_1 = v_{in} + (v_r - v_{in}) w_1/w_r$ w_j ve $w_{r,j}$ j . rüzgar generatörünün üretilen ve nominal gücünü temsil eder.

2.2.2 Rüzgar gücü karakterizasyonu

Rüzgar gücü kullanan sistemlerde , rüzgarın hızının kontrol edilmesi en önemli konudur. Çünkü , doğada rüzgarın hızı belirsizdir ve her şiddette olabilir. Weibull dağılımı,rüzgar hızını kontrol etmenin yaygın olarak kullanıldığı yöntemlerden biridir [21]. Weibull dağılımı Denklem (21)'deki gibi tanımlanabilir:

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (21)$$

Formülde v rüzgar hızının olasılığını, k ve c sırasıyla biçim ve ölçek çarpanını temsil eder [23].

Weibull dağılımının ortalaması:

$$\mu = c\Gamma(1+k^{-1}) \quad (22)$$

şeklinde tanımlanabilir. Formüldeki gama fonksiyonu $\Gamma(x)$ ise Denklem (23)'te belirtilmiştir.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (23)$$

Rüzgar generatörünün rüzgar hızına göre fonksiyonu Denklem (24)'te belirtildiği gibidir.

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & , \quad v < v_{in} \text{ ve } v > v_{out} \\ P_{wr} \left(\frac{v-v_{in}}{v_r-v_{in}} \right) & , \quad v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_{wr} & , \quad v_r < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (24)$$

Formüldeki rüzgar hızı, devreye girme hızından düşük ve devreden çıkma hızından büyük ise çıkış gücü sıfır olur. Eğer rüzgar hızı, nominal hız ve devreden çıkma hızının arasında ise çıkış gücü nominal güce eşittir. Bu belirli sınırlar için, olasılıklar:

$$f_w(p_w)\{p_w = 0\} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_{in}}{c}\right)^k\right] + \exp\left[-\left(\frac{v_{out}}{c}\right)^k\right] \quad (25)$$

$$f_w(p_w)\{p_w = p_{wr}\} = \exp\left[-\left(\frac{v_r}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_{out}}{c}\right)^k\right] \quad (26)$$

şeklinde verilebilir. Denklem (24)'teki rüzgar hızı, devreye girme hızı ve nominal hız arasında ise olasılık formülü:

$$f_w(p_w) = \frac{k(v_r-v_{in})}{c^k * p_{wr}} \left[v_{in} + \frac{p_w}{p_{wr}}(v_r-v_{in}) \right]^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_{in} + \frac{p_w}{p_{wr}}(v_r-v_{in})}{c}\right)^k\right] \quad (27)$$

şeklinde hesaplanabilir [35].

2.3. Güneş enerjisi

Geleneksel termik enerji jeneratörlerinin aksine, güneş enerjisi jeneratörleri yakıt gerektirmez. Güneş PV santrallerinin bağımsız sistem operatörüne (ISO) ait olduğu durumda, ISO, güneş PV santralleri için ilk harcamaya bir miktar geri ödeme maliyeti atamak veya bunu bir bakım ve yenileme maliyeti olarak atamak istemediği sürece, güneş PV santralleri yakıt gerektirmediğinden maliyet fonksiyonu mevcut olmayabilir [24]. Ancak, güneş enerjisi santralleri özel taraflara ait olduğunda, ISO sözleşmeyle kararlaştırılan planlanmış güce orantılı bir fiyat öder.

2.3.1 Güneş gücü maliyeti

Rüzgar enerjisi santrali gibi, güneş enerjisi santrali de kesintili ve belirsiz çıktıya sahiptir. Prensipten olarak, güneş enerjisinin fazla ve eksik tahminine yaklaşım rüzgar enerjisi ile aynı olacaktır. Bununla birlikte, güneş ışınımı, Weibull PDF'sini takip ettiği bilinen rüzgar dağılımından farklı olarak lognormal PDF [25] izlediğinden, hesaplamada kolaylık sağlamak için rezerv ve ceza maliyeti modelleri [9]'da sunulan konseptte dayalı olarak oluşturulmuştur.

k' 'nci güneş PV santrali için rezerv maliyeti şöyledir:

$$\begin{aligned} C_{RS,k}(P_{ss,k} - P_{sav,k}) &= K_{RS,k}(P_{ss,k} - P_{sav,k}) \\ &= K_{RS,k} * f_s(P_{sav,k} < P_{ss,k}) \\ &* [P_{ss,k} - E(P_{sav,k} < P_{ss,k})] \end{aligned} \quad (28)$$

Burada, $K_{RS,k}$ k' 'nci güneş enerjisi santraline ait rezerv maliyet katsayısı, $P_{sav,k}$ aynı santralden elde edilen gerçek kullanılabilir güçtür.

$f_s(P_{sav,k} < P_{ss,k})$ güneş enerjisi açığı oluşma olasılığıdır. $E(P_{sav,k} < P_{ss,k})$, planlanan güçten ($P_{ss,k}$) daha düşük güneş PV gücü beklentisidir.

k' 'nci güneş enerjisi santralinin düşük tahmin edilmesi için ceza maliyeti şöyledir:

$$\begin{aligned} C_{PS,k}(P_{sav,k} - P_{ss,k}) &= K_{PS,k}(P_{sav,k} - P_{ss,k}) \\ &= K_{PS,k} * f_s(P_{sav,k} > P_{ss,k}) \\ &* [E(P_{sav,k} > P_{ss,k}) - P_{ss,k}] \end{aligned} \quad (29)$$

Burada, $K_{PS,k}$ k' 'nci güneş enerjisi santraline ait ceza maliyeti katsayısı,

$f_s(P_{sav,k} > P_{ss,k})$ planlanan güçten ($P_{ss,k}$) fazla güneş enerjisi gücü olasılığı,

$E(P_{sav,k} > P_{ss,k})$ $P_{ss,k}$ 'nın üzerindeki güneş enerjisi gücü beklentisidir.

2.4. Amaç fonksiyonu

OGA probleminde kullanılmak üzere iki amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bunlardan birincisi, tüm maliyet fonksiyonlarını içerecek şekilde olup emisyon maliyeti dahil edilmemiş haliyle aşağıdaki denklemde sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
F_1 = C_T(P_{TG}) + \sum_{j=1}^{N_{WG}} [C_{w,j}(P_{ws,j}) \\
+ C_{RW,j}(P_{ws,j} - P_{wav,j}) \\
+ C_{Pw,j}(P_{wav,j} - P_{ws,j})] \\
+ \sum_{k=1}^{N_{SG}} [C_{s,k}(P_{ss,k}) \\
+ C_{Rs,k}(P_{ss,k} - P_{sav,k}) \\
+ C_{Ps,k}(P_{sav,k} - P_{ss,k})] \quad (30)
\end{aligned}$$

İkinci amaç fonksiyonu olarak da karbon vergisi uygulandığında üretim maliyetini görmek için, emisyon maliyetinin eklendiği aşağıda verilen denklem oluşturulmuştur [31].

$$F2 = F1 + C_{tax}E \quad (31)$$

3. Yöntem ve Metot

Bu çalışmada OGA Probleminin çözümde kullanılmak üzere Üçgenleme Topolojisi Toplama İyileştiricisi (ÜTTİ) algoritması ve mesafe uygunluk dengesi algoritması tabanlı geliştirilmiş hali önerilmiştir.

3.1. Üçgenleme topolojisi toplama iyileştiricisi

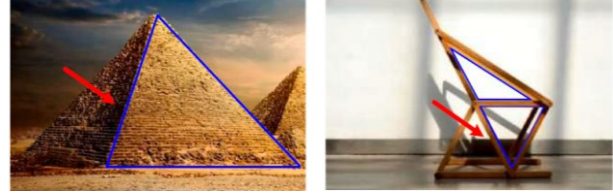
Üçgen düzlem geometrisindeki en temel grafikdir. Sonlu veya sonsuz boyutlu bir uzayda üçgen bir topoloji, 2 boyutlu alt uzayının altındaki bir grafik olarak kabul edilebilir. Bazı kapalı sistemlerde üçgen diğer topolojilerden daha basit ve daha kararlıdır. Şekil 1 üçgen topolojinin gerçek hayattaki uygulamalarını göstermektedir. Bu avantaj nedeniyle, birçok alan genellikle araştırma nesnesini üçgen topolojik birimlere böler ve tanımlama ve analiz için ilgili modeller oluşturur [36, 37].

Üçgen benzerliği geometrinin en önemli özelliklerinden biridir. Bir çokgen, hesaplamalı geometri ve bilgisayar bilimi için önemli bir uygulama değeri olan bir üçgen birleşiminden oluşabilir [38,39]. Ayrıca pratik mühendislik uygulamalarında ölçülmesi zor olan yükseklik veya mesafe problemi benzer üçgenler kullanılarak çözülebilir. Görüntü tanıma için, benzer üçgenlerin karşılık gelen köşeleri arasındaki mesafeye göre iki özelliğin ilişkili olup olmadığına da karar verilebilir. Matematikte iki üçgenin benzer karar teoremleri aşağıdaki gibidir. Şekil 2(a)-(d) sırasıyla dört karar teoremine ilişkin şemaları göstermektedir.

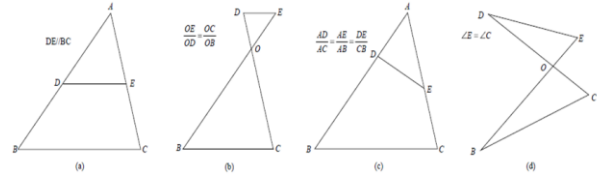
- Yeni oluşan üçgenin, orijinal üçgenin bir kenarına paralel bir kenarı vardır ve bu çizginin uzatma çizgisi, orijinal üçgene benzer şekilde diğer kenarları veya her iki tarafın uzatma çizgilerini keser;

- İki üçgenin karşılık gelen kenarlarının oranları ve açıları eşitse, iki üçgen benzer kabul edilebilir;
- Karşılık gelen kenarları eşit oranda olan bir üçgen başka bir üçgene benzer;
- İki üçgenin açıları eşitse iki üçgen benzerdir.

Önerilen ÜTTİ algoritması benzer üçgenlere dayanmaktadır. Yinelemeli evrimle, arama uzayında sürekli olarak yeni köşe noktaları oluşturulur ve farklı boyutlarda benzer üçgenler oluşturmak için kullanılır.



Şekil 1. Üçgen topolojilerin gerçek hayattaki uygulamaları



Şekil 2. Benzer üçgen topolojiler: (a) Değerlendirme yöntemi 1, (b) Değerlendirme yöntemi 2, (c) Değerlendirme yöntemi 3 ve (d) Değerlendirme yöntemi 4

3.2. Matematiksel modelin oluşturulması

Bu alt bölümde önerilen ÜTTİ algoritmasına ilişkin matematiksel model açıklanmaktadır. ÜTTİ'nun optimizasyon süreci temel olarak iki aşamadan, yani farklı ve aynı birimler arasındaki birleştirmeden oluşur.

3.2.1 Başlatma

İlk olarak, ÜTTİ algoritması optimizasyon sürecini başlatmak için popülasyonu başlatır. Popülasyon büyüklüğü N ve değişken boyut D verilmiştir. Üçgen topolojik birimdeki her köşe bir arama aracısını temsil eder. ÜTTİ algoritmasında, birey sayısı N , $\lfloor N/3 \rfloor$ üçgen topolojik birimlere bölünebilir; burada $\lfloor \cdot \rfloor$, aşağı yuvarlanmayı gösterir. Ekstra bireyler arama uzayında rastgele oluşturulur. Başlatma aşamasında uygun bölgede rastgele $\lfloor N/3 \rfloor$ etmenleri üretilir ve her bireyin ürettiği matematiksel ifade şu şekilde hesaplanır:

$$\vec{X}_{i,1} = r_0 \times (\vec{UB} - \vec{LB}) + \vec{LB} \quad (32)$$

burada $\vec{X}_{i,1}$ i 'inci üçgen topolojik birimdeki ilk aranan bireyi temsil eder ve i , 1 ile $\lfloor N/3 \rfloor$ arasında pozitif bir tamsayıdır. r_0 , $[0, 1]$ arasında rastgele bir sayıyı belirtir; \vec{LB} ve \vec{UB} değişkenlerin alt ve üst sınırlarıdır ve matematiksel ifadeleri şu şekilde tanımlanabilir:

$$\overrightarrow{LB} = [lb_1, \dots, lb_D] \quad (33)$$

$$\overrightarrow{UB} = [ub_1, \dots, ub_D] \quad (34)$$

3.2.2 Üçgen topolojik birimlerin oluşumu

Belirli bir problemin boyutu genellikle 2'den büyük olduğundan, ÜTTİ algoritmasında yalnızca her iki boyutlu yüzeyin bir eşkenar üçgen olması garanti edilir. Üçgen topolojik birimlerin oluşumu, kutupsal bir koordinat ile sıradan bir koordinat sistemi arasındaki dönüşümü kullanır [40]. Uzunluğu $l * f \rightarrow$ olan yeni bir yön vektörü, küresel bir koordinat sisteminde başlangıç köşesi olarak birinci köşe kullanılarak yerleştirilir ve ikinci köşeyi oluşturmak için trigonometrik fonksiyonla sıradan bir koordinat sistemine dönüştürülür.

Uzunluğu $l * f \rightarrow$ olan oluşturulan yön vektörü saat yönünün tersine $\pi/3$ döndürülür ve ardından üçüncü tepe noktasını elde etmek için koordinat sistemi tarafından dönüştürülür. Bu köşelerin ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$\overrightarrow{X_{i,2}} = \overrightarrow{X_{i,1}} + l * \overrightarrow{f(\theta)} \quad (35)$$

$$\overrightarrow{X_{i,3}} = \overrightarrow{X_{i,1}} + l * \overrightarrow{f\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)} \quad (36)$$

burada l , matematiksel olarak şu şekilde ifade edilen üçgen bir topolojik birimin boyutunu temsil eder:

$$l = 9 * e^{-\frac{1}{T}} \quad (37)$$

Denklem(37)'de, t mevcut yineleme sayısını temsil eder. T maksimum yineleme sayısını belirtir. Tekrar sayısı arttıkça l azalır. İlk aşamalarda birim, küresel aramaya odaklanmak için daha geniş bir arama aralığı oluşturabilir. Daha sonraki aşamalarda toplanıp umut verici bir yönde derinden gelişir. Üçgen topolojik birimin daha sonraki iterasyonlarda da üretilebilmesini sağlamak için l değeri 0'a düşmeyecektir. Bu kurulum aynı zamanda aşırı kullanımın yerel bir ekstremumda sıkışıp kalmasını da önler ve ilk noktanın yönlendirdiği diğer iki kenarın yön vektörlerini temsil eder. Denklem (38) ve Denklem (39) ile hesaplanır.

$$\overrightarrow{f(\theta)} = [\cos\theta_1, \cos\theta_2, \dots, \cos\theta_{D-1}, \cos\theta_D] \quad (38)$$

$$\overrightarrow{f\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)} = \left[\cos\left(\theta_1 + \frac{\pi}{3}\right), \dots, \cos\left(\theta_{D-1} + \frac{\pi}{3}\right), \cos\left(\theta_D + \frac{\pi}{3}\right) \right] \quad (39)$$

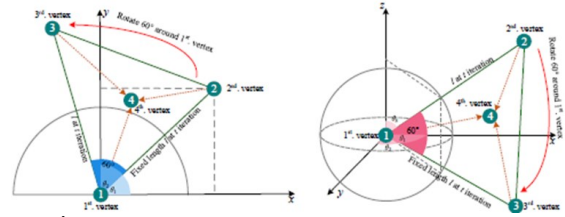
Burada $\theta \rightarrow = [\theta_1, \dots, \theta_D]$ ve $\theta_j (j = 1, \dots, D)$ $[0, \pi]$ arasındaki rastgele sayılardır.

Üçgen topolojik birimlerin her bir grubu dahili olarak dördüncü köşede toplanır. Bu nokta, bireysel bilgilerin kullanılması için doğrusal ağırlıklı bir şekilde oluşturulmuştur. Dördüncü köşe şu şekilde tanımlanır:

$$\overrightarrow{X_{i,4}} = r_1 * \overrightarrow{X_{i,1}} + r_2 * \overrightarrow{X_{i,2}} + r_3 * \overrightarrow{X_{i,3}} \quad (40)$$

burada r_1, r_2 ve r_3 , $[0, 1]$ arasında rastgele sayılardır ve $r_1 + r_2 + r_3 = 1$ 'dir. Dolayısıyla dördüncü arama aracı her üçgen topolojik birimin içindedir.

Her yinelemenin başlangıcında, bir tepe noktasından ve aynı uzunluktaki iki kenardan yeni benzer üçgen topolojik birim elde edilir ve yinelemeler sırasında kenar uzunluğu dinamik olarak değişir. Her ünite içinde en iyi tepe noktası, her yinelemede öncü tepe noktası olarak düşünülebilir ve bu, her ünite için diğer bireylerin evrimine rehberlik eder. Ayrıca diğer köşeler de en iyi köşeye göre oluşturulur. Şekil 3 (a) ve (b), 2 ve 3 boyutlu uzayda üçgen topolojik birimlerin yapısını göstermektedir.

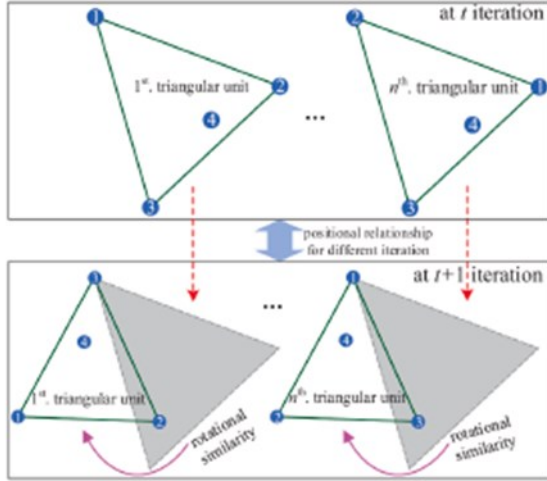


Şekil 3. İki ve üç boyutlu uzayda oluşturulan üçgen topolojik birimlerin şematik diyagramı

Şekil 3.3 (a)'da her birim için ilk (en iyi) tepe noktası yer almaktadır. Kutupsal bir koordinat ile sıradan bir koordinat sistemi arasında dönüşümler meydana gelir. Sabit uzunluklu l rastgele yön vektörü $[\theta_1, \theta_2]$ oluşturuldu ve açıları vurgulamak için farklı renkler kullanıldı.

Daha sonra ikinci köşe trigonometrik fonksiyonla normal koordinat sistemine dönüştürülür. Birinci köşe ve ikinci köşeden oluşan sabit uzunluktaki vektör 60° yani $l * [\theta_1 + \pi/3, \theta_2 + \pi/3]$ döndürülür ve üçüncü köşeyi elde etmek için sıradan bir koordinat sistemine dönüştürülür. Koordinat sisteminin mutlaka standart koordinat sistemi olması gerekmediğini ve dolayısıyla θ 'nın keyfi olarak üretildiğini ve yalnızca \cos fonksiyonu tarafından düzenlendiğini belirtmekte fayda vardır. İlk üç köşe dördüncü köşeyi oluşturacak şekilde doğrusal olarak ağırlıklandırılır. 3 boyutlu uzay için kutupsal koordinattaki $l * [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ ve $l * [\theta_1 + \pi/3, \theta_2 + \pi/3, \theta_3 + \pi/3]$ vektörleri ikinci köşeyi ve üçüncü köşeyi elde etmek için sıradan bir koordinat sistemine dönüştürülür. Şekil 3.3 (b), üçgen birimi x-z düzlemleriyle göstermektedir.

Şekil 3.4, benzer birimin 2 boyutlu uzay için aynı periyottaki ve farklı periyotlardaki durumlarını açıklamaktadır. θ 'nın rastgeleliği nedeniyle, t zamanındaki her üçgen topolojik birim aynı boyutu ve yönü, yani uyumu gösterir. Farklı zamanlar için üçgen topoloji ünitesinin yönü dönüşten sonra tutarlıdır. Eğer üçgensel zaman birimi t , üçgensel zaman birimi $t+1$ 'deki bir tepe noktasına aktarılırsa, ikisi dönme açısından benzerdir. Daha sonra, her grup içindeki veya üçgen topolojik birimlerin farklı grupları arasındaki bireyler, küresel aramayı ve yerel madenciliği gerçekleştirmek için bilgi alışverişinde bulunabilir.



Şekil 4. Üçgen topoloji biriminin iki boyutlu uzaydaki durumları

3.2.3 Genel toplama

Genel toplama, keşif aşamasına vurgu yapar. Bu aşamada farklı üçgen birimlerdeki iyi bireylerin bilgileri toplanır ve yeni uygulanabilir çözümler üretilir. Bilgi etkileşimi, her üçgen topolojik birimdeki en iyi birey ile rastgele seçilen herhangi bir birim kümesindeki en iyi birey arasında meydana gelir. GA'daki gen geçişinden esinlenerek bir bilgi etkileşim mekanizması özelleştirilmiştir [41]. İki pozitif bireyin her boyut değişkeni arasında farklı ağırlıkların doğrusal bir kombinasyonu vardır. Yeni birey, matematiksel olarak şu şekilde ifade edilen daha iyi iki köşe bağlantısında üretilir:

$$\overrightarrow{X_{i,new1}^{t+1}} = r_4 * \overrightarrow{X_{i,best}^t} + (1 - r_4) * \overrightarrow{X_{rand,best}^t} \quad (41)$$

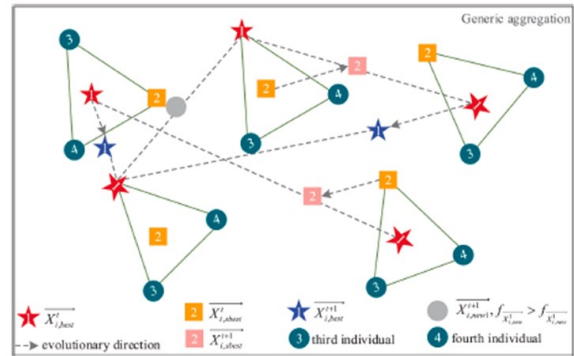
burada r_4 , $[0, 1]$ arasında rastgele bir sayıdır. $\overrightarrow{X_{i,best}^t}$ ve $\overrightarrow{X_{rand,best}^t}$, i birimi için en iyi bireyi ve t 'inci yinelemede rastgele seçilen bir birimi belirtir. Ayrıca, $X_{i,new1}^{t+1}$ 'nin uygunluk değeri, optimal veya optimal altı arama ajanı ile karşılaştırılır ve optimal ajan güncellenir. Bir minimizasyon problemi varsayarak, $(t+1)$ 'inci iterasyonda güncellenen

optimal ve suboptimal bireylerin matematiksel ifadeleri şu şekildedir:

$$\begin{cases} \overrightarrow{X_{i,best}^{t+1}} = \overrightarrow{X_{i,new1}^{t+1}} & f_{X_{i,new1}^{t+1}} < f_{X_{i,best}^t} \\ \overrightarrow{X_{i,best}^t} = \overrightarrow{X_{i,new1}^{t+1}} & f_{X_{i,new1}^{t+1}} < f_{X_{i,best}^t} \end{cases} \quad (42)$$

burada $X_{i,sbest}^t \rightarrow i$ 'inci yinelemedeki optimal olmayan bireyi temsil eder. $f(.)$ verilen problemin bir fonksiyonudur.

Şekil 5, optimal ajanın ve optimal olmayan ajanın güncelleme ayrıntılarını açıklamaktadır. Bir birimdeki her köşenin sayısı, uygunluk değerinin sıralamasını temsil eder. Üç farklı hareket yolu dahildir. Birincisi, çapraz bireylerin orijinal konumdan daha iyi olduğu yerdir; örneğin, sol üst birim ve sol alt birim, sağ üst birim ve sol alt birim. İkincisi, çaprazlanan bireyin optimal olmayan konumdan daha iyi olmasıdır; örneğin, üstteki ikinci ünite ile sağ üst ünite, sol üst ünite ile sağ alt ünite. Yukarıdaki sol alt üniteyle birlikte ikinci ünite, çaprazlamadan sonra en kötü bireyi temsil ediyor. Gruplar arasındaki bilgi alışverişi, popülasyon çeşitliliğini artırmaya ve bireylerin yeterince keşfetmesine olanak sağlamaya yardımcı olur.



Şekil 5. Çoklu üçgen topolojik birimlerin genel toplanması

3.2.4 Yerel toplama

Yerel toplama esas olarak kullanım aşamasını vurgulamaktadır. Bu aşamada üçgen topolojik birimler dahili olarak toplanır. Bir önceki aşamadan sonra güncellenen optimal veya suboptimal bireyler ile gruptaki iyi uygunluk değerlerine sahip iki köşe arasında geçici olarak üçgen bir topoloji oluşturuldu. Bu durumda topolojinin eşkenar üçgen olması şart değildir. Optimal bireyin konumu, optimal ve optimal olmayan bireylerin oluşturduğu hareket vektörü farkına bağlı olarak yerel bir bölge (hem yön hem de adım boyutu açısından) tarafından bozulur. Böylece, her topolojik üçgen biriminin kullanımını gerçekleştirmek için her grup belirli bir yerel alanda yeniden araştırılır.

Yeni tepe noktası şu şekilde hesaplanır:

$$\overrightarrow{X_{i,new2}^{t+1}} = \overrightarrow{X_{i,best}^{t+1}} + \alpha * (\overrightarrow{X_{i,best}^{t+1}} - \overrightarrow{X_{i,sbest}^{t+1}}) \quad (43)$$

burada α azalması toplama kapsamı boyutunu ayarlamayı sağlar. α şu şekilde hesaplanabilir:

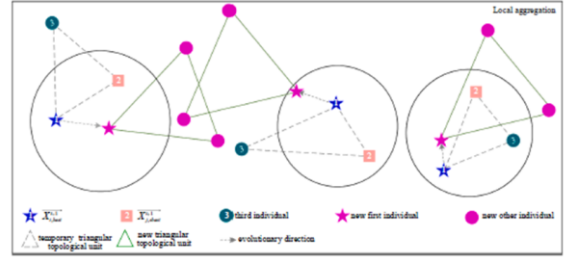
$$\alpha = \ln\left(\frac{e - e^3}{T - 1}t + e^3 - \frac{e - e^3}{T - 1}\right) \quad (44)$$

İdeal olmayan bireysel bilgiyi kullanmanın amacı, optimal bireyin yerel bir uç noktaya hapsolmesini önlemektir. Toplama sonrasında, geçici üçgen ünitesinin başlangıç noktasının ünite içerisinde optimal olması garanti edilmelidir. Yakınsamanın umut verici bir yönde gelişmesini sağlamak için, yerel madencilik öncesi ve sonrası iki tepe noktasının uygunluk değerleri, güncellenen belirlenmesi amacıyla karşılaştırılır.

Yakınsamanın umut verici bir yönde gelişmesini sağlamak için, iki tepe noktasının yerel madencilik öncesi ve sonrası uygunluk değerleri, konumun güncellenmesini belirlemek üzere karşılaştırılır. Yeni birey orijinalinden daha iyi performans gösteriyorsa güncelleme pozisyonuna geçilir, aksi halde güncelleme yapılmaz. İlgili matematiksel ifade aşağıdaki gibidir.

$$\overrightarrow{X_{i,best}^{t+1}} = \begin{cases} \overrightarrow{X_{i,new2}^{t+1}} & f_{\overrightarrow{X_{i,new2}^{t+1}}} < f_{\overrightarrow{X_{i,best}^{t+1}}} \\ \overrightarrow{X_{i,best}^{t+1}} & otherwise \end{cases} \quad (44)$$

Şekil 6, üçgen topolojik birimlerin yerel toplama diyagramını göstermektedir. Yerel toplamanın amacı, her topolojik üçgen birimi içindeki pozitif bilgiyi toplamaktır. Kesikli üçgen topolojik birim, genel toplamadan sonra optimal tepe noktası, optimal olmayan tepe noktası ve üçüncü tepe noktasının kombinasyonunun geçici topolojisini gösterir. Her birimdeki en uygun birey toplanır ve α parametresinin (gri dairenin alanı) kontrolü altında belirli bir aralıktaki daha iyi bir konuma güncellenir. Her geçici birimin yerel olarak toplanmasından sonra, mor noktalardan oluşan en iyi konumlarına göre yeni benzer topoloji birimleri oluşturulur. Yerel toplama süreci, her topolojik üçgen biriminin mümkün olduğu kadar hassas bir şekilde çıkarılmasını sağlar. Ayrıca daha sonraki yinelemelerde varyasyon aralığı giderek küçülür.



Şekil 6. Üçgen topolojik birimlerin yerel toplaması

3.2.5 ÜTTİ algoritmasının yürütme akışı

İlk olarak üçgen topolojik birimlerin sayısı $[N/3]$ ile belirlenir. Her yinelemede geri kalan 1 veya 2 kişinin uygun bölgede rastgele yeni pozisyonlar oluşturduğuna dikkat edilmelidir.

Rastgele oluşturulan konumlar, her yinelemede aynı sayıda üçgen birimin sağlanmasını amaçlayan uygunluk değeri için mevcut bireylerle karşılaştırılır. Bu nedenle, bir sonraki yineleme güncellemesi için lider olarak en iyi $[N/3]$ bireyler seçilir. Bunlar aslında her birim için en uygun bireylerdir. ÜTTİ algoritmasında, her üçgen topolojik birim için en uygun birey, yineleme başına üç aşamalı güncelleme uygular; yani oluşturulan üçgen topolojik birimler, genel toplama ve yerel toplama. Algoritma 1, ÜTTİ algoritmasının yürütme sözde kodudur.

3.3. Uygunluk mesafe dengesi

Uygunluk-mesafe dengesi (Fitness Distance Balance, FDB) seçim yöntemi, Kahraman ve arkadaşları tarafından 2020 yılında önerilen geliştirilmiş bir seçim yöntemidir. FDB yönteminin amacı, arama sürecinde MSA algoritmalarına etkin bir şekilde rehberlik etmektir. MSA algoritmalarında seçim yöntemleri, arama operatörlerinin ihtiyaç duyduğu referans konumları belirlemek için kullanılır [33], [42-44]. Bu nedenle, seçim yöntemleri popülasyonun geleceğinin şekillenmesine olanak sağladığı için MSA algoritmalarının performansı açısından oldukça önemlidir. MSA algoritmalarındaki diğer unsurlarda olduğu gibi, seçim yöntemlerinin tasarımında da doğadaki süreçler referans alınır. Buna göre, MSA algoritmalarında kullanılan seçim yöntemleri ağgözlü, rastgele ve olasılıksal olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır. Ağgözlü seçim yöntemi, doğadaki elitizm mantığına dayanmaktadır. Buna göre, popülasyon üyeleri arasından en güçlü olanın seçildiği yöntemdir. Rastgele seçim yöntemi, doğada sıklıkla meydana geldiği varsayılan rastgeleliğe dayanmaktadır. Buna göre, popülasyondaki bireyler arasında tamamen rastgele bir seçim yapılır. Olasılıksal seçim yönteminde ağgözlü ve rastgele seçim yöntemleri birlikte kullanılır ve seçimin olasılığı uygunluk değerine göre belirlenir. Rulet tekerleği ve turnuva yöntemleri, olasılıksal seçim yöntemlerinin örnekleridir [33].

FDB açgözlü bir seçim yöntemidir. Ancak, FDB'nin diğer açgözlü yöntemlerden en önemli farkı, seçim işleminin sadece uygunluk değerine göre değil, puan değerine göre yapılmasıdır. FDB yönteminde, her bir çözüm adayının puan değeri hesaplanır. Puan hesabında, popülasyondaki her bir çözüm adayının uygunluk değeri ve en iyi çözüm adayına olan uzaklığı dikkate alınmaktadır. FDB yöntemi, en yüksek puana sahip çözüm adayının arama sürecini yönlendirmesine izin verir. Sonuç olarak, en iyi çözüm adayının komşuluğunda bir çözüm adayının seçimini de engellemiş olur. Böylece, keşif ve sömürü görevlerinin dengeli bir şekilde yürütülmesi sağlanmaktadır [33].

FDB yöntemini uygulamak için aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

- (i) FDB yönteminin ilk adımında, çözüm adaylarının en iyi çözüme (best x) olan uzaklığı hesaplanır. Popülasyondaki çözüm aday sayısı N ve problem boyutu D ise, i. çözüm adayının en iyi çözüm

adayına olan Öklid uzaklığı denklem (45) kullanılarak hesaplanır.

$$D_i = \sqrt{(x_{i(1)} - x_{best(1)})^2 + (x_{i(2)} - x_{best(2)})^2 + \dots + (x_{i(D)} - x_{best(D)})^2} \quad (45)$$

- (ii) P popülasyonu için uzaklık vektörü D_P , denklem (46) ile gösterilir.

$$D_P \equiv \begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (46)$$

4. Benzetim Sonuçları

Elektrik üretimi sürecinde dikkate alınması gereken belli başlı durumlar vardır. Bu durumlardan en önemlileri arasında maliyet hesabı ve çevre kirliliği konusunda en önemli etken olan emisyon yer almaktadır. Termal jeneratörlerine ait maliyet ve emisyon hesaplamalarında kullanılan katsayılar Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. İncelenen sistem için termik jeneratörlerin maliyet ve emisyon katsayıları [31].

Generatör	Bara	a	b	c	d	e	α	β	γ	ω	μ
TG1	1	0	2	0.00375	18	0.037	4.091	-5.554	6.49	0.0002	6.667
TG2	2	0	1.75	0.0175	16	0.038	2.543	-6.047	5.638	0.0005	3.333
TG3	8	0	3.25	0.00834	12	0.045	5.326	-3.55	3.38	0.002	2

IEEE 30 baralı sistemde kullanılan termal jeneratörler yerine rüzgar ve güneş enerji santralleri entegre edilmiştir. Kullanılan rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi

santrallerine ait PDF parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi santrallerinin PDF parametreleri[31].

Rüzgar gücü üretim tesisi				Güneş PV tesisi			
Rüzgar Tarlası#	Türbin Sayısı	Nominal Güç, Pwr (MW)	Weibull PDF parametreleri	Weibull ortalama, Mwbl	Nominal Güç, Pwr (MW)	Lognormal PDF Parametresi	Lognormal ortalama, Mlgn
1 (bus 5)	25	75	c = 9 k = 2	v = 7.976 m/s	50 (bus 13)	$\mu = 6 \sigma = 0.6$	G = 483 W/m ²
2 (bus 11)	20	60	c = 10 k = 2	v = 8.862 m/s	-	-	-

Bu çalışmada IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde toplam iki farklı durum için optimizasyon işlemi yapılmıştır. Optimizasyonu yapılan durumlardan ilki, sistemde yer alan enerji üretim elemanlarının maliyet katsayıları ile birlikte oluşturulan maliyet uygunluk değerinin minimizasyon işlemidir. Bu durumda sadece sistemde yer alan üretim elemanlarının maliyetleri dikkate alınarak en uygun değer bulunması amaçlanmıştır. Önerilen bu durum, daha önce literatürde yer alan SHADE-SF [31], geliştirmesi yapılan algoritmanın orijinal hali olan ÜTTİ ve önerilen UMDÜTTİ algoritmaları ile çözümlenmiş ve

bulunan değerler Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te yer alan bilgilerden de görülebileceği üzere önerilen UMDÜTTİ algoritması, **781.6925 \$/h** değeri ile maliyet hesabı açısından sırasıyla 782.503 \$/h ve 782.8708 \$/h değerlerine sahip SHADE-SF [31], ve ÜTTİ algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir.

Tablo 3. IEEE 30-baralı durum 1

		Min	Max	SHADE-SF	ÜTTİ	UMD_ÜTTİ
Kontrol Değişkenleri	P_{TG2} (MW)	20	80	28.564	26.4214	26.8640
	P_{TG3} (MW)	10	35	10	10.0261	10.0002
	P_{ws1} (MW)	0	75	43.774	44.0502	44.9856
	P_{ws2} (MW)	0	60	36.949	35.4115	35.5633
	P_{ss} (MW)	0	50	34.976	38.4581	36.8242
	V_1 (p.u.)	0.95	1.10	1.072	1.0711	1.0726
	V_2 (p.u.)	0.95	1.10	1.057	0.9787	1.0546
	V_5 (p.u.)	0.95	1.10	1.035	1.0526	1.0326
	V_8 (p.u.)	0.95	1.10	1.04	1.0748	1.0782
Parametreler	V_{11} (p.u.)	0.95	1.10	1.1	1.0993	1.0972
	V_{13} (p.u.)	0.95	1.10	1.055	1.0630	1.0537
	P_{TG1} (MW)	50	140	134.908	134.9104	134.9120
	Q_{TG1} (MVar)	-20	150	-1.903	12.1252	3.9203
	Q_{TG2} (MVar)	-20	60	13.261	-20.0000	4.8198
	Q_{TG3} (MVar)	-15	40	35.101	40.0000	40.0000
	Q_{ws1} (MVar)	-30	35	23.181	35.0000	21.3423
	Q_{ws2} (MVar)	-25	30	30	29.7195	29.6301
	Q_{ss} (MVar)	-20	25	17.346	20.4214	17.0721
	Toplam maliyet (\$/h)			782.503	782.8708	781.6925
	Emisyon (t/h)			1.762	1.7629	1.7629
	Karbon vergisi (\$/h)			-	-	-
	$P_{kayıp}$ (MW)			5.770	5.8777	5.7493
	VD (p.u.)			0.463	0.4947	0.4582

Optimizasyonu yapılan durumlardan ikincisi ise toplam maliyetin yanı sıra sistemde doğaya salınan emisyon gazı ile emisyon maliyet katsayısı çarpımı sonucu elde edilen karbon vergisi uygunluk değerinin minimizasyon işlemidir. Bu durumda ise toplam maliyete ek olarak sistemde yer alan karbon salınımına ait maliyet de dikkate alınarak en uygun değer bulunması amaçlanmıştır. Önerilen bu durum, daha önce literatürde yer alan SHADE-SF [31],

geliştirmesi yapılan algoritmanın orijinal hali olan ÜTTİ ve önerilen UMDÜTTİ algoritmaları ile çözümlenmiş ve bulunan değerler Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te yer alan bilgilere göre önerilen UMDÜTTİ algoritması, **809.2866 \$/h** değeri ile sırasıyla 810.346 \$/h ve 809.8440 \$/h değerlerine sahip SHADE-SF [31], ve ÜTTİ algoritmalarından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4. IEEE 30-baralı durum 2

		Min	Max	SHADE-SF	ÜTTİ	UMD_ÜTTİ	
Kontrol Değişkenleri	P_{TG2} (MW)	20	80	33.047	32.4144	33.1977	
	P_{TG3} (MW)	10	35	10	10.0007	10.0009	
	P_{ws1} (MW)	0	75	46.021	45.4991	46.0304	
	P_{ws2} (MW)	0	60	38.748	38.2894	38.7452	
	P_{ss} (MW)	0	50	37.336	38.8975	36.8487	
	V_1 (p.u.)	0.95	1.10	1.071	1.1000	1.1000	
	V_2 (p.u.)	0.95	1.10	1.057	1.0904	1.0901	
	V_5 (p.u.)	0.95	1.10	1.036	1.0718	1.0715	
	V_8 (p.u.)	0.95	1.10	1.04	1.0801	1.0993	
	V_{11} (p.u.)	0.95	1.10	1.099	1.1000	1.1000	
	V_{13} (p.u.)	0.95	1.10	1.056	1.0943	1.0972	
	Parametreler	P_{TG1} (MW)	50	140	123.525	123.3090	123.5835
		Q_{TG1} (MVar)	-20	150	-2.678	11.5190	-10.9509
Q_{TG2} (MVar)		-20	60	12.319	17.8115	16.5835	
Q_{TG3} (MVar)		-15	40	35.27	40.0000	40.0000	
Q_{ws1} (MVar)		-30	35	22.964	24.8866	24.5938	
Q_{ws2} (MVar)		-25	30	30	18.8630	18.7102	
Q_{ss} (MVar)		-20	25	17.779	21.1664	22.2778	
Toplam maliyet (\$/h)				810.346	809.8440	809.2866	
Emisyon (t/h)				0.891	0.8805	0.8943	
Karbon vergisi (\$/h)				17.83	17.6095	17.8870	
$P_{kayıp}$ (MW)				5.276	5.0101	5.0063	
VD (p.u.)				0.469	1.0707	1.0864	

Ayrıca önerilen algoritmanın verimliliğine dair daha iyi bir gösterge olması açısından orijinal ÜTTİ algoritması ve geliştirilmiş UMDÜTTİ algoritması bağımsız 30 çalışma ile çözümlenmiş ve bulunan sonuçlara ait minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Verilen değerler göz önünde bulundurulduğunda geliştirilen UMDÜTTİ algoritmasının bağımsız 30 çalışma sonucunda hem minimum hem de ortalama değer olarak Durum 1 ve Durum 2 için orijinal ÜTTİ

algoritmasından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenebilir.

Tablo 5. ÜTTİ ve UMDÜTTİ algoritmalarının karşılaştırılması

	Durum 1				Durum 2			
	Min	Ort	Maks	Std	Min	Ort	Maks	Std
ÜTTİ	782.8708	783.2067	784.1176	0.3087	809.8463	809.9921	810.2703	0.1726
UMDÜTTİ	781.6925	782.3956	784.6169	0.6438	809.2866	809.3937	809.7072	0.1422

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, güç sistemleri alanında günümüzün önemli problemlerinden olan, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği Optimal Güç Akışı probleminin çözümü için, uygunluk mesafe dengesi tabanlı üçgenleme topolojisi toplama iyileştiricisi kullanılarak geliştirilen bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntemde, üçgenleme topolojisinin global arama kapasitesini artırmak ve algoritmanın keşif ile sömürü arasında güçlü bir denge sağlanabilmesi amacıyla uygunluk-mesafe dengesi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, geliştirilen uygunluk mesafe dengesi tabanlı üçgenleme topolojisi toplama iyileştiricisi (UMDÜTTİ), rüzgar ve güneş enerjisi entegreli IEEE 30 baralı güç sisteminde OGA problemini çözmek amacıyla kullanılmıştır. Benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlar üçgenleme topolojisi toplama iyileştiricisi (ÜTTİ) ve uygun kısıtlama işleme yönteminin dahil edildiği uyarlanabilir diferansiyel evrim algoritmasını (SHADE-SF) ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, OGA probleminin çözümü için UMDÜTTİ yönteminin ÜTTİ ve SHADE-SF ile karşılaştırıldığında daha etkili çözümler sunduğunu göstermektedir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Duman, S., Güvenç, U., Sönmez, Y., & Yörükeren, N. (2012). Optimal power flow using gravitational search algorithm. *Energy conversion and management*, 59, 86-95.
- [2] Y. Hınışlıoğlu, "Kaotik güve sürüsü algoritması kullanarak rüzgar gücü entegreli optimal güç akışı," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2018.

- [3] Kaymaz, E., Duman, S., & Guvenc, U. (2021). Optimal power flow solution with stochastic wind power using the Lévy coyote optimization algorithm. *Neural Computing and Applications*, 33(12), 6775-6804.
- [4] Yan, X., & Quintana, V. H. (1999). Improving an interior-point-based OPF by dynamic adjustments of step sizes and tolerances. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(2), 709-717.
- [5] Habibollahzadeh, H., Luo, G. X., & Semlyen, A. (1989). Hydrothermal optimal power flow based on a combined linear and nonlinear programming methodology. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(2), 530-537.
- [6] Burchett, R. C., Happ, H. H., & Vierath, D. R. (1984). Quadratically convergent optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (11), 3267-3275.
- [7] Devaraj, D., & Yegnanarayana, B. (2005). Genetic-algorithm-based optimal power flow for security enhancement. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 152(6), 899-905.
- [8] Lai, L. L., Ma, J. T., Yokoyama, R., & Zhao, M. (1997). Improved genetic algorithms for optimal power flow under both normal and contingent operation states. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 19(5), 287-292.
- [9] Abido, M. A. (2002). Optimal power flow using tabu search algorithm. *Electric power components and systems*, 30(5), 469-483.
- [10] Abido, M. A. (2002). Optimal power flow using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 24(7), 563-571.
- [11] Varadarajan, M., & Swarup, K. S. (2008). Solving multi-objective optimal power flow using differential evolution. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2(5), 720-730.
- [12] Ozkaya, B. (2024). Enhanced growth optimizer algorithm with dynamic fitness-distance balance method for solution of security-constrained optimal power flow problem in the presence of

stochastic wind and solar energy. *Applied Energy*, 368, 123499.

[13] Sallam, K. M., Hossain, M. A., Elsayed, S., Chakraborty, R. K., Ryan, M. J., & Abido, M. A. (2024). Optimal power flow considering intermittent solar and wind generation using multi-operator differential evolution algorithm. *Electric Power Systems Research*, 232, 110377.

[14] Trojovský, P., Trojovská, E., & Akbari, E. (2024). Economical-environmental-technical optimal power flow solutions using a novel self-adaptive wild geese algorithm with stochastic wind and solar power. *Scientific Reports*, 14(1), 4135.

[15] Adhikari, A., Jurado, F., Naetiladdanon, S., Sangswang, A., Kamel, S., & Ebeed, M. (2023). Stochastic optimal power flow analysis of power system with renewable energy sources using Adaptive Lightning Attachment Procedure Optimizer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 153, 109314.

[16] Huy, T. H. B., Doan, H. T., Vo, D. N., Lee, K. H., & Kim, D. (2023). Multi-objective optimal power flow of thermal-wind-solar power system using an adaptive geometry estimation based multi-objective differential evolution. *Applied Soft Computing*, 149, 110977.

[17] Hassan, M. H., Elsayed, S. K., Kamel, S., Rahmann, C., & Taha, I. B. (2022). Developing chaotic Bonobo optimizer for optimal power flow analysis considering stochastic renewable energy resources. *International Journal of Energy Research*, 46(8), 11291-11325.

[18] Alghamdi, A. S. (2022). A hybrid firefly-JAYA algorithm for the optimal power flow problem considering wind and solar power generations. *Applied Sciences*, 12(14), 7193.

[19] Li, S., Gong, W., Wang, L., & Gu, Q. (2022). Multi-objective optimal power flow with stochastic wind and solar power. *Applied Soft Computing*, 114, 108045.

[20] Guvenc, U., Duman, S., Kahraman, H. T., Aras, S., & Kati, M. (2021). Fitness-Distance Balance based adaptive guided differential evolution algorithm for security-constrained optimal power flow problem incorporating renewable energy sources. *Applied Soft Computing*, 108, 107421.

[21] Rambabu, M., VenkataNagesh Kumar, G., Venkateswara Rao, B., & Sravan Kumar, B. (2021). Optimal power flow solution of an integrated power system using elephant herd optimization algorithm incorporating stochastic wind and solar power. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-21.

[22] Riaz, M., Hanif, A., Hussain, S. J., Memon, M. I., Ali, M. U., & Zafar, A. (2021). An optimization-based strategy for solving optimal power flow problems in a power system integrated with stochastic solar and wind power energy. *Applied Sciences*, 11(15), 6883.

[23] Farhat, M., Kamel, S., Atallah, A. M., & Khan, B. (2021). Optimal power flow solution based on jellyfish search optimization considering uncertainty of renewable energy sources. *IEEE Access*, 9, 100911-100933.

[24] Khamees, A. K., Abdelaziz, A. Y., Eskaros, M. R., El-Shahat, A., & Attia, M. A. (2021). Optimal power flow solution of wind-integrated power system using novel metaheuristic method. *Energies*, 14(19), 6117.

[25] Khan, I. U., Javaid, N., Gamage, K. A., Taylor, C. J., Baig, S., & Ma, X. (2020). Heuristic algorithm based optimal power flow model incorporating stochastic renewable energy sources. *IEEE Access*, 8, 148622-148643.

[26] Duman, S., Rivera, S., Li, J., & Wu, L. (2020). Optimal power flow of power systems with controllable wind-photovoltaic energy systems via differential evolutionary particle swarm optimization. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(4), e12270.

[27] Elattar, E. E. (2019). Optimal power flow of a power system incorporating stochastic wind power based on modified moth swarm algorithm. *IEEE Access*, 7, 89581-89593.

[28] Salkuti, S. R. (2019). Optimal power flow using multi-objective glowworm swarm optimization algorithm in a wind energy integrated power system. *International Journal of Green Energy*, 16(15), 1547-1561.

[29] Mishra, C., Singh, S. P., & Rokadia, J. (2015). Optimal power flow in the presence of wind power using modified cuckoo search. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(7), 615-626.

[30] Panda, A., & Tripathy, M. (2015). Security constrained optimal power flow solution of wind-thermal generation system using modified bacteria foraging algorithm. *Energy*, 93, 816-827.

[31] Biswas, P. P., Suganthan, P. N., & Amaratunga, G. A. (2017). Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power. *Energy conversion and management*, 148, 1194-1207.

[32] Zhao, S., Zhang, T., Cai, L., & Yang, R. (2024). Triangulation topology aggregation optimizer: A novel mathematics-based meta-heuristic algorithm for continuous optimization and engineering applications. *Expert Systems with Applications*, 238, 121744.

- [33] Kahraman, H. T., Aras, S., & Gedikli, E. (2020). Fitness-distance balance (FDB): a new selection method for meta-heuristic search algorithms. *Knowledge-Based Systems*, 190, 105169.
- [34] M. J. Morshed and A. Asgharpour, "Hybrid imperialist competitive-sequential quadratic programming (HIC-SQP) algorithm for solving economic load dispatch with incorporating stochastic wind power: A comparative study on heuristic optimization techniques," *Energy Conversion Management*, vol. 84, pp. 30–40, 2014.
- [35] U. Güvenç, S. Duman, and E. Kaymaz, "Economic Dispatch of Power System Including Wind Power using Salp Swarm Algorithm," presented at 7th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'18), Antalya, Turkey, 2018.
- [36] Jones, M. W., & Satherley, R. A. (2001, May). Shape representation using space filled sub-voxel distance fields. In *Proceedings international conference on shape modeling and applications* (pp. 316-325). IEEE.
- [37] Reddy, P. V. N., Padmini, G. R., Govindaraj, P., & Sudhakar, M. S. (2022). Robust feature descriptor employing square triangle tessellation for shape retrieval. *Wireless Personal Communications*, 1-14.
- [38] Laczkovich, M. (2021). Irregular tilings of regular polygons with similar triangles. *Discrete & Computational Geometry*, 66(4), 1239-1261.
- [39] Soifer, A., & Soifer, A. (2009). *How Does One Cut a Triangle? I* (pp. 15-23). Springer New York.
- [40] Jiang, M., Wang, Z., Hong, H., & Yen, G. G. (2020). Knee point-based imbalanced transfer learning for dynamic multiobjective optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 25(1), 117-129.
- [41] Forrest, S. (1996). Genetic algorithms. *ACM computing surveys (CSUR)*, 28(1), 77-80.
- [42] S. Aras, E. Gedikli ve H. T. Kahraman, "A novel stochastic fractal search algorithm with fitness-distance balance for global numerical optimization", *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 61, ss. 100821, 2021.
- [43] S. Duman, H. T. Kahraman, Y. Sonmez, U. Guvenc, M. Kati ve S. Aras, "A powerful meta-heuristic search algorithm for solving global optimization and realworld solar photovoltaic parameter estimation problems", *Engineering, Applications of Artificial Intelligence*, c. 111, ss. 104763, 2022.
- [44] S. Duman, H. T. Kahraman, U. Guvenc, ve S. Aras, "Development of a Lévy flight and FDB-based coyote optimization algorithm for global optimization and realworld ACOPF problems", *Soft Computing*, c. 25, sayı 8, ss. 6577-6617, 2021.