



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.09.2023
Kabul Tarihi : 13.05.2024

Received Date : 23.09.2023
Accepted Date : 13.05.2024

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ENERJİ DAĞITIM HATLARINA OPTİMUM ŞEKİLDE KONUMLANDIRILMASI

OPTIMAL ALLOCATION OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS ON ENERGY DISTRIBUTION NETWORKS

Murat ÇIKAN^{1*} (ORCID: 0000-0001-6723-5769)
Nisa NACAR ÇIKAN² (ORCID: 0000-0002-9641-4616)

¹ Çukurova Üniversitesi, Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Adana, Türkiye

² Çukurova Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Murat ÇIKAN, mcikan@cu.edu.tr

ÖZET

Elektrikli araçların (EA) güç sistemlerine büyük ölçekli entegrasyonu elektrik şebekesinin güç kalitesinin düşmesine, hatlardaki aktif güç kayıplarının artmasına ve dağıtım hattının güvenilirlik indeksi değerlerinin azalmasına neden olur. Bu tarz problemler elektrikli araç şarj istasyonlarının (EAŞİ) şebekeye optimal şekilde konumlandırılması ile minimize edilebilir. Bu çalışmada, sürüş eğitimi-temelli optimizasyon (DTBO) algoritması kullanılarak 200 baralı test sisteminde optimal yük akışı ve EAŞİ'lerin optimum noktalara konumlandırılması eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, üç farklı senaryo ve her bir senaryoya ait üç farklı durum göz önüne alınmıştır. Birinci senaryoda EAŞİ'lerin hatta bulunmadığı durumda optimal güç akışının gerçekleştirilmesi, ikinci senaryoda EAŞİ'lerin rastgele baralara konumlandırılarak, üreticilerin aktif/reaktif güç çıkışlarının optimize edilmesi ve üçüncü senaryoda ise EAŞİ'lerin DTBO algoritması ile optimum noktalara yerleştirilerek ve üreticilerin çıkış güçlerinin birlikte optimize edilmesi olarak özetlenebilir. Her senaryoda üç farklı durum (serbest çalışma, deterministik ve meta-sezgisel metot yaklaşımları) göz önüne alınarak sistemdeki aktif güç kayıpları minimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, DTBO algoritmasının kullanılmasıyla EAŞİ'lerin optimal noktalara konumlandırılması sonucunda aktif güç kayıplarının %32 oranında azaldığı göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç şarj istasyonu, konumlandırma, optimizasyon, meta-sezgisel algoritma

ABSTRACT

The large-scale integration of Electric Vehicles (EVs) into the power systems causes a decrease in the power quality of the electrical grid, an increase in active power losses in the lines, and a reduction in the reliability index values of the distribution network. Such problems can be minimized by the optimal positioning of electric vehicle charging stations (EVCSs) on the grid. This study uses a driving training-based optimization (DTBO) algorithm to simultaneously determine the optimal load flow and the optimal positioning of the EASIs in a 200-bus test system. In the study, three different scenarios and three different cases for each scenario have been considered. The study can be summarized as follows: In the first scenario, the power flow is optimized without the presence of EVCSs on the grid. In the second scenario, EVCSs are randomly placed on buses and generators' active/reactive power outputs are optimized. In the third scenario, simultaneously EVCSs at optimal locations are allocated using the DTBO algorithm and the generator output powers are optimized. The active power losses in the system have been minimized in each scenario by considering three different cases (unrestricted operation, deterministic, and meta-heuristic method approaches). The obtained results demonstrate that using the DTBO algorithm for the optimal placement of EVCSs has resulted in a 32% reduction in active power losses.

Keywords: Electrical vehicle charging station, allocation, optimization, metaheuristic algorithms

GİRİŞ

Dünya genelinde satış rakamları hızla büyüyen elektrikli araçlar (EA), otomotiv sektöründe dikkate değer bir trend yakalamıştır. Son on yılda gerçekleşen bu hızlı yükselişin arkasında, EA'ların, CO_2 emisyonunun azaltılmasına yönelik olumlu katkısı ve içten yanmalı motorlara kıyasla işletme maliyetlerinin düşmesi gibi faktörler yer almaktadır (Parker vd., 2021; Zhou vd., 2021). Yapılan araştırmalara göre, 2030 yılına gelindiğinde, EA kullanımının artışı ile birlikte CO_2 emisyonu %28 oranında azalacaktır (Adnan vd., 2018). Ancak, EA'lara geçiş sürecinde çözüm bulunması gereken en önemli problemlerden bir tanesi elektrikli araç şarj istasyonlarının (EAŞİ) kurulumu için gerekli olan elektriksel alt yapının yetersizliğidir. Günümüzde EA sahibi olma imkânının kolaylaşmasıyla birlikte, EA'lara olan talep miktarında artış oluşmakta ve bu artış şebeke yükünü ciddi oranda arttırmaktadır. Şubat 2023'te yayımlanan Dünya Bankası verilerine göre, Türkiye'nin 2022 yılına ait toplam EA sayısı 5915 ve EA'ların yıllık toplam enerji tüketimi 15764 bin kWh olarak belirtilmiştir. Öngörülere göre, 2030 yılında toplam EA sayısının 1466954'e yükselmesi beklenmekte ve bu yükselmeyle birlikte EA'ların enerji ihtiyacının 3909433 bin kWh olacağı öngörülmektedir. Bu veriler, EA'ların hızla yaygınlaşacağını ve enerji talebinin önemli ölçüde artacağını göstermektedir. Bu artışın, enerji dağıtım şebekesi operatörleri (EDŞO) tarafından önemli ölçüde dikkate alınması gerekmektedir.

Günümüzde, EAŞİ'lerin boyutlarının ve konumlarının belirlenmesi için düzenleyici kuruluşlar tarafından net kurallar henüz oluşturulmamıştır. EAŞİ'ler birden fazla şarj istasyonu ve şarj soketi barındırarak aynı anda birden fazla EA'nın şarj edilmesine imkân verir. Bu durum, şebekede kontrolsüz ve anlık yük artışlarına yol açmaktadır (Nurmuhammed & Karadağ, 2021). Elektrikli araç sektöründeki otobüs ve kamyon gibi diğer araç çeşitlerinin de hızla artmasıyla birlikte, enerji ihtiyacı önemli ölçüde artacaktır. Plansız yerleştirilen şarj istasyonları, pik saatlerde trafo yük dengesizliğini bozabilir, gerilim profilini olumsuz etkileyebilir ve aktif güç kayıplarına neden olabilir. Ayrıca EA kullanıcıları, araçlarını kısa sürede şarj etme ihtiyacı duymaktadır. EA sayısının artmasıyla birlikte hızlı şarj istasyonlarının artması ise dağıtım sistemini önemli ölçüde olumsuz etkileyebilir. Bu olumsuz etkiler, doğru bir EAŞİ planlamasıyla büyük ölçüde azaltılabilir (Tuan, 2017).

EAŞİ'lerin konumlandırılması üzerine kapsamlı bir literatür çalışması (Ahmad vd., 2022) tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmaların çoğunda maliyet hesaplamaları göz önünde bulundurulmuştur. (Islam vd., 2015)'de EAŞİ'lerin konumlandırılmasını etkileyen faktörler 33 baralı bir test sistemi üzerinde incelenmiştir. (Ge vd., 2011)'de, şebeke bölümlenmesi temel alınarak EAŞİ'lerin konumlandırılması ve boyutlandırılması yöntemi tartışılmıştır. Trafik yoğunluğu ve şarj istasyonu kapasite sınırlamaları temel olarak dikkate alınan faktörlerdir ve optimize mekanizması olarak genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. (Reddy & Selvajyothi, 2020)'de 19 ve 25 baralı dengesiz test sistemlerinde PSO algoritması kullanılarak ve güç kayıplarının azaltılması amaç fonksiyonu olarak seçilerek optimal EAŞİ konumlandırılması belirlenmiştir. (Kathiravan & Rajnarayanan, 2023)'te, 33 baralı test sisteminde aritmetik optimizasyon algoritması (AOA) kullanılarak ve hat kayıplarının minimize edilmesi amaç fonksiyonu seçilerek EAŞİ'lerin konumları belirlenmiştir. (Mozafar vd., 2017)'da, 33 baralı test sisteminde hibrit genetik algoritma-parçacık sürü optimizasyonu (GA-PSO) kullanılarak, EA ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) optimal şekilde konumlandırılması yapılmıştır. Çalışmada, EA pil maliyetlerini düşürmek, şarj ve talep maliyetlerini düşürmek ve gerilim dalgalanmalarını düşürmek amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. (Pal vd., 2021)'de 33 baralı test sisteminde şarj talebinin yoğun olduğu bölgeler dikkate alınarak yavaş ve hızlı şarj senaryoları dikkate alınarak EAŞİ'lerin konumları belirlenmiştir. Gerilim sapsmasının minimize edilmesi, amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Problem çözümünde diferansiyel evrim (DE) kullanılmıştır ve elde edilen sonuçları doğrulamak için Harris Hawks Optimizasyonu (HHO) kullanılmıştır.

Literatür taraması sonucunda, yapılan çalışmaların çoğunun 16, 25 ve 33 baralı gibi küçük boyutlu test sistemleri kullandığı görülmüştür (Yuvaraj vd., 2024). Bara sayısının artması arama yüzeyini (çözüm uzayını) genişleterek çözüm süresini artırdığından, işlemlerin kolaylaştırılması için küçük baralı test sistemleri tercih edilmiştir. Bu çalışmada, 200 baralı ağ yapıya sahip bir test sistemine EA'lerin optimal noktalara konumlandırılması hedeflenmiştir. Çalışmada, üç farklı senaryo ve her bir senaryo için üç farklı durum göz önünde bulundurulmuştur. Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda optimal konumların belirlenmesinde meta-sezgisel algoritmalarından faydalanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle herhangi bir metot uygulanmadan, serbest çalışma durumu gözetilerek sistemin aktif ve reaktif güç kayıpları incelendi. Daha sonra sırasıyla deterministik metot ve meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak sistemin güç kayıpları karşılaştırıldı. Birinci senaryoda, optimum yük akış problemi serbest çalışma, Lagrange katsayı yöntemine dayanan deterministik bir yaklaşım ve güncel bir meta-sezgisel bir algoritma olan Sürüş Eğitimi-Temelli Optimizasyon (Driving Training-Based Optimization, DTBO) optimizasyon algoritması yaklaşımı ile

çözülmüştür. Bu senaryodaki amaç, üreteçlerin aktif ya da reaktif üretim güçlerini kontrol ederek dağıtım hattındaki aktif güç kayıplarını minimize etmenin, önerilen yöntemler ile gerçekleştirilebileceğini göstermektir. İkinci senaryoda, her biri 2 MW olarak kabul edilen 17 adet EAŞİ (toplam 34 MW) güç dağıtım hattı baralarına rastgele dağıtılarak optimum güç akışı sağlanmıştır. Üçüncü senaryoda ise 34 MW'lık EAŞİ'lerin konumlandırılması DTBO arama algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda, EAŞİ'lerin optimal konumlarının bulunması ve sistemdeki üreteçlerin çıkış güçlerinin hesaplanması eş zamanlı olarak optimize edilmiştir.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde özetlenebilir. Bölüm 2'de, matematiksel modeller ve modellere bağlı fiziksel kısıtlamalar sunulmuştur. Bölüm 3'de, DTBO algoritması hakkında bilgi ve çalışma prensibi anlatılmıştır. Bölüm 4'de, çalışmaya ait senaryolar ve elde edilen sonuçlar tartışılarak sunulmuştur. Son bölümde ise sonuçlar özetlenmiştir.

MATEMATİKSEL MODELLER ve FİZİKSEL KISITLAR

Çalışmada kullanılan analiz metotları, modele bağlı fiziksel kısıtlamalar ve kullanılan amaç fonksiyonunun detayları bu bölümde verilmiştir.

Newton-Raphson Metodu ile Yük Akış Algoritması

Güç sistemlerinde (dağıtım hattının) yük akışının hesaplanması için literatürde birçok yöntem mevcuttur. Algoritmaların birbirlerine göre üstünlükleri olduğu gibi, kimi zaman da zayıflıkları daha belirgin olabilir. Newton-Raphson (N-R) algoritması gerek yakınsama hızı gerekse de yakınsama hassasiyetinden dolayı oldukça popüler bir yük akış algoritmasıdır (Glover vd., 2016). N-R algoritmasına ait denklemler Eş. (1) ile Eş. (8) arasında açıklanmıştır. $y=f(x)$ tarzındaki bir eşitliği güç sistemlerine uyarlısak:

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2 \\ \vdots \\ P_N \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} \text{ ve } f(x) = \begin{bmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2(x) \\ \vdots \\ P_N(x) \\ Q_2(x) \\ \vdots \\ Q_N(x) \end{bmatrix} \quad (1)$$

x bilinmeyen baralara ait gerilim (V p.u cinsinden) ve gerilim açısını (δ radyan cinsinden) değerlerini göstermektedir. P ve Q değerleri, ise salınım barası hariç tüm baraların aktif ve reaktif güç değerlerini p.u cinsinden göstermektedir. Salınım barasına ait değişkenler, ($[V_1 \text{ ve } \delta_1] = [1 \text{ ve } 0]$) çözüm sonucunda sabit olarak kalır. $i \in 2, 3, \dots, N$ bara numarasını göstermektedir.

$$P_i(x) = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_i(x) = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Bu yöntem, iki veya fazla değişkene sahip fonksiyonların Taylor serisine açılmasıyla elde edilir. Yüksek dereceli Taylor değerleri ihmal edilmiştir. Bu ihmal, çözümün hassasiyetini önemli ölçüde etkilemez. Eş. (3)'te, ' N ' bara sayısına sahip bir güç sistemi için aktif ve reaktif güç değerlerinin ayrı ayrı nasıl ifade edildiği gösterilmiştir.

$$\text{Jacobian} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial V_N} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Aktif güç değeri için fark (hata) denklemlerinin bara gerilimine ait faz açısı ve mutlak değerlerine bağlı kısmi türev değerleri Eş. (4) ve Eş. (5)'te verilmiştir. Böylece jakoben matrisine ait j_1 ve j_2 değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımı ile ifade edilir. Diyagonal olan ve olmayan elemanlara ait j_1 jakoben matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Diyagonal olan ve diyagonal olmayan elemanlara ait j_2 jakoben matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = |V_i| \cdot |Y_{ii}| \cdot \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Reaktif güç değeri için fark (hata) denklemlerinin bara gerilimine ait faz açısı ve mutlak değerlerine bağlı kısmi türev değerleri Eş. (6) ve Eş. (7)'de sunulmuştur. Bu sayede jakoben matrisinin j_3 ve j_4 değerleri, aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir. Diyagonal ve diyagonal olmayan elemanlara ait j_3 jakoben matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = |V_i| \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Diyagonal olan ve diyagonal olmayan elemanlara ait j_4 jakoben matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| \cdot |Y_{ii}| \cdot \sin(\theta_{ii}) + \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

i ve $j \in 2,3, \dots, N$ dir. Eş. (8) salınım barası hariç geri kalan diğer baraların açılı ve gerilim değerini göstermektedir.

$$x(k) = \begin{bmatrix} \delta(k) \\ V(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$x(k)$ için başlangıç değeri seçilir ve her iterasyon sonucunda $x(k)$ değeri güncellenir. İstenilen hassasiyete ulaşıldığında ise döngü sonlandırılır.

Gerilim Kararlılık İndeksi

Gerilim kararlılık indeksi (VSI), bir güç dağıtım sisteminin gerilim düzeyinin dalgalanmalara ve dış etkilere karşı ne kadar kararlı olduğunu değerlendiren bir ölçüdür. Bu indeks, elektrik sistemlerinin gerilim, empedans ve güç düzeyindeki değişikliklere nasıl tepki verdiğini ve sistemdeki değişimlerin sınırlarını belirlemeye yardımcı olur. Sınır değerlere yakın çalışan sistemlerin gerilim kararlılığının daha hassas bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Literatürde birçok gerilim kararlılık indeksi bulunmaktadır. Ancak bu formüllerin birçoğu çeşitli varsayımlara veya kabullere dayanmaktadır. Bu çalışmada, hattın yüklenmesini ve çoklu hat parametrelerini dikkate alan güncel bir indeks (Doğanşahin & Cikan, 2023) kullanılmıştır. Kullanılan formül Eş. (9)'da gösterilmiştir.

$$VSI = \frac{4|V_S|^2 |C| |D| |S_R| \cos(\varphi_R + \delta_S) \cdot \sin(\delta_S)}{|S_S|^2 \cdot \cos^2(\varphi_S + \delta_R)} \leq 1 \quad (9)$$

Burada 'S ve R' alt indisleri, sırasıyla hat başı ve hat sonu değişkenlerini ifade etmektedir. S_S ve S_R , hat başı ve hat sonuna ait görünür gücü, V bağlı bulunduğu bara hat gerilimini, δ_S ve δ_R , gerilimlerin faz açılarını ve φ_S ve φ_R ise görünür gücün güç açılarını göstermektedir. C ve D değişkenleri ise, Eş. (10) ve Eş. (11)'de verilmiştir.

$$C = Y \times \left[1 + \left(Y \times \frac{Z}{4} \right) \right] \quad (10)$$

$$D = 1 + \left(Y \times \frac{Z}{2} \right) \quad (11)$$

Z ve Y sırasıyla, hattın hat empedans ve shönt admintas değerlerini göstermektedir.

Kısıtlar

Güç sistemlerinin stabil ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için aşağıda gösterilen kısıt değerlerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Cikan & Kekezoglu, 2022) (Cikan & Cikan, 2023).

- Bara gerilim değerlerinin tanımlanmış sınırlar içerisinde çalışması gerekir.

$$V_{Bara,min}^i \leq V_{Bara}^i \leq V_{Bara,maksi}^i \quad (12)$$

- Eş. (13)'te görüldüğü üzere, yük baraları için gerilime ait alt ve üst limit değerleri, nominal bara gerilim değerinin $\pm 10\%$ dur.

$$0.9 \cdot V_{Bara}^i \leq V_{Bara}^i \leq 1.1 \cdot V_{Bara}^i \quad (13)$$

- Aynı şekilde fider baralarına ait gerilim salınım seviyesi ise Eş. (14)'de nominal bara gerilim değerinin $\pm 5\%$ olarak tanımlanmıştır.

$$0.95 \cdot V_{Besleme}^i \leq V_{Besleme}^i \leq 1.05 \cdot V_{Besleme}^i \quad (14)$$

- Eş. (15)'de, baralara bağlı branşmanlar arasındaki akım değeri, kablunun maksimum akım taşıma kapasitesini aşmamalıdır.

$$I_{Bara}^i \leq I_{Bara,maksi}^i \quad (15)$$

- Fiderler tarafından sisteme verilen toplam güç, hatta bağlı olan toplam yük gücü ile hattaki kayıp değerlerinin toplamına eşit ya da büyük olmalıdır.

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i} \geq \sum_{i=1}^{N_{Yük}} P_{LD,i}^{abc} + \sum_{i=1}^{N_{Dal}} P_{Kayıp,i}^{abc} \quad (16)$$

- Üreteç Gücü: Aktif ve reaktif güç değerleri tanımlanan limitler arasında kalmalıdır.

$$\begin{aligned} P_{gen,i}^{min} < P_{gen,i} < P_{gen,i}^{maksi} \\ Q_{gen,i}^{min} < Q_{gen,i} < Q_{gen,i}^{maksi} \end{aligned} \quad (17)$$

- İletilen güç değerinin tanımlanan sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir.

$$S_{l,i} < S_{l,i}^{maksi} \quad (18)$$

Amaç Fonksiyonu

Enerjinin bir noktadan diğerine güvenilir ve stabil şekilde taşınması sırasında, iletim ve dağıtım sistemlerinin belirli fiziksel ve mekaniksel sınırlamalara uyması beklenir. Güç sistemlerinde enerjinin iletilmesi esnasında, hattın direnci, manyetik etkiler ve diğer nedenlerden dolayı hat kayıpları meydana gelir. Hat kayıplarının hesaplanması için Eş. (19)'da ki formül kullanılmıştır (Cikan & Kekezoglu, 2022).

$$P_{kayıp} = \sum_{i=1}^{N_{dal}} r^{(i)} \cdot \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \quad (19)$$

Sistemdeki toplam aktif güç kaybı, Kron formülü kullanılarak bulunmuştur. Bu formülün ayrıntıları Bölüm 2.4 ve 2.5'te yer alan formüller ref. (Saadat, 2010)'da sunulmuştur.

$$P_{Kayıp}^{min} = \sum_{i=1}^{N_{gen}} \sum_{j=1}^{N_{gen}} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{N_{gen}} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (20)$$

Burada, B_{ij} indisi kayıp katsayısı ya da B -katsayısı olarak isimlendirilir. B katsayısının elde edilmesi ile ilgili ayrıntılı bilgi ref.(Saadat, 2010)'de gösterilmiştir. Eş. (20)'de kapalı formda verilen denklemin açık formdaki hali Eş. (21)'de sunulmuştur.

$$P_{Loss} = [P_{g1} \ P_{g2} \ \dots \ P_{Ngen}] \begin{bmatrix} B_{1,1} & B_{1,2} & \dots & B_{1,Ngen} \\ B_{2,1} & B_{2,2} & \dots & B_{2,Ngen} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{Ngen,1} & B_{Ngen,2} & \dots & B_{Ngen,Ngen} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gNgen} \end{bmatrix} + [P_{g1} \ P_{g2} \ \dots \ P_{Ngen}] \cdot \begin{bmatrix} B_{01} \\ B_{02} \\ \vdots \\ B_{0Ngen} \end{bmatrix} + B_{00} \quad (21)$$

Lagrange Katsayı Yöntemi (\mathcal{L}) ile Üreteçlerin Optimal Güç Değerinin Hesaplanması

Enerjinin ekonomik bir şekilde dağıtılması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi için çeşitli deterministik yöntemler geliştirilmiştir. Eş. (22) üreteçlerin ürettikleri güce bağlı toplam maliyet değerini hesaplamamıza yardımcı olur.

$$C_t = \sum_{i=1}^{N_{gen}} C_i = \sum_{i=1}^{N_{gen}} \alpha_i + \beta_i \cdot P_i + \gamma_i \cdot P_i^2 \quad (22)$$

α_i , β_i ve γ_i değerleri güç üretimine bağlı katsayılardır ve her üreteç olarak spesifik olarak tanımlanır. P_i indisi üretimin ürettiği güç değerini göstermektedir. Eş. (23), üreteçlerin üreteceği güç değerinin, hat kayıpları (P_{Loss}) ve talep yük (P_D) değerlerinin toplamına eşit olması gerektiğini gösterir.

$$\sum_{i=1}^{N_{gen}} P_i = P_D + P_{Kayıp} \quad (23)$$

Üreteçlerin üreteceği aktif güç değeri Eş. (24) ile tanımlanmıştır.

$$P_{gen,i}^{min} < P_{gen,i} < P_{gen,i}^{maks} \quad (24)$$

Eş. (22) ile Eş. (24) arasındaki denklemleri Lagrange katsayı yöntemi ile ifade edersek Eş.(25) elde edilir.

$$\mathcal{L} = C_t + \lambda \left(P_D + P_{Loss} - \sum_{i=1}^{N_{gen}} P_i \right) + \sum_{i=1}^{N_{gen}} \mu_i^{maks} \cdot (P_i - P_i^{maks}) + \sum_{i=1}^{N_{gen}} \mu_i^{min} \cdot (P_i - P_i^{min}) \quad (25)$$

Eş. (25)'de geçen μ_i^{min} ve μ_i^{maks} değerlerinin seçimi Eş. (26)' te gösterilmiştir.

$$\text{Eğer, } \begin{cases} \mu_i^{maks} = 0 & P_i < P_i^{maks} \\ \mu_i^{min} = 0 & P_i - P_i^{min} \end{cases} \quad (26)$$

μ_i^{maks} ve μ_i^{min} değerleri sadece sınır değerlerinin aşılması durumunda aktif hale gelir. Limitlerde bir çalışma yapılıyorsa, bu terimlerin bulunduğu denklem grubu sifıra eşit olacaktır. Kron kayıp formülü ve çeşitli matematiksel manipülasyonlar kullanılarak Eş. (27) ve Eş. (28) elde edilir. Bu sayede ekonomik açıdan üretilen en uygun güç miktarı deterministik bir yaklaşımla belirlenmiş olur.

$$\left(\frac{Y_i}{\lambda} + B_{ii} \right) \cdot P_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{gen}} B_{ij} P_j = \frac{1}{2} \left(1 - B_{0i} - \frac{\beta_i}{\lambda} \right) \quad (27)$$

kapalı formda verilmiş olan Eş.(27)'nin, açık formdaki hali Eş. (28)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \frac{Y_1}{\lambda} + B_{1,1} & B_{1,2} & \cdots & B_{1,N_{gen}} \\ B_{2,1} & \frac{Y_2}{\lambda} + B_{2,2} & \cdots & B_{2,N_{gen}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{N_{gen},1} & B_{N_{gen},2} & \cdots & \frac{Y_{N_{gen}}}{\lambda} + B_{N_{gen},N_{gen}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gN_{gen}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 - B_{01} \cdot \frac{\beta_1}{\lambda} \\ 1 - B_{02} \cdot \frac{\beta_2}{\lambda} \\ \vdots \\ 1 - B_{0N_{gen}} \cdot \frac{\beta_{N_{gen}}}{\lambda} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Eş. (28), iteratif ($\lambda^{(1)}$) yöntemlerle çözülür. k . iterasyona bağlı güç eşitliği Eş. (29)'da verilmiştir.

$$P_i^k = \frac{\lambda^{(k)}(1 - B_{oi}) - \beta_i - 2\lambda^{(k)} \cdot \sum_{j \neq i}^{N_{gen}} B_{ij} P_j^{(k)}}{2(Y_i + \lambda^{(k)} \beta_{ii})} \quad (29)$$

Eş. (29) denklemini gradiyent metodu ile çözümlenirse Eş. (30) elde edilir.

$$\sum_{i=1}^{N_{gen}} \left(\frac{\partial P_i}{\partial \lambda} \right)^{(k)} = \sum_{i=1}^{N_{gen}} \left(\frac{Y_i + B_{ii} \cdot \beta_i}{2(Y_i + \lambda^{(k)} B_{ii})^2} \right) \quad (30)$$

SÜRÜŞ EĞİTİMİ-TESELLİ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI (DTBO)

Sürüş Eğitimi-Temelli Optimizasyon (Driving Training-Based Optimization, DTBO) algoritması, 2022 yılında yayınlanan, insanların sürüş eğitimi sırasındaki davranışlarını taklit ederek geliştirilmiş güncel bir stokastik arama algoritmasıdır (Dehghani vd., 2022). DTBO algoritması matematiksel olarak üç aşamada modellenmektedir:

1. Sürüş eğitmeni tarafından verilen eğitimin matematiksel ifadesi,
2. Öğrencilerin direksiyon hocalarının becerilerini taklit etmesine dayanan matematiksel modelleme
3. Son aşama olarak ise teorik bilginin pratiğe uygulanmasının modellenmesi olarak özetlenebilir.

Sürücü kursu öğrencilerinden ve eğitmenlerden oluşan topluluk, DTBO algoritmasının popülasyonunun temelini oluşturur. Bu popülasyondaki her birey, bir aday çözüm olarak kabul edilir ve sürüş becerilerini temsil eder. Eş.(31)'de problemle ilgili aday çözümlerin elde edilmesi için, popülasyon üyelerini içeren bir matris oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1j} & \cdots & X_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} & \cdots & X_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N1} & \cdots & X_{Nj} & \cdots & X_{Nm} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Burada X vektörü DTBO algoritmasının popülasyonunun dağılımını göstermektedir. X_i notasyonu ise i . çözüme ait değeri ifade eder. $i=1,2,\dots,N$ ve $j=1,2,\dots,m$ olarak sınır değerleri ifade eder. N değeri popülasyondaki üye sayısını ve m değeri problemin boyutunu (değişken sayısını) gösterir. Matris içerisinde konumlanmış olan üyelerin başlangıçtaki konumu, Eş.(32)'deki formül kullanılarak rastgele bir şekilde başlatılır. Kullanılan eşitlik aynı zamanda popülasyon üyelerinin, arama-uzayı dışında çözüm üretmesinin de önüne geçer.

$$x_{i,j} = Alt_{S_{nir}}^j + \text{rand.} \cdot (\text{Üst}_{S_{nir}}^j - Alt_{S_{nir}}^j) \quad (32)$$

$\text{Üst}_{S_{nir}}^j$ ve $\text{Alt}_{S_{nir}}^j$ arama uzayının üst ve alt sınır değerlerini göstermektedir. $\text{rand}(\cdot)$ komutu $[0,1]$ arasında üretilecek rastgele sayıları temsil etmektedir. Popülasyon içerisindeki her aday, problem çözümü için bir sonuç üretir. Üretilen değerler, amaç fonksiyonunun bir değişkeni olarak atanır ve uygun çözüm için bir adaylık teşkil eder. Eş. (33)'teki vektör, amaç fonksiyonunun değerlerini modellemektedir.

$$\text{Obj} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}_{N \times 1} = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (33)$$

Obj değişkeni, amaç fonksiyon vektörünü ve F_i ise i . çözüme ait üretilmiş amaç fonksiyon değerini ifade eder. Doğadan esinlenerek geliştirilen birçok arama algoritmasının mekaniksel tasarımı birbirlerine çok benzemektedir. Genel olarak algoritmalar keşfet ve sömür ilkesine dayanmaktadır. Meta-sezgisel algoritmalar arasındaki temel fark, aday çözümlerin güncellenmesi sürecinde kullanılan stratejidir. DTBO algoritmasında aday çözümler, üç farklı aşamada güncellenir: (1) öğrenci sürücünün sürüş eğitmeni tarafından eğitilmesi, (2) öğrenci sürücünün eğitmen becerilerine göre şekillendirilmesi ve (3) öğrenci sürücünün pratik yapması.

Aşama 1: Sürüş eğitmeni tarafından eğitim (1.keşif fazı).

DTBO güncellemesinin ilk aşaması, sürücü adayı tarafından direksiyon hocasının seçilmesi ve ardından seçilen hoca tarafından sürücü adayına eğitimin verilmesine dayanır. DTBO popülasyonu arasından seçilen en iyi üyeler sürüş hocasını, geri kalanlar ise sürücü adayları olarak değerlendirilir. Direksiyon hocasının seçilmesi ve becerilerinin öğrenilmesi, popülasyon üyelerinin arama uzayında farklı alanlara hareket etmesine yol açacaktır. Bu da algoritmanın global arama ve optimum alandaki keşif gücünü artıracaktır.

$$DI = \begin{bmatrix} DI_1 \\ \vdots \\ DI_i \\ \vdots \\ DI_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DI_{11} & \cdots & DI_{1j} & \cdots & DI_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DI_{i1} & \cdots & DI_{ij} & \cdots & DI_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DI_{N_{DI,1}} & \cdots & DI_{N_{DI,j}} & \cdots & DI_{N_{DI,m}} \end{bmatrix}_{N_{DI} \times m} \quad (34)$$

Bu nedenle, DTBO güncellemesinin ilk aşaması, algoritmanın keşif yeteneğini göstermektedir. Her iterasyon sonunda, üretilen amaç fonksiyonunun değerlerinin karşılaştırılmasına bağlı olarak, DTBO'nun N üyesi, Eş. (34)'te gösterildiği gibi sürücü eğitmeni olarak seçilir. DI , direksiyon hocalarını gösteren matris değeri, DI_i i .inci direksiyon hocasını, $DI_{i,j}$ ise j .boyutu temsil eder. $N_{DI} = \left\lfloor \frac{1}{10} \cdot N \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \right\rfloor$ sürüş eğitmenlerinin sayısıdır. Burada t mevcut iterasyon değerini ve T ise maksimum iterasyon sayısı göstermektedir. DTBO algoritmasının 1. aşamaya ait matematiksel modeli Eş. (35)-(36)'da gösterilmiştir. Eş. (35) yardımıyla her üyenin konumunu güncellenir. Güncelleme sonucunda amaç fonksiyonu daha iyi sonuçlar üretiyorsa bu değer Eş. (36) yardımıyla kontrol edilip yeni değer saklanır. Eğer iyileşme söz konusu değil ise eski değer kullanılmaya devam eder.

$$x_{ij}^{p1} = \begin{cases} x_{i,j} + \text{rand}(DI_{Ki,j} - I.x_{i,j}) & F_{Ki,j} < F_i \\ x_{i,j} + \text{rand}(x_{i,j} - DI_{Ki,j}) & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (35)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{p1} & F_i^{p1} < F_i \\ X_i & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (36)$$

X_i^{p1} DTBO arama algoritmasının çözüm olarak sunulan i . adayın konum bilgisini verir. F_i^{p1} amaç fonksiyon değeri, $I\{1, 2\}$ kümesinden rastgele seçilen bir sayı, $r [0, 1]$ aralığında rastgele bir sayı, DI_{Ki} i . öğrenciye direksiyon eğitimi veren ve rastgele seçilen eğitmeni temsil eder.

Aşama 2: Sürücü adayının direksiyon hocasının becerilerini taklit etmesi (modellemesi) (2.keşif fazı).

DTBO algoritmasının ikinci aşaması, sürücü adayının, direksiyon hocasının yeteneklerini taklit etme ilkesine dayanır, kısaca öğrenci hocasının hareketlerini ve becerilerini modelleye çalışır. Bu süreç DTBO'daki popülasyon üyelerini arama uzayında farklı konumlara taşır ve böylece DTBO algoritmasının keşif gücü artar. Bu ifade matematiksel olarak Eş. (37) kullanılarak simüle edilmiştir. Her bir sürücü adayının, eğitmenle doğrusal kombinasyonuna dayalı olarak yeni bir konum oluşturulur. Güncelleme sonucunda amaç fonksiyonu daha iyi sonuçlar üretiyorsa bu değer Eş. (38) yardımıyla kontrol edilip yeni değer saklanır.

$$x_{ij}^{p2} = P.x_{i,j} + (1 - P)DI_{Ki,j} \quad (37)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{p2} & F_i^{p2} < F_i \\ X_i & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (38)$$

X_i^{p2} DTBO'nun ikinci aşamasına dayalı olarak i . aday çözüm için hesaplanan yeni durum, x_{ij}^{p2} j .boyut, F_i^{p2} amaç fonksiyon değeri ve P aşağıdaki şekilde verilen desenleme indeksidir.

$$P = \frac{1}{100} + 0.9 \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (39)$$

Aşama 3: Öğrendiklerini Pratiğe Dökme (sömürü fazı)

DTBO algoritmasının üçüncü ve son aşaması, sürücü adayının sürüş becerisini geliştirmek ve iyileştirmek için yapmış olduğu pratik uygulamalara dayanmaktadır. Her sürücü adayı bu aşamada kabiliyetlerini en üst seviyeye çıkarmaya çalışır. Matematiksel olarak her üyenin mevcut konumu etrafında yerel bir aramaya dayalı olarak daha iyi bir konum keşfetmesine olanak sağlayacak şekilde güncelleme yapması gerekir. Bu durum DTBO arama algoritmasının lokal aramadan yararlanma gücünü göstermektedir. Eş. (40)'a göre her bir popülasyon üyesinin yakınında rastgele bir konum oluşturulur. Daha sonra, Eş. (41)'e göre, bu konum amaç fonksiyonunun değerini iyileştirirse önceki konumun yerini alır ve hafızada saklanır.

$$x_{i,j}^{p3} = x_{i,j} + (1 - 2r) \cdot R \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot x_{i,j} \quad (40)$$

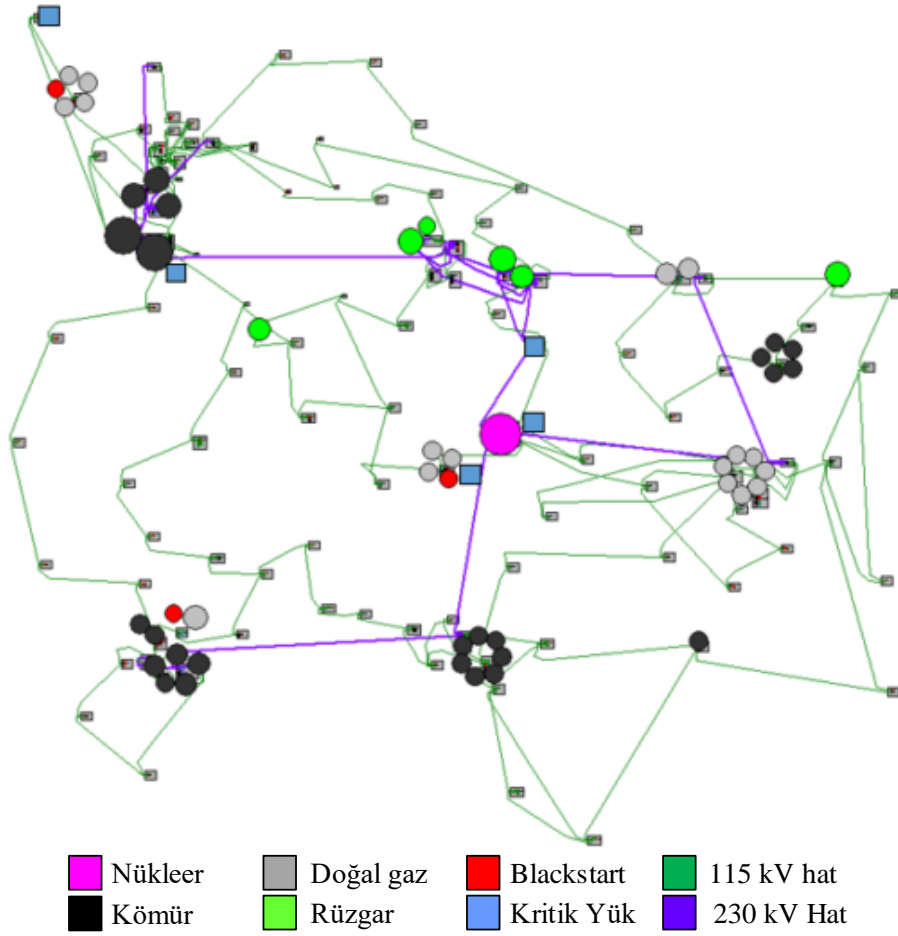
$$X_i = \begin{cases} X_i^{p3} & F_i^{p3} < F_i \\ X_i & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (41)$$

X_i^{p3} DTBO'nun üçüncü aşamasına dayalı olarak i . aday çözüm için hesaplanan yeni durum, $x_{i,j}^{p3}$ j 'inci boyut, F_i^{p3} amaç fonksiyonu değeri, r $[0, 1]$ aralığında rastgele olarak seçilmiş reel sayıyı göstermektedir. R değeri 0,05 olarak seçilmiş sabit bir değerdir. t , o andaki iterasyon değerini ve T maksimum iterasyon sayısını gösterir. Popülasyon üyeleri her bir aşama sonrasında konumlarını günceller. Güncellenmiş popülasyona sahip algoritma, bir sonraki DTBO iterasyonuna girer. Güncelleme işlemi tüm aşama adımlarına göre, Eş. (34)- Eş. (41) arasındaki fonksiyonları sürdürerek maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar işlemleri tekrarlar. DTBO algoritması verilen problem üzerinde uygulandıktan sonra, yürütme sırasında kaydedilen en iyi aday çözüm, problemin optimal çözümü olarak hafıza tutulur.

ÇALIŞMAYA AİT SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Şekil 1'de 200-Baralı test sistemi görülmektedir. Sistem, 49 tane fider (38 tanesi aktif durumda ve 11 adet ise kullanım dışı), 200 bara, 245 adet bransman, 4 kapasitör tank, 66 transformatör ve baralara bağlı farklı boyutlarda 108 adet sabit PQ yük modelinden oluşmaktadır. Hat ve baralara ait detaylı bilgiler ref.(Birchfield vd., 2017)'den elde edilebilir. Sistemde kurulu aktif ve reaktif yüklerin toplam güçleri sırasıyla 1475,7 MW ve 420,55 MVAR'dır. Sistemde bulunan fider (üreteç) kurulu aktif güç değeri 3379,6 MW ve reaktif güç değeri ise [-420,3 ile 1436,1] MVAR arasında değişmektedir. Güç iletim hattı 13,8 kV, 115 kV ve 230 kV'luk farklı gerilim seviyelerinde çalışmaktadır. Hattın başlangıç koşullarına göre gerçekleştirilen yük akış algoritması neticesinde minimum ve maksimum gerilim değerleri 148.barada 1,010 p.u ve 100.barada 1,055 p.u olduğu görülmüştür. Hattaki güç kaybı 12,6069 MW + j176,2450 MVAR olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm analizler Matlab ortamında Matpower (Zimmerman vd., 2011) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma, üç farklı senaryo göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Birinci senaryoda, hatta herhangi bir şarj istasyonu bağlı değil iken üreteçlerin çalışması ve optimum yük akışı: (1)-Kısıt durumu yok iken (serbest çalışma durumu), (2)-Deterministik yöntem ve (3)-DTBO arama algoritması yardımı ile üreteçlerin çıkış güçlerinin kontrol edilmesi sağlanmıştır 3-farklı yaklaşım sayesinde, hattaki aktif güç kayıplarının ve gerilim profil değerlerinin değişimi incelenmiştir. İkinci senaryoda, şarj istasyonlarının konumlandırılması rastgele baralara atama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Birinci senaryodaki 3-durum gözetilerek senaryo-II'deki yeni koşullara göre çalışma tekrarlanmıştır. Üçüncü senaryoda, elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılması DTBO algoritması yardımıyla optimum noktalar tespit edilerek gerçekleştirilmiştir. Bu sayede EAŞİ'lerin optimum noktalara konumlandırılması ve üreteçlerin çıkış güçlerinin optimum değerlerde çalıştırılması amaçlanmıştır.



Şekil 1. 200-Baralı Test Sistemi (ACTIVSg200)

Senaryo I

Dağıtım hattına bağlı üreteçlerin optimum çalışma noktalarının belirlenmesi için birkaç kriter mevcuttur. Bunlardan bir tanesi üreteçlerin üretim değerleri göz önüne alınarak, üretim maliyetinin minimize edilmesidir. Diğer bir yöntem ise üretim değerleri optimize edilerek hat kayıplarının düşürülmesidir. Bu çalışmada hattı besleyen fiderlerin benzer maliyet karakteristiği gösterdiği (MW üretim maliyet değerinin aynı olduğu) kabulü yapılarak, aktif güç kaybının düşürülmesi amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

Şebekede Elektrikli Şarj İstasyonu Mevcut Değilken

Senaryo I'de, dağıtım hattında EAŞİ'lerin bulunmadığı ve bu nedenle herhangi bir yük talebinin olmadığı varsayılmıştır. Böylece sistem, dağıtım hattında bulunan puant yük değerleri dikkate alınarak (1) üreteçlerin serbest çalışma durumu, (2) deterministik ve (3) stokastik (DTBO arama algoritması) yaklaşımları kullanılarak üreteçlerin çıkış güçleri optimize edildiği durumlar göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. 200-Baralı Test Sisteminin Serbest Çalışma, Deterministik ve Meta-Sezgisel Yöntemlerle Gerçekleştirilen Optimum Çalışma Noktalarına ait Üreteç Değerleri

Fider No	Serbest Çalışma Durumu için		Deterministik Yöntem ile Çözüldüğünde		Stokastik Arama Algoritması Yardımı ile Çözüldüğünde	
	P ^{Güçü çıkış} (MW)	Q ^{Güçü çıkış} (MVAR)	P ^{Güçü çıkış} (MW)	Q ^{Güçü çıkış} (MVAR)	P ^{Güçü çıkış} (MW)	Q ^{Güçü çıkış} (MVAR)
49	1,3600	0,8892	4,5300	0,7854	1,3600	0,8449
50	1,3600	1,1863	4,5300	0,9354	1,3600	1,1280
51	1,3600	0,7734	4,5300	0,7999	1,3600	0,7350
52	1,3600	1,2619	4,5300	0,9309	1,3600	1,1999
53	2,7200	0,7999	9,0700	1,2939	2,7200	0,7591
65	86,5000	0,9104	86,5000	-2,8744	86,5000	0,5371
67	1,4100	-0,9024	4,7000	-0,5514	2,9745	-1,6459
68	8,3800	-0,5141	24,7703	-1,3610	9,7546	-0,8046
69	8,3800	-1,4247	24,8995	-3,2830	15,1480	-2,4643

70	8,3800	-0,7325	24,7703	-1,7066	9,7285	-1,1356
71	8,3800	-1,5785	24,9460	-3,3757	18,9648	-2,8537
72	8,3800	-1,7302	24,9459	-3,3771	18,9289	-3,1423
73	8,3800	-1,0384	24,7703	-1,9867	9,6889	-1,6002
76	1,2000	1,4065	4,0000	0,6251	4,0000	1,2220
77	0,7200	0,5014	2,4000	0,3572	2,3199	0,4566
78	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
79	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
90	0,9600	0,1319	3,2000	-0,3599	3,2000	0,1412
91	1,5000	0,5996	5,0000	-0,5499	5,0000	0,3454
92	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
94	5,4000	-2,5270	18,0000	-2,1999	17,9971	-3,2142
104	67,6000	3,0415	67,6000	-3,2155	67,6000	2,3075
105	154,8000	8,2115	154,8000	-2,1706	154,8000	7,1253
114	1,4000	1,2467	1,4000	0,2056	1,4000	1,0738
115	133,5000	12,4049	133,5000	19,1793	133,5000	11,2070
125	39,0200	7,2353	39,0200	6,3366	39,0200	6,6548
126	39,0200	12,5334	39,0200	15,9484	47,3497	11,6470
127	39,0200	25,9630	39,0200	22,6800	70,3893	23,5560
135	133,9200	21,4284	133,9200	24,6266	133,9200	19,6490
136	133,9200	25,0163	133,9200	23,6818	133,9200	22,8470
147	92,4000	8,7849	92,4000	9,6280	92,4000	8,1998
151	1,6200	0,0253	5,4000	-0,6085	5,3999	-0,4866
152	23,1700	0,2820	27,8655	-7,4798	53,1864	-0,74089
153	23,1700	0,0284	27,6824	-2,6200	24,0787	-1,4930
154	23,1700	0,1596	27,8655	-7,7632	53,1652	-2,2226
155	23,1700	0,1489	27,8655	-7,7856	53,1241	-2,3749
161	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
164	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
165	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
166	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
167	2,8200	-1,6523	9,4000	-1,0400	9,4000	-2,5511
168	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
169	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
170	2,8200	-0,9002	9,4000	-1,0400	9,4000	-1,3734
182	5,2500	2,1561	17,5000	1,4617	17,5000	1,2081
183	7,9800	5,7361	26,6000	2,2880	26,6000	3,0282
189* (Slack)	384,3969	-24,0390	170,7500	-46,6698	145,9925	-21,2440
196	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
197	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Toplam	1488,2969	105,8233	1485, 021	29,745	1484,51103	76,52474

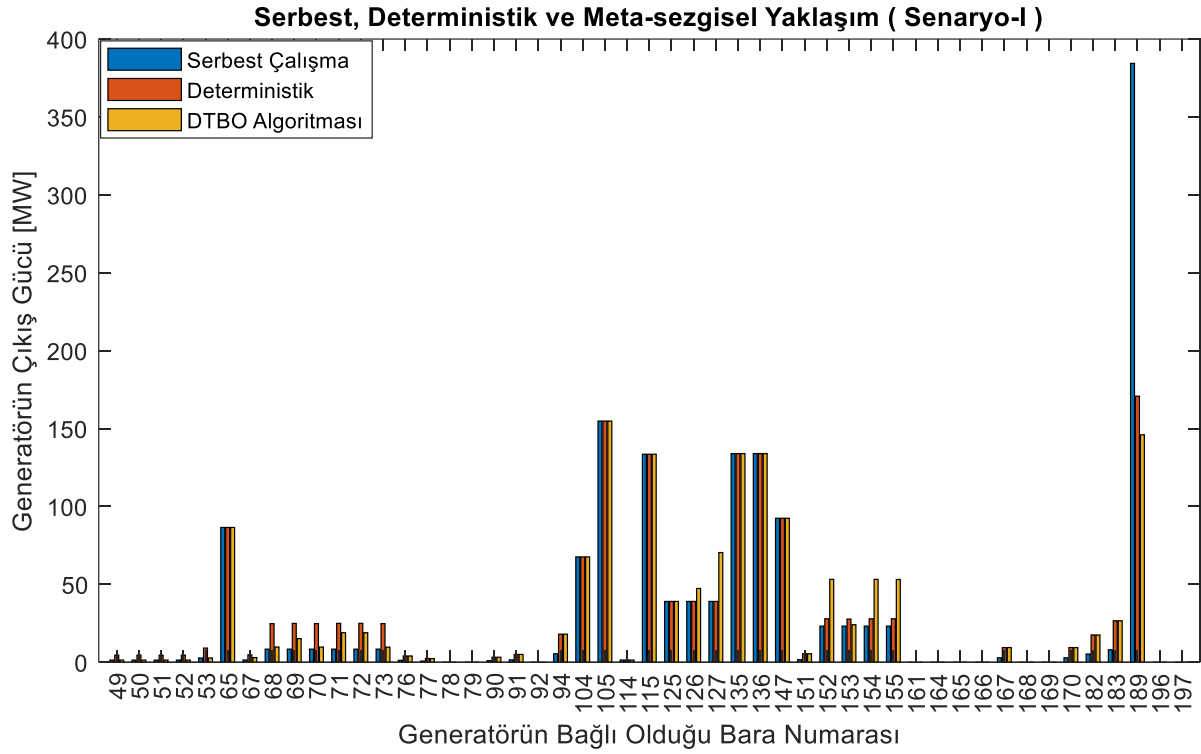
Bu sayede 3-farklı yaklaşım ile elde edilen değerlerin karşılaştırılması ve şebekeye olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bölüm 2.5 ve Bölüm 3'te sunulan formüller yardımıyla deterministik ve stokastik olarak üreteçlerin optimum çalışma noktası elde edilmiştir. Tablo 1'de, 200 baralı dağıtım hattının yük akış algoritması sonrasında üreteçlerin sisteme enjekte ettikleri aktif/reaktif güç değerleri gösterilmiştir. Serbest çalışma, deterministik ve meta-sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen yük akış algoritması sonucunda hat kayıpları ve gerilim kararlılık indeks değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. 3-Farklı Yaklaşım Sonucunda Elde Edilen Hat Kayıpları Gerilim Kararlılık İndeks Sonuçları

	Serbest Çalışma	Deterministik	Stokastik Arama Algoritması
	Durumu için	Yöntem ile Çözüldüğünde	Yardımları ile Çözüldüğünde
Kayıp Değeri	12,6069 MW 176,2450 MVar	9,3310 MW 140,8168 MVar	8,821032 MW 148,24949 MVar
Mini/Maksi Bara Gerilim	1,010 p.u @ bara148 1,055 p.u @ bara 100	1,059 p.u @ bara 148 1,100 p.u @ bara 100	1,01097 p.u @ bus 148 1,05646 p.u @ bus 100
Gerilim Kararlılık İndeksi (VSI)	Maksimum VSI değeri 142.barada 0,9697 olarak hesaplandı	Maksimum VSI değeri 153.barada 0,9840 olarak hesaplandı	Maksimum VSI değeri 94.barada 0,5341 olarak hesaplandı

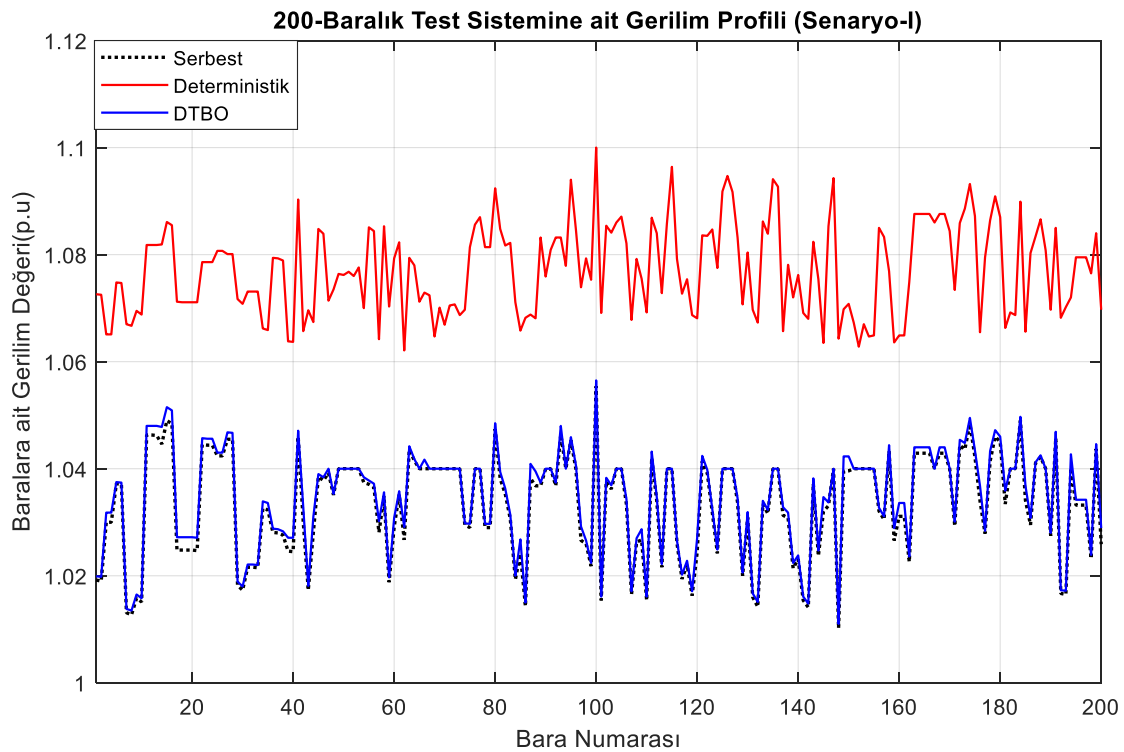
Tablo 2' den görüldüğü üzere, güç sistemindeki üreteçler, herhangi bir kısıt durumu yokken serbest şekilde çalışması durumunda hatlarda 12,607 MW'lık bir kayıp meydana gelmektedir. Üreteçler, Lagrange katsayı yaklaşımı yardımıyla optimize edildiğinde ise hat kayıpları 9,3310 MW değerine düşmektedir. DTBO algoritması ile üreteçlerin çalışması optimize edildiğinde ise bu değer 8,8210 MW değerine düşmektedir. 38 adet üreticinin aktif ve reaktif güçleri DTBO algoritması ile optimize edilerek elde edilen 76 değişkenin değeri Tablo 1'de (sondan-2-sütün) gösterilmiştir. Geleneksel ve stokastik yaklaşımlar neticesinde elde edilen üreteçlere ait güç değerleri tanımlanan limit aralığında kalmıştır. Üreteçlerin çıkış güçleri iki yöntem ile de optimize edildiği takdirde hatlardaki kayıp miktarı %25,98 ve %30,03 azalmıştır. Tablo 1' de gösterilen üreteçlerin çıkış güçlerinin karşılaştırılması Şekil 2'de sunulmuştur. 189

numaralı (salınım-barası) baraya bağlı üreticinin optimizasyonu öncesi ve sonrası çıkış güçleri karşılaştırıldığında, üreticinin başlangıç durumuna göre $\approx 37,98\%$ kapasite ile çalışmasının optimum sonuçlar üreteceği görülmüştür.



Şekil 2. Serbest Çalışma, Deterministik ve Meta-sezgisel Algoritma Yardımıyla Üreteçlerin Çıkış Güçlerinin Yük Akış Sonuçları (Senaryo-I)

Güç dağıtım sistemindeki baralara ait gerilim değerleri Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. 3-Farklı Yaklaşım ile Gerçekleştirilen Yük Akışı Sonrasında Baralara ait Gerilim Değerleri

Dağıtım hatlarında, bara gerilim değerinin [0,9 ile 1,1] p.u arasında salınım yapmasına müsaade edilir (Nacar Cikan & Cikan, 2024). Şekil 3'ten görüldüğü üzere optimizasyon sonucunda her baranın gerilim değeri müsaade edilen sınır değerler içerisinde bulunmaktadır. DTBO algoritması kullanılarak elde edilen ortalama gerilim değeri, 1,0345 p.u değerindedir. Lagrange optimizasyonu yaklaşımı ile üreteçlerin üretim değerleri ve hatta ait parametre sonuçları Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Deterministik Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler		Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)
Bara	200	Toplam Gen. Kapasitesi	3379,6	-420,3 to 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 to 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1485,0	29,7
Bağlı Yük Sayısı	108	Yük Miktarı	1475,7	420,5
Sabit Yük Sayısı	108	Sabit Yük Değeri	1475,7	420,5
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	-0,0	-0,0
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	225,6
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ($I^2 \cdot Z$)	9,33	140,82
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-----	306,0

Lagrange yaklaşımı kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda dağıtım hattına ait en düşük ve en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Hattın Gerilimine ait Değerler

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,059 p.u	148	1,100 p.u	100
Gerilim Açısı	-5,230 derece	148	6,260 derece	65
Aktif Güç Kaybı	---		0,250 MW	199-25
Reaktif Güç Kaybı	---		12,300 MVar	105-102

Meta-sezgisel arama algoritması (DTBO) yardımıyla 76 parametrenin aynı anda optimizasyonu sonucunda elde edilen değerler kullanıldığında hattın ürettiği parametreler Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Meta-Sezgisel Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler		Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)
Bara	200	Toplam Gen. Kapasitesi	3379,6	-420,3 ile 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 ile 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1484,5	76,5
Bağlı Yük Sayısı	108	Yük Miktarı	1475,7	420,5
Sabit Yük Sayısı	108	Sabit Yük Değeri	1475,7	420,5
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	-0,0	-0,0
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	209,6
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ($I^2 \cdot Z$)	8,82	148,25
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-----	282,6

Enerji dağıtım hatlarında fiderlere bağlı bara gerilim değerlerinin $\pm 5\%$ salınım yapmasına izin verilir. Belirtilen kısıtlar dikkate alındığında besleme gerilim değerlerinin, [0,95 ile 1,05] arasında dalgalanmasına müsaade edilir. DTBO algoritması yardımıyla hattın optimize edilmesi durumunda üreteçlerin gerilim değerleri 1,05 p.u değerini aşmamaktadır. Hattaki en düşük ve yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. DTBO Algoritması Sonuçlarına Göre Elde Edilen Gerilim Değerleri

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,011 p.u	148	1,056 p.u	100
Gerilim Açısı	-5,120 derece	175	5,290 derece	65
Aktif Güç Kaybı	---		0,240 MW	81-55
Reaktif Güç Kaybı	---		13,190 MVar	105-102

170	2,8200	-0,8066	9,4000	-1,0400	9,4000	-1,3192
182	5,2500	2,2398	17,5000	1,5084	17,5000	1,2670
183	7,9800	5,9543	26,6000	2,4023	26,6000	3,1817
189* (Slack)	419,1000	-22,7510	170,7500	-46,6699	158,99788	-21,1990
196	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
197	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Toplam	1522,99594	114,07377	1519,29529	33,44465	1518,7019	79,88043

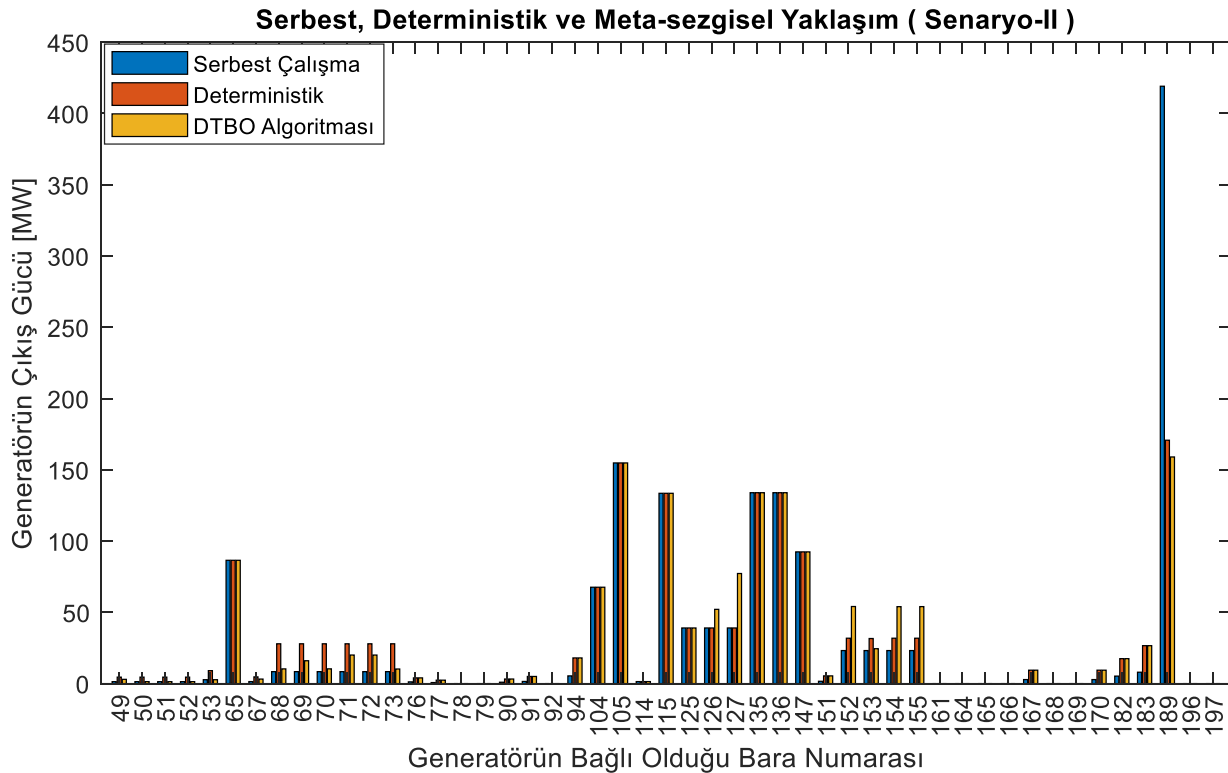
Serbest çalışma, deterministik ve meta-sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen yük akış algoritması sonucunda hat kayıpları ve gerilim kararlılık indeks değerleri Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. 3-Farklı Yaklaşım Sonucunda Elde Edilen Hat Kayıpları Gerilim Kararlılık İndeks Sonuçları

	Serbest Çalışma Durumu için	Deterministik Yöntem ile Çözüldüğünde	Stokastik Arama Algoritması Yardımı ile Çözüldüğünde
Kayıp Değeri	13,305945 MW 184,201796 MVA	9,6053 MW 144,81635 MVA	9,0119 MW 151,450 MVA
Mini/Maksi Bara Gerilim	1,010 p.u @ bara 148 1,055 p.u @ bara 100	1,058 p.u @ bara 148 1,100 p.u @ bara 100	1,0109 p.u @ bara 148 1,0563 p.u @ bara 100
Gerilim Kararlılık İndeksi (VSI)	Maksimum VSI değeri 169.barada 0,9971 olarak hesaplandı	Maksimum VSI değeri 119.barada 0,4437 olarak hesaplandı	Maksimum VSI değeri 23.barada 0,8189 olarak hesaplandı

Senaryo I deki duruma benzer şekilde 38 adet üreticinin aktif ve reaktif güçleri DTBO algoritması ile optimize edilmiş ve elde edilen 76 değişkenin değeri Tablo 7’de (son-2-sütun) gösterilmiştir. Geleneksel ve stokastik yaklaşımlar neticesinde elde edilen değişken değerleri tanımlanan limit aralıklarında kalmıştır.

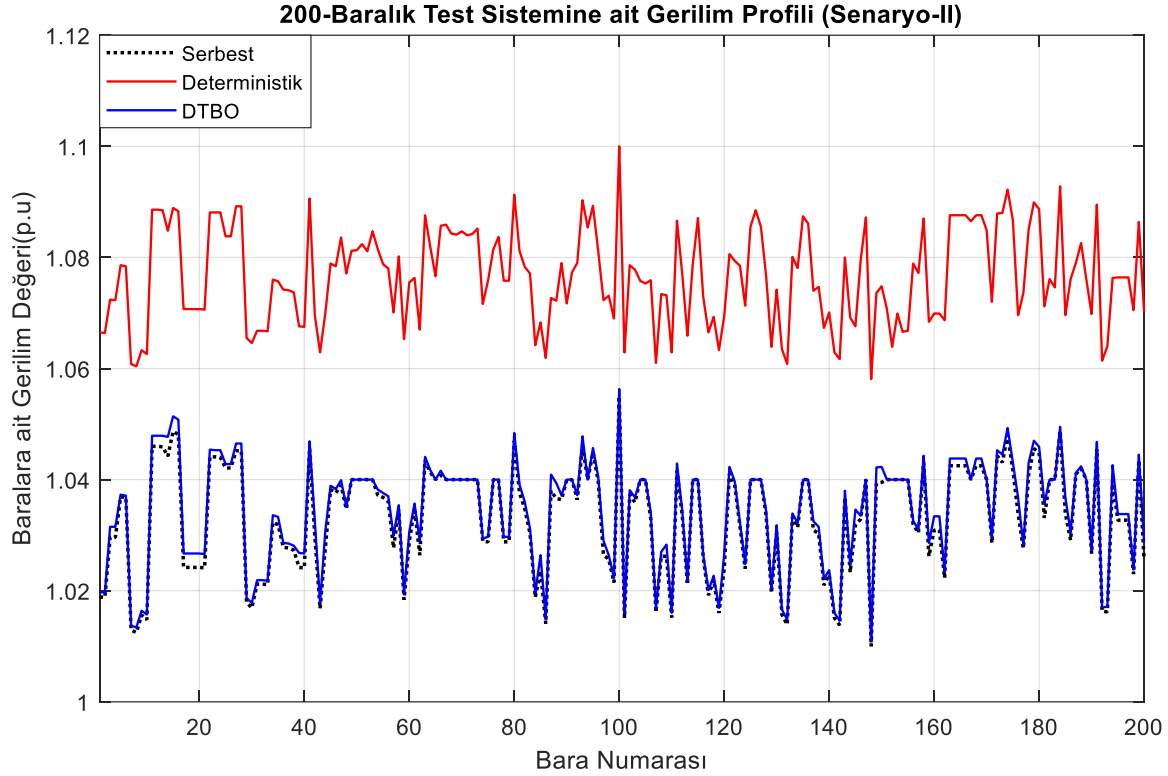
Tablo 8’den görüldüğü üzere, güç sistemine ilave edilen 34 MW’lık yük sonucunda hatlarda meydana gelen güç kaybı (serbest çalışma durumuna göre) **12,607 MW**’tan **13,305945 MW** değerine yükselmiştir. Benzer şekilde deterministik yaklaşım ile hattın optimize edilmesi durumunda aktif güç kaybı **9,3310 MW**’dan **9,6053 MW** değerine yükselmiştir. DTBO algoritması yardımı ile üreticilerin çıkış güçleri optimize edildiğinde ise bu değer **8,8210 MW**’tan **9,0119 MW** değerine yükselmiştir.



Şekil 4. Serbest Çalışma, Deterministik ve Meta-sezgisel Algoritma Yardımıyla Üreteçlerin Çıkış Güçlerinin Yük

Akış Sonuçları (Senaryo-II)

Üç yaklaşım karşılaştırıldığında aktif güç kayıplarındaki en az yükselme meta-sezgisel algoritma tarafından gerçekleştirildiği görülmüştür. Üreteçlerin çıkış güçleri optimize edildiği takdirde hatlardaki kayıp miktarı sırasıyla %27,812 ve %32,27 azalmaktadır. Tablo 7’de gösterilen üreteçlerin çıkış güçlerinin karşılaştırılması Şekil 4’te sunulmuştur. 189 numaralı salınım barasına bağlı üreticinin optimizasyon öncesi ve sonrası çıkış güçleri karşılaştırıldığında, üreticinin başlangıç durumuna göre \approx %37,94 kapasite ile çalışmasının daha optimum sonuçlar meydana getirdiği söylenebilir.



Şekil 5. 3-Farklı Yaklaşım ile Gerçekleştirilen Yük Akışı Sonrasında Baralara ait Gerilim Değerleri

Güç dağıtım sistemindeki baralara ait gerilim değerleri Şekil 5’te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere optimizasyon sonucunda her baranın gerilim değeri müsaade edilen sınır değerler içerisinde bulunmaktadır ve ortalama değeri ise 1,0343 p.u değerindedir. Lagrange yaklaşımı kullanılarak üreteçlerin üretiminin optimizasyonu sonucunda hatta ait parametre değerleri Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 9. Deterministik Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler	Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)	
Bara	200	Toplam Gen, Kapasitesi	3379,6	-420,3 ile 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 ile 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1519,3	33,4
Bağlı Yük Sayısı	118	Yük Miktarı	1509,7	420,5
Sabit Yük Sayısı	118	Sabit Yük Değeri	1509,7	420,5
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	-0,0 of -0,0	-0,0
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	225,9
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ($I^2 \cdot Z$)	9,61	144,82
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-	306,0

Lagrange yaklaşımı kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda dağıtım hattına ait en düşük ve en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 10’da gösterilmiştir.

Tablo 10. Lagrange Yöntemine Dayalı Optimizasyon Sonrası Hat Gerilimlerine ait Değerler

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,058 p.u	148	1,100 p.u	100
Gerilim Açısı	-5,470 derece	148	5,940 derece	65
Aktif Güç Kaybı	---		0,240 MW	63-184
Reaktif Güç Kaybı	---		12,320 MVAr	105-102

DTBO algoritması kullanarak üreticilerin aktif/reaktif güç çıkışlarının optimizasyonu sonucunda elde edilen değerler Tablo 11’de gösterilmiştir.

Tablo 11. Meta-Sezgisel Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına Ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler		Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVAr)
Bara	200	Toplam Gen, Kapasitesi	3379,6	-420,3 ile 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 ile 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1518,7	79,90
Bağlı Yük Sayısı	118	Yük Miktarı	1509,7	420,50
Sabit Yük Sayısı	118	Sabit Yük Değeri	1509,7	420,50
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	-0,0 of -0,0	-0,00
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	209,60
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ($I^2 \cdot Z$)	9,01	151,45
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-	282,50

Hattaki en düşük/en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 12’de gösterilmiştir.

Tablo 12. DTBO Algoritması Sonuçlarına Göre Elde Edilen Gerilim Değerleri

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,011 p.u	148	1,056 p.u	100
Gerilim Açısı	-5,400 derece	175	5,020 derece	105
Aktif Güç Kaybı	---		0,250 MW	81-55
Reaktif Güç Kaybı	---		13,190 MVAr	105-102

Tablo 7 ve Tablo 12 arasındaki veriler dikkate alındığında meta-sezgisel arama algoritmasının hem serbest çalışma hem de deterministik yaklaşım metodundan daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. Hattaki aktif güç kaybının minimum olması ve güç dağıtım sistemine ait gerilim değerlerinin $\pm 5\%$ sınırlar içerisinde salınım yapması arama algoritmasının gücünü ortaya koymaktadır.

Senaryo III

Senaryo-III’te DTBO arama algoritması yardımıyla 17 EAŞİ’nin konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Toplam 93 parametre değişkeninin optimizasyonu yapılmıştır. 76 değişken, 38 üreticinin aktif ve reaktif güç değerini optimize ederken, geri kalan 17 değişken ise EAŞİ’lerin konum değerini optimize etmektedir. Optimizasyon sonucu elde edilen EAŞİ’lerin konum ve güç değerleri, serbest çalışma ve Lagrange yaklaşımı ile güç akışının gerçekleştirilmesinde de kullanılmıştır. Senaryo III’de optimum baralara bağlanmış EAŞİ’lerin şebekeden toplamda 34 MW güç çektiği düşünülmüştür. Sistem önceki senaryolarda olduğu gibi, amaç fonksiyonunu aktif güç kaybının minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, 3 farklı metot kullanılarak optimal yük akışı gerçekleştirilmiştir.

Şarj İstasyonunun Optimal Noktalara Konumlandırıldığı Durum

200 baralı dağıtım hattının puant yük değerleri altında, 17 adet EAŞİ’nin konumlandırma çalışması DTBO algoritması yardımıyla gerçekleştirildi. Elde edilen EAŞİ bara numaraları sırasıyla 1, 5, 25, 26, 46, 52, 55, 65*, 73, 105, 125, 147, 194 olarak hesaplandı. Yapılan optimizasyon çalışması neticesinde 65* numaralı baraya nominal EAŞİ kurulu gücünün 5 katı büyüklüğünde şarj istasyonunun kurulmasının uygun olduğu hesaplanmıştır. Maksimum talep güç (yüklenme) verileri altında yapılan çalışma neticesinde generatörlerin aktif/reaktif güç çıkışlarının optimizasyonu sonucunda elde edilen güç akış değerleri Tablo 13’de sunulmuştur.

Tablo 13. Şarj İstasyonlarının Optimum Noktalara Konumlandırıldığı Durum

Fider No	Serbest Çalışma Durumu		Deterministik Yöntem		Meta-sezgisel Algoritma Yardımı ile Çözüldüğünde	
	P ^{Güçü} _{çıkış} (MW)	Q ^{Güçü} _{çıkış} (MVAR)	P ^{Güçü} _{çıkış} (MW)	Q ^{Güçü} _{çıkış} (MVAR)	P ^{Güçü} _{çıkış} (MW)	Q ^{Güçü} _{çıkış} (MVAR)
49	1,3600	0,9474	4,5300	0,6862	1,5073	0,8491
50	1,3600	1,2630	4,5300	0,8112	2,3407	1,0959
51	1,3600	0,8240	4,5300	0,7007	2,4179	0,7085
52	1,3600	1,4559	4,5300	0,7510	4,4952	1,1574
53	2,7200	0,8537	9,0700	1,1680	2,7937	0,7673
65	86,5000	1,4099	86,5000	-3,8932	86,5000	0,9816
67	1,4100	-0,8486	4,7000	-0,5333	1,4119	-1,4067
68	8,3800	-0,4847	27,9200	-0,4109	14,381	-0,7781
69	8,3800	-1,3427	27,9200	-2,7464	8,7017	-2,2054
70	8,3800	-0,6935	27,9200	-0,8452	8,3809	-1,0984
71	8,3800	-1,4831	27,9200	-3,2720	12,1000	-2,6054
72	8,3800	-1,6258	27,9200	-3,2829	18,9720	-3,1085
73	8,3800	-0,9113	27,9200	-1,3288	24,5930	-1,9061
76	1,2000	1,4167	4,0000	0,6257	2,2912	1,2902
77	0,7200	0,5050	2,4000	0,3575	0,7571	0,4733
78	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
79	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
90	0,9600	0,1395	3,2000	-0,3601	3,1103	0,1393
91	1,5000	0,6341	5,0000	-0,5510	4,9681	0,3542
92	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
94	5,4000	-2,4702	18,0000	-2,2000	17,8670	-3,1722
104	67,6000	3,3002	67,6000	-3,2567	67,6000	2,4112
105	154,8000	8,4573	154,8000	-2,5713	154,8000	7,1419
114	1,4000	1,2959	1,4000	0,2070	1,4000	1,0924
115	133,5000	12,7453	133,5000	19,1440	133,5000	11,3350
125	39,0200	7,3274	39,0200	6,2036	39,5490	6,6781
126	39,0200	12,6600	39,0200	15,9590	53,7180	11,7250
127	39,0200	26,2269	39,0200	22,6960	73,3480	23,5740
135	133,9200	21,6686	133,9200	24,4830	133,9200	19,7310
136	133,9200	25,3091	133,9200	23,5380	133,9200	22,9460
147	92,4000	8,7324	92,4000	9,0463	92,4000	8,0892
151	1,6200	0,0568	5,4000	-0,6212	1,87430	-0,4192
152	23,1700	0,4209	31,7800	-7,2508	54,7740	-0,5948
153	23,1700	0,1350	31,5660	-2,2841	24,5450	-1,4402
154	23,1700	0,3507	31,7800	-7,6142	47,5880	-2,2700
155	23,1700	0,3459	31,7800	-7,6432	63,6830	-1,9817
161	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
164	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
165	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
166	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
167	2,8200	-1,4161	9,4000	-1,0400	9,2398	-2,3834
168	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
169	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
170	2,8200	-0,7765	9,4000	-1,0400	9,3485	-1,2880
182	5,2500	2,2039	17,5000	1,4714	17,1000	1,2335
183	7,9800	5,8607	26,6000	2,3159	26,5780	3,1061
189* (Slack)	418,8724	-22,9090	170,7500	-46,6700	162,0800	-21,5210
196	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
197	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Toplam	1522,7724	111,58431	1519,0665	30,759304	1518,55922	78,70087

Serbest çalışma, deterministik ve meta-sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen yük akış algoritması sonucunda hat kayıpları ve gerilim kararlılık indeks değerleri Tablo 14’de gösterilmiştir.

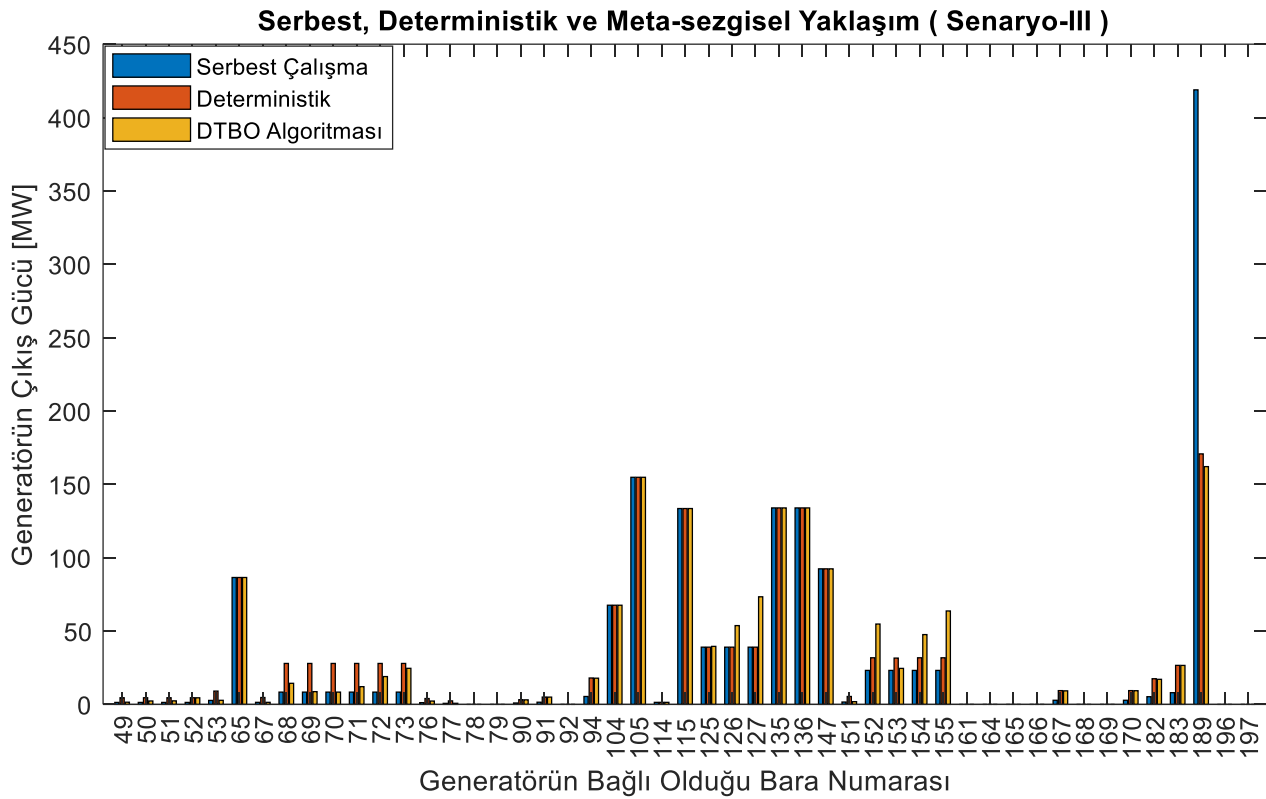
Tablo 14. 3-Farklı Yaklaşım Sonucunda Elde Edilen Hat Kayıpları Gerilim Kararlılık İndeks Sonuçları

	Serbest Çalışma Durumu için	Deterministik Yöntem ile Çözüldüğünde	Stokastik Arama Algoritması Yardımı ile Çözüldüğünde
Kayıp Değeri	13,0824 MW 181,7587 MVAR	9,376542 MW 142,440627 MVAR	8,869225 MW 150,29859 MVAR
Mini/Maksi Bara Gerilim	1,0101 p.u @ Bara 148 1,0549 p.u @ Bara 100	1,0586 p.u @ bus 148 1,1000 p.u @ bus 100	1,011 p.u @ bus 148 1,056 p.u @ bus 100
Gerilim Kararlılık İndeksi	Maksimum VSI değeri 44.barada 0,8076 hesaplandı	Maksimum VSI değeri 119.barada 0,9712 hesaplandı	Maksimum VSI değeri 37.barada 0,5823 hesaplandı

DTBO algoritması ile optimize edilmiş ve elde edilen değişkenlerin değeri Tablo 13' de (son-2-sütün) gösterilmiştir. Geleneksel ve stokastik yaklaşımlar neticesinde elde edilen değerler tanımlanan limit aralıklarında kalmıştır. Toplam 34 MW'lık yükün dağıtım hattına, optimizasyon öncesi (senaryo 2) ve sonrası (senaryo 3) konumlandırılması sonucunda elde edilen değerlerin karşılaştırılması aşağıdaki gibidir.

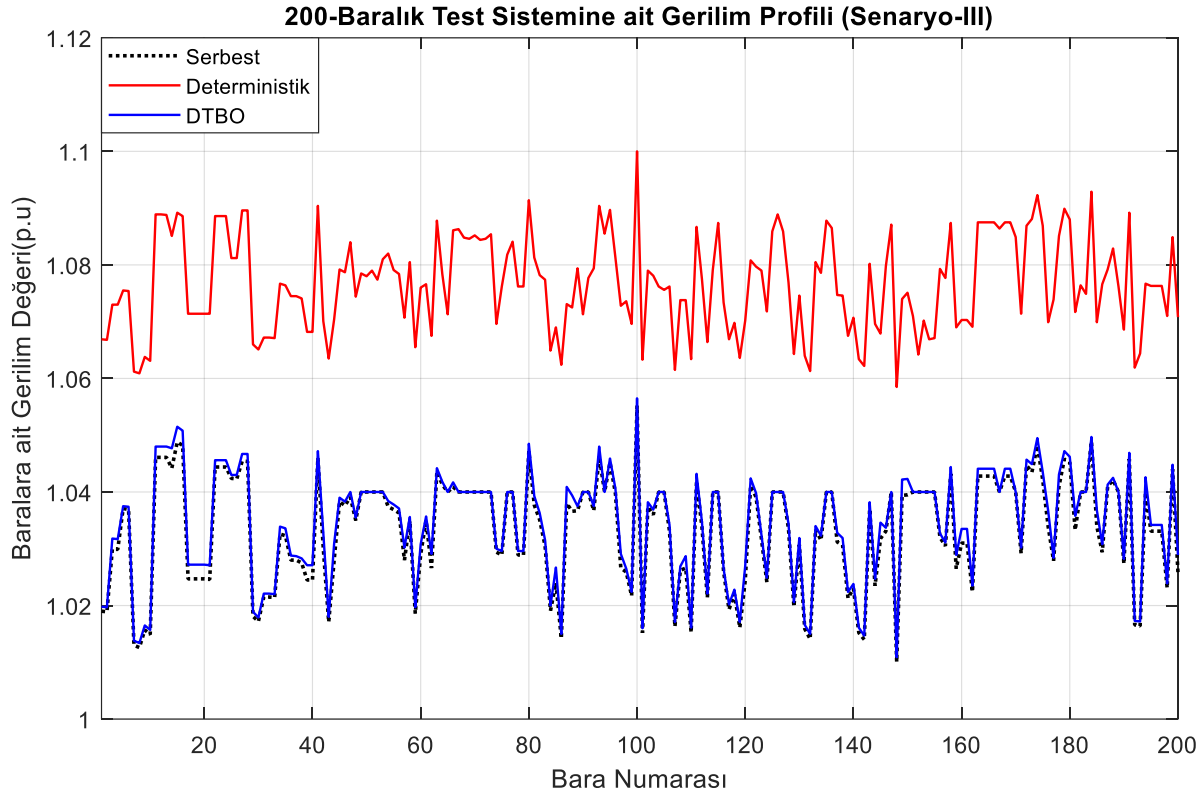
- Hatlarda meydana gelen güç kaybı (serbest çalışma durumunda), **13,306 MW'tan 13,083 MW** değerine,
- Deterministik yaklaşım ile optimizasyon neticesinde aktif güç kaybı **9,605 MW'dan 9,376 MW** değerine,
- DTBO algoritması ile generatörlerin çalışması ve EAŞİ'lerin konumlandırılması optimize edildiğinde ise bu değer **9,0119 MW'tan 8,869 MW** değerine düşmüştür.

3 durum karşılaştırıldığında en düşük aktif güç kaybının meta-sezgisel algoritma tarafından bulunan değerler ile elde edildiği söylenebilir. Optimal konumlandırma değerlerine göre generatörlerin çıkış güçleri optimize edildiğinde, hatlardaki kayıp miktarı sırasıyla %28,334 ve %32,21 azalmaktadır. Tablo 13'de gösterilen generatörlerin çıkış güçlerinin karşılaştırılması Şekil 6'da sunulmuştur. 189 numaralı baraya bağlı üreteçlerin optimizasyon öncesi ve sonrası çıkış güçleri karşılaştırıldığında üreticinin başlangıç durumuna göre \approx %38,69 kapasite ile çalışmasının daha optimum sonuçlar meydana getirdiği görülmüştür.



Şekil 6. Serbest Çalışma, Deterministik ve Meta-sezgisel Algoritma Yardımıyla Üreteçlerin Çıkış Güçlerinin Yük Akış Sonuçları (Senaryo-III)

Güç dağıtım sistemindeki baralara ait gerilim değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere optimizasyon sonucunda her baranın gerilim değeri müsaade edilen sınır değerler içerisinde bulunmaktadır ve ortalama değeri ise 1.0345 p.u değerindedir.



Şekil 7. 3-Farklı Yaklaşım ile Gerçekleştirilen Yük Akışı Sonrasında Baralara ait Gerilim Değerleri

Lagrange yaklaşımı kullanılarak üreticilerin güç üretim optimizasyonu sonucunda hatta ait parametre değerleri Tablo 15’de sunulmuştur.

Tablo 15. Deterministik Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler		Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)
Bara	200	Toplam Gen. Kapasitesi	3379,6	-420,3 ile 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 ile 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1519,1	30,8
Bağlı Yük Sayısı	119	Yük Miktarı	1509,7	420,5
Sabit Yük Sayısı	119	Sabit Yük Değeri	1509,7	420,5
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	0,0	-0,0
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	226,0
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ($I^2 \cdot Z$)	9,38	142,44
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-	306,2

Hattaki en düşük/en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 16’da gösterilmiştir.

Tablo 16. Gerilim Değerine ait Değerler

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,059 p.u.	148	1,100 p.u.	100
Gerilim Açısı	-5,360 derece	148	5,39 derece	65
Aktif Güç Kaybı	---		0,25 MW	63-184
Reaktif Güç Kaybı	---		11,99 MVar	105-102

Meta-sezgisel arama algoritması (DTBO) yardımıyla 93 parametrenin aynı anda optimizasyonu sonucu elde edilen değerler kullanıldığında hattın ürettiği parametreler Tablo 17’de gösterilmiştir.

Tablo 17. Meta-sezgisel Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler	Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVAr)
Bara	200	Toplam Gen. Kapasitesi	3379,6
Üreteç	49	On-line Kapasite	-420,3 ile 1436,1
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	2997,5
Bağlı Yük Sayısı	119	Yük Miktarı	1518,6
Sabit Yük Sayısı	119	Sabit Yük Değeri	78,70
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	1509,7
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	420,50
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ($I^2 \cdot Z$)	0,0
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-0,00
			8,87
			150,30
			-
			282,60

DTBO algoritması yardımıyla hattın optimize edilmesi durumundaki hattaki en düşük/en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 18’de gösterilmiştir.

Tablo 18.DTBO Algoritması Sonuçlarına Göre Elde Edilen Gerilim Değerleri

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,011 pu	148	1,056 pu	100
Gerilim Açısı	-5,470 derece	175	4,930 derece	105
Aktif Güç Kaybı	-	-	0,250 MW	81-55
Reaktif Güç Kaybı	-	-	12,850 MVAr	105-102

Tablo 13 ve Tablo 18 arasındaki veriler dikkate alınır meta-sezgisel algoritmanın ürettiği sonuçların, deterministik çözüm metodundan daha iyi çıktılar sunduğu söylenebilir. Fakat stokastik aramaya dayalı optimizasyon metodlarının çözüme ulaşma süresi, geleneksel yaklaşımlara göre daha uzundur. Bunun yanı sıra meta-sezgisel algoritmalar, aynı problem setinde, benzer koşullarda aynı değeri üretememesi de zayıf yönleri arasındadır.

SONUÇ

Bu çalışmanın amacı, elektrikli araç şarj istasyonlarının 200 baralı dağıtım hattına optimum şekilde konumlandırılmasıdır. Çalışma, 3 farklı senaryo ve her bir senaryo altında 3 farklı yaklaşım göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk senaryoda optimum yük akış problemi, serbest çalışma, Lagrange katsayı yöntemine dayanan deterministik yaklaşım ve güncel meta-sezgisel bir algoritma olan DTBO optimizasyon algoritması yaklaşımı ile çözülmüştür. Buradaki amaç, üreteçlerin aktif/reaktif üretim güçlerinin kontrol edilerek, dağıtım hattındaki aktif güç kayıplarının minimizasyonunun önerilen yöntemler ile gerçekleştirilmesidir. İkinci senaryoda, her biri 2 MW olan 17 adet EAŞİ'nin (toplam 34 MW) güç dağıtım hattına rastgele dağıtılarak optimum güç akışının yapılması sağlanmıştır. Üçüncü senaryoda ise 34 MW'lık EAŞİ'lerin konumlandırılması DTBO arama algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda EAŞİ'lerin baralara optimal konumlandırılması yapılmış ve optimum güç akışı I. ve II. senaryoya benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre EAŞİ'lerin rastgele baralara konumlandırılmasının ekonomik açıdan ve elektriksel olarak bazı olumsuzluklara neden olduğu görülmüştür. Hattaki aktif güç kaybının artması ekonomik açıdan hem üreticiye hem de dolaylı olarak da tüketiciye fazladan maliyet getirmektedir. Elektriksel açıdan ise dağıtım hatlarında fiziki şartların aşılmasına (aşırı akım ve güç talebi) ya da hattaki gerilim profilinde belirlenen sınırlar dışında düşmelere/yükselmelere neden olmaktadır. DTBO algoritması yardımıyla optimal şekilde EAŞİ'lerin konumlandırılması sonucunda hattaki kayıpların %32 seviyesinde düştüğü görülmüştür. Bu da algoritmanın EAŞİ konumlandırma probleminin çözümünde etkin olduğunu ve üstünlüğünü göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124E002 sayılı 1001-Projesi olarak desteklenmiştir. Değerli destekleri için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Adnan, N., Md Nordin, S., bin Bahruddin, M. A., & Ali, M. (2018). How trust can drive forward the user acceptance to the technology? In-vehicle technology for autonomous vehicle. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 819–836. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.019>
- Ahmad, F., Iqbal, A., Ashraf, I., Marzband, M., & Khan, I. (2022). Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review. *Energy Reports*, 8, 2314–2333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.180>
- Birchfield, A. B., Xu, T., Gegner, K. M., Shetye, K. S., & Overbye, T. J. (2017). Grid Structural Characteristics as Validation Criteria for Synthetic Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4), 3258–3265. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2616385>
- Cıkan, M., & Cıkan, N. N. (2023). Optimum allocation of multiple type and number of DG units based on IEEE 123-bus unbalanced multi-phase power distribution system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108564>
- Cıkan, M., & Kekezoglu, B. (2022). Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 991–1031. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.079>
- Dehghani, M., Trojovská, E., & Trojovský, P. (2022). A new human-based metaheuristic algorithm for solving optimization problems on the base of simulation of driving training process. *Scientific Reports*, 12(1), 9924. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14225-7>
- Ge, S., Feng, L., & Liu, H. (2011). The planning of electric vehicle charging station based on Grid partition method. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2726–2730. <https://doi.org/10.1109/ICCEENG.2011.6057636>
- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2016). *Power_system_analysis_and_design_5th*. Cengage Learning.
- Islam, M., Shareef, H., & Mohamed, A. (2015). A Review of Techniques for Optimal Placement and Sizing of Electric Vehicle Charging Stations. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91, 122–126. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113450868>
- Doğanşahin, K., & Cıkan, M. (2023). A new line stability index for voltage stability analysis based on line loading. *Journal*, 1(1), 23–30.
- Kathiravan, K., & Rajnarayanan, P. N. (2023). Application of AOA algorithm for optimal placement of electric vehicle charging station to minimize line losses. *Electric Power Systems Research*, 214, 108868. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108868>
- Mozafar, M. R., Moradi, M. H., & Amini, M. H. (2017). A simultaneous approach for optimal allocation of renewable energy sources and electric vehicle charging stations in smart grids based on improved GA-PSO algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 32, 627–637. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.007>
- Nacar Cıkan, N., & Cıkan, M. (2024). Reconfiguration of 123-bus unbalanced power distribution network analysis by considering minimization of current & voltage unbalanced indexes and power loss. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, 109796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109796>
- Nurmuhammed, M., & Karadağ, T. (2021). Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması ve Enerji Şebekesi Üzerine Etkisi Konulu Derleme Çalışması. In *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation* (Vol. 8, Issue 2, pp. 218–233). Gazi University.
- Pal, A., Bhattacharya, A., & Chakraborty, A. K. (2021). Allocation of electric vehicle charging station considering uncertainties. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 25, 100422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100422>
- Parker, N., Breetz, H. L., Salon, D., Conway, M. W., Williams, J., & Patterson, M. (2021). Who saves money buying electric vehicles? Heterogeneity in total cost of ownership. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 96, 102893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102893>

Reddy, M. S. K., & Selvajothi, K. (2020). Optimal placement of electric vehicle charging station for unbalanced radial distribution systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 0(0), 1–15. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1731017>

Saadat, H. (2010). *Power System Analysis (3rd ed.)*. PSA Pub.

Tuan, L. A. (2017). Impacts of fast charging of electric buses on electrical distribution systems. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), 2350-2353(3). <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/oap-cired.2017.0802>

Yuvaraj, T., Devabalaji, K. R., Kumar, J. A., Thanikanti, S. B., & Nwulu, N. I. (2024). A Comprehensive Review and Analysis of the Allocation of Electric Vehicle Charging Stations in Distribution Networks. *IEEE Access*, 12, 5404–5461. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3349274>

Zhou, M., Long, P., Kong, N., Zhao, L., Jia, F., & Campy, K. S. (2021). Characterizing the motivational mechanism behind taxi driver's adoption of electric vehicles for living: Insights from China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 144, 134–152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.01.001>

Zimmerman, R. D., Murillo-Sánchez, C. E., & Thomas, R. J. (2011). MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 12–19. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051168>