Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1601006
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 065602 (1427-1438)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 065602 (1427-1438)

Elektrikli Otobüsler için Şarj İstasyonlu Durakların İkili Genetik Algoritma Kullanılarak Belirlenmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 13.12.2024
Kabul/Accepted: 15.06.2025
Yayımlandı/Published: 03.12.2025

Determining Bus Stops to be Equipped with Electric Bus Charging Devices Using the Binary Genetic Algorithm

İlyas Cihan AKSOY[1], Mehmet Metin MUTLU[2*], Yalçın ALVER[3]

[1] Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye
[2] Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aydın, Türkiye
[3] Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Toplu taşıma sistemlerinin etkin kullanımı son yıllarda hızla artan ulaşım tabanlı problemlere karşı etkili bir çözüm yolu olarak görülmektedir. Toplu taşıma diğer ulaşım türlerine kıyasla sürdürülebilir bir ulaşım türü olsa da ulaşım kaynaklı emisyonun önemli bir oranına toplu taşıma taşıtlarının çoğunluğunu oluşturan dizel motora sahip otobüsler yol açmaktadır. Bu nedenle, kentsel ulaşımda sürdürülebilir bir toplu taşıma sistemi tesis etmek için elektrikli otobüsler tercih edilebilecek seçenekler arasında görülmektedir. Ancak, sınırlı menzile sahip elektrikli otobüsler, gün içinde enerji seviyelerinin düşmesi nedeniyle hizmet dışı kalabilmektedir. Bu çalışmada, toplu taşıma ağlarında belirli duraklara kablosuz şarj cihazları yerleştirerek, elektrikli otobüslerin yolcu indirme/bindirme süreleri boyunca gün boyunca ihtiyaç duydukları enerjiyi temin etmelerini sağlayan bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Şarj cihazı ile donatılacak duraklar, yatırım maliyetinin minimizasyonu amacıyla ve elektrikli otobüslerin hizmetlerine gün boyunca herhangi bir aksama yaşamadan devam edebilmesini sağlayan kısıtlar altında, İkili Genetik Algoritma kullanılarak belirlenmektedir. Geliştirilen optimizasyon modelinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde İkili Genetik Algoritma'nın, Dal Sınır Yöntemi ile elde edilen kesin çözüm ile karşılaştırıldığında, çok daha kısa sürelerde ve yüksek güvenilirlikle en iyi çözüme ulaşabildiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Sürdürülebilir Ulaşım; Elektrikli Otobüs; Elektrikli Toplu Taşıma Ağ Tasarımı; Şarj İstasyonu Konumlandırma; İkili Genetik Algoritma.*

Abstract

In recent years, the efficient use of public transport systems has emerged as an effective solution to the rapidly increasing transport-based problems. Despite being a relatively sustainable transportation mode compared to other modes, diesel-powered buses, which constitute the majority of public transport vehicles, are responsible for a significant proportion of transport-related emissions. As a result, electric buses are seen as a promising option for sustainable urban public transport systems. However, due to their limited driving range, electric buses may experience service disruptions throughout the day as their energy levels decrease. This study develops an optimization model that enables electric buses to meet their daily energy requirements by wirelessly charging at selected stops during passenger boarding and alighting times within the transit network. The stops to be equipped with charging devices are determined using a Binary Genetic Algorithm, under operational constraints that ensure uninterrupted service of electric buses throughout the day, with the objective of minimizing the total investment cost. An analysis of the results obtained from the developed optimization model reveals that the Binary Genetic Algorithm achieves the best solution in significantly shorter computation times and with high reliability, when compared to the exact solution obtained using the Branch and Bound method.

Keywords: *Sustainable Transportation; Electric Bus; Electric Transit Network Design; Optimal Charging Station Location; Binary Genetic Algorithm.*

1. Giriş

Özellikle son yirmi yılda, küresel ölçekte araç sayısındaki ve ulaşım talebindeki hızlı büyüme, yolculuk sürelerinin uzaması, kazaların artışı ve çevresel kirlilik gibi ulaşım kaynaklı sorunların yaygınlaşmasına neden olmuştur. Özellikle şehir merkezlerinde yoğunlaşan bu problemlerin giderilmesi amacıyla, yüksek yolcu kapasiteli toplu taşıma sistemleri önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemlerin cazibesini artırmaya yönelik planlamalar, bireysel araç kullanımını azaltarak ulaşım kaynaklı olumsuzlukların azaltılmasında kritik bir rol üstlenmektedir.

Toplu taşıma türünün payını arttırma çabaları ulaşım tabanlı problemler için önemli bir çözüm yolu olarak düşünülmektedir. Bununla birlikte, geleneksel toplu taşıma sistemi taşıtları yüksek egzoz emisyonu üreterek, özellikle kentsel alanlarda, kent sağlığı açısından tehlike arz etmektedir. Lin vd. (2019) çalışmasında, toplu taşımanın diğer ulaşım türlerine göre daha sürdürülebilir bir seçenek olduğu belirtilmekle birlikte, fosil yakıtlı

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mehmet Metin MUTLU e-posta/e-mail: metin.mutlu@adu.edu.tr

geleneksel otobüslerin egzoz emisyonlarının tüm taşıt kaynaklı emisyonların %34'ünü oluşturduğu ifade edilmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir ve çevre dostu kentler oluşturabilmek amacıyla, araştırmacıların yoğunlaştığı önemli konulardan biri, çevreci toplu taşıma ağlarının geliştirilmesidir. Dünya genelinde ulaşım kaynaklı sera gazı salınımlarını düşürmek üzere sıfır emisyonlu taşıt düzenlemeleri ve Kyoto Protokolü gibi çeşitli girişimlerde bulunulmuş; ayrıca, emisyonların azaltılmasını sağlamak amacıyla doğalgazla çalışan otobüslerin kullanımı teşvik edilmiştir. Doğalgazın yakıt olarak kullanılması sera gazı salınımını tamamen ortadan kaldırmadığından dolayı, sürdürülebilir ve çevre dostu bir toplu taşıma sistemi oluşturmak adına en makul çözüm, elektrikli otobüslerin tercih edilmesi olarak değerlendirilmektedir (Mposdra vd, 2018). Noel ve McCormack (2014) ise, yakıt maliyetleri, sağlık sorunları ve iklim değişikliği konusundaki endişelerin, karar alıcıları elektrikli otobüslerin kullanımına doğru yönlendirdiğini ifade etmektedir.

Elektrikli otobüsler çevre dostu özellikleri, sürdürülebilir ve sessiz çalışma avantajları sayesinde kentsel bölgeler için son derece uygun bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Çeşitli bataryalı otobüs modellerinin teknik özellikleri Çizelge 1'de sunulmaktadır. Gao vd. (2014) elektrikli otobüsler için enerji tüketiminin ortalama olarak 1,35 kWh/km olduğunu ifade etmektedir. Benzer bir çalışmada bu tüketimin 1,65 – 1,84 kWh/km aralığında olduğu ve soğutma/ısıtma sistemlerinin tüketimi ile birlikte 2,35 kWh'e kadar çıktığı belirtilmektedir (İnt. Kyn. 1). Belirtilen değerler göz önünde bulundurulduğunda, batarya kapasitesi düşük otobüslerin menzillerinin yetersiz kalması ve gün içinde enerjilerinin tükenmesi beklendik bir durumdur.

Çizelge 1. Elektrikli otobüsler ve elektriksel özellikleri için örnekler (Gao vd. 2017).

Tür	**Üretici**	**Pil Kapasitesi** (kWh)	**Şarj Gücü** (kW)
Troleybüs	ABB	38	40/200/400
12 metre	PRIMOVE	60-90	200
12 metre	Hengtong	61-78	400
Shuttle	Motiv	80-120	60
12 metre	New Flyer	200-300	500
12 metre	EBusco	242-311	125
Shuttle	Balqon	312	40/100

Göhlich vd. (2018), elektrikli otobüsler için şarj stratejilerini fırsat, hareket halinde ve merkezlerde şarj stratejisi olmak üzere üç sınıfta değerlendirmektedir. Hızlı şarj yöntemi olarak da adlandırılan fırsat şarj stratejisinde bataryalar, otobüslerin işletimi esnasında genellikle terminal durakları veya ara duraklardaki yolcu indirme/bindirme süreleri boyunca kablosuz pantograf sistemleri ya da kaplama altı indüksiyon sistemleri aracılığıyla şarj edilmektedir. Bu tür şarj stratejisinde, otobüslerin mümkün şarj sürelerinin sınırlı olması, yüksek şarj gücüne duyulan gereksinimi artırmaktadır.

Hareket halinde şarj stratejisinde, otobüslerin güzergâhlarının belirli bölümleri elektrik şebekesine bağlı havai kablolarla donatılmaktadır. Bu sayede, otobüslerin pilleri seyir halindeyken şarj edilmektedir. Havai kablonun bulunmadığı yol kesimlerinde ise ihtiyaç duyulan enerji, pillerinden sağlanmaktadır. Bununla birlikte, bu tür bir şarj stratejisinin uygulanabilirliği için ciddi yatırım maliyetlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Merkezlerde şarj stratejisi ise pillerin genellikle bir kablo aracılığıyla şarj merkezlerinde şarj edilmesidir. Bu teknolojiye sahip otobüsler için sürüş mesafesi yaklaşık olarak 200 – 300 kilometre civarındadır. Yavaş şarj veya gece şarjı olarak da adlandırılan bu stratejide gün içinde enerji seviyesi düşen elektrikli otobüsler, enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla belirli sürelerle hizmetten çekilerek şarj edilir. Ancak bu durum, toplu taşıma hizmetinde aksamalar yaratabilir veya kesintisiz hizmet sağlanabilmesi için şarj süresince yedek otobüslerin devreye girmesini gerektirebilir. Bunun bir sonucu olarak, geleneksel otobüslere göre daha fazla sayıda araca ihtiyaç duyulmakta ve bu durum elektrikli otobüslerin küresel ölçekte benimsenmesi önünde engel teşkil etmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için, araçların gün boyunca kesintisiz hizmet verebileceği şekilde enerji tedarikinin sağlanması gerekmektedir. Fırsat şarj stratejisi bu bağlamda etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, elektrikli otobüslerin terminal duraklarda sefere çıkmadan önce veya ara duraklarda yolcu indirip bindirirken bataryalarını hızlı bir şekilde şarj edebilmesiyle mümkün olmaktadır (Illiopolou ve Kepaptsoglou 2019).

Farahani vd. (2013) ulaşıma ilişkin tasarım, planlama ve yönetim süreçlerinin tamamını Kentsel Ulaşım Ağı Tasarım Problemleri (KUATP) olarak isimlendirmektedir. KUATP'ler Toplu Taşıma Ağı Tasarım Problemi (TTATP) ve Yol Ağı Tasarım Problemi (YATP) olmak üzere iki alt kategoride incelemektedir. TTATP, ideal olarak birbirine bağlı şekilde eşzamanlı ele alınması gereken, hat güzergâhlarının belirlenmesi, sefer sıklığının düzenlenmesi, zaman çizelgesinin oluşturulması, araç planlaması ve sürücü takviminin hazırlanması gibi alt problemlerden oluşmaktadır (Ceder 2007). Problemin karmaşık yapısı nedeniyle, özellikle gerçek ölçekli ağlarda tüm alt problemlerin aynı anda ele alınması mümkün olmadığından, ayrı ayrı çözümlemek daha uygulanabilir bir yaklaşım olarak benimsenmiştir (Magnanti ve Wong 1984).

Elektrikli otobüslerin kullanımına başlanmasıyla birlikte, TTATP kapsamında ele alınan alt problemlere, bu araçların enerji ihtiyacının karşılanması sorunu da eklenmiştir. Elektrikli otobüslerin enerji tedarikini sağlamak amacıyla, uygun noktalara şarj tesislerinin yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu konu, literatürde Şarj İstasyonu Konumlandırma Problemi (ŞİKP) olarak tanımlanmaktadır (Illiopolou vd. 2019).

NP-Zor (NP-Hard) sınıfındaki ve kombinatoryal yapıya sahip olan ŞİKP'ler için optimal karar değişkenlerini kesin çözüm yöntemleriyle elde etmek, özellikle büyük boyutlu problemler için günümüz hesaplama teknolojileriyle oldukça zor ve zaman alıcıdır. Bu tür problemlerin çözümünde, kabul edilebilir sürelerde optimum çözüm elde edilemese de optimuma yakın çözümler elde edebilen metasezgisel algoritmaların kullanılması uygun ve yaygın bir çözüm yaklaşımıdır.

ŞİKP, özellikle son yıllarda elektrikli ulaşıma artan talep ile beraber literatürde ilgi gören bir problem olmuştur. Güler ve Yomralioğlu (2020) ve Bilgilioğlu (2022), Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanlı Çok Kriterli Karar Verme yardımıyla elektrikli araç şarj istasyon kurulumu için en uygun konumları belirlemişlerdir. Yang vd. (2021) Genetik Algoritma yardımıyla gerçek zamanlı elektrik ücretini belirleyerek hem elektrik şebeke yükünü hafifletmişler hem de şarj maliyetlerini düşürmüşlerdir. Calvo-Jurado vd. (2024), Voronoi diyagramını kullanarak mevcut şarj altyapısı üzerine inşa edilecek ek şarj istasyonlarının konumlarının belirlenmesine yönelik bir model önermişlerdir. Ameer vd. (2025) ise, şarj istasyonlarının konumlarını belirlemek amacıyla Yoğunluk Tabanlı Konumsal Kümeleme tabanlı bir lineer optimizasyon modeli önermişlerdir.

Mpousdra vd. (2018) hareket halinde şarj stratejisini benimseyerek bir otobüs ağındaki şarj cihazlı yolları, geliştirdikleri tam sayılı program ile belirlemişlerdir. Liu vd. (2020), Liu vd. (2020) ve Liu vd. (2022) yapmış oldukları çalışmalarda, elektrikli otobüslerin enerji temininin toplu taşıma ağına entegre olmadan inşaat edilmiş şarj merkezlerinde sağlanacağını varsaymışlar ve rotalardaki otobüslerin kendisine en yakın aday şarj merkezine yönlendirileceğini esas almışlardır. Uslu ve Kara (2021) tarafından yapılan çalışmada, şehirlerarası toplu taşıma ağlarında hizmet veren elektrikli otobüsler için şarj istasyonu konumlarının ve bu konumlardaki şarj cihazlarının sayılarının, karma tam sayılı doğrusal programlama kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Ancak, yukarıda da bahsedildiği gibi, bu tür şarj stratejileri ciddi yatırım maliyetlerine ihtiyaç duymakta ya da elektrikli otobüslerin verimsiz kullanımına neden olmaktadır. Öte yandan literatürde fırsat şarj stratejisini benimseyen çalışmalar da mevcuttur. Illiopolou ve Kepaptsoglou (2019) ve Illiopolou vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda geliştirilen çift seviyeli modelin üst seviyesinde rotalar belirlenirken, alt seviyesinde ise karma tam sayılı programlama kullanılarak şarj cihazları ile donatılacak duraklar belirlenmektedir. Bir saatlik analiz periyodu için gerçekleştirilen çalışmalarda, otobüslerin duraklardaki şarj süresinin sabit olduğu kabulü yapılmıştır. Kunith vd. (2016) ve Kunith vd. (2017) otobüslerin duraklarda şarj olma sürelerinin durak türlerine göre değiştiğini varsaymış ve hızlı şarj teknolojisine sahip şarj cihazlarının yerleştirileceği durakları karma tam sayılı programlama ile belirlemişlerdir. Wang vd. (2017) elektrikli otobüsler için şarj cihazlarının konumlandırılacağı durakları saptamak amacıyla Çoklu Geri İzleme ve Açgözlü algoritmalarından faydalanmışlardır. Fırsat şarj stratejisini benimseyen bu çalışmaların tümü, enerji değerlendirilmesini hatlar üzerinden değerlendirmişlerdir. Bununla birlikte, gerçek dünya problemlerinde aynı hatta çalışan farklı otobüslerin dinamik talepten kaynaklı olarak gün boyunca tedarik ettikleri enerji miktarları birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Bu sebeple, elektrikli otobüslerin enerji değerlendirmesini kısa periyotlar için hatlar bazından yürütmek yerine her bir otobüsün enerji durumunu bireysel olarak gün boyunca ele almak daha gerçekçi bir çözüm yaklaşımı olmaktadır. Bu bağlamda, Aksoy vd. (2024) hatlar açısından enerji durumlarının değerlendirildiği geçmiş çalışmalara önemli bir katkı sağlayarak, her bir otobüsün enerji durumunu bireysel olarak ele alan bir matematiksel program geliştirmişler ve Dal-Sınır yöntemi ile kesin çözümü elde etmişlerdir. Aşağıdaki Çizelge 2'de fırsat şarj stratejisini benimseyen geçmiş çalışmaların çözüm yaklaşımlarına ve problemin kapsamına göre özetleri verilmektedir.

Çizelge 2. Geçmiş çalışmaların özeti.

Çalışma	Çözüm Yaklaşımı	Problemin Kapsamı
Illiopolou ve Kepaptsoglou (2019)	Kesin Çözüm	Hatlar Bazında
Illiopolou vd. (2019)	Kesin Çözüm	Hatlar Bazında
Kunith vd. (2016)	Kesin Çözüm	Hatlar Bazında
Kunith vd. (2017)	Kesin Çözüm	Hatlar Bazında
Wang vd. (2017)	Sezgisel Algoritmalar	Hatlar Bazında
Aksoy vd. (2024)	Kesin Çözüm	Otobüs Bazında
Bu çalışma	Metasezgisel (GA)	Otobüs Bazında

Çizelge 2'de görülebileceği gibi, Aksoy vd. (2024) her bir elektrikli otobüsün enerji durumunu bireysel olarak ele

alarak geçmiş çalışmalara kayda değer bir katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, özellikle büyük ölçekli toplu taşıma ağları üzerinde, ŞİKP'de her bir otobüsün enerji durumunu bireysel değerlendirmek probleme ait matematiksel programı daha da karmaşık hale getirmektedir. Dolayısıyla, böylesine kapsamlı bir problemi büyük ölçekli ağlarda kesin çözüm metotları ile ele almak oldukça zaman tüketici hale dönüşmekte ve bir araştırma açığı doğurmaktadır.

Bu çalışmada, önceden belirlenen zaman çizelgesine göre otobüs-sefer ataması yapılmış elektrikli otobüslerle işletilen bir toplu taşıma ağında, otobüslerin yetersiz enerji sebebiyle hizmet dışı kalmasını önlemek amacıyla, duraklarda fırsat şarj stratejisine dayalı bir şarj istasyonu yerleşim düzeni oluşturmayı hedefleyen bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen optimizasyon modeli, Aksoy vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada olduğu gibi, toplu taşıma ağındaki otobüslerin her birinin gün boyu bireysel enerji durumunu dikkate almaktadır. Bununla birlikte bu çalışma, karmaşık yapıdaki bu zaman tüketici problemi metasezgiseller ile ele alarak, kabul edilebilir sürelerde probleme ait optimal çözümü elde edebilmek adına literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu doğrultuda, şarj cihazlarının yerleştirileceği duraklar belirlenirken İkili Genetik Algoritma'dan faydalanılmıştır. İkili Genetik Algoritma kullanılarak elde edilen çözümlerin kalitesi, Dal Sınır Yöntemi kullanılarak elde edilen kesin çözümler ile karşılaştırılmıştır.

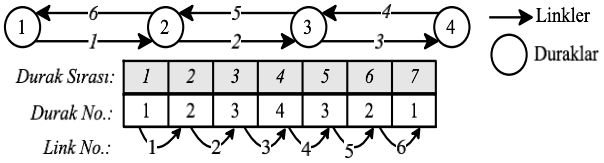
2. Yöntem

2.1 Problemin tanımı

Otobüslerin bir günlük operasyon süresi boyunca enerji durumlarını belirleyebilmek için, tüm seferleri için linklerde tüketilen enerjinin ve bir kablosuz şarj cihazı yerleştirilmiş duraklara vardıklarında ise, temin edilen enerji miktarlarının hesaplanması gereklidir.

Otobüslerin enerji tüketimi, farklı trafik akım hızlarında ve duraklamalar boyunca ısıtma/soğutma ve aydınlatma gibi enerji tüketmeye devam eden sistemler bulunması nedeniyle değişkenlik gösterir. Bu nedenle, enerji tüketimi yalnızca kat edilen yolun uzunluğuna değil, seyahat süresine de bağlıdır. Bu nedenle bu çalışmada, ağdaki talebin ve buna bağlı olarak linklerin seyahat sürelerinin gün içindeki farklı zaman dilimlerine göre değiştiği varsayılmaktadır. Otobüslerin enerji tüketimleri ise linklerin uzunluğu ve zaman dilimine göre değişen link kat edilme sürelerine göre hesaplanmaktadır. Otobüslerin şarj cihazı bulunan duraklarda temin ettikleri enerji miktarı ise bu duraklardaki yolcu indirme/bindirme sürelerine göre hesaplanmaktadır. Bu süreler, toplu taşıma yolculuk ataması ile elde edilen, sefer boyunca duraklarda inen ve binen yolcu sayıları ile hesaplanabilmektedir.

Otobüslerin tükettiği enerji miktarlarını hesaplayabilmek için, ağdaki her bir linkin uzunluğuna ve her bir otobüsün her bir seferinin linkler ve duraklar bazında zaman çizelgesine ihtiyaç duyulmaktadır. Örnek bir rotaya ait durakların ve linklerin sırası Şekil 1'de verilmektedir. Çizelge 3'te, Şekil 1'de verilen rotaya hizmet veren bir otobüsün gün boyu gerçekleşen iki seferi için durak, durak sıra numarası ve duraklara varış ve ayrılış zamanlarına göre inen ve binen yolcu sayıları sunulmaktadır.



Şekil 1. Örnek bir otobüs hattına ait rota bilgileri.

Çizelge 3. Örnek hat seferlerine ait zaman çizelgeleri, inen ve binen yolcu sayıları.

#	*Sefer 1*				*Sefer 2*			
	Durak No.	*Varış Anı (dk)*	Yolcu *İnen*	Yolcu *Binen*	*Durak No.*	*Varış Anı (dk)*	Yolcu *İnen*	Yolcu *Binen*
1	1	360	15	0	1	405	7	0
2	2	368	8	3	2	416	6	1
3	3	374	11	2	3	425	9	2
4	4	384	7	6	4	438	8	10
5	3	391	0	12	5	448	3	4
6	2	400	1	9	6	460	1	9
7	1	403	0	10	7	466	0	8

Duraklarda enerji tedarik sürelerinin belirlenmesinde kullanılan inen/binen yolcu sayıları, toplu taşıma yolculuk ataması ile analitik olarak hesaplanabilmekte veya veri toplama yöntemleri ile sayıların gerçek değerleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, önerilen model kullanılarak gerçekleştirilen sayısal uygulamada kullanılan iniş/biniş sayıları, gün içi dinamik toplu taşıma ataması yöntemi ile hesaplanmıştır. Önerilen optimizasyon modelinde toplu taşıma atama yönteminin bir işlevi olmaması nedeniyle, sadelik adına, atama modelinin detaylarına yer verilmemiştir.

Toplu taşıma ataması gerçekleştirilmeden önce, seferleri çizelgeleyebilmek için gün boyu değişen hat frekans ve link seyahat süresi verileri gerekmektedir. Frekans verisi hatlardaki toplam sefer sayılarını ve seferlerin başlangıç zamanını belirlemektedir. Gün boyu değişen link seyahat süreleri ise, her bir seferi duraklar bazında çizelgelemekte ve seferin toplam seyahat süresini belirlemektedir.

Seferleri çizelgede herhangi bir gecikme olmadan işletebilmek için gerekli otobüs sayısı Denklem 1 ile belirlenmektedir.

$$\ddot{n}^r = \max_{t \in \mathbf{T}} \left(\left\lceil \frac{T_{max}^{r,t}}{h^{r,t}} \right\rceil \right) \quad (1)$$

Burada, $T_{max}^{r,t}$ r hattının t zaman dilimindeki en büyük tur süresi, $h^{r,t}$ r hattının t zaman dilimindeki sefer kalkış aralığıdır. Hatlar için gerekli otobüs sayıları belirlendikten sonra, hatlarda gerçekleştirilen ilk seferden son sefere kadar otobüslerin ataması sırayla gerçekleştirilmektedir.

Eldeki problemi basitleştirebilmek için birkaç varsayım yapılmıştır: (1) otobüsler, izin verilen en yüksek batarya doluluk oranı kısıtı (SOC_{max}) altında, bataryaları tam dolu şekilde güne başlamaktadırlar, (2) otobüslerin iki ardışık durak arasında tükettikleri enerji, bu duraklar arasındaki zamana bağlı yolculuk süresine ve bu duraklar arasındaki linkin uzunluğuna göre hesaplanmaktadır, (3) duraklarda yolcu indirme/bindirme sürelerinin sefer çizelgeleri üzerinde etkiye sahip olmadığı varsayılmış olup, bu süreler sadece tedarik edilen enerji miktarlarının hesaplanmasında kullanılmıştır, (4) otobüsler terminal duraklar dahil tüm duraklardaki yolcu indirme ve bindirme sürelerinde enerji temin edebilme imkânına sahip olup, ardışık iki seferleri arasındaki sefer çizelgesine uyum amacıyla geçirdikleri kısa bekleme sürelerinde enerji temin etmemektedirler, (5) ardışık iki seferleri arasındaki bekleme zamanı boyunca terminal duraklarına çok yakın olduğu varsayılan bir alanda beklemekte olan elektrikli otobüsler, bu bekleme alanı ve terminal durakları arasındaki hizmet dışı seyir esnasında enerji tüketmemektedir, (6) seçilen duraklara yerleştirilen şarj cihazları Öklid uzaklığına göre kendisine en yakın trafodan enerji tedarik edecek olup, bu durakları şarj cihazı ile donatmanın maliyetleri her durağın kendisi ile eşleştirildiği trafoya olan Öklid uzaklığının birim yapım maliyeti, C, ile çarpılarak hesaplanmaktadır (Denklem 2).

Problemin çözümüne ait matematiksel program (Denklem 2-9) ve kullanılan semboller aşağıda sunulmaktadır.

$$\min Z = \sum_{s \in S} \delta^s \times d^s \times C \quad (2)$$

$$t_c^{r,b,k,i+1} \leq \delta^s \times max\{\hat{n}^{r,b,k,i+1}, \check{n}^{r,b,k,i+1}\} \times \tilde{t} \quad (3)$$
$$\forall r \in \mathbf{R}, \forall b \in \mathbf{B}^r, \forall k \in \mathbf{K}^{r,b}, \forall i \in \mathbf{I}^{r,b,k}$$

$$t_c^{r,b,k,i+1} \geq 0 \quad \forall r \in \mathbf{R}, \forall b \in \mathbf{B}^r, \forall k \in \mathbf{K}^{r,b}, \forall i \in \mathbf{I}^{r,b,k} \quad (4)$$

$$E^{r,b,k,i+1} = E^{r,b,k,i} - e^{r,b,k,i,i+1} + t_c^{r,b,k,i+1} \times CP \quad (5)$$
$$\forall r \in \mathbf{R}, \forall b \in \mathbf{B}^r, \forall k \in \mathbf{K}^{r,b}, \forall i \in \mathbf{I}^{r,b,k}$$

$$E^{r,b,k,i} \geq e^{r,b,k,i,i+1} + BC \times SOC_{min} \quad (6)$$
$$\forall r \in \mathbf{R}, \forall b \in \mathbf{B}^r, \forall k \in \mathbf{K}^{r,b}, \forall i \in \mathbf{I}^{r,b,k}$$

$$e^{r,b,k,i,i+1} = d^{r,i,i+1} \times c_1^{r,i,i+1} + t^{r,b,k,i,i+1} \times c_2 \quad (7)$$
$$\forall r \in \mathbf{R}, \forall b \in \mathbf{B}^r, \forall k \in \mathbf{K}^{r,b}, \forall i \in \mathbf{I}^{r,b,k}$$

$$E^{r,b,k,i+1} \leq BC \times SOC_{max} \quad (8)$$
$$\forall r \in \mathbf{R}, \forall b \in \mathbf{B}^r, \forall k \in \mathbf{K}^{r,b}, \forall i \in \mathbf{I}^{r,b,k}$$

$$E^{r,b,1,1} = BC \times SOC_{max} \quad \forall r \in \mathbf{R}, \forall b \in \mathbf{B}^r \quad (9)$$

Sunulan matematiksel programda $\mathbf{B}^r$, r numaralı rotada işletilen otobüsler kümesi; BC, batarya kapasitesi (kWh); C, şarj cihazı yerleştirmek için birim imalat maliyeti (TL/m); CP, istasyon şarj gücü (kW); $E^{r,b,k,i}$, r numaralı rotaya hizmet veren b numaralı otobüsün k numaralı seferindeki i sıra numaralı duraktan ayrıldığı andaki enerjisi (kWh); $\mathbf{I}^{r,b,k}$, r numaralı rotaya hizmet veren b numaralı otobüsün k numaralı seferindeki durak sıraları kümesi; $\mathbf{K}^{r,b}$, r numaralı rotadaki b numaralı otobüs ile işletilen seferler kümesi; $\mathbf{R}$, rotalar kümesi; $\mathbf{S}$, duraklar kümesi; SOC_{min} ve SOC_{max}, sırasıyla izin verilen minimum ve maksimum batarya doluluk oranları; $T_{max}^{r,t}$, r numaralı rotanın t numaralı zaman dilimindeki en büyük tur süresi (dk); $c_1^{r,i,i+1}$, r numaralı rotada yer alan i ve $i+1$ sıra numaralı durakları birbirine bağlayan linkte, birim mesafede tüketilen enerji (kWh/km); c_2, seyir halindeyken birim zamanda tüketilen enerji miktarı (kWh/dk); $d^{r,i,i+1}$, r numaralı rotada i ve $i+1$ sıra numaralı durakları birbirine bağlayan link uzunluğu (km); d^s, s numaralı durağın kendisine en yakın olan trafoya uzaklığı (m); $e^{r,b,k,i,i+1}$, r numaralı rotaya hizmet veren b numaralı otobüsün k numaralı seferindeki i ve $i+1$ sıra numaralı duraklar arasında bulunan linkte tüketilen toplam enerji miktarı (kWh); $h^{r,t}$, r numaralı rotanın t numaralı zaman dilimindeki sefer aralığı (dk); $\hat{n}^{r,b,k,i}$ ve $\check{n}^{r,b,k,i}$, r numaralı rotaya hizmet veren b numaralı otobüsün k numaralı seferi boyunca i sıra numaralı durağı için sırasıyla inen ve binen yolcu sayıları; $\ddot{n}^r$, r numaralı rotayı işletebilmek için gerekli otobüs sayısı; $\tilde{t}$, duraklarda yolcu başına iniş/biniş süresi (sa); $t_c^{r,b,k,i}$, r numaralı rotaya hizmet veren b numaralı otobüsün k numaralı seferinde i sıra numaralı durağında şarj olduğu süre (sa); $t^{r,b,k,i,i+1}$, r numaralı rotaya hizmet veren b numaralı otobüsün k numaralı seferinde i ve $i+1$ sıra numaralı durakları birbirine bağlayan linkin yolculuk süresi (dk); δ^s, s numaralı durakta bulunan şarj cihazı sayısı (bulunuyorsa 1, aksi halde 0) olarak tanımlanmıştır.

Denklem 2 şarj cihazları ile donatılacak durak kombinasyonu doğrultusunda oluşan yatırım maliyetinin minimizasyonunu, yani matematiksel programın amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Denklem 3, otobüslerin şarj cihazlı bir duraktaki şarj olma süresinin o duraktaki toplam yolcu iniş/biniş süresini aşmasını engelleyen kısıtken, Denklem 4 ise bu şarj olma süresinin pozitif bir

değer olmasını sağlayan kısıttır. Denklem 5, şarj cihazlı duraklarda temin edilen enerji miktarı ve linklerde tüketilen enerji miktarı arasındaki enerjinin korunumunu temsil etmektedir. Denklem 6, bir duraktan ayrılan bir otobüsün sıradaki durağına vardığında izin verilen minimum enerji miktarının altına düşmemesini sağlayan kısıttır. Denklem 7 enerji tüketim modelini ifade etmektedir. Denklem 8, günün herhangi bir anında otobüslerin izin verilen maksimum enerji miktarını aşmasını engelleyen kısıtken, Denklem 9, otobüs bataryalarının sefere çıkmadan önce tamamen dolu olduğu kabul edilen varsayım (1) doğrultusunda, ilk seferlerinin ilk sıradaki duraklarındaki enerji seviyelerinin izin verilen en yüksek batarya doluluk seviyesinde dolu olduğunu ifade etmektedir.

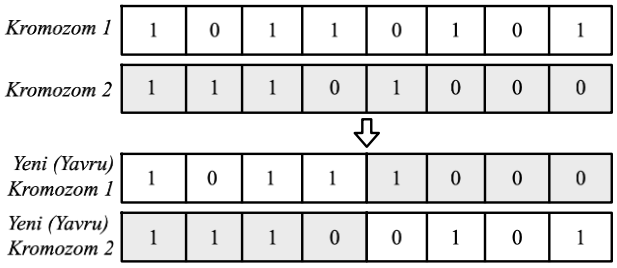
Probleme ait karma tam sayılı matematiksel programın çözümü için, hem kesin çözümü verebilen Dal Sınır Yöntemi, hem de daha kısa sürelerde yaklaşık çözüm bulabilen metasezgisel bir algoritma olan İkili Genetik Algoritma kullanılmıştır.

2.2 İkili genetik algoritma

Eldeki kompleks problem için kabul edilebilir sürelerde en iyi veya en iyiye yakın bir çözüme ulaşabilmek için bir metasezgisel algoritmadan yararlanılması gerekmektedir. Birçok farklı disiplinden problemlerin çözümünde kullanılan Genetik algoritma, metasezgisel algoritmaların atası olarak kabul edilmekte ve algoritma performanslarının karşılaştırılmasında bir referans olarak kabul görmektedir (Katoch vd., 2021). Bu özellikleri nedeniyle bu çalışmada da Genetik Algoritma tercih edilmiştir. Genetik Algoritma, genetik popülasyonlara dayalı prensipleri kullanan bir arama algoritmasıdır. Algoritmanın ana fikri, aday çözümleri temsil eden kromozomlardan meydana gelen popülasyonu iyileştirmektir. Popülasyondaki her bir kromozom bir uygunluk değerine sahiptir ve bu uygunluk değeri, bir sonraki nesle aktarılarak yeni kromozomları yaratmak için kullanılacak kromozomların belirlenmesinde kullanılır. Kromozomların belirlenmesi süreci seçilim operatörü ile sağlanırken, yeni kromozomların yaratılması ise çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile gerçekleştirilmektedir (Herrera vd. 1998).

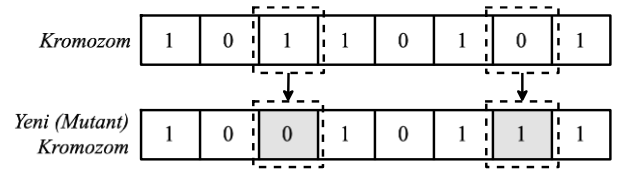
Genetik Algoritma'da, bir iterasyon boyunca $nPop$ adet kromozoma sahip yeni bir popülasyon yaratılmakta olup, ortaya çıkan yeni popülasyon nesil olarak adlandırılmaktadır. Üretilecek nesillerin sayısı, ön tanımlı iterasyon sayısına ($nIter$) bağlıdır. Kromozomları oluşturan genler (karar değişkenleri) kesikli veya sürekli değerler alabilmektedir. Bu çalışmada değişkenler duraklarda şarj cihazı olup olmama durumunu temsil edeceği için kromozomlardaki her bir değişken {0,1} ikili değerleri ile temsil edilmektedir. Genetik Algoritma'nın ele aldığı amaç fonksiyonu Denklem 2'de, bağlı olduğu kısıtlar ise Denklemler 3-9'da verilmektedir.

Algoritmada kullanılacak olan çaprazlama operatörü tek noktalı çaprazlama olarak adlandırılmaktadır. Bu tür çaprazlamada, iki kromozom rastgele bir gen konumundan bölünerek, bölünen parçaların birbiriyle yer değiştirmesi sonucunda iki yeni kromozom meydana gelmektedir. Tek noktalı çaprazlama operatörü ile gerçekleştirilen işleme ait temsili bir gösterim Şekil 2'de verilmektedir (Yang 2010). Popülasyonda çaprazlama operatörü ile üretilecek olan kromozom sayısı çaprazlama oranı, p_c, ile belirlenmektedir.



Şekil 2. Tek noktalı çaprazlama operatörüne ait temsili gösterim.

Mutasyon operatöründe, rastgele seçilen kromozomlarda, rastgele seçilen genlerin değerleri değiştirilmektedir. Bu çalışmada ikili değişkenler kullanıldığı için değer değişiminde 1 değerleri 0'a ve 0 değerleri 1'e dönüştürülmektedir. Mutasyon operatörüne ait temsili bir gösterim Şekil 3'te verilmektedir (Yang 2010). Popülasyonda mutasyona uğrayacak kromozom sayısı, mutasyon oranı, p_m, ile, mutasyona uğrayacak kromozomlarda değiştirilecek gen sayısı ise r_m oranı ile belirlenmektedir.



Şekil 3. Mutasyon operatörüne ait temsili gösterim.

Algoritmanın başında başlangıç popülasyonundaki kromozomlar rastgele bir şekilde üretilmektedir. Genetik Algoritma, oluşturulan bu başlangıç popülasyonunu $nIter$ nesiller boyunca yönlendirerek daha iyi çözümler elde etmeyi amaçlamaktadır. Yeni nesle ait popülasyonun oluşturulması sırasında, seçilim operatörü seçkinci bir yaklaşım benimsemekte olup, mevcut nesildeki çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile üretilen kromozomların da yer aldığı tüm kromozomlar arasından en iyi maliyetli $nPop$ adet kromozom sonraki nesle

aktarılmaktadır. İkili Genetik Algoritma'nın adımları Şekil 4'te verilmektedir.

Adım 0: Problemi ve değişken yapısını tanımla.
$f(\mathbf{x}), x_{i,j} = \{0,1\}, \forall i \in \{0,..,nPop\}, \forall j \in \{1,..,nVar\}$
Adım 1: Parametre değerlerini tanımla.
$nVar, nPop, nIter, p_c, p_m, r_m$
Adım 2: Rastgele değerlerle bir başlangıç popülasyonu yarat.
$\mathbf{P} = \{\{x_{1,1},...,x_{1,nVar}\},...,\{x_{nPop,1},...,x_{nPop,nVar}\}\}$
Adım 3: Döngü $(i < nIter)$. $\mathbf{P}$ popülasyonundaki her kromozom için:
Adım 3.1: Çeşitleme.
$\mathbf{Q} = \text{Çaprazlama}(\mathbf{P}, p_c) \cup \text{Mutasyon}(\mathbf{P}, p_m, r_m)$
Adım 3.2: Yeni ve mevcut kromozomlardan bir popülasyon yarat.
$\mathbf{R} = \mathbf{Q} \cup \mathbf{P}$
Adım 3.3: Sonraki jenerasyona aktarılacak kromozomları seç.
$\mathbf{P} = \text{Seçilim}(\mathbf{R})$
Adım 4: Çıktı. Çözümler arasından en iyi maliyetli olanı kaydet.

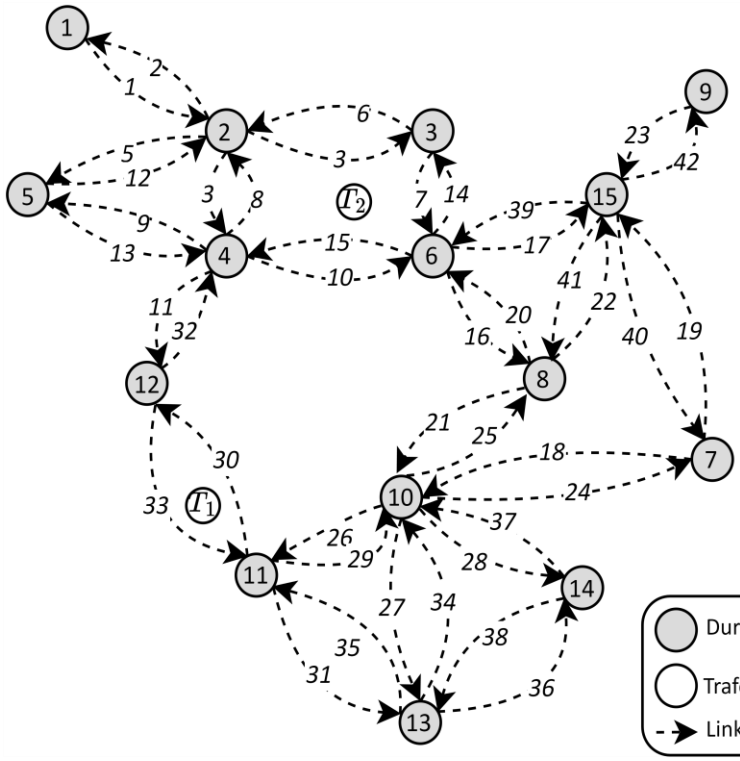
Şekil 4. İkili Genetik Algoritma adımları.

3. Sayısal Uygulama

Bu çalışmada oluşturulan model, literatürde yaygın olarak kullanılan Mandl ağı üzerinde test edilmiştir. Kullanılan test ağı 15 adet düğüm noktası ve 42 adet tek yönlü linkten oluşmaktadır. Otobüs rotaları, Arbex ve da Cunha (2015) tarafından en iyi çözüm olarak belirlenen 10 hatlı otobüs ağından elde edilmiştir. Toplu taşıma ağında 183 adet otobüs ile günde 10 hatta ait 955 sefer gerçekleşmektedir. Ağda düğüm noktaları yolculukların başladığı ve bittiği duraklar olarak tanımlanmıştır. Ağ üzerinde tanımlanan 10 otobüs rotasının düğüm noktası ve link sıraları Çizelge 4'te, ağın görsel temsili, rastgele konumlandırılan iki hipotetik trafonun koordinatları ve duraklara şarj istasyonu yerleştirilmesi durumunda bu durakların enerji alacakları trafolara olan uzaklık bilgileri Şekil 5'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Hatlara ait rota düğüm noktası (durak no.) ve link sıraları.

Hat	*Düğüm Noktası Sırası*	*Link Sırası*
1	[1, 2, 3, 6, 8, 10, 11, 13, 11, 10, 8, 6, 3, 2, 1]	{1, 3, 7, 16, 21, 26, 31, 35, 29, 25, 20, 14, 6, 2}
2	[9, 15, 7, 10, 11, 12, 11, 10, 7, 15, 9]	{23, 40, 18, 26, 30, 33, 29, 24, 19, 42}
3	[7, 15, 8, 6, 3, 2, 4, 5, 4, 2, 3, 6, 8, 15, 7]	{19, 41, 20, 14, 6, 4, 9, 13, 8, 3, 7, 16, 22, 42}
4	[2, 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14, 13, 11, 10, 8, 6, 4, 2]	{4, 10, 16, 21, 26, 31, 36, 38, 35, 29, 25, 20, 15, 8}
5	[13, 14, 10, 8, 6, 3, 2, 4, 2, 3, 6, 8, 10, 14, 13]	{36, 37, 25, 20, 14, 6, 4, 8, 3, 7, 16, 21, 28, 38}
6	[1, 2, 5, 4, 12, 4, 5, 2, 1]	{1, 5, 13, 11, 32, 9, 12, 2}
7	[11, 10, 7, 15, 6, 3, 2, 1, 2, 3, 6, 15, 7, 10, 11]	{29, 24, 19, 39, 14, 6, 2, 1, 3, 7, 17, 40, 18, 26}
8	[5, 4, 6, 8, 10, 11, 10, 8, 6, 4, 5]	{13, 10, 16, 21, 26, 29, 25, 20, 15, 9}
9	[13, 11, 12, 4, 5, 2, 1, 2, 5, 4, 12, 11, 13]	{35, 30, 32, 9, 12, 2, 1, 5, 13, 11, 33, 31}
10	[9, 15, 8, 6, 3, 2, 4, 12, 4, 2, 3, 6, 8, 15, 9]	{23, 41, 20, 14, 6, 4, 11, 32, 8, 3, 9, 16, 22, 42}



Durak	X(m)	Y(m)	En Yakın Trafo	Trafoya Uzaklık (m)
1	1000	9000	2	3.522,789
2	3000	8000	2	1.345,362
3	4500	7750	2	960,468
4	2750	6200	2	1.400,892
5	800	6600	2	3.125,699
6	4600	6000	2	1.220,655
7	7000	4500	1	3.868,462
8	5500	5000	2	2.561,249
9	8500	6800	2	4.604,345
10	5800	3250	1	2.304,886
11	3800	2250	1	559,017
12	1300	3500	1	2.371,708
13	5250	1000	1	2.439,774
14	6700	1750	1	3.304,920
15	6750	5800	2	3.092,329

Trafo	X(m)	Y(m)
1	3550	2750
2	3900	7000

Şekil 5. Mandl Test Ağı ve duraklara göre şarj cihazı yerleştirme maliyetleri.

Örnek uygulamada toplu taşıma hizmetinin sabah saat 06.00'da başlayıp, gece saat 00.00'a kadar sürdüğü ve gün boyunca toplam 178.350 yolculuk talebi olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 5, ağdaki tüm seferlerin çizelgelenmesi sonucunda elde edilen, hatlarda gün içerisindeki toplam sefer sayısını ve bu seferlerin kesintisiz şekilde işletebilmesi için gereken otobüs sayısını (Denklem 1) vermektedir. Ağdaki tüm seferlerin çizelgelenmesinin ardından toplu taşıma ataması gerçekleştirilerek problemin çözümü için gerekli olan, Çizelge 3'te örneği sunulan, ağdaki her otobüsün duraklar bazında çizelgesi ve inen/binen yolcu sayıları elde edilmektedir.

Çizelge 5. Toplam sefer ve gerekli otobüs sayıları.

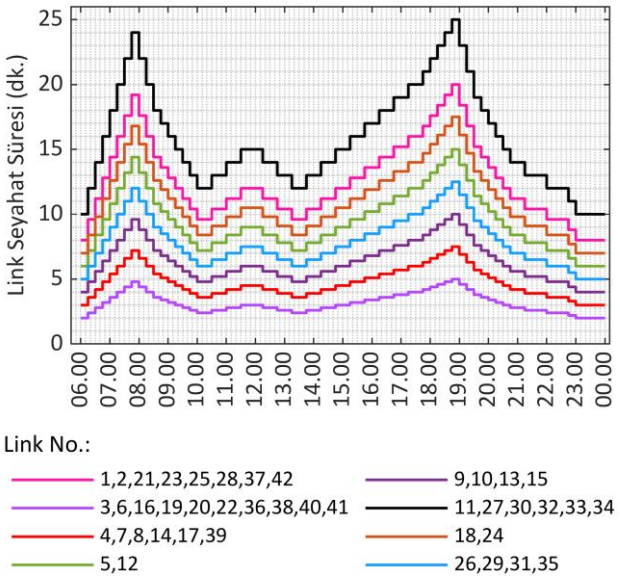
Hat No:	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
Toplam Sefer:	118	93	76	97	110	78	127	104	71	81
Otobüs Adet:	28	22	10	19	20	12	25	19	16	12

Çizelge 6 ve Şekil 6, sırasıyla seferlerin çizelgelenebilmesi için gerekli olan gün boyu değişen hat frekans değerlerini ve link seyahat sürelerini vermektedir.

Çizelge 6. Hatların farklı zaman dilimlerindeki frekans (sefer/saat) değerleri.

Hat No.:	***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***
Saat Aralığı:	***Frekans*** (sefer/saat)									
06 – 07	10	5	4	6	6	5	10	10	4	5
07 – 08	12	10	6	10	10	6	15	12	5	6
08 – 09	6	5	4	6	6	4	10	10	4	5
09 – 10	4	3	3	4	5	2	5	4	3	4
10 – 11	3	3	2	3	3	3	4	3	2	3
11 – 12	4	3	3	4	4	4	5	4	3	3
12 – 13	4	3	3	5	5	4	6	5	3	4
13 – 14	5	4	4	5	6	5	6	6	4	5
14 – 15	6	5	6	6	6	5	10	6	5	6
15 – 16	10	6	6	6	10	6	10	6	6	6
16 – 17	15	12	6	10	12	6	12	10	6	6
17 – 18	12	10	6	10	10	6	10	6	4	5
18 – 19	10	6	6	6	10	6	6	6	6	6
19 – 20	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
20 – 21	4	5	4	5	4	4	5	4	4	5
21 – 22	3	3	3	2	3	3	2	3	3	2
22 – 23	2	3	2	2	2	2	3	2	2	2
23 – 00	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2

Problemin Dal Sınır Yöntemi ile çözümünde MATLAB paket programında yer alan Optimization Toolbox araç seti kullanılmış; İkili Genetik Algoritma ise yazarlar tarafından MATLAB ortamında kodlanmıştır. Hesaplama performansının etkilenmemesi için her iki modelin çözümünde aynı değişken türleri kullanılmıştır.



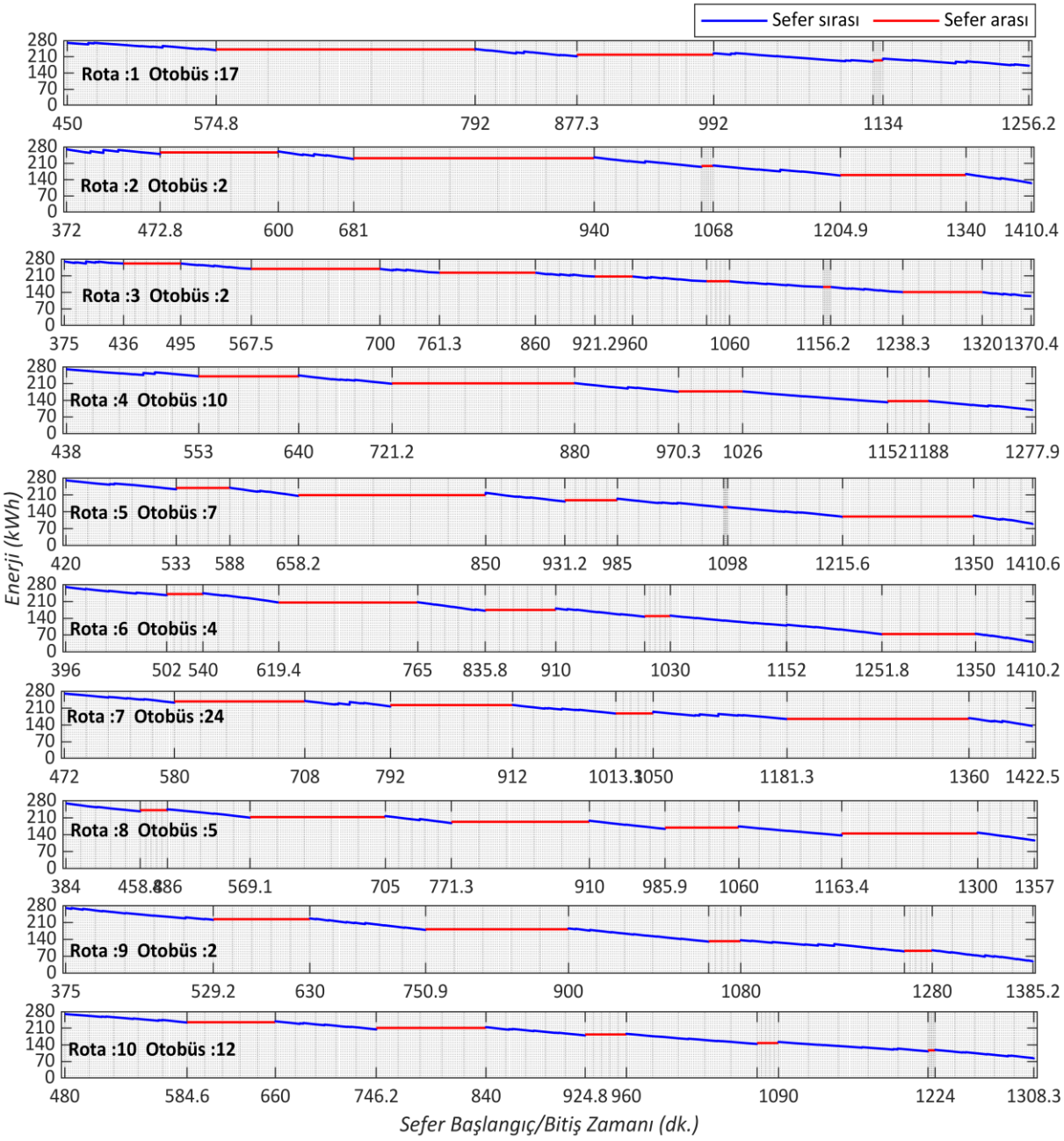
Şekil 6. Gün boyunca link seyahat süreleri.

Uygulamada kullanılan bilgisayarın işlemcisi 3.6 Ghz Intel Core i7 ve bellek (RAM) kapasitesi 16 GB'tır. Çözümler Dal Sınır Yöntemi ve İkili Genetik Algoritma ile sırasıyla 7,5 saat ve 18 saniye sürmüştür. Optimizasyonda kullanılan, ağa, otobüslere ve İkili Genetik Algoritma'ya ilişkin parametrelerin değerleri Çizelge 7'de sunulmuştur. Genetik Algoritma'nın parametre değerleri tatonman yöntemiyle belirlenmiştir.

Çizelge 7. Optimizasyon modeli parametre değerleri.

Parametre	**Değer**	**Parametre**	**Değer**
SOC_{min}	%10	C	1000 TL/m
SOC_{max}	%90	$\tilde{t}$	2 sn.
BC	300 kWh	p_c	0,5
CP	250 kW	p_m	0,5
c_1	1,2 kWh/km	r_m	0,1
c_2	0,1 kWh/min	$nIter$	30
		$nPop$	20

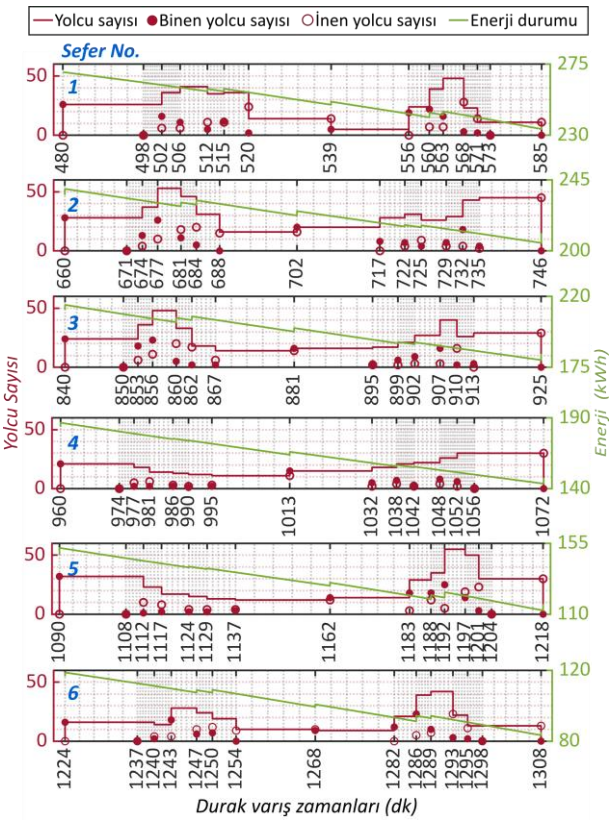
Problemin Dal Sınır Yöntemi kullanılarak elde edilen kesin çözümü, yatırım maliyetinin, problemin kısıtlarını sağlayacak şekilde 1, 2, 3, 5, 9, 11, 12 ve 13 numaralı duraklara şarj cihazlarının yerleştirilmesi durumunda minimize edilebileceğini göstermektedir. Kesin çözüm doğrultusunda yapılması gereken yatırım maliyeti ise 18.929.159 TL olarak hesaplanmıştır. Elde edilen çözüme göre duraklara şarj tesisatı yerleştirilmesi durumunda, her rota için örnek olarak bir otobüsün gün boyu enerji durumu Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Her rota için örnek bir otobüsün gün boyu enerji durumu.

Yolculuk aktivitesi ve enerji durumundaki değişimi daha detaylı ortaya koyabilmek adına, Şekil 8'de, 10 numaralı rotada çalışan 12 numaralı otobüsün gün boyunca hizmete çıktığı 6 sefer boyunca yolculuk aktivitesi ve Dal Sınır Yöntemi ile elde edilen çözümde belirlenen duraklara şarj cihazlarının yerleştirilmesi sonucundaki enerji durumu sunulmuştur. 10 numaralı rotaya hizmet veren elektrikli otobüsler, güzergâhları üzerindeki 1'inci (durak 9), 5'inci (durak 3), 6'ncı (durak 2), 8'inci (durak 12), 10'uncu (durak 2), 11'inci (durak 3) ve on 15'inci (durak 9) sıradaki duraklarda şarj olma imkânına sahiptir. Şekil 7'de de görülebildiği gibi, bu rotada çalışan 12 numaralı otobüs, ilk seferine 270 kWh enerji ile başlamış olup, son seferindeki son durağından ayrıldığı andaki sahip olduğu enerji 85,17 kWh'tir.

İkili Genetik Algoritma kullanılarak, algoritma performansının ve çözüm kalitesinin belirlenmesi amacıyla 30 adet optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 8). Gerçekleştirilen optimizasyonların 21'inde Dal Sınır Yöntemi kullanılarak elde edilen kesin çözüm vektörü elde edilmiştir. Elde edilen diğer çözümlerde de kesin çözüme yakın yatırım maliyeti değerleri bulunduğu görülmüştür. 30 optimizasyon işleminden elde edilen çözümlere göre hesaplanan yatırım maliyetlerinin ortalaması 18.978.454 TL, standart sapması 163.318 TL, varyasyon katsayısı ise %0,86'dır. Literatürde varyasyon katsayısı değeri %5'in altında olan modellerin güvenilir kabul edildiği göz önünde bulundurulduğunda, Genetik Algoritma'nın eldeki problem üzerinde son derece istikrarlı bir performans sergilediği görülmektedir.

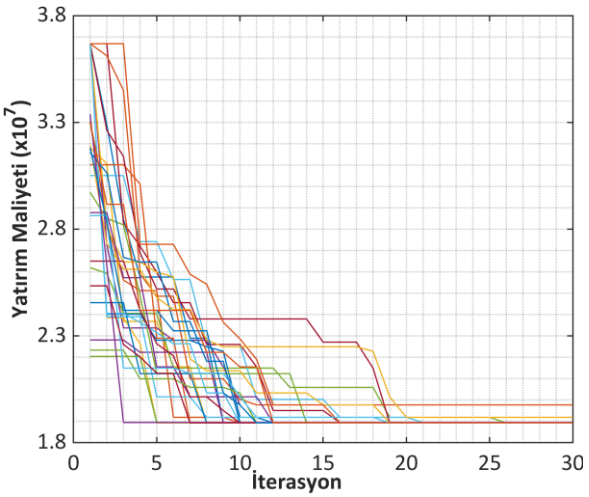


Şekil 8. 10 numaralı rotadaki 12 numaralı otobüsün gün boyu enerji değişimi ve yolculuk aktivitesi.

Çizelge 8. İkili Genetik Algoritma kullanılarak elde edilen çözümler.

Çözüm	*Yatırım Maliyeti* (TL)	*Şarj Cihazlı Duraklar*	*Sayı*
1	18.929.159	{1,2,3,5,9,11,12,13}	21
2	18.948.594	{1,2,3,4,5,6,8,12,13}	6
3	19.189.346	{1,2,5,6,9,11,12,13}	2
4	19.771.035	{1,2,3,4,5,9,12,13}	1

Optimizasyon sonuçları, elde edilen çözümlerin farklılıklarının kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir. Gerçekleştirilen 30 optimizasyon işlemine ait yakınsama grafiği Şekil 9'da verilmiştir. İkili Genetik Algoritma'nın en iyi çözüme ortalama olarak 20'inci iterasyonda ulaştığı görülmektedir.



Şekil 9. *İkili Genetik Algoritma kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyonların yakınsama grafiği.*

4. Sonuç

Bu araştırmada, elektrikli otobüslerin etkin kullanımını sağlamak amacıyla, otobüslerin duraklarda kablosuz şarj olarak gün boyunca gereken enerji ihtiyacını karşılamasını sağlayan en uygun durak konumlarının belirlendiği bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen optimizasyon modeli literatürde sıklıkla kullanılmış olan İkili Genetik Algoritma'ya dayanmakta olup, geliştirilen optimizasyon modelinin ürettiği çözümler, Dal Sınır Yöntemi ile elde edilen kesin çözümle karşılaştırılmıştır. Uygulamalar, 10 hat üzerinde 183 adet otobüs ile işletilen toplamda 955 seferin gerçekleştiği bir toplu taşıma ağında yürütülmüştür. Dal Sınır Yöntemi ile yaklaşık olarak 7,5 saatte elde edilen 18.929.159 TL maliyetli kesin çözüm, Genetik Algoritma ile elde edilen 30 çözüm içerisinde 21 kez, yaklaşık olarak 18 saniyede ve %0,86'lık varyasyon katsayısı ile elde edilmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde, Genetik Algoritma tabanlı optimizasyon modelinin çok daha kısa sürelerde optimum çözüme yüksek güvenilirlikle ulaşabildiği görülmüştür.

Geliştirilen modelin, bu çalışmada kullanılan küçük ölçekli test ağından farklı olarak gerçek ölçekli ağlarda uygulanması durumunda, kesin çözüm algoritmaları kabul edilebilir sürelerde çözüm sunamayacağı için, çok daha kısa sürelerde güvenilir çözümler sunabilen İkili Genetik Algoritma'nın şarj istasyonu yerleştirme problemlerinde kullanmak için uygun bir algoritma olduğu söylenebilmektedir. Toplu taşıma ağları elektrikli otobüsler ile işletilmeye başlandığında, bu çalışma ile geliştirilen sezgisel tabanlı optimizasyon modeli sayesinde, özellikle büyük ölçekli ağlarda kabul edilebilir sürelerde optimum veya optimuma yakın bir çözüm elde etmek mümkün olabilecektir. Bu sayede önerilen modelin karar vericiler tarafından bir karar destek sistemi olarak kullanılması ile, altyapı yatırımları için gerekli kaynaklar daha verimli şekilde kullanılacaktır. Ek olarak, önerilen optimizasyon modeli sayesinde, elektrikli toplu taşıma ağlarının oluşturulmasında daha düşük altyapı yatırım maliyetlerinin ortaya çıkacak olması ile kentsel toplu taşıma hizmeti sağlamada elektrikli otobüs kullanımının yaygınlaşacağı düşünülmektedir.

Literatürde elektrikli otobüslerin enerji durumunun gün içinde kısa analiz periyotlarında değerlendirildiği geçmiş çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bu çalışma, analiz periyodunun tüm gün olması yönü ile literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Ek olarak, bu çalışma, otobüslerin şarj cihazlı duraklarda şarj olma sürelerinin yolcu indirme ve bindirme sürelerine bağlı olması ve böylece daha gerçekçi bir optimizasyon modeli geliştirilmiş olması yönüyle de geçmiş çalışmalardan ayrılmaktadır.

Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda otobüslerin içindeki yolcu yüklerinin, yollardaki düşey eğimden kaynaklı eğim direncinin ve otobüslerin ısıtma/soğutma sistemleri tarafından hava sıcaklığına bağlı olarak harcanan enerjinin, enerji tüketimi modeline dâhil edilerek çalışmanın geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Ek olarak, önerilen modelin algoritmik performansını daha derinlemesine araştırabilmek adına, önerilen modelin başka metasezgiseller ile de test edilmesi kıymetli bir araştırma potansiyeli taşımaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Bu çalışma Prof. Dr. Yalçın ALVER danışmanlığında İlyas Cihan AKSOY tarafından 01/12/2023 tarihinde tamamlanan "Elektrikli otobüsler için çok amaçlı toplu taşıma ağ tasarımı" başlıklı doktora (Tez no: 843747) tezinden türetilmiştir.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Analiz, Görselleştirme, Yazma/orijinal taslak.

Yazar 2: Metodoloji, Analiz, Görselleştirme, Yazma/inceleme ve düzenleme.

Yazar 3: Danışmanlık, Denetleme, Doğrulama.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

5. Kaynaklar

Aksoy, İ.C., Mutlu, M.M. and Alver Y., (2024). *Addressing charging infrastructure location problem considering a dynamic and supply*. CETRA 2024. Catvat, Croatia, 381-388.

Ameer, H., Wang, Y. and Chen, Z., 2025. A density-based spatial clustering and linear programming method for electric vehicle charging station location and price optimization. *Energy*, **317**, 134581. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134581

Arbex, R.O. and da Cunha C.B., 2015. Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B*, **81**, 355-376, 2015. https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.06.014

Bilgilioğlu, S.S., 2022. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci ile Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **22(1)**, 165 - 174. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1013244

Calvo-Jurado, C., Ceballos-Martínez, J.M., García-Merino, J.C., Muñoz-Solano, M. and Sánchez-Herrera, F.J., 2015. Optimal location of electric vehicle charging stations using proximity diagrams. *Sustainable Cities and Society*, **113**, 105719, 2024. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105719

Ceder, A., 2007. Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior, Butterworth-Heinemann.

Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W.Y. and Rashidi, H., 2013. A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, **229(2)**, 281–302. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001

Gao, Z., LaClair, T., Daw, C., Smith, D. and Franzese, O., 2014. Simulations of the fuel economy and emissions of hybrid transit buses over planned local routes. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, **7(1)**, 216-237. https://doi.org/10.4271/2014-01-1562

Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T., Liu, C., Li, J., Birky, A. and Ward, J., 2017. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, **122**, 588-600. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101

Göhlich, D., Fay, T., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A. and Zhang, X., 2018. Design of urban electric bus systems, *Design Science*, **4**, e15. https://doi.org/10.1017/dsj.2018.10

Herrera, F., Lozano, M. and Verdegay, J.T., 1998. Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for Behavioural Analysis. *Artificial Intelligence Review*, **12**, 265–319. https://doi.org/10.1023/A:1006504901164

Illiopolou, C. and Kepaptsoglou, K., 2019. Integrated transit route network design and infrastructure planning for on-line electric vehicles. *Transportation Research Part D*, **77**, 178- 197. https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.016

Illiopolou, C., Tassopoulos, I., Kepaptsoglou, K., Beligiannis G., 2019. Electric Transit Route Network Design Problem: Model and Application. *Transportation Research Record*, **2673(8)**, 275-283. https://doi.org/10.1177/0361198119838513

Katoch, S., Chauhan, S.S. and Kumar, V., 2021. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, **80**, 8091-8126. https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6

Kunith, A., Mendelevitch, R. and Göehlich, D., 2017. Electrification of a city bus network—An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems. *International Journal of Sustainable Transportation*, **11(10)**, 707-720. https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962

Kunith, A., Mendelevitch, R., Kuschmierz, A. and Göehlich D., (2016). *Optimization of fast charging infrastructure for electric bus transportation – Electrification of a city bus network*. EVS29 Symposium. Montreal, Canada, 438-449.

Lin, Y., Zhang, K., Shen, Z.M., Ye, B. and Miao, L., 2019. Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. *Transportation Research Part C*, **107**, 423-443. https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009

Liu, Y., Feng, X., Ding, C., Hua, Q. and Ruan, Z., 2020. Electric Transit Network Design by an Improved Artificial Fish-Swarm Algorithm. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, **146(8)**, 0402007. https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000393

Liu, Y., Feng, X., Yang, Y., Ruan, Z. and Li, K., 2022. Solving urban electric transit network problem by integrating Pareto artificial fish swarm algorithm and genetic algorithm. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, **(26)3**, 253-268. https://doi.org/10.1080/15472450.2020.1848561

Liu, Y., Feng, X., Zhang, L., Hua, Q. and Li, K., 2020. A pareto artificial fish swarm algorithm for solving a multi-objective electric transit network design problem. *Transportmetrica A: Transport Science*, **16(3)**, 1648-1670. https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1773574

Magnanti, T.L. and Wong, R.T., 1984. Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms. *Transportation Science*, **18(1)**, 1–55. https://doi.org/10.1287/trsc.18.1.1

Mposdra, A., Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K., Vlahogianni, E. and Tyrinopoulos, Y., 2018. Rapid transit network design for on-line electric vehicles. *Advances in Transportation Studies: an International Journal Section*, **46**, 19-30. https://doi.org/10.4399/9788255186412

Noel, L. and McCormack, R., 2014. A cost benefit analysis of a V2G-capable electric school bus compared to a traditional diesel school bus. *Applied Energy*, **126**, 246-255. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.009

Uslu, T. and Kara, O., 2021. Location and capacity decisions for electric bus charging stations considering waiting times. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **90**, 102645. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102645

Wang, X., Yuen, C., Hassan, N., An, N. and Wu, W., 2017. Electric Vehicle Charging Station Placement for Urban Public Bus Systems. *IEEE Trannsactions on Intellegent Transportation Sysstems*, **18**, 128-139. https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2563166

Yang, X., Niu, D., Sun, L., Ji, Z., Zhou, J., Wang, K. and Siqin, Z., 2021. A bi-level optimization model for electric vehicle charging strategy based on regional grid load following. *Journal of Cleaner Production*, **325**, 129313. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129313

Yang, X.S., 2010. Engineering Optimization. John Wiley & Sons.

Yomralıoğlu, T. and Güler, D., 2020. Açık Kaynak Kodlu CBS Yazılımı ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Yöntemini İçeren Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçimi Önerisi. *Harita Dergisi*, **(86)163**, 17-28.

İnternet kaynakları

1-Sustainable Bus Editorial Board, Electric bus range, focus on electricity consumption. A sum-up, https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-range-electricity-consumption, (12.12.2024)