



A multi objective mixed-integer linear programming model for the electric vehicle charging network design

Meltem Uzuner^{1*}, Orhan Dengiz², İmdat Kara¹, Esra Karasakal³, Berna Dengiz¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Baskent University, 06790, Ankara, Türkiye

²DvM IoT Solutions, 06530, Ankara, Türkiye

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Middle East Technical University, 06800, Ankara, Türkiye

Highlights:

- A real-world electric vehicle charging station location and sizing problem is addressed
- Addressing the realistic demands of electric vehicles
- A new multi objective mixed-integer linear programming model is developed

Keywords:

- Electrical vehicle
- Charging station
- Location problem
- Sizing problem
- Multi objective mixed-integer linear programming

Article Info:

Research Article

Received: 05.12.2022

Accepted: 24.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1214878

Correspondence:

Author: Meltem Uzuner

e-mail:

meltemuzuner@baskent.edu.tr

phone: +90 546 691 48 89

Graphical/Tabular Abstract

Since the Industrial Revolution, at the end of the extensions to energy, there has been a series of largely air pollution in the environment. Countries keep increasing the containment of green alternative fuels, including electricity, so that the rapid growth of air pollution can be stopped/reduced. In this context, a new multi objective mixed integer linear programming model has been developed to determine when, where, and at what capacity the charging stations will be installed, in a way that would satisfy the demand of electric vehicles (EV) from the nearby areas and minimize the cost of electric vehicle charging station installation and operation. Demands are handled realistically to make an appropriate investment plan, considering various features, including vehicle brands and models. The overall performance of the proposed model is examined on randomly generated 15 different test problems randomly generated by computational experiments. For the solution of the problems, the Pareto Front (PC), which is obtained by using the multi-objective optimization methods Lexicographic Optimization Method and AUGMECON2, provides the decision maker with trade-off information for different levels of the objective functions. Table A shows the computational results obtained by Lexicographic Optimization method of small-size test problems.

Table A. Computational results of small-size test problems

P#	f_1^{ideal}	f_2^{nadir}	Solution Time (sec.)	f_2^{ideal}	f_1^{nadir}	Solution Time (sec.)
15_1	342906,9	6228,658	4169,76	1748,175	664980,6	1,88
15_2	244927,2	5152,749	368,75	1001,557	595636,5	1,88
15_3	241307,5	5474,044	821,37	1035,589	604959,6	2,76
30_1	759439,3	6263,145	22699,72	1940,183	1362374	11,19
30_2	-	-	-	1717,916	1416644	7,28
30_3	-	-	-	1605,448	1387817	11,27

Purpose:

The purpose of this study is to develop an investment plan that satisfy the demand of EV from the nearby areas and minimize the cost of electric vehicle charging station installation and operation.

Theory and Methods:

To dealing with many objectives and time periods in the context of modeling, a multi objective mathematical model has been proposed. The model was solved using lexicographic optimization and the AUGMECON2. The resulting PFs are also displayed on the graphs and provided to the decision maker trade-off information to help his/her choose an appropriate solution.

Results:

Range anxiety, one of the most common concerns among drivers, will be eliminated, and a significant step toward a cleaner environment will be taken.

Conclusion:

Studies in the literature that have addressed the electric vehicle charging station location problem up to now, it has never been considered the battery and power specifications among electric vehicles and charging stations. In this study, vehicle brands and models, battery and power capacities of the EV and the charger in the station have been considered to addressing the realistic demands of electric vehicles.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Elektrikli araç şarj ağı tasarımı için çok amaçlı bir karma tamsayı doğrusal programlama modeli

Meltem Uzuner^{1*}, Orhan Dengiz², İmdat Kara³, Esra Karasakal³, Berna Dengiz¹

¹Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Etimesgut, Ankara, Türkiye

²DvM IoT Solutions, 06530, Çankaya, Ankara, Türkiye

³Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Bir elektrikli araç şarj istasyonu yer seçim ve boyutlandırma problemi ele alınmıştır.
- Elektrikli araçların şarj talepleri ve şarj süreleri temelli bir planlama yapılmıştır.
- Çok dönemli çok amaçlı bir karma tamsayı doğrusal programlama modeli önerilmiştir.

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.12.2022

Kabul: 24.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1214878

Anahtar Kelimeler:

Elektrikli araç,
şarj istasyonu,
yer seçim problemi,
boyutlandırma problemi,
çok amaçlı karma tamsayı
doğrusal programlama

ÖZ

Bu çalışmada, elektrikli araçların (EA) taleplerini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayacak ve EA şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde, şarj istasyonlarının hangi dönemde, nerede ve hangi kapasitede kurulacağını belirlemek için yeni birçok amaçlı karma tamsayı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Problem çözümünde, mevcut şarj altyapısı da dikkate alınarak, EA'ların artan ihtiyaçlarını karşılayacak şarj ağı tasarımı elde edilmiştir. Farklı EA marka ve modelleri, EA'nın ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleri, farklı tiplerdeki şarj hizmeti talepleri dikkate alınarak, talepler gerçekçi bir biçimde tahmin edilmiştir. Önerilen modelin genel performansı, hesaplamalı deneysel analiz ile rassal olarak üretilen 15 farklı test problemi üzerinde incelenmiştir. Problemlerin çözümü için, çok amaçlı eniyileme yöntemlerinden Öncelikli Eniyileme Yöntemi (ÖEY) ve Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2 (AEKY2) kullanılarak elde edilen Pareto Cephesi (PC), karar vericiye amaç fonksiyonlarının farklı düzeyleri için ödünleşim bilgisini sunmaktadır.

A multi objective mixed-integer linear programming model for the electric vehicle charging network design

HIGHLIGHTS

- An electric vehicle charging station location and sizing problem has been addressed
- Charging demand and charging time-based planning for electric vehicles have been implemented
- A multi period multi objective mixed integer linear programming model has been proposed

Article Info

Research Article

Received: 05.12.2022

Accepted: 24.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1214878

Keywords:

Electric vehicle,
charging station,
location problem,
sizing problem,
multi objective mixed integer
linear programming

ABSTRACT

In this study, a new multi objective mixed integer linear programming model has been proposed to determine when, where, and at what capacity the charging stations will be installed, in a way that would satisfy the demand of electric vehicles (EV) from the nearby areas and minimize the cost of EV charging station installation and operation. In addressing the problem, considering the existing charging infrastructure, a charging network design has been obtained to meet the growing demands of EVs. Demands are predicted realistically, by taking into consideration different EV brands and models, battery and power capacities of the EV and the charger in the station, and different types of charging service demands from drivers. The overall performance of the proposed model is examined on 15 test problems randomly generated by computational experiments. For the solution of the problems, Pareto Front (PF) was obtained by using multi objective optimization methods -Lexicographic Optimization Method and AUGMECON2- providing the decision maker with trade-off information for different levels of objective functions.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / *Corresponding Author/Authors: *meltemuzuner@baskent.edu.tr, orhan.dengiz@gmail.com, koktener@metu.edu.tr, ikara@baskent.edu.tr, bdengiz@baskent.edu.tr / Tel: +90 546 691 48 89

1. Giriş (Introduction)

Sanayi Devrimi'nden itibaren, zamanla kas gücünün yerini makine gücünün alması ve böylelikle enerjiye olan bağımlılığın artması sonucunda çevre kirliliğinde büyük oranda bir artış yaşanmıştır. Bu bağımlılık, fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz vb.) tüketimindeki artışı da beraberinde getirmiştir. Bu tür yakıtların yanması sonucunda aralarında başlıca 'sera gazı' olarak bilinen karbondioksitin de bulunduğu çeşitli gazlar atmosfere karışmaktadır. Bu durum, atmosferdeki sera gazı miktarının artmasına neden olmaktadır.

Küresel olarak, yıllık sera gazı emisyonunun önemli bir bölümü ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır [1, 2]. Bu nedenle, Paris anlaşmasındaki öncelikli taahhütler arasında 'ulaşım sektörünün elektrikleştirilmesi' yer almaktadır. Ülkemizde "Ulaşım Enerji Verimliliğinin Artırılmasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmelik" ile araçlarda aralarında elektriğin de bulunduğu çevreci alternatif yakıt kullanımının teşvik edilmesi amaçlanmaktadır. Dünya genelinde ise bazı ülkeler belirli bir yıl itibarı ile içten yanmalı motorlu araçların satışını yasaklayarak sera gazı emisyonunu azaltmaya yönelik adımlar atmışlardır. Bununla birlikte, 2021 yılında Glasgow'da gerçekleştirilen 26. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda imzalanan bir anlaşma ile Paris Anlaşması'nın hedeflerine ulaşmak için sıfır emisyonlu araçlara geçişin hızlandırılması taahhüt edilmiştir [3]. Küresel olarak 2040 yılına kadar ve lider pazarlarda en geç 2035 yılına kadar tüm yeni araba ve minibüs satışlarının sıfır emisyon olması hedeflenmiştir [4]. Bu hedef ile birlikte, sürücülerin EA'lara ve araç üreticilerinin farklı sürücülerin ihtiyaçlarına yanıt verebilecek özelliklere sahip farklı nitelikteki EA'ların üretimine yöneleceği beklentisi gündeme gelmiştir. Böylelikle, önümüzdeki süreçte trafikte daha fazla EA olması beklenmektedir. Genel olarak hibrit, fişli hibrit ve tam elektrikli olmak üzere üç türü bulunan, bir bataryadan elektrik çeken ve harici bir kaynaktan şarj edilebilen, elektrik motoruyla çalıştırılabilen EA'lar, çevre dostu özellikleriyle çekici bir hale gelmiştir [5-7]. Sürücüler gereksinimlerine ve kullanım tercihlerine göre, istedikleri teknolojiye sahip EA'yı seçmektedirler.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından hazırlanan "Türkiye ulaşım sektörünün dönüşümü: Elektrikli araçların Türkiye dağıtım şebekesine etkileri" isimli raporda yüksek büyüme ve orta büyüme

senaryoları için Türkiye genelindeki EA satışlarının tahmini yer almaktadır [8]. Bu çalışmadaki EA satışlarının tahmininden yola çıkılarak; ele alınan orta büyüme senaryosu için hesaplanan Türkiye'deki tahmini fişli hibrit EA (FHEA) ve tam EA (TEA) sayıları Şekil 1'de yer almaktadır.

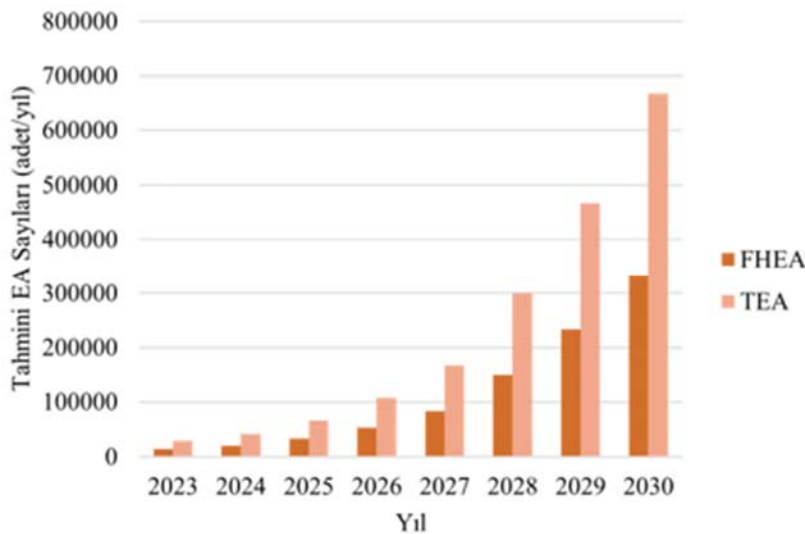
Orta büyüme senaryosundaki artışa bakıldığında sayılarının artacağı açıkça görülen EA'lar için şarj istasyonlarının artması gerekliliği de ortaya çıkmaktadır. Mevcut EA'lara ve tahminlere ek olarak yerli araç olan TOGG'un 2023 yılında satışına başlandığı da göz önünde bulundurulduğunda, ülkemizde mevcut şarj altyapısına daha fazla yüklenme olacak ve şarj gereksinimi artacaktır. Bu değerlendirmeler sonucunda EA sürücülerinin kesintisiz bir şekilde seyahat edebilmesi için en önemli adımlardan birisi ülke genelinde yeterli şarj istasyonu altyapısı planlamasının yapılmasıdır.

EA şarj cihazları ve istasyonlarının kurulması ve işletilmesini düzenleyen "Şarj Hizmeti Yönetmeliği" T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından 2022 yılında yayınlanmıştır. Bu yasal yapılanma ile şarj hizmeti veren firmaların ülke genelinde yaptığı yatırımlar ivmelenmiştir.

Bu çalışmada, EA'ların taleplerini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayacak ve EA şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde, şarj istasyonlarının hangi dönemde, nerede ve hangi kapasitede kurulacağını belirlemek için yeni çok amaçlı bir karma tamsayı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Farklı EA marka ve modelleri, EA'nın ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleri, farklı tiplerdeki şarj hizmeti talepleri dikkate alınarak, talepler gerçekçi bir biçimde tahmin edilmiştir. Bu problem, alan yazındaki yer seçim ve boyutlandırma problemine benzer olarak ele alınmış ve çok amaçlı çok dönemli EA şarj istasyonu yer seçim ve boyutlandırma problemi (ÇAÇD-EAŞİYSBP) olarak adlandırılmıştır.

Bu problemin ele alınmasının motivasyonları:

- EA sayılarının önümüzdeki yıllarda artacak olması ve buna bağlı olarak artacak şarj gereksinimini karşılayabilecek şarj istasyonlarının kurulması ve/veya mevcut şarj istasyonlarının kapasitelerinin artırılması gereksinimi,



Şekil 1. Orta büyüme senaryosunda EA sayıları (EV Sales Forecast in the "Medium-Growth" scenario)

- Şarj hizmeti veren/verecek firmaların ülke ihtiyacına göre planlı yatırım yapabilmesi, şarj istasyonu yerlerinin ve hizmet verme kapasitelerinin belirlenmesi gereksiniminden kaynaklanmıştır.

Makalenin ikinci bölümünde ele alınan problem ile ilgili alan yazın taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde problem tanımı ve önerilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli, dördüncü bölümde ise önerilen modelin çözümü için kullanılan Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2 (AEKY2) sunulmuştur. Beşinci bölümde, geliştirilen modelin performansı beş farklı boyuttaki 15 test problemi üzerinde incelenmiştir. Son bölümde ise sonuçlar sunulmuştur.

2. Alan Yazın Taraması (Literature Survey)

Son yüzyılda küresel ölçekte gündeme gelen iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi sorunlar nedeniyle, EA şarj istasyonlarının yer seçimi ve/veya boyutlandırılması çok sayıda araştırmacının ilgisini çeken bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bekleneceği üzere, EA şarj istasyonu yer seçim problemi (EAŞİYSBP) ve EA şarj istasyonu yer seçim ve boyutlandırma problemi (EAŞİYSBP) ile ilgili alan yazında çok sayıda tarama ve araştırma çalışması bulunmaktadır.

Tarama çalışmalarına örnek olarak; Deb vd. [9], şarj istasyonu altyapısı planlamasına ilişkin farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaları ele almışlardır. İlgili çalışmalarda çeşitli katkılar, problem formülasyonları ve algoritmalar incelenmiş olup, gelecekteki olası çalışma yönleri sunulmuştur. Kizhakkan vd. [10], alan yazındaki çalışmalarca şarj istasyonu yerleşim planlamasında dikkate alınan önemli parametrelere, uygunluğuna ve tuzaklarına odaklanmışlardır. Boujelben [11], şarj istasyonu yer seçiminin modellenmesinde, çözülmesinde ve gerçek hayat uygulamalarında önerilen yaklaşımlar için alan yazını incelemişlerdir. Alan yazın, aralarında talep temsiline, model yapısına, problem parametrelerindeki zamana bağımlılığın ve belirsizliğin bulunduğu çeşitli perspektiflerden analiz edilmiştir. Jog vd. [12], şarj istasyonu sistem düzenlemelerindeki hayati açıları ele alırken; şarj istasyonu ağının tasarımı ve verimli bir şekilde yönetilmesi için teknolojik vb. yönlerdeki ilerlemeler ile ilgili bilgiler sunmuşlardır. Araştırma çalışmalarına ait özet tablo ise Tablo 1'de sunulmuştur. Alan yazın incelendiğinde, EAŞİYSBP ve EAŞİYSBP için kullanılan yöntemler ve dikkate alınan özellikler Tablo 1'de özetlenmiştir.

- Birinci sütunda, çalışmanın yazar bilgisi,
- İkinci sütunda, eniyileme amaçlı model kullanılıp kullanılmadığı,
- Üçüncü ve dördüncü sütunlarda, yer seçim ve boyutlandırma kararlarının veriliş verilişmediği,
- Beşinci ve altıncı sütunlarda, dikkate alınan amaç sayısı,
- Yedinci sütunda, EA'nın marka ve model ayrımının dikkate alınıp alınmadığı,
- Sekizinci sütunda ise, farklı tip ve/veya kapasitedeki şarj cihazlarının birlikte kullanılıp kullanılmadığı yer almaktadır.

EAŞİYSBP ele alınırken, çeşitli özellikler (EA'nın marka ve model farklılığı, EA'nın ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleri, farklı tip şarj cihazları vb.) dikkate alınmalıdır.

Bu özelliklerden ilki, EA marka ve model farklılığıdır. Matematiksel model içeren herhangi bir çalışmada dikkate alınmayan bu özellik, alan yazında yalnızca Micari vd. [23] ve Shom vd. [19] tarafından dikkate alınmıştır. Micari vd. [23] 18 EA marka ve modelini ve her bir EA'nın batarya kapasitesi farklılığını dikkate almışlardır. Öte yandan, bu özellik dikkate alınmış olmasına rağmen EA'ların dönüştürücü kapasiteleri dikkate alınmadığı için şarj süresi hesabı gerçekçi bir şekilde yapılamamıştır. Shom vd. [19] ise iki EA marka ve modeli dikkate almışlardır, bununla birlikte detaylı bilgiye rastlanmamıştır.

Şarj sürelerinin belirlenmesi için gerekli olan bir diğer özellik, EA'nın ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleridir. Alan yazında EAŞİYSBP'yi ele alan çalışmaların çoğunda şarj cihazlarının güç kapasiteleri dikkate alınsa da, sınırlı sayıda çalışmada aracın gücüne ilişkin bilgiye rastlanmıştır. Kong vd. [13] bataryanın maksimum şarj gücünün 45 kW olduğunu varsaymışlardır. Bununla birlikte, Liu vd. [47] ve Kong vd. [61] çalışmalarında bataryanın gücü ifadesini kullanmışlardır. Bilindiği kadarıyla alan yazındaki çalışmalarda EA'nın ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasitelerini birlikte dikkate alan bir çalışma bulunmamaktadır.

Sürücülerin ihtiyaçlarına yanıt vermede önemli olan bir diğer özellik, şarj cihazı çeşitliliğidir. Sürücüler için önemli olmasına rağmen, alan yazında sınırlı sayıda çalışmada farklı tip ve kapasitelerdeki şarj cihazları dikkate alınmıştır. Fazeli vd. [41], Li ve Jenn [45], Liu [48] üç tip ve kapasitedeki şarj cihazını, Sathaye ve Kelley [16], Huang vd. [63], MirHassani vd. [66], Yazdekhesti vd. [52] ise iki tip ve kapasitedeki şarj cihazını dikkate almışlardır.

Bu özelliklere ek olarak; gerçek hayattaki yatırım kararlarının çoğu birden fazla amaca sahip olmasına rağmen, alan yazında sınırlı sayıda çalışmada bulunan matematiksel modellerde birden fazla amaç dikkate alınmıştır. Liu vd. [15], geliştirdikleri modelde minimum yatırım maliyeti ve minimum kullanıcı süresi maliyetini enküçüklemişlerdir. Yazdekhesti vd. [52], şarj istasyonları tarafından karşılanamayan talep miktarını ve şarj istasyonu kurulum maliyetini enküçüklemişlerdir. Xu vd. [33], sürücü memnuniyetini ve şarj kolaylığını enbüyüklemişlerdir. Zhang vd. [27], geliştirdikleri iki seviyeli programlama modelindeki üst seviyede toplam maliyeti ve toplam hizmet gecikmesini; alt seviyede ise toplam seyahat süresini enküçüklemişlerdir. Asna vd. [28], araçların seyahat süresini, istasyon maliyetlerini ve güç kaybını enküçüklemişlerdir.

Ancak EA'nın marka ve model farklılığı, EA'nın ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleri, farklı tip şarj cihazları, farklı türlerdeki şarj hizmeti talebi, artan ihtiyaca bağlı olarak dönemsel şarj istasyonu kapasitesi vb. özellikler dikkate alındığında EAŞİYSBP gerçek hayat ile uyumlu bir problem olarak çalışmamızda ele alınmış ve şarj istasyonu yatırımları doğru dönemlerde doğru yerlerde ve doğru büyüklükte yapılabilmiştir. Tablo 1'de de görüldüğü gibi tüm bu gerçekçi özelliklerin birlikte ele alındığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmamız bu yönüyle alan yazındaki eksikliği tamamlayarak alana katkı sağlamaktadır.

3. Problem Tanımı ve Matematiksel Model (Problem Description and Mathematical Model)

Bu çalışmada, EA'ların taleplerini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayacak ve EA şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde, hangi dönemde, nerede ve hangi kapasitede şarj istasyonu kurulacağı kararının verilmesi problemi, ÇAÇD-EAŞİYSBP ele alınmıştır. Ayrıca, mevcut şarj istasyonları da göz önünde bulundurularak; şarj istasyonu bulunan yerler arasında hangi dönemde, nerede ve hangi kapasitede artış yapılacağı kararı da verilmektedir. Problemin çözümünde, EA'ların farklı tiplerdeki şarj hizmeti talepleri de göz önünde bulundurulmaktadır.

EA'lar, kablolu ve kablosuz olmak üzere iki farklı yöntem ile şarj edilebilmektedir. Ülkemizde EA teknolojileri ve şarj istasyonları genellikle kablolu şarjı desteklemektedir. Bu nedenle kablolu şarj yöntemi yaygındır. Bu yöntemde, farklı seviyelerde şarj işlemi söz konusu olup, farklı tipte ve kapasitelerdeki şarj cihazları (soketler) kullanılmaktadır. Şarj istasyonları için uygun yerler; kamuya açık alanlar, erişime sınırlı alanlar ve özel alanlar olarak gruplandırılabilir [68]. Alışveriş merkezleri, sağlık kurumları, konaklama yerleri otoparkları ve akaryakıt istasyonları gibi kamuya açık alanlar, EA sürücülerinin araçlarını rahatlıkla şarj edebilmelerine olanak sağlayan

istasyon alanları olarak tanımlanmaktadır. Özel siteler, iş merkezleri gibi erişime sınırlı alanlar, yalnızca izni olan sürücülerin girebileceği; özel alanlar ise, yalnızca istasyon sahibi veya belirli bir grup tarafından kullanılabilen şarj istasyonlarının bulunduğu alanlardır.

EA sürücüler, şarj ihtiyaçlarını karşılamak için tercih edecekleri şarj seviyesine, kullanılacak soketin tipine, kapasitesine ve hizmet

alınacak istasyon yerine ait özelliklere göre istasyon seçmektedirler. Aynı zamanda, zaman ve fiyat faktörlerini de göz önünde bulundurmaktadırlar. EA sürücüsü, bu kararları doğrultusunda, seçmiş olduğu istasyona gelerek aracını hizmet alacağı sokete bağlamaktadır. Şarj süreci anlık olarak izlenebilmekte ve doluluk yüzdesi bir LED ekranından okunabilmektedir.

Tablo 1. EAŞİYS ve EAŞİYSBP İlgili Araştırma Çalışmaları (Research Articles Related)

Yazar(lar)	Eniyileme Modeli	Yer Seçimi Kararı	Boyutlandırma Kararı	Tek Amaçlı	Çok Amaçlı	EA Marka ve Model Ayrımı	Farklı Tip ve/veya Kapasitedeki Şarj Cihazlarının Kullanımı
Kong vd. [13]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
Lu ve Hua [14]	Evet	Evet	Evet	X		B	Hayır
Liu vd. [15]	Evet	Evet	Evet		X	B	Hayır
Sathaye ve Kelley [16]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Evet
Zhong vd. [17]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B
Lee ve Han [18]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B
Shom vd. [19]	Hayır						
Tamay ve Inga [20]	Hayır						
Quddus vd. [21]	Evet	Evet	Evet			Hayır	B
Zhang vd. [22]	Evet	Evet	Evet			B	Hayır
Micari vd. [23]	Hayır						
Aghalari vd. [24]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B
Kang vd. [25]	Evet	Evet	Hayır	X		B	B
Boujelben ve Gicquel [26]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B
Zhang vd. [27]	Evet	Evet	Evet		X	Hayır	Hayır
Asna vd. [28]	Evet	Evet	Evet		X	B	Hayır
Schmidt vd. [29]	Hayır						
Yazdi vd. [30]	Evet	Evet	Hayır	X		B	B
Boonraksa ve Marungsri [31]	Hayır						
Bouguerra ve Layeb [32]	Evet	Evet	Hayır	X		B	B
Xu vd. [33]	Evet	Evet	Hayır		X	Hayır	B
Bao ve Xie [34]	Evet	Evet	Hayır			B	B
Hu vd. [35]	Evet	Evet	Evet	X		B	Hayır
Tu vd. [36]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B
Pradhan vd. [37]	Hayır						
Zhu vd. [38]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	B
Wei vd. [39]	Hayır						
Zheng vd. [40]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B
Fazeli vd. [41]	Evet	Evet	Evet			B	Evet
Wang vd. [42]	Hayır						
Han vd. [43]	Evet	Evet	Evet	X		B	Hayır
Jia vd. [44]	Evet	Evet	Hayır	X		B	B
Li ve Jenn [45]	Evet	Evet	Evet	X		B	Evet
Feng vd. [46]	Hayır						
Liu vd. [47]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
Liu [48]	Evet	Evet	Evet			Hayır	Evet
Wang vd. [49]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
Bouguerra ve Layeb [50]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
Boujelben ve Gicquel [51]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
Yazdekhasi vd. [52]	Evet	Evet	Evet		X	Hayır	Evet
Huang ve Kockelman [53]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
Rani ve Mishra [54]	Hayır						
Kinay vd. [55]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B
Boujelben ve Gicquel [56]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B
Zhang vd. [57]	Evet	Evet	Hayır	X		B	Hayır
He vd. [58]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	Hayır
Fredriksson vd. [59]	Evet	Evet	Hayır	X		B	B
Gavranović vd. [60]	Evet	Evet	Hayır	X		B	B
Kong vd. [61]	Evet	Evet	Evet			B	Hayır
Wang vd. [62]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
Huang vd. [63]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	Evet
Yıldız vd. [64]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
Chen vd. [65]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
MirHassani vd. [66]	Evet	Evet	Evet	X		Hayır	Evet
Li vd. [67]	Evet	Evet	Hayır	X		Hayır	B

B: Belirtilmemiş

Mevcut istasyonun kapasitesinin artırılması ve/veya yeni istasyon kurulması ile ilgili planlama ufku üç yıl olarak dikkate alınmıştır. Her bir planlama döneminde, ilgili dönemin EA tahmini dikkate alınmış, EA'ların tamamının belirli seviyeler arasında şarj ihtiyacı olduğu (en kötü senaryo) ve EA'ların şarj taleplerinin tamamının karşılanacağı düşünülmüştür. İstanbul Kalkınma Ajansı tarafından hazırlanan İstanbul ili EA araç şarj istasyonu kurulumuna ilişkin ön fizibilite raporunda dikkate alınan istasyon altyapı maliyeti, soket satın alma maliyeti, soket nakliye maliyeti, değişken maliyet (yazılım programı maliyeti ve istasyon işletme maliyeti) ve alan kiralama maliyeti benzer şekilde bu çalışmada da dikkate alınmıştır [68]. İstasyon işletme maliyeti içerisinde kurulum danışmanlık maliyeti, işletme danışmanlık maliyeti, tanıtım ve pazarlama maliyeti, ofis, muhasebe, sigorta vb. maliyeti bulunmaktadır. Yavaş (AC) ve Hızlı (DC) şarj hizmetleri için aynı raporda dikkate alınan 22 kW ve 100 kW kapasitelerine sahip tek tip soketler bu çalışmada da dikkate alınmıştır [68].

Problemin çözümünde şarj istasyonları ile ilgili yönetmelik, mevzuat vb. bağlayıcı bilgiler aşağıda verildiği şekilde göz önünde bulundurulmuştur:

- Mevcut Otopark Yönetmeliği'ne göre "Otuzbin metrekareden büyük AVM'lerde kurulacak şarj ünitelerinden en az birinin, yetmişbin metrekareden büyük AVM'lerde ise en az ikisinin ilgili standartlara göre hızlı şarj kapasitesine sahip olması gerekmektedir."
- EPDK'nın Şarj Hizmeti Yönetmeliği'ne göre "Halka açık şarj istasyonlarında lisans sahibinden kaynaklanmayan haklı sebepler ve mücbir sebepler hariç şarj hizmetinin sürekli ve kesintisiz olarak sunulması zorunludur. Otel, restoran, alışveriş merkezi gibi işyerlerine ait otoparklarda kullanıma açık olan şarj istasyonları bağlı bulundukları iş yerinin çalışma saatleri ile sınırlı olarak şarj hizmeti sunabilir."

Bu bilgi ve açıklamalar ışığında bu çalışmada ele alınan problemin kısıtları aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

- Her bir planlama döneminde, mahallelerin taleplerinin tamamı karşılanmalıdır.
- Herhangi bir planlama döneminde, sürücülerin bir yerdeki istasyondan şarj hizmeti alabilmesi ve/veya o yerdeki istasyona ilave soket kurulabilmesi için, o dönem içerisinde ya da öncesinde ilgili yerde kurulan bir istasyon olmalıdır.
- Herhangi bir planlama döneminde, bir yerdeki istasyona atanabilecek toplam şarj talebi istasyonun hizmet kapasitesini aşmamalıdır.
- Planlama ufku boyunca bir yerdeki istasyona yeni kurulacak soket sayısı, belirtilen üst sınırı aşmamalıdır. Yerler arasında olası aşırı bir yüklenmenin önlenmesi için, fiziksel kapasite de göz önünde bulundurularak, istasyonlara en çok 21 yeni soket kurulmasına izin verilmiştir.
- Planlama ufku boyunca bir yerde en fazla bir defa istasyon kurulabilir. Herhangi bir dönemde kurulan bir istasyon planlama ufkunun sonuna dek açık kalmalıdır.
- AVM'lerde büyüklüklerine göre hızlı şarj hizmeti veren gerekli sayıda soket kurulmalıdır.
- Herhangi bir planlama döneminde, bir yerde istasyon kurulursa ilgili istasyona en az bir soket kurulmalıdır.

ÇAÇD-EAŞİYSBP için bu çalışmada kullanılan varsayımlar:

- Şarj süreleri hesaplanırken doğrusal ilişki kullanılmaktadır.
- EA'lar, bataryaları %10 dolu iken istasyona gelmekte, %80 oranında doluluk sağlandığında istasyondan ayrılmaktadır.

- İstasyonlar 24 saat kesintisiz çalışmaktadır.
- Yatırım için planlama ufku üç yıl (2026, 2027, 2028) olarak dikkate alınmıştır.
- Her bir planlama döneminde Türkiye geneli için elde edilen EA tahminleri, nüfus ve gelişmişlik indeksleri dikkate alınarak herhangi bir alana/bölgeye indirgenmiştir.
- Mahalle bazında talepler, her bir mahallede bulunan tüm EA'ların yavaş ve hızlı şarj hizmet talepleri dikkate alınarak, toplam şarj hizmeti süresi (saat) şeklinde düzenlenmiştir.
- Her bir yıl için, mahalle bazında talepler için ilgilenilen alandaki/bölgedeki toplam TEA ve FHEA sayılarına, her bir mahalledeki her bir marka ve model grubundaki EA sayılarına ve her bir marka ve model grubundaki EA'ların şarj hizmeti süresine gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla, gerekli nüfus, gelişmişlik indeksi ve EA marka ve model satış oranları bilgileri sırasıyla Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü [69] ve TEHAD tarafından hazırlanan raporlardan elde edilebilmektedir.

Her bir yıl için, alandaki/bölgedeki toplam TEA veya FHEA sayıları, Keçeci vd. [70] çalışmalarındaki benzer olarak, ilgili alan/bölge nüfusunun Türkiye nüfusuna oranı ile Türkiye'deki TEA veya FHEA sayısı ve alanın/bölgenin gelişmişlik indeksinin çarpımı ile elde edilir. Her bir mahalledeki her bir marka ve model grubundaki EA sayıları ise, alandaki/bölgedeki toplam TEA veya FHEA sayısı ile ilgili marka ve model EA satış oranı ve mahalle nüfusunun alan/bölge nüfusuna oranının çarpımı ile elde edilir. Marka ve model türüne göre EA'ların ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleri, EA'ların batarya kapasiteleri vb. bilgiler kullanılarak her bir marka ve model EA için birim şarj hizmeti süreleri hesaplanmıştır. Modelde kullanılan talep değeri ise, problem setindeki her bir mahalle için, her bir marka ve model grubundaki EA sayıları ile birim şarj hizmeti sürelerinin çarpımlarının toplamaları ile elde edilmektedir.

- Türkiye'deki tahmini FHEA ve TEA sayıları, SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından hazırlanan "Türkiye ulaştırma sektörünün dönüşümü: Elektrikli araçların Türkiye dağıtım şebekesine etkileri" isimli rapordaki EA satışlarının tahmininden yola çıkılarak; ele alınan orta büyüme senaryosu için hesaplanmıştır. Diğer parametreler rassal olarak üretilmiştir.
- Her bir marka ve model grubundaki EA'ların satış oranlarında üç yıllık planlama ufku boyunca herhangi bir değişim olmayacaktır.
- Şarj hizmeti süresi, her bir marka ve model grubundaki EA'ların batarya dolulukları, kullanılabilir batarya kapasiteleri, EA ile istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasitelerine bağlı olarak hesaplanmaktadır.
- EA sürücülerinin %80'i yavaş (AC) şarj hizmetini, %20'si ise hızlı (DC) şarj hizmetini tercih etmektedir.
- Bazı marka ve model grubundaki EA'lar (örneğin Smart EQ ForFour, Smart EQ ForTwo, BMW i8 vb.) teknolojik nedenlerle yalnızca yavaş (AC) şarj hizmeti alabilmektedir.
- Yatırım maliyetlerinde istasyon altyapı maliyeti, soket satın alma maliyeti, soket nakliye maliyeti, değişken maliyet (yazılım programı maliyeti ve istasyon işletme maliyeti) ve alan kiralama maliyeti dikkate alınmıştır. İstasyon işletme maliyeti içerisinde kurulum danışmanlık maliyeti, işletme danışmanlık maliyeti, tanıtım ve pazarlama maliyeti, ofis, muhasebe, sigorta vb. maliyeti bulunmaktadır.
- Yavaş (AC) şarj hizmeti için 22 kW, hızlı (DC) şarj hizmeti için 100 kW kapasitelerine sahip tek tip soketler dikkate alınmıştır.
- Şarj İstasyonlarında şarj hizmeti veren alanlar yıllık olarak kiralananmaktadır.
- Planlama ufkundaki toplam yatırım maliyeti hesabında Net Bugünkü Değer dikkate alınmıştır.
- İlgilenilen alanın/bölgenin gelişmişlik indeksi ikidir ve bu değerde üç yıllık planlama ufku boyunca herhangi bir değişim olmayacaktır.

- Potansiyel istasyon yerleri belirlenirken yüzme havuzu, spor tesisi, eğlence merkezi, alışveriş merkezi, benzin istasyonu, hastane, otel, restoran gibi EA sürücülerinin vakit geçirebileceği farklı alan türleri dikkate alınmıştır.

Problemin matematiksel modeli, dizin kümeleri, parametreler, karar değişkenleri ve yardımcı karar değişkenleri aşağıda verilmektedir.

Dizin Kümeleri

I = Mahalleler kümesi $I = \{i = 1, \dots, \dots, I\}$
 J = Potansiyel istasyon yerleri kümesi $J = \{j = 1, \dots, \dots, J\}$,
 $J = J_{SSC} \cup J_{MSC} \cup J_{LSC} \cup J_0$
 J_{SSC} = Alanı 30000 m²'den küçük olan AVM'lerin kümesi
 J_{MSC} = Alanı 70000 m²'den küçük ve 30000 m²'den büyük olan AVM'lerin kümesi
 J_{LSC} = Alanı 70000 m²'den büyük olan AVM'lerin kümesi
 J_0 = AVM dışındaki yerlerin kümesi
 T = Planlama dönemleri kümesi $T = \{t = 1, \dots, \dots, T\}$
 K = Şarj hizmeti tipleri kümesi $K = \{k = 1, \dots, \dots, K\}$

Parametreler

$g_j = \begin{cases} 1, j. \text{ yerde } 1. \text{ dönem başında mevcut bir istasyon varsa} \\ 0, \text{dd} \end{cases}$
 e_{jk} : $j. \text{ yerde } 1. \text{ dönem başında kurulu olan } k. \text{ tip şarj hizmeti veren soket sayısı}$
 dm_{itk} : $i. \text{ mahallenin } t. \text{ dönemdeki } k. \text{ tip şarj hizmeti talebi (h)}$
 ds_{ij} : $i. \text{ mahalle ile } j. \text{ yer arasındaki mesafe (km)}$
 f_t : $t. \text{ dönemde istasyon kurulmasına ilişkin altyapı maliyeti (\$)}$
 p_{tk} : $t. \text{ dönemde } k. \text{ tip şarj hizmeti veren bir adet soketin satın alma maliyeti (\$)}$
 s_t : $t. \text{ dönemde satın alınan ilave soketin nakliye maliyeti (\$)}$
 v_t : $t. \text{ dönemde istasyon işletme maliyeti (yıllık) (\$)}$
 a_t : $t. \text{ dönemde şarj hizmeti alacak araçlar için istasyonda alan kiralama maliyeti (ortalama bir araç) (yıllık) (\$)}$
 u : Planlama ufku boyunca bir istasyona kurulabilecek toplam soket sayısının üst sınırı
 h : İstasyonların hizmet verdiği süre (saat)
 o : enflasyon oranı (%)
 r : firmanın getiri beklentisi (%)
 M : Yeterince büyük pozitif bir sayı

Karar Değişkenleri

x_{ijtk} : $i. \text{ mahallenin } j. \text{ yerdeki istasyon tarafından } t. \text{ dönemde } k. \text{ tip şarj hizmeti talebinin karşılanma oranı}$
 $y_{jt} = \begin{cases} 1, j. \text{ yerdeki istasyon } t. \text{ dönemde kurulursa} \\ 0, \text{dd} \end{cases}$
 z_{jtk} : $j. \text{ yerdeki istasyonda } t. \text{ dönemde kurulacak } k. \text{ tip şarj hizmeti veren soket sayısı}$

Yardımcı Karar Değişkenleri

$w_{jt} = \begin{cases} 1, j. \text{ yerdeki istasyonda } t. \text{ dönemde ilave soket kurulursa} \\ 0, \text{dd} \end{cases}$
 $b_{jt} = \begin{cases} 1, j. \text{ yerdeki istasyon } t. \text{ dönemde açık ise} \\ 0, \text{dd} \end{cases}$

ÇAÇD-EAŞİYSBP için geliştirilen çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli:

$$\text{Enk } f_1 = \sum_{t=1}^T \frac{TC_t}{(1+r)^{t-1}} \quad (1)$$

$$TC_t = \sum_{j=1}^J y_{jt} * f_t + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K z_{jtk} * p_{tk} + \sum_{j=1}^J w_{jt} * s_t + \sum_{j=1}^J b_{jt} * v_t + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^t \sum_{k=1}^K z_{jlk} * a_t \quad (2)$$

$$\text{Enk } f_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K dm_{itk} ds_{ij} x_{ijtk} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ijtk} = 1 \quad \forall i, t, k \quad (4)$$

$$x_{ijtk} \leq g_j + \sum_{l=1}^t y_{jl} \quad \forall i, j, t, k \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I dm_{itk} * x_{ijtk} \leq h * \left(e_{jk} + \sum_{l=1}^t z_{jlk} \right) \quad \forall j, t, k \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_{jtk} \leq u * \sum_{t=1}^T y_{jt} \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{jt} \leq 1 \quad \forall j \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K z_{jtk} \leq u * \sum_{l=1}^t y_{jl} \quad \forall j, t \quad (9)$$

$$z_{jtk} + e_{jk} \geq 2 \quad j \in J_{LSC}, t = 1 \text{ ve } k = 2 \quad (10)$$

$$z_{jtk} + e_{jk} \geq 1 \quad j \in J_{MSC}, t = 1 \text{ ve } k = 2 \quad (11)$$

$$M * w_{jt} \geq \sum_{k=1}^K z_{jtk} \quad \forall j, t \quad (12)$$

$$w_{jt} \leq \sum_{k=1}^K z_{jtk} \quad \forall j, t \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^t w_{jl} \leq t * b_{jt} \quad \forall j, t \quad (14)$$

$$b_{jt} \leq \sum_{l=1}^t w_{jl} \quad \forall j, t \quad (15)$$

$$y_{jt} \leq \sum_{k=1}^K z_{jtk} \quad \forall j, t \quad (16)$$

$$x_{ijtk} \geq 0 \quad \forall i, j, t, k \quad (17)$$

$$y_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, t \quad (18)$$

$$w_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, t \quad (19)$$

$$b_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, t \quad (20)$$

$$z_{jtk} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j, t, k \quad (21)$$

Matematiksel modelin amaç fonksiyonları Eş. 1, toplam yatırım maliyetinin net bugünkü değerini; Eş. 3 ise talep ağırlıklı toplam mesafeyi enküçükleme. Eş. 2, her bir planlama dönemi için toplam yatırım maliyetini hesaplamaktadır. Yatırım maliyeti bileşenleri sırasıyla istasyon altyapı maliyeti, soket satın alma maliyeti, soket nakliye maliyeti, değişken maliyet (yazılım programı maliyeti ve istasyon işletme maliyeti) ve alan kiralama maliyetidir. Eş. 4, herhangi bir planlama döneminde, her bir mahallenin talebinin tamamının bir veya birden fazla yerdeki istasyonlar tarafından karşılanmasını sağlar. Eş. 5, bir mahallenin talebinin bir yerdeki istasyon tarafından karşılanabilmesi için o dönemde ya da daha önceki dönemlerden birinde ilgili yerde istasyon kurulmuş olmasını garanti eder. Eş. 6, her bir planlama döneminde bir yerdeki istasyona atanan taleplerin toplamının istasyonun hizmet kapasitesini aşmamasını sağlar. Eş. 7 ve Eş. 9, sırasıyla planlama ufkunu boyunca ve bir planlama döneminde farklı yerlerdeki istasyonlara yeni kurulacak soket sayılarının toplamının, belirtilen üst sınırı aşmamasını sağlar, o dönem içerisinde ya da öncesinde ilgili yerde istasyon kurulmuş olmasını garanti eder. Eş. 8, planlama ufkunu boyunca aynı yerde en fazla bir defa istasyon kurulabileceğini ifade eder. Herhangi bir dönemde kurulan bir istasyon planlama ufkunun sonuna dek açık kalmalıdır. Eş. 10 ve Eş. 11, Otopark Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmeliğin dördüncü maddesinin beşinci fıkrasında belirtildiği üzere, ilgili yerlerdeki AVM'lerde büyüklüklerine göre hızlı şarj hizmeti veren gerekli sayıda soket kurulmasını garanti eder. Eş. 12 ve Eş. 13 herhangi bir planlama döneminde, bir yerdeki istasyona ilave soket kurulup kurulmadığının belirlenmesi ve bununla ilişkili soket kurulumu kararlarının alınabilmesini sağlar. Eş. 14 ve Eş. 15 herhangi bir planlama döneminde, bir yerdeki istasyona ilave soket kurulup kurulmadığı ile ilişkili istasyonun açık olup olmadığının belirlenmesini sağlar. Eş. 16, herhangi bir planlama döneminde bir yerde istasyon kurulursa ilgili istasyona o dönemde en az bir soket kurulmasını sağlar. Eş. 17 – Eş. 21 karar değişkenleri için işaret sınırlarını ifade eder.

4. Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2 (Augmecon2 Method)

Tek amaçlı eniyileme problemleri tasarım uzayında tek bir nokta ile sonuçlanırken; çok amaçlı eniyileme problemleri, amaç fonksiyonu uzayında Pareto Eniyi Çözüm (PEÇ) olarak adlandırılan bir dizi nokta ile sonuçlanır [71]. Baskın olmayan çözümleri temsil eden bu noktalar dizisi ise Pareto Cephesini (PC) oluşturur. Baskın olmayan çözümlerin elde edilebilmesi için ise alan yazında aralarında Ağırlıklı Toplam Yöntemi, Epsilon Kısıt Yöntemi (EKY), Hedef Programlama gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [71]. Bununla birlikte, EKY diğer bazı ağırlıklandırma yöntemlerine göre çeşitli avantajlara sahip olup, alan yazındaki birçok çalışmada kullanılmıştır [72].

Alan yazında, EKY'nin geliştirilmiş versiyonları bulunmakla birlikte, Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2 (AEKY2)'nin AEKY ve alan yazındaki diğer bazı yöntemlere göre daha verimli sonuçlar verdiği bilindiği için; ÇAÇD-EAŞİYSBP'nin çözümünde AEKY 2'nin kullanılmasına karar verilmiştir [73]. Bu yöntem ile problem aşağıdaki hale dönüşmektedir [73];

$$f_2 + s_2 = \varepsilon_2 \quad (22)$$

Kısıt (1) – (21)
kısıtları altında

$$\min f_1 - \delta * (s_2/r_2) \quad (23)$$

$$s_2 \geq 0 \quad (24)$$

Buradaki s_2 , aylak değişken; r_2 , ilgili amaç fonksiyonunun aralığı; δ , genellikle 10^{-3} ile 10^{-6} arasında olan yeterince küçük bir sayı ve ε_2

ise bir sınır değeridir. Bu çalışmada δ , 10^{-5} olarak ele alınmıştır. Önemli bir konu olan ε_2 değeri ise, $f_2^{nadir} \leq \varepsilon_2 \leq f_2^{ideal}$ aralığında olmalıdır [74]. Bu yöntem uygulanırken,

- Enküçüklenecek amaç fonksiyonu f_1 , kısıt olarak eklenecek amaç fonksiyonu f_2 olarak dikkate alınmıştır.
- Toplam 10 tane çözümün yeterli olacağı değerlendirilerek aralık sayısı $q_2 = 9$ olarak belirlenmiştir.

Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda, sonraki bölümde sunulan test problemleri için oluşturulan ÇAÇD-EAŞİYSBP'ler AEKY 2 kullanılarak çözülmüştür.

5. Deneysel Sonuçlar (Computational Results)

ÇAÇD-EAŞİYSBP için geliştirilen modelin performansı rassal olarak üretilen test problemleri üzerinde incelenmiştir. Matematiksel model ILOG CPLEX OPL Optimization Studio Version 20.10.0.0 çözücüsünde kodlanmış ve Intel Xeon Phi 7290 CPU @ 1.50GHz ve 16 GB RAM'e sahip bir Linux bilgisayarda 16 çekirdek kullanılarak çözdürülmüştür. Hesaplamalı analizler, 86400 saniyelik CPU zamanı ile sınırlandırılmış olup, sınıra ulaşıldığında CPLEX sonlandırılır. Bu bölümde test problemleri hakkında bilgi ve elde edilen sayısal sonuçlar sunulmuştur.

5.1. Test Problemleri (Test Problems)

Bu çalışmada ele alınan problem, tüm özellikleri ile alan yazında daha önce ele alınmadığı için, ÇAÇD-EAŞİYSBP için geliştirilen modelin performansı, rassal olarak üretilen test problemleri üzerinde incelenmiştir. Test problemlerinde kullanılacak parametre değerleri örneğin mahalle ile istasyon yerleri arasındaki mesafeler, mahallelerin talepleri vb. Tablo 2'de görüldüğü gibi rassal olarak üretilmiştir. Test problemlerine <https://github.com/meltemuzuner/Electric-Vehicle-Charging-Station-Network-Design-Dataset> linkinden ulaşılabilir. Mahalle sayısı ve istasyon yeri sayısının 15-30 ile 20-48 olduğu test problemleri küçük, 45 ile 60-68 olduğu test problemleri orta, 60-75 ile 80-108 olduğu problemler ise büyük boyutlu problemler olarak sınıflandırılmıştır.

Bu çalışmada mahalle ve istasyon yeri sayısına göre, beş farklı büyüklükte problem tanımlanmış olup, her büyüklük için üç farklı test problemi ile, toplam 15 test problemi çözülmüştür. Tablo 2'de test problemlerine ilişkin problem boyutu ve özellikleri ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Örneğin bu tablodaki 15_2 test problemi küçük boyutlu bir problem olup, ilk sütun problem numarasını, ikinci sütun alandaki/bölgedeki toplam mahalle sayısını, üçüncü sütun istasyon kurulabilecek toplam potansiyel yer sayısını (Örneğin , P#15_2 test probleminde 1'den 24'e kadar numaralandırılmış toplam 24 adet potansiyel yer vardır), dördüncü sütun dikkate alınan EA marka ve model grubu sayısını, beşinci sütun mevcut durumda kurulu istasyon bulunan yer sayısını, altıncı ve yedinci sütunlar sırası ile mevcut durumda kurulu istasyonlardaki tiplerine göre mevcut soket sayılarını göstermektedir.

Geliştirilen model, her bir amaç fonksiyonunun aralığının elde edilmesi sırasında baskın çözümlerin önüne geçilebilmesi için Öncelikli Eniyileme Yöntemi (ÖEY) kullanılarak çözülmüştür ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir [72, 75, 76].

ÖEY, amaç fonksiyonları için önceliğin dikkate alındığı sıralı bir yaklaşımdır. Bu yöntemde öncelikle, en yüksek öncelikli amaç fonksiyonu eniyilenir. Ardından, bu amaç fonksiyonu elde edilen değer ile sınırlandırılarak kısıt olarak ele alınmakta ve diğer amaç fonksiyonu eniyilenmektedir [75].

Tablo 2. Test Problemleri (Test Problems)

P #	I (Mahalle)	J (İstasyon Yeri)	EA Marka ve Model Grubu Sayısı	Mevcut Tesis #	Mevcut Tip 1 Soket #	Mevcut Tip 2 Soket #
15_1	15	20	2	0	0	0
15_2	15	24	3	0	0	0
15_3	15	28	4	1	0	1
30_1	30	40	10	0	0	0
30_2	30	44	12	2	0	2
30_3	30	48	14	3	1	2
45_1	45	60	20	2	1	1
45_2	45	64	22	3	1	2
45_3	45	68	24	4	3	1
60_1	60	80	30	3	3	0
60_2	60	84	32	4	2	2
60_3	60	88	34	5	4	3
75_1	75	100	40	4	4	0
75_2	75	104	42	5	3	4
75_3	75	108	44	6	4	2

Tablo 3. Test problemlerinin ideal ve nadir çözüm değerleri ve süreleri
(Ideal and nadir solution values of test problems)

P#	f_1^{ideal}	f_2^{nadir}	ÇS (sec.)	f_2^{ideal}	f_1^{nadir}	ÇS (sec.)
15_1	342906,9*	6228,658	4169,76	1748,175*	664980,6	1,88
15_2	244927,2*	5152,749	368,75	1001,557*	595636,5	1,88
15_3	241307,5*	5474,044	821,37	1035,589*	604959,6	2,76
30_1	759439,3*	6263,145	22699,72	1940,183*	1362374	11,19
30_2	-	-	-	1717,916*	1416644	7,28
30_3	-	-	-	1605,448*	1387817	11,27
45_1	-	-	-	1541,152*	1898308	23,41
45_2	-	-	-	1476,411*	1890132	19,02
45_3	1083414	6745,367	86400	1652,733*	2050878	17,97
60_1	1445808	78024,24	86400	2022,292*	2501665	63,92
60_2	1432176	75880,19	86400	1904,18*	2535185	81,06
60_3	-	-	-	1851,995*	2515518	90,88
75_1	1698141	88601,3	86400	2047,248*	3010001	241,15
75_2	1632462	90968,11	86400	1887,995*	3003204	253,42
75_3	1658677	88349,43	86400	1727,713*	2997862	162,15

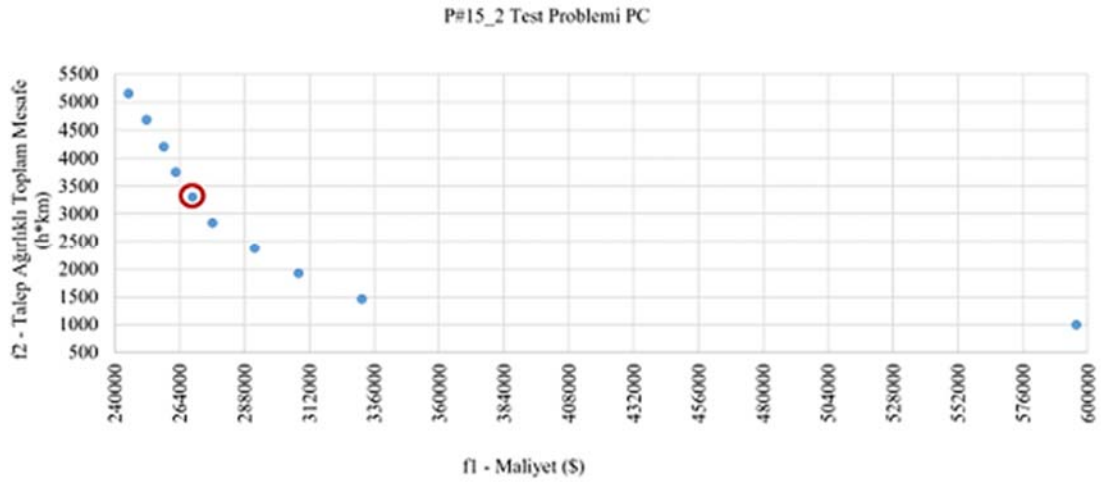
Tablo 3'te, ilk amaç fonksiyonu öncelikli bir şekilde dikkate alınarak model çözüldüğünde her bir test problemi için elde edilen f_1 ve f_2 değerleri sırasıyla f_1^{ideal} ve f_2^{nadir} sütunlarında; ikinci amaç fonksiyonu öncelikli bir şekilde dikkate alınarak çözüldüğünde ise her bir test problemi için elde edilen f_1 ve f_2 değerleri sırasıyla f_1^{nadir} ve f_2^{ideal} ve sütunlarında yer almaktadır. Çözüm süreleri ise ÇS sütunlarında saniye cinsinden yer almaktadır. Çözüm süresi 86400 saniyeden küçük olan problemlere ait f_1^{ideal} ve f_2^{ideal} değerleri ilgili problemin eniyi amaç fonksiyonu değerleridir. Bu değerler tabloda yıldız (*) ile belirtilmiştir. Bazı test problemlerinde ise CPLEX'in çözüm süresine ilişkin belirlenen sınır olan 86400 saniye içerisinde bir çözüm bulunamadığından, ilgili problemlerin f_1^{ideal} ve f_2^{nadir} amaç fonksiyonu değeri "-" ile gösterilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde, ikinci amaç fonksiyonu öncelikli bir şekilde dikkate alınarak çözüldüğünde problem boyutunun büyümesine rağmen, kısa sürelerde en iyi çözümün bulunduğu görülmektedir. Bu durumun, birinci amaç fonksiyonunun hesaplama işlemlerinin daha fazla parametreye bağlı ve karmaşık olması ile açıklanabileceği düşünülmektedir.

Tablo 3'te görüldüğü üzere, f_1 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alındığında f_2 , f_2 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alındığında ise f_1 amaç fonksiyonu değeri kötüleşmektedir. Dolayısı ile, f_1 ve f_2

amaçlarının birbirleri ile çeliştiği söylenebilir. Her iki amaç fonksiyonunun eniyi değeri aynı anda elde edilemeyeceği için amaçlar arasında bir ödünleşim söz konusudur. Örneğin, P#15_1 problemi için f_1 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alındığında f_1^{ideal} değeri 342906,9, f_2^{nadir} değeri 6228,658 olarak elde edilmiştir. Öte yandan f_2 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alındığında f_2^{ideal} değeri 1748,175, f_1^{nadir} değeri 664980,6 olarak elde edilmiştir. Bu nedenle, her iki amaç fonksiyonu arasında farklı dengeler sağlayan bir dizi çözüm elde edebilmek için, tablodaki değerlerden yola çıkılarak ve AEKY 2 kullanılarak her bir test problemi için Pareto Çözümleri (PÇ) elde edilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü gibi, ilk dört problem verilen çözüm süresi içerisinde çözülebilirken; f_1 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alındığında 30_2, 30_3, 45_1, 45_2 ve 60_3 problemleri için çözüm bulunamamakta, f_2 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alındığında ise bu problemlere çok kısa süreler içerisinde çözüm bulunabilmektedir.

Diğer problemler için ise f_2 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alındığında en iyi çözümler kısa süreler içerisinde bulunabilirken, f_1 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alındığında belirlenen süre sınırı içerisinde elde edilebilen çözümler verilmiştir. Dolayısıyla, en iyi çözümü bulabilen test problemleri için elde edilen PC'ler oluşturulmuş; en iyi çözümü bulunamayan büyük boyutlu test problemleri için ise Yaklaşık PC (YPC)'ler elde edilmiştir. Böylelikle, karar verici en uygun kararı verebilecektir.



Şekil 2. P#15_2 test problemi PC (P#15_2 test problem PF)

Tablo 4. P#15_2 test problemi için örnek çözüme ait yatırım planı (Investment plan for the P#15_2 test problem's example solution)

Planlama Dönemi	İstasyon Yeri	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	J			√√																√√					
	K1			7																9					
	K2																			1					
2	J			√																√		√√			
	K1																			5		6			
	K2																				1				
3	J			√	√√															√		√			
	K1			6	13																	7			
	K2			1																					

Örnek olarak, Test Problemi P#15_2 için elde edilen PC örneği Şekil 2’de görülmektedir. İlgili şekildeki 10 tane PEÇ’nin her biri bir yatırım planını temsil etmektedir. Karar verici, yatırım için ayırabileceği bütçeyi ve EA sürücülerinin gideceği talep ağırlıklı toplam mesafeyi göz önüne alarak kendince uygun bir çözümü 10 çözüm arasından seçebilecektir. Şekil 2’de de görüldüğü üzere, talep ağırlıklı toplam mesafe azaldıkça, yani kullanıcıların daha yakın yerdeki istasyonlardan hizmet alması durumunda, toplam yatırım maliyeti (net bugünkü değeri) artmaktadır.

Örneğin, karar vericinin Şekil 2’de kırmızı daire içerisinde yer alan çözümü seçtiği düşünüldüğünde; ilgili yatırım planı Tablo 4’te özetlenmiştir. Tablo 4’teki ilk sütun planlama dönemini, ikinci sütundaki J istasyon yerini, K1 ve K2 sırasıyla yavaş ve hızlı soket türlerinden kaçarak tane kurulacağını göstermektedir. Tablo içindeki “√” işareti mevcut durumda var olan ve/veya kapasite artışı yapılacak olan istasyon yerini, “√√” işareti ise yeni açılacak istasyon yerini göstermektedir.

Tablo 4’te yer alan yatırım planında, dönemler bazında yapılacak yatırım aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- 1. Planlama döneminde potansiyel istasyon yerleri arasında 3. ve 19. yerlerde yeni istasyon kurulacaktır. 3. yerdeki istasyona yedi adet Tip 1 soket; 19. yerdeki istasyona dokuz adet Tip 1 ve bir adet Tip 2 soket kurulacaktır.
- 2. Planlama döneminde, 1. Planlama döneminde kurulan istasyonlar açık kalırken, potansiyel istasyon yerleri arasında 21. yerde yeni istasyon kurulacaktır. 3. yerdeki mevcut istasyona ilave soket kurulumu yapılmazken, 19. yerdeki istasyona ilave beş adet Tip 1 soket; 21. yerdeki istasyona altı adet Tip 1 ve bir adet Tip 2 soket kurulacaktır.

- 3. Planlama döneminde ise, 1. ve 2. Planlama döneminde kurulan istasyonlar açık kalırken, potansiyel istasyon yerleri arasında 4. yerde yeni istasyon kurulacaktır. 19. yerdeki mevcut istasyona ilave soket kurulumu yapılmazken, 3. yerdeki mevcut istasyona ilave altı adet Tip 1 soket ve bir adet Tip 2 soket; 4. yerdeki istasyona 13 adet Tip 1 soket; 21. yerdeki mevcut istasyona ilave yedi adet Tip 1 soket kurulacaktır.

6. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Son yıllarda, dünya genelinde çevreci bakış açısının benimsenmesi ve ülkelerin bu konuda çeşitli adımlar atması EA’lara olan ilgiyi artırmakta, bu ilgi de satış rakamlarına yansımaktadır. Bunun yanı sıra EA’ların sürücülere sağladığı sessiz, konforlu ve ekonomik sürüş deneyimi ile artan ilgi, araştırmacıların da bu alanda ortaya çıkan çeşitli problemler üzerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır. Ülkemiz özelinde şarj altyapısı yeni gelişmekte olup gerçek hayat uygulamalarına yönelik problemleri çözmek için yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, ele alınan ÇAÇD-EAŞİYSBP için birçok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Problem, EA’ların şarj ihtiyacını mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayacak ve EA şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde şarj istasyonlarının hangi dönemde, nerede ve hangi kapasitede istasyon kurulacağı kararını içermektedir. Ele alınan problemin çözümü ile elde edilecek planlar ilgili kurum/firmalar ile paylaşılarak EA şarj istasyonu yatırımcılarının karar vermesinde yönlendirici olacaktır.

Önerilen modelin genel performansı, hesaplamalı deneylerle rassal olarak üretilen 15 farklı test problemi üzerinde incelenmiştir. Üretilen

test problemlerinin çözümü için, çok amaçlı eniyileme yöntemlerinden ÖEY ve AEKY 2 kullanılarak PC elde edilmiştir. PC, karar vericiye amaç fonksiyonlarının farklı düzeyleri için ödünleşim bilgisini sunmaktadır. Örneğin, karar verici PC'ye baktığında, hangi amaç fonksiyonunun eniyi değerinden ne kadar uzaklaştıkça diğer amaç fonksiyonunun eniyi değerine ne kadar yaklaşacağını görebilmektedir. Böylelikle, PC'ler incelenerek uygun çözüm seçilebilmektedir. Küçük boyutlu test problemlerinden P#15 problemleri ortalama 1786.627 saniyede çözülebilmektedir. Büyük boyutlu problemler için, P#60 ve P#75, elde edilen sonuçlar çözüm sınırı olan 86400 saniye sonunda elde edilmiştir. Öte yandan, P#30 ve P#45 problemlerinden bazıları için f_1^{ideal} değerleri bu süre sınırı içinde elde edilememiştir.

Bu çalışmada önerilen model ile yapılan deneysel hesaplama analizi sonucunda, toplam mahalle sayısının 30'dan büyük olduğu problemlerde eniyi çözümlere ulaşmak zorlaşmaktadır. TÜİK 2021 yılı verilerine göre Türkiye'de mahalle sayısı 30 ve altında olan ilçeler yaklaşık olarak toplam ilçelerin %73'ünü oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada önerilen matematiksel model ile ülkemizin bu kapsama giren bölgelerinde ÇAÇD-EAŞİYSBP çözülebilecektir. Öte yandan büyük boyutlu problemlerin çözümü için, ileriki çalışmalarda, metasezgisel algoritmalar geliştirilecektir.

Kaynaklar (References)

1. EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research. Global Greenhouse Gas Emissions Dataset. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg70. Erişim tarihi Aralık 4, 2022.
2. Dönmez S., Koç Ç., Altıparmak F., The mixed fleet vehicle routing problem with partial recharging by multiple chargers: A formulation and an insertion based constructive heuristic, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (1), 1-16, 2024.
3. COP26, COP26 Transport Declaration <https://cop26transportdeclaration.org/en/?contextKey=en>. Erişim tarihi Kasım 16, 2022.
4. U.K. GOV., Politika Raporu, COP26 declaration on accelerating the transition to 100% zero emission cars and vans. <https://www.gov.uk/government/publications/cop26-declaration-zero-emission-cars-and-vans/cop26-declaration-on-accelerating-the-transition-to-100-zero-emission-cars-and-vans>. Güncellenme tarihi Kasım 17, 2022. Erişim tarihi Kasım 16, 2022.
5. U.S. Department of Energy – Energy Efficiency & Renewable Energy, Alternative Fuels Data Center Electric Vehicles. <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric>. Erişim tarihi Eylül 3, 2024.
6. Larminie, J., Lowry, J., Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2012.
7. Güneş D., Tekdemir İ.G., Karaarslan M.Ş., Alboyacı B., Assessment of the impact of electric vehicle charge station loads on reliability indices, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (3), 1073-1084, 2018.
8. Saygın D., Tör O.B., Teimourzadeh S., Koç M., Hildermeier J., Kolokathis C., Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri, SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi, 2019.
9. Deb, S., Tammi, K., Kalita, K., Mahanta, P., Review of recent trends in charging infrastructure planning for electric vehicles, Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 7 (6), 2018.
10. Kizhakkan, A.R., Rathore, A.K., Awasthi, A., Review of Electric Vehicle Charging Station Location Planning, 2019 IEEE Transportation Electrification Conference, Bengaluru-India, 17-19 Aralık, 2019.
11. Kchaou-Boujelben, M., Charging station location problem: A comprehensive review on models and solution approaches Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 132, 2021.
12. Jog, P., Shete, S., Kumawat, R.K., Palwalia, D.K., Electric Vehicle Charging Station Infrastructure: A Review, 6th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, Kedah-Malaysia, 1-3 Aralık, 2021.
13. Kong, C., Jovanovic, R., Bayram, I.S., Devetsikiotis, M., A Hierarchical Optimization Model for a Network of Electric Vehicle Charging Stations, Energies 10 (5), 2017.
14. Lu, F., Hua, G., A location-sizing model for electric vehicle charging station deployment based on queuing theory, International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences, Barcelona, 27-29 Temmuz, 2015.
15. Liu, W., Tang, Y., Yang, F., Dou, Y., Wang, J., A multi-objective decision-making approach for the optimal location of electric vehicle charging facilities, Computers, Materials and Continua 60 (2), 813-834, 2019.
16. Sathaye, N., Kelley, S., An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 59, 15-33, 2013.
17. Zhong, P., Xu, A., Kang, Y., Zhang, S., Zhang, Y., An optimal deployment scheme for extremely fast charging stations, Peer-to-Peer Networking and Applications, 15, 1486-1504, 2022.
18. Lee, C., Han, J., Benders-and-Price approach for electric vehicle charging station location problem under probabilistic travel range, Transportation Research Part B: Methodological, 106, 130-152, 2017.
19. Shom, S., Al Juheshi F., Rayyan A., Alahmad M., Abdul-Hafez M., Shuaib K., Case studies validating algorithm to determine the number of charging station placed in an Interstate and US-Highway, IEEE International Conference on Electro Information Technology, Lincoln-USA, 14-17 Mayıs, 2017.
20. Tamay, P., Inga, E., Charging Infrastructure for Electric Vehicles Considering Their Integration into the Smart Grid, Sustainability, 14 (14), 2022.
21. Quddus, M.A., Shahvari, O., Marufuzzaman, M., Ekşioğlu, S.D., Castillo-Villar, K.K., Designing a reliable electric vehicle charging station expansion under uncertainty, International Journal of Production Economics 236, 2021.
22. Zhang Y., Wang Y., Li F., Wu B., Chiang Y.Y., Zhang X., Efficient Deployment of Electric Vehicle Charging Infrastructure: Simultaneous Optimization of Charging Station Placement and Charging Pile Assignment, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22 (10), 6654-6659, 2021.
23. Micari, S., Polimeni, A., Napoli, G., Andaloro, L., Antonucci, V., Electric vehicle charging infrastructure planning in a road network, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 98-108, 2017.
24. Aghalari, A., Salamah, D.E., Marino, C., Marufuzzaman, M., Electric vehicles fast charger location-routing problem under ambient temperature, Annals of Operations Research, 2021.
25. Kang, N., Feinberg, F.M., Papalambros, P.Y., Integrated decision making in electric vehicle and charging station location network design, Journal of Mechanical Design, 137 (6), 2015.
26. Kchaou Boujelben, M., Gicquel, C., Location of electric vehicle charging stations under uncertainty on the driving range, International Conference on Computational Logistics, Vietri sul Mare-Italy, 475-486, 1-3 Ekim, 2018.
27. Zhang, B., Zhao, M., Hu, X., Location planning of electric vehicle charging station with users' preferences and waiting time: multi-objective bi-level programming model and HNSGA-II algorithm, International Journal of Production Research, 2022.
28. Asna, M., Shareef, H., Muhammad, M.A., Ismail, L., Prasanthi, A., Multi-objective quantum atom search optimization algorithm for electric vehicle charging station planning, International Journal of Energy Research, 2022.
29. Schmidt, M., Zmuda-trzebiatowski, P., Kiciński, M., Sawicki, P., Lasak, K., Multiple-criteria-based electric vehicle charging infrastructure design problem, Energies, 14 (11), 2021.
30. Yazdi, L., Ahadi, R., Rezaee, B., Optimal Electric Vehicle Charging Station Placing with Integration of Renewable Energy, 15th Iran International Industrial Engineering Conference, Yazd-Iran, 47-51, 23-24 Ocak, 2019.
31. Boonraksa, T., Marungsri, B., Optimal Fast Charging Station Location for Public Electric Transportation in Smart Power Distribution Network, International Electrical Engineering Congress, Krabi-Thailand, 7-9 Mart, 2018.
32. Bouguerra, S., Layeb, S.B., Optimal locations determination for an electric vehicle charging infrastructure in the city of tunis, tunisia, Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration, Sousse-Tunisia, 979-981, 20-25 Kasım 2017.
33. Xu, D., Pei, W., Zhang, Q., Optimal Planning of Electric Vehicle Charging Stations Considering User Satisfaction and Charging Convenience, Energies 15 (14), 2022.
34. Bao, Z., Xie, C., Optimal station locations for en-route charging of electric vehicles in congested intercity networks: A new problem

- formulation and exact and approximate partitioning algorithms, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 133, 2021.
35. Hu, D., Zhang, J., Zhang, Q., Optimization design of electric vehicle charging stations based on the forecasting data with service balance consideration, Applied Soft Computing Journal, 75, 215-226, 2019.
36. Tu W., Li Q., Fang Z., Shaw S., Zhou B., Chang Z., Optimizing the locations of electric taxi charging stations: A spatial-temporal demand coverage approach, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 65, 172-189, 2016.
37. Pradhan, S., Ghose, D., Uddin S., Planning and design of suitable sites for electric vehicle charging station- a case study, International Journal of Sustainable Engineering 14 (3), 404-418, 2021.
38. Zhu J., Li Y., Yang J., Li X., Zeng S., Chen Y., Planning of electric vehicle charging station based on queuing theory, 6th International Conference on Renewable Power Generation, Wuhan-Çin, 1867-1871, 19-20 Ekim, 2017.
39. Wei, G., Wei, C., Wu, J., Guo, Y., Probabilistic linguistic multiple attribute group decision making for location planning of electric vehicle charging stations based on the generalized Dice similarity measures, Artificial Intelligence Review, 54, 4137-4167, 2021.
40. Zheng, H., He, X., Li, Y., Peeta, S., Traffic Equilibrium and Charging Facility Locations for Electric Vehicles, Networks and Spatial Economics, 17, 435-457, 2017.
41. Fazeli, S.S., Venkatachalam, S., Chinnam, R.B., Murat, A., Two-Stage Stochastic Choice Modeling Approach for Electric Vehicle Charging Station Network Design in Urban Communities, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22 (5), 3038-3053, 2021.
42. Wang, Z.P., Liu, P., Han, H.B., Lu, C., Xin, T., A distribution model of electric vehicle charging station, Applied Mechanics and Materials, 44-47, 1543-1548, 2010.
43. Han, D., Ahn, Y., Park, S., Yeo, H., Trajectory-interception based method for electric vehicle taxi charging station problem with real taxi data, International Journal of Sustainable Transportation, 10 (8), 671-682, 2016.
44. Jia, J., Liu, C., Wan, T., Planning of the charging station for electric vehicles utilizing cellular signaling data, Sustainability, 11 (3), 2019.
45. Li, X., Jenn, A., An integrated optimization platform for spatial-temporal modeling of electric vehicle charging infrastructure, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 104, 2022.
46. Feng, J., Xu, S.X., Li, M., A novel multi-criteria decision-making method for selecting the site of an electric-vehicle charging station from a sustainable perspective, Sustainable Cities and Society, 65, 2021.
47. Liu J., Peper J., Lin G., Zhou Y., Awasthi S., Li Y., Rehtanz C., A planning strategy considering multiple factors for electric vehicle charging stations along German motorways, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 124, 2021.
48. Liu, X., Bi-level planning method of urban electric vehicle charging station considering multiple demand scenarios and multi-type charging piles, Journal of Energy Storage, 48, 2022.
49. Wang, C., He, F., Lin, X., Shen, Z.J.M., Li, M., Designing locations and capacities for charging stations to support intercity travel of electric vehicles: An expanded network approach, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 102, 210-232, 2019.
50. Bouguerra, S., Bhar Layeb, S., Determining optimal deployment of electric vehicles charging stations: Case of Tunis City, Tunisia, Case Studies on Transport Policy, 7, 628-642, 2019.
51. Kchaou Boujelben, M., Gicquel, C., Efficient solution approaches for locating electric vehicle fast charging stations under driving range uncertainty, Computers and Operations Research, 109, 288-299, 2019.
52. Yazdekhashti, A., Jazi, M.A., Ma, J., Electric vehicle charging station location determination with consideration of routing selection policies and driver's risk preference, Computers and Industrial Engineering, 162, 2021.
53. Huang, Y., Kockelman, K.M., Electric vehicle charging station locations: Elastic demand, station congestion, and network equilibrium, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 78, 2020.
54. Rani, P., Mishra, A.R., Fermatean fuzzy Einstein aggregation operators-based MULTIMOORA method for electric vehicle charging station selection Expert Systems with Applications, 182, 2021.
55. Kinay, Ö.B., Gzara, F., Alumur, S.A., Full cover charging station location problem with routing Transportation Research Part B: Methodological, 144, 1-22, 2021.
56. Kchaou Boujelben, M., Gicquel, C., Locating electric vehicle charging stations under uncertain battery energy status and power consumption, Computers and Industrial Engineering, 149, 2020.
57. Zhang, H., Tang, L., Yang, C., Lan, S., Locating electric vehicle charging stations with service capacity using the improved whale optimization algorithm, Advanced Engineering Informatics, 41, 2019.
58. He, Y., Kockelman, K.M., Perrine, K.A., Optimal locations of U.S. fast charging stations for long-distance trip completion by battery electric vehicles, Journal of Cleaner Production, 214, 452-461, 2019.
59. Fredriksson, H., Dahl, M., Holmgren, J., Optimal placement of charging stations for electric vehicles in large-scale transportation networks, 10th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks, Coimbra-Portugal, 77-84, 4-7 Kasım, 2019.
60. Gavranović H., Barut A., Ertek G., Yüzbaşıoğlu O.B., Pekpostalıcı O., Tombuş Ö., Optimizing the electric charge station network of EŞARJ, 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management, Moscow-Russia, 15-21, 3-5 Haziran, 2014.
61. Kong, W., Luo, Y., Feng, G., Li, K., Peng, H., Optimal location planning method of fast charging station for electric vehicles considering operators, drivers, vehicles, traffic flow and power grid, Energy, 186, 2019.
62. Wang, Y., Shi, J., Wang, R., Liu, Z., Wang, L., Siting and sizing of fast charging stations in highway network with budget constraint, Applied Energy, 228, 1255-1271, 2018.
63. Huang, K., Kanaroglou, P., Zhang, X., The design of electric vehicle charging network, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 49, 1-17, 2016.
64. Yıldız, B., Olcaytu, E., Şen, A., The urban recharging infrastructure design problem with stochastic demands and capacitated charging stations, Transportation Research Part B: Methodological, 119, 22-44, 2019.
65. Chen, Z., Li, C., Chen, X., Yang, Q., Towards optimal planning of EV charging stations under grid constraints IFAC-PapersOnLine, 53, 14103-14108, 2020.
66. MirHassani, S.A., Khaleghi, A., Hooshmand, F., Two-stage stochastic programming model to locate capacitated EV-charging stations in urban areas under demand uncertainty, EURO Journal on Transportation and Logistics, 9, 2020.
67. Li, J., Xie, C., Bao, Z., Optimal en-route charging station locations for electric vehicles: A new modeling perspective and a comparative evaluation of network-based and metanetwork-based approaches, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 142, 2021.
68. T. C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı İstanbul Kalkınma Ajansı. İstanbul İli Elektrikli Araçlar İçin Şarj İstasyonu Kurulumu Ön Fizibilite Raporu. <https://www.istka.org.tr/media/pdf/o5T8CmtWn9CDypaBhIYt9EqEZO Fm8EzPZroD8B4oK9yOyDKD3QTR.pdf>. Yayın tarihi Nisan 21, 2022.
69. T. C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. İlçelerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Sıralaması Araştırması Sege-2017. <https://www.sanayi.gov.tr/merkez-birimi/b94224510b7b/sege/ilce-sege-raporlari>. 2017.
70. Keçeci B., Dengiz O., Dengiz B., Sümer E., Kılıç A., Çeki E., İnan B., Çiçek S., WEEE estimation and determination of collection points: A case for the Municipality of Çankaya, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 24 (4), 692-704, 2018.
71. Arora, R.K., Optimization: algorithms and applications, CRC Press, 2015.
72. Mavrotas, G., Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems, Applied Mathematics and Computation, 213, 455-465, 2009.
73. Mavrotas, G., Florios, K., AUGMECON2: A novel version of the ϵ -constraint method for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems.
74. Parvizi, M., Shadkam, E., Jahani, N., A Hybrid COA/ ϵ -Constraint Method for Solving Multi-Objective Problems, International Journal in Foundations of Computer Science & Technology, 5, 27-40, 2015.
75. Rabbani, M., Mokarrari, K.R., Akbarian-saravi, N., A multi-objective location inventory routing problem with pricing decisions in a sustainable waste management system, Sustainable Cities and Society, 75, 2021.
76. Govindan, K., Nosrati-Abarghoee, S., Nasiri, M.M., Jolai, F., Green reverse logistics network design for medical 25 waste management: A circular economy transition through case approach, Journal of Environmental Management, 322, 2022.