

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ AĞI TASARIMI

HAZIRLAYAN

MELTEM UZUNER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2023

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ AĞI TASARIMI

HAZIRLAYAN

MELTEM UZUNER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. BERNA DENGİZ

ANKARA – 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Meltem Uzuner tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 05 / 01 / 2023

Tez Adı: Elektrikli Araç Şarj Ağı Tasarımı

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Berna Dengiz

Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Esra Karasakal

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Barış Keçeci

Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk Elaldı

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 12 / 01 / 2023

Öğrencinin Adı, Soyadı : Meltem Uzuner

Öğrencinin Numarası : 22010001

Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği

Programı : Endüstri Mühendisliği

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Prof. Dr. Berna Dengiz

Tez Başlığı : Elektrikli Araç Şarj Ağı Tasarımı

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 51 sayfalık kısmına ilişkin, 12 / 01 / 2023 tarihinde şahsım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %5'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Prof. Dr. Berna Dengiz

.....

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kişi ve kuruluşlara içtenlikle teşekkür eder.

Sayın Prof. Dr. Berna DENGİZ'e (tez danışmanı), başta bu süreçte gösterdiği tüm anlayış, sabır ve hoşgörüsü olmak üzere, kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile yürüdüğüm bu yolda bana daima destek olduğu, yoluma ışık tuttuğu ve kendisinden öğrendiğim sayısız şey için,

Sayın Prof. Dr. İmdat KARA'ya, çalışma süresince değerli önerileri ile yol gösterdiği ve probleme farklı bir perspektiften bakabilmem konusundaki desteği için,

Sayın Doç. Dr. Barış KEÇECİ'ye, modelin uzak sunucudaki çözümü sırasında karşılaşılan zorlukların aşılmasındaki değerli yardımları ve sonsuz desteği için,

Sevgili Araş. Gör. Derya NURCAN'a, başta IBM ILOG CPLEX paket programının kullanılma sürecindeki sonsuz desteği olmak üzere, bu süreçteki tüm manevi desteği ve paha biçilemez dostluğu için,

Sevgili Araş. Gör. Esra CAN'a, başta bu süreçteki manevi desteği ve anlayışı olmak üzere, iyi günde ve kötü günde daima yanımda olduğu ve değerli varlığı için,

Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin saygıdeğer tüm hocalarına, araştırma görevlisi arkadaşlarım ve idari personellerine anlayış ve destekleri için,

Benim için ilham kaynağı olan, tanıdığım en güçlü kadınlardan biri olan anneannem Kâmile Güler TEKER'e, bana olan sonsuz güveni, inancı ve manevi desteği için,

Canım ailem, annem Gülten UZUNER, babam Hasan UZUNER ve ablam Dr. Öğr. Üyesi Merve UZUNER ŞAHİN'e, hayatımın her döneminde yanımda olarak, maddi ve manevi destekleri ve daima hissettiğim sonsuz sevgileri ile hayatı değerli kıldıkları için,

Beni dünyanın en şanslı teyzesi yapan biricik yeğenim Masalcık'a, varlığı ile hayatı eşsiz kıldığı ve bana öğrettiği her şey için,

Kendime, onlarca kısıt dahilinde bu çalışmayı tamamlayarak verdiğim sözü tuttuğum için,

Son olarak, Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği (TEHAD) Başkanı Sayın Berkan BAYRAM'a ve E-GARAJ Kurum Eğitmeni Sayın Murat BELEN'e Elektrikli Araçların (EA) çalışma ve şarj prensibi ile ilgili verdikleri değerli bilgiler için,

içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Meltem UZUNER

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ AĞI TASARIMI

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2023

Son yıllarda artan fosil yakıt kullanımı ve buna bağlı olarak atmosfere karışan sera gazlarının sebep olduğu çevre kirliliği, araştırmacılar tarafından dikkatle incelenen ve çözüm aranan önemli bir sorun haline gelmiştir. Çevre kirliliğinde farklı sektörlerin payı bulunmakta olup, bu sektörlerin başında Ulaşım sektörü gelmektedir. Elektrikli Araçlar (EA) çevre dostu özellikleri nedeniyle dünyada benimsenen önemli çözümlerden biridir. Dünyada ve ülkemizde her geçen gün hızla artan EA sayıları, şarj hizmeti sağlayıcıları için mevcut altyapının uygun bir yatırım planı ile kapasitesinin artırılması ve/veya genişletilmesi gerekliliğini gündeme getirmektedir.

Bu nedenle bu tez çalışmasında, EA'ların şarj gereksinimini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayabilecek ve şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde hangi dönemde, nerede şarj istasyonu kapasitesinin ne kadar artırılacağı ve/veya nerede hangi kapasitede yeni istasyon kurulacağı kararının verilmesi problemi, Çok Amaçlı Çok Dönemli Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçim ve Boyutlandırma Problemi (ÇAÇD-EAŞİYSBP), ele alınmıştır. Ele alınan problem ile, mevcut şarj istasyonları da göz önünde bulundurularak; artan yeni talebi karşılayacak şekilde kapasite artışı ve/veya yeni istasyon kurulum kararı verilecektir. Problem için çok amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli (ÇA-KTDPM) geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin performansı, rassal olarak üretilen 25 farklı test problemi üzerinde incelenmiştir. Hesaplamalı analiz sonuçlarına göre, küçük boyutlu test problemlerinin bir kısmı için en iyi çözüm elde edilebilirken, problem boyutu büyüdükçe en iyi çözümlere ulaşmak zorlaşmaktadır.

Geliştirilen modelin çözümü için, Çok Amaçlı Eniyileme (ÇAE) yöntemlerinden Öncelikli Eniyileme Yöntemi (ÖEY) ve Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2 (AEKY 2) kullanılmıştır. ÖEY kullanılarak 86400 saniyelik bir zaman sınırı ile her bir amaç için ideal ve nadir değerler; ardından AEKY 2 kullanılarak ayrı yatırım planlarını temsil eden Pareto Çözümler (PÇ) elde edilmiştir. Böylece, karar vericiye amaç fonksiyonlarının farklı düzeyleri için ödünleşim bilgisi sunulmakta ve uygun yatırım planı kararının verilmesi sağlanmaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Elektrikli Araç, Şarj İstasyonu, Yer Seçim Problemi, Boyutlandırma Problemi, Çok Amaçlı Karma Tamsayı Doğrusal Programlama

ABSTRACT

Meltem UZUNER

ELECTRIC VEHICLE CHARGING NETWORK DESIGN

Başkent University Institute of Science

Department of Industrial Engineering

2023

In recent years, the increasing use of fossil fuels and the environmental pollution caused by greenhouse gases in the atmosphere have become an important problem that has been studied and suggested some solutions by researchers. There are many sectors that cause environmental pollution. The transportation sector is one of the leading sectors that cause environmental pollution. Electric Vehicles (EV) are one of the important solutions adopted in the world due to its environmentally friendly features. The rapidly increasing number of EVs in the world and in our country brings the necessity of increasing and/or expanding the capacity of the existing infrastructure with an appropriate investment plan for charging service providers.

For this reason, in this thesis, the problem of deciding in which period, in where, how much the capacity of the charging station will be increased and/or a new station will be established, in a way that will meet the charging requirement of EVs from as close as possible locations and minimize the cost of installation and operation of the charging station. In our study, this problem was named as the Multi Objective Multi Period Electric Vehicle Charging Station Location and Sizing Problem (MOMP-EVCSLSP). With the problem in question, taking into account the existing charging stations; Capacity increase and/or new station installation decision will be made to meet the increasing new demand. A multi-objective mixed integer linear programming (MOMILP) model has been proposed for the problem. The performance of the developed model was observed with 25 different randomly generated test problems. According to the results of the computational analysis, while the best solution can be

obtained for some of the small-sized test problems when the problem size increases, it becomes more challenging to reach the best solutions.

The Lexicographic Optimization Method (LOM) and Augmented Epsilon Constraint Method 2 (AUGMECON2), two Multi Objective Optimization (MOO) methods, were employed to solve the problem. The LOM was employed to obtain ideal and nadir values for each objective with a time constraint of 86400 seconds. The AUGMECON2 was then employed to get Pareto Solutions (PS). Each one of PS represents an investment plan and give the decision-maker trade-off information for various levels of objective functions, allowing them to choose an appropriate investment plan.

KEYWORDS: Electric Vehicle, Charging Station, Location Problem, Sizing Problem, Multi Objective Mixed Integer Linear Programming

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU YER SEÇİM VE BOYUTLANDIRMA PROBLEMİ.....	6
2.1 Alan Yazındaki EAŞİYSBP ve EAŞİYSBP ile ilgili Çalışmalar	7
2.1.1 Alan Yazında Taramalar	7
2.1.2 Alan Yazında Eniyileme Modeli İçeren Çalışmalar	7
2.1.3 Alan Yazında Eniyileme Modeli İçermeyen Çalışmalar.....	18
2.2 Alan Yazındaki Çalışmaların Değerlendirilmesi ve Özgün Yaklaşım Gerekçeleri	19
3. ÇOK AMAÇLI ÇOK DÖNEMLİ ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU YER SEÇİM VE BOYUTLANDIRMA PROBLEMİ.....	22
3.1 Problem Tanımı	22
3.1.1 Sistemin Gereklilikleri, Yapısı ve İşleyişi.....	22
3.1.2 Sistemde Bilinmesi Gereken Bilgiler/Veriler.....	23
3.2 Geliştirilen Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli.....	28
3.3 Deneyisel Çalışmalar	32
3.3.1. Test problemleri.....	32
3.3.2. Sayısal Değerlendirme.....	33
4. ÇAÇD-EAŞİYSBP İÇİN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI	36
4.1 Deneyisel Çalışmalar ve Sayısal Değerlendirme	37
5. UYGULAMA: YENİMAHALLE ÖRNEĞİ.....	40

5.1	Sistemde Bilinmesi Gereken Bilgiler/Veriler	40
5.2	Sayısal Değerlendirme	44
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	47
	KAYNAKLAR.....	49
EKLER		
	EK 1: EAŞİYSP ve EAŞİYSBP İLE İLGİLİ ALAN YAZINDAKİ ÇALIŞMALAR	
	EK 2: P#15_2 TEST PROBLEMİ ÖRNEK YATIRIM PLANI DETAYLARI	
	EK 3: TEST PROBLEMLERİ İÇİN ELDE EDİLEN PARETO ÇÖZÜMLER	
	EK 4: MARKA ve MODEL GRUBU BAZINDA SATILAN TEA ve FHEA SAYILARI	
	EK 5: ŞARJ İSTASYONU MALİYETLERİ	
	EK 6: YENİMAHALLE PROBLEMİ ÖRNEK YATIRIM PLANI DETAYLARI	

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. EAŞİYSB ve EAŞİYSBP ile ilgili araştırma çalışmaları.....	59
Tablo 3.1. Test problemleri.....	33
Tablo 3.2. Test problemlerine ait ideal ve nadir çözüm değerleri ve süreleri.....	34
Tablo 4.1. P#15_2 için AEKY 2 ile elde edilen amaç fonksiyonu değerleri.....	37
Tablo 4.2. P#15_2 test problemi için örnek çözüme ait yatırım planı.....	64
Tablo 5.1. İncelenen alandaki mahalleler ve koordinat bilgileri.....	40
Tablo 5.2. İncelenen alandaki aday ve mevcut istasyon yerleri ve koordinat bilgileri.....	41
Tablo 5.3. İncelenen alandaki mevcut istasyon bilgileri.....	42
Tablo 5.4. Türkiye’de 2015-2021 yılları arasında marka ve model grubu bazında satılan TEA sayıları.....	70
Tablo 5.5. Türkiye’de 2015-2021 yılları arasında marka ve model grubu bazında satılan FHEA sayıları.....	71
Tablo 5.6. Ticari şarj istasyonu yaklaşık birim maliyetleri.....	72
Tablo 5.7. Yenimahalle problemine ait ideal ve nadir çözüm değerleri ve süreleri.....	44
Tablo 5.8. Yenimahalle problemi için AEKY 2 ile elde edilen amaç fonksiyonu değerleri.....	45
Tablo 5.9. Yenimahalle problemi seçilen nokta için örnek yatırım planı.....	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Dünya geneli 1970-2020 sektör bazında yıllık sera gazı emisyonu.....	1
Şekil 1.2. Orta büyüme senaryosunda Türkiye’deki tahmini FHEA ve TEA sayıları.....	3
Şekil 4.1. P#15_2 test problemi PEÇ’ler.....	38
Şekil 4.2. P#15_1 test problemi PEÇ’ler.....	65
Şekil 4.3. P#15_3 test problemi PEÇ’ler.....	65
Şekil 4.4. P#15_4 test problemi PEÇ’ler.....	65
Şekil 4.5. P#15_5 test problemi PEÇ’ler.....	66
Şekil 4.6. P#30_1 test problemi PEÇ’ler.....	66
Şekil 4.7. P#30_4 test problemi PEÇ’ler.....	66
Şekil 4.8. P#45_3 test problemi YPEÇ’ler.....	67
Şekil 4.9. P#45_5 test problemi YPEÇ’ler.....	67
Şekil 4.10. P#60_1 test problemi YPEÇ’ler.....	67
Şekil 4.11. P#60_2 test problemi YPEÇ’ler.....	68
Şekil 4.12. P#60_5 test problemi YPEÇ’ler.....	68
Şekil 4.13. P#75_1 test problemi YPEÇ’ler.....	68
Şekil 4.14. P#75_2 test problemi YPEÇ’ler.....	69
Şekil 4.15. P#75_3 test problemi YPEÇ’ler.....	69
Şekil 4.16. P#75_4 test problemi YPEÇ’ler.....	69
Şekil 5.1. İncelenen alandaki mahalleler, aday ve mevcut istasyon yerleri	41
Şekil 5.2. İncelenen alandaki PEÇ’ler.....	45
Şekil 5.3. Yenimahalle problemi için genişleme planı.....	46

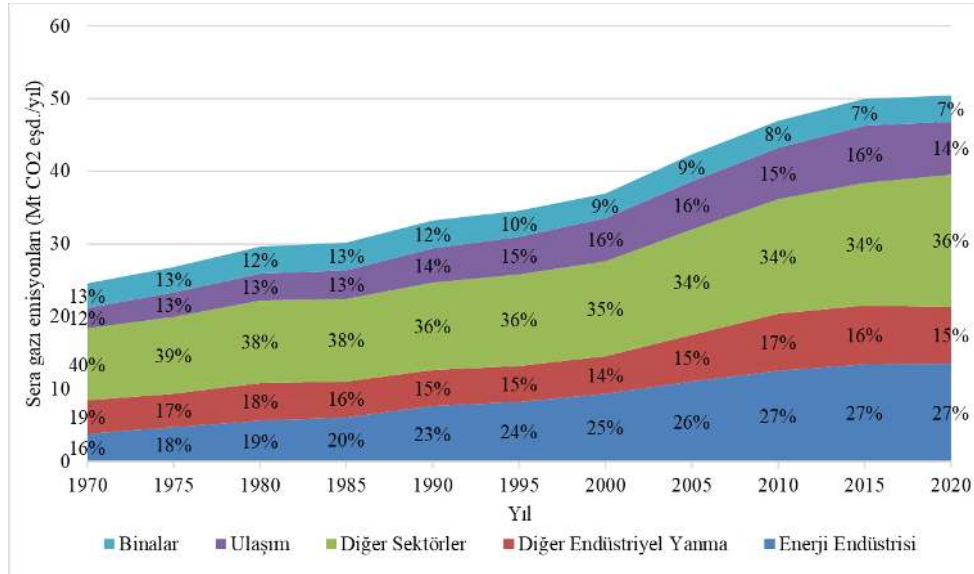
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AC	Alternatif akım
AEKY	Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi
AEKY 2	Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2
ÇA-KTDPM	Çok Amaçlı Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli
ÇAÇD-EAŞİYSBP	Çok amaçlı çok dönemli elektrikli araç şarj istasyonu yer seçim ve boyutlandırma problemi
DC	Doğru akım
EA	Elektrikli araç
EAŞİYSBP	Elektrikli araç şarj istasyonu yer seçim ve boyutlandırma problemi
EAŞİYSP	Elektrikli araç şarj istasyonu yer seçim problemi
EKY	Epsilon Kısıt Yöntemi
EPDK	T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FHEA	Fişli hibrit elektrikli araç
HEA	Hibrit elektrikli araç
ÖEY	Öncelikli Eniyileme Yöntemi
PC	Pareto Cephesi
PÇ	Pareto Çözüm
PEÇ	Pareto Eniyi Çözüm
TEA	Tam elektrikli araç
TEHAD	Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TSYP	Tesis Yer Seçim Problemi
YPC	Yaklaşık Pareto Cephesi
YPEÇ	Yaklaşık Pareto Eniyi Çözüm

1. GİRİŞ

Dünyanın karşı karşıya olduğu en ciddi sorunlardan biri olan çevre kirliliği, “yer/atmosfer sisteminin fiziksel ve biyolojik bileşenlerinin, çevresel süreçleri olumsuz yönde etkileyecek kadar kirlenmesi” olarak tanımlanmakta olup, kaynakların yenilenme kapasitelerinden daha yüksek oranda kullanılması sonucunda söz konusu olmaktadır [1].

İnsanlık tarihinin önemli dönüm noktalarından biri olarak kabul edilen Sanayi Devrimi’nin ardından çevre kirliliğinde büyük oranda artış yaşanmıştır. Bu artış, kas gücünün yerini zamanla makine gücünün alması ve böylelikle enerjiye olan bağımlılığın artması ile de ivmelenmiştir. Artan bağımlılık, endüstriyel alanda geniş kullanım alanına sahip olan fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz vb.) tüketiminin artmasını da beraberinde getirmiştir. Fosil yakıtların yanması sonucunda atmosfere aralarında başlıca ‘sera gazı’ olarak bilinen karbondioksitin de bulunduğu çeşitli gazlar karışmaktadır. Dünya genelinde 1970-2020 yılları arasında sektör bazında CO₂ (yalnızca fosil), CH₄, N₂O ve F gazlarını içeren yıllık sera gazı emisyonundaki hesaplanan değişim Şekil 1.1’de görülmektedir [2].



Şekil 1.1. Dünya geneli 1970-2020 sektör bazında yıllık sera gazı emisyonu

Gelinen noktada, hava kirliliğinin insana ve çevreye verdiği zararlar önemli boyutlara ulaşmıştır. Ülkeler, çevre konusundaki hassasiyetin artması ile temiz ve sürdürülebilir bir gelecek kaygısı ile çeşitli adımlar atmaktadır. 2015 yılında imzalanan ve ülkelerin, iklim krizinin önüne geçmek amacıyla ortak hareket etmeleri gerektiğini kabul ettikleri uluslararası

bir anlaşma olan Paris Anlaşması bu adımlardandır. Bu anlaşma ile ülkeler, iklim değişikliği ile mücadele bağlamında çeşitli konularda taahhütler (emisyon azaltımı, teknoloji geliştirme vb.) vermişlerdir. Bu taahhütler arasında, fosil yakıtların yenilenebilir enerji kaynaklarıyla değiştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması, ulaşım vb. sektörlerin elektrikleştirilmesi yer almaktadır.

Şekil 1.1'e bakıldığında, 2020 yılında dünya genelindeki yıllık sera gazı emisyonunun yaklaşık %14'üne ulaşım sektörünün neden olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, ülkeler tarafından verilen öncelikli taahhütlerden biri de 'ulaşım sektörünün elektrikleştirilmesi' olmuştur. Örneğin, Resmî Gazete'de yayınlanan "Ulaşım Enerji Verimliliğinin Artırılmasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmelik" ile ülkemizdeki araçlarda aralarında elektriğin de bulunduğu çevreci alternatif yakıt kullanımının teşvik edilmesi amaçlanmaktadır.

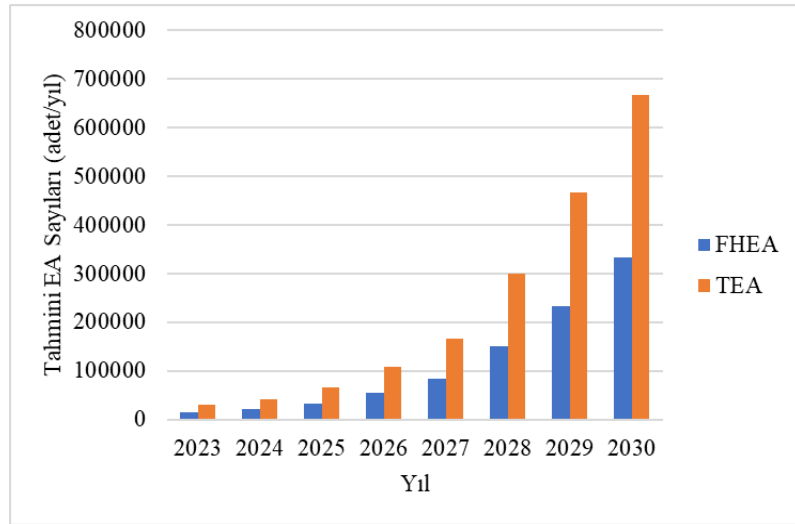
Elektrikli araçlar (EA), çevre (hava, gürültü vb.) kirliliği, petrol bağımlılığı, karbon salınımı azaltımı gibi çevre dostu özellikleri nedeniyle giderek daha çekici bir hale gelmektedir. Bu doğrultuda, EA'ların tasarımı, üretimi ve pazara sunulması konularındaki faaliyetlerin yayılma hızının arttığı söylenebilir. EA, bir bataryadan elektrik çeken ve şarj edilebilen bir elektrik motoruyla çalıştırılabilen bir araç olarak tanımlanabilir [3]. Temel olarak, bu araçlarda tek tahrik mekanizması olarak yalnızca içten yanmalı motor yerine, bu motoru değiştirmek veya geliştirmek için bir elektrikli tahrik sistemi kullanılmaktadır [4]. Genel olarak üç tür EA olduğu ve bunların sırası ile Hibrit, Fişli Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar olduğu söylenebilir. Bu araçlarla ilgili detaylı bilgiler aşağıda yer almaktadır;

Hibrit Elektrikli Araç (HEA) içerisinde hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru bulunmaktadır [4]. Bu araçlarda bulunan batarya, şebeke elektriği yerine içten yanmalı motor tarafından üretilen güçle desteklenen rejeneratif (geri kazanımlı) frenleme ile şarj edilmektedir [5]. Fişli Hibrit Elektrikli Araç (FHEA) içerisinde hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru bulunmaktadır. Genel olarak HEA'lara kıyasla daha büyük bir batarya ile donatılmış olup, bu batarya şebeke elektriği ile de şarj edilebilmektedir [4]. Tam Elektrikli Araç (TEA) içerisinde ise yalnızca elektrik motoru bulunmaktadır [5]. Genel olarak FHEA'lar gibi daha büyük bir batarya ile donatılmış olup, bu batarya şebeke elektriği ile şarj edilebilmektedir.

Sürücüler gereksinimlerine ve kullanım tercihlerine yönelik olarak, istedikleri teknolojiye sahip EA'yı seçebilirler. Çevre dostu bakış açısının yanı sıra, sürücülere sağlanan esneklik ile dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de EA'lar yaygınlaşmaktadır. Öte yandan, sürücüler açısından EA'ların benimsenmesini engelleyebilecek bazı faktörler (araç boyutu, şarj süresi,

sınırlı menzil ve şarj altyapısı) bulunmaktadır [4]. Bu faktörlerin başında gelen menzil, bataryanın yeniden şarj edilmesi gerekmeden önce aracın kat edebileceği mesafeyi ifade etmektedir. Firmalar, EA’ların tasarımını gerçekleştirirken bu değeri artırmak için çabalasa da “sınırlı menzil” ve “şarj altyapısı” faktörleri sürücüler için hâlâ kaygı kaynağıdır.

Uzmanlar, EA’larda daha fazla menzil elde edebilmek için batarya kapasitesinin artırılması gerektiğini, fakat bunun araca ek ağırlık yüklemek olduğunu ve bu iki değer artmasının, aracın enerji verimliliğini düşüreceğini ve aracın maliyetini önemli ölçüde artıracakını dile getirmektedir. Bununla birlikte, uzmanlara göre menzilin artırılması yerine, şarj süresinin makul değerlere indirilmesi ve şarj altyapısına odaklanılması yerinde olacaktır [6]. Yerli araç olan TOGG’un 2023 yılının ilk çeyreğinde satışına başlanacağı bilgisi de göz önünde bulundurulduğunda, ülkemizde mevcut şarj altyapısına daha fazla yüklenme olacaktır [7]. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından hazırlanan “Türkiye ulaştırma sektörünün dönüşümü: Elektrikli araçların Türkiye dağıtım şebekesine etkileri” isimli raporda iki farklı senaryo (Yüksek Büyüme ve Orta Büyüme) altında Türkiye’deki FHEA ve TEA satışları tahmin edilmiştir [8]. İlgili çalışmadaki tahminlerden yola çıkılarak; ele alınan Orta Büyüme senaryosu için hesaplanan Türkiye’deki tahmini FHEA ve TEA sayıları Şekil 1.2’de yer almaktadır.



Şekil 1.2. Orta büyüme senaryosunda Türkiye’deki tahmini FHEA ve TEA sayıları

Mevcut EA’lara ek olarak; bahsedilen tüm bu bilgiler göz önünde bulundurulduğunda ülkemizde mevcut şarj altyapısına daha fazla yüklenme olacak ve şarj gereksinimi artacaktır. Bu değerlendirmeler sonucunda EA’ların benimsenmesi ve EA sürücülerinin kesintisiz bir

şekilde seyahat edebilmesi için en önemli adımlardan birisi ülke genelinde yeterli şarj istasyonu altyapısı planlamasının yapılmasıdır.

Türkiye’de EA, son yıllarda hükümet politikaları ile kanuni altyapısı oluşturulan ve dünyada da olduğu gibi her geçen gün daha da fazla talep gören bir teknoloji haline gelmiştir. EA şarj cihazı ve şarj cihazlarını bünyesinde bulunduran istasyonların kurulması, şarj ağı ve şarj ağına bağlı şarj istasyonlarının işletilmesi ile şarj hizmetinin sunulmasına ilişkin hususların belirlendiği Şarj Hizmeti Yönetmeliği Taslağı T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından hazırlanmış olup, kamuoyunun görüş ve değerlendirmelerinin alınmasının ardından, son hali verilerek 02.04.2022 tarihli ve 31797 sayılı Resmî Gazete’de yayınlanmıştır. Yasal altyapı ile çerçevesi çizilen bu hizmetin yaygınlaşması ile şarj hizmeti sağlayıcı firmaların yaptığı yatırımlar ivmelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, EA’ların şarj gereksinimini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayabilecek ve şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde hangi dönemde, nerede şarj istasyonu kapasitesinin ne kadar artırılacağı ve/veya nerede hangi kapasitede yeni istasyon kurulacağı kararının verilmesi problemi, Çok Amaçlı Çok Dönemli Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçim ve Boyutlandırma Problemi (ÇAÇD-EAŞİYSBP) ele alınmıştır.

Alan yazın incelendiğinde, dünya genelinde bu konuda yapılan çok sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Ancak, ilgili çalışmalarda ele alınan şarj taleplerinin, ele alınma biçimlerinin gerçek hayata uyum sağlayamadığı fark edilmiştir. Bu tez çalışması, farklı araç marka ve modellerinin, EA’nın ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasitelerinin, farklı tiplerdeki şarj hizmeti taleplerinin aynı anda dikkate alındığı ilk çalışmadır.

Tez çalışması için öncelikle EA’lara ilişkin araştırmalar yapılmış ve EA’lar, şarj istasyonlarının kurulumu ve şarj sürecini daha iyi anlayabilmek için Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği (TEHAD), SHARZ.NET ve Türkiye’nin ilk E-mobilite merkezi olarak bilinen E-GARAJ ile çeşitli görüşmeler yapılmıştır. Bu görüşmelerdeki temel amaç, EA teknolojisine farklı konumlardan ve perspektiflerden bakan kuruluşlar/firmalar ile bir araya gelerek, EA’ların çalışma prensibi ve şarj sürecinin işleyişi hakkında bilgi toplamak ve bu bilgileri modele yansıtılabilmektir. Geliştirilen matematiksel model için, problem tanımına ek olarak alan yazındaki Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçim Problemi (EAŞİYSP)’nin ve Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçim ve Boyutlandırma Problemi (EAŞİYSBP)’nin farklı ülkelerde, değişik amaç ve kısıtları dikkate alınarak modellendiği çalışmaların incelenmesinin önemli olacağı düşünülmüştür.

Bu tez çalışmasının sonunda, önerilen model ile hangi dönemde, nerede şarj istasyonu kapasitesinin ne kadar artırılacağı ve/veya nerede hangi kapasitede yeni istasyon kurulacağı kararı verilecektir.

Tezin izleyen bölümleri şu şekilde organize edilmiştir.

İkinci bölümde, EAŞİYSP ve EAŞİYSBP üzerinde durulmuş olup, alan yazında yer alan ilgili çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde, dikkate alınan ÇAÇD-EAŞİYSBP için problem tanımı yapılarak, probleme ilişkin geliştirilen yeni Çok Amaçlı Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli (ÇA-KTDPM) sunulmuştur. Dördüncü bölümde, önerilen model üretilen test problemleri, beşinci bölümde ise pilot bölge olarak seçilen Yenimahalle’de bir alan için oluşturulan problem için çözdürülmüştür. Tezin son bölümü olan altıncı bölümde, yapılan çalışmalar özetlenmiş, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek araştırma önerileri belirtilmiştir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU YER SEÇİM VE BOYUTLANDIRMA PROBLEMİ

EAŞİYSBP, genel olarak belirli bir alanda bulunan, şebeke elektriği ile şarj edilebilen bir bataryaya sahip olan araçların taleplerini belirlenen amaç(lar) doğrultusunda karşılayabilmek için şarj istasyonu kurulacak yer(ler)in ve her bir yere kurulacak şarj cihazı (soket) sayılarının belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Bu problemde amaç(lar), planlama ufku boyunca dikkate alınan kısıtlara göre belirlenen bir kriterin en küçüklenmesi ve/veya en büyüklenmesi olabilir.

Alan yazında EAŞİYSP ve EAŞİYSBP olmak üzere iki ana problem grubu bulunmaktadır. EAŞİYSP’de şarj istasyonu kurulacak yerler belirlenirken; EAŞİYSBP’de belirlenen yerlerdeki şarj istasyonlarının kapasitesi de belirlenmektedir. Bu çalışmada ele alınan ÇAÇD-EAŞİYSBP, EA’ların şarj gereksinimini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayabilecek ve şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde hangi dönemde, nerede şarj istasyonu kapasitesinin ne kadar artırılacağı ve/veya nerede hangi kapasitede yeni istasyon kurulacağı kararının verilmesi şeklinde özetlenebilir.

Ele alınan problem, alan yazında Tesis Yer Seçim Problemi (TYSP) kategorisi altında incelenebilen bir problem türüdür. TYSP, bazı kısıtlara göre bir dizi talebin (müşteri) karşılanma maliyetinin en küçüklenmesi için bir dizi tesisin (kaynak) yerlerinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır [9]. Tesis yer seçim kararları gerek kamu sektörü gerekse özel sektör için stratejik kararlar olup, süreç içerisinde alınacak çok sayıda kararı etkilemektedir. Bu nedenle, doğru bir yatırım planı hayati önem taşımaktadır.

Son yıllarda, dünya genelinde benimsenen çevreci bakış açısı ve ülkeler tarafından atılan adımlar, EA’lara olan ilgiyi artırmakta, bu ilgi de satış rakamlarına yansımaktadır [10]. Bunun yanı sıra EA’ların sürücülere sağladığı sessiz, konforlu ve ekonomik sürüş deneyimi ile artan ilgi, araştırmacıların da bu alanda ortaya çıkan problemler üzerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır.

Ülkemiz özelinde şarj altyapısı yeni gelişmekte olup gerçek hayat uygulamalarına yönelik problemleri çözmek için yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bölümde öncelikle alan yazında EAŞİYSP ve EAŞİYSBP ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Ardından, mevcut çalışmalar değerlendirilerek tezde ele alınan özgün yaklaşımın gerekçeleri sunulmuştur.

2.1 Alan Yazındaki EAŞİYSP ve EAŞİYSBP ile ilgili Çalışmalar

Zaman içerisinde EA'lara olan ilginin artması ile, şarj istasyonları ile ilgili yapılan çalışmaların sayısı artmıştır. Alan yazın incelendiğinde, EAŞİYSP ve EAŞİYSBP için çalışmalarda kullanılan yöntemler ve dikkate alınan özelliklerin farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu özellikler arasında, araçların ele alınma şekli (Bireysel/Toplu), verilen karar (Yer seçimi ve/veya Kapasite) vb. yer almaktadır. Konu ile ilgili olan alan yazındaki araştırma çalışmaları EK 1'deki Tablo 2.1'de verilmiş olup, ilerleyen bölümlerde de detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

2.1.1 Alan Yazında Taramalar

Deb et al. [11], şarj istasyonu altyapısı planlamasına ilişkin farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarını ele almıştır. İlgili çalışmalardaki çeşitli katkılar, problem formülasyonları ve algoritmalar incelenmiş olup, gelecekteki olası çalışma yönleri sunulmuştur.

Kizhakkan et al. [12], şarj istasyonu yerleşim planlamasında dikkate alınan önemli parametrelere, uygunluğuna ve tuzaklarına odaklanmıştır.

Boujelben [13], şarj istasyonu yer seçiminin modellenmesinde, çözülmesinde ve gerçek hayat uygulamalarında önerilen yaklaşımlar için alan yazını incelemiştir. Alan yazın, aralarında talep temsilinin, model yapısının, problem parametrelerindeki zamana bağımlılığın ve belirsizliğin bulunduğu çeşitli perspektiflerden analiz edilmiştir.

Jog et al. [14], 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 sunmuştur.

2.1.2 Alan Yazında Eniyileme Modeli İçeren Çalışmalar

Sathaye and Kelley [15], talep belirsizliği altında FHEA ve TEA'lar için otoyoldaki şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için bir yaklaşım sunmuşlardır. Yaklaşım içerisindeki model, şarj talebinden şarj istasyonlarına olan toplam mesafeyi enküçükleme amaçlıdır. Modeli çözmek için bir Kök Bulma Yöntemi kullanılmıştır. Bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, model incelendiğinde marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Öte yandan, farklı tip ve/veya kapasitelerde şarj hizmeti veren soketler dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Texas Üçgeni olarak bilinen ve eyaletin en büyük 5 şehrinden oluşan bölgede uygulanmıştır.

Gavranović et al. [16], firma yöneticilerinin yer tercihleri ve kapasite endişelerini göz önünde bulundurarak, Türkiye’de şarj hizmeti veren bir firmaya ait şarj istasyonlarının yer seçimi için CPLEX ile çözülen bir Kapasiteli P-Medyan Yer Seçim Modelini benimsemiştir. Model, ilçenin talebinin atandığı yere kadar katedilen mesafe ile çarpımının, o yer için tercih puanına bölünmesi ile hesaplanan toplam maliyeti enküçüklemetedir. Araçlar toplu olarak ele alınmıştır. Önerilen metodoloji, İstanbul’da uygulanmıştır.

Lu and Hua [17], kuyruk teorisine dayalı olarak şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için yeni bir model geliştirmiştir. Model kapsanan toplam akışı enbüyüklemektedir. Şarj istasyonlarının yer seçimi için Genetik Algoritma, şarj cihazlarının tahsis edilmesi için Açgözlü-Ekleme Sezgisel Algoritması kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmıştır. İstasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, alan yazında Kuby and Lim [18] tarafından kullanılan 25 düğümlü bir test ağında uygulanmıştır.

Kang et al. [19], işbirlikçi bir iş modelinin karlılığını değerlendirmek için entegre bir karar verme çerçevesi önermiştir. Pazarlama, mühendislik ve işletme konularını birleştiren çok disiplinli bir modeli kullanılmış olup, hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi için Akış Yakalama Konum Modeli ele alınmıştır. Modeli çözmek için Genetik Algoritma kullanılmıştır. Model, kapsanan toplam akışı enbüyüklemektedir. Araçlar toplu olarak ele alınmıştır. Önerilen metodoloji, Michigan’ın güneydoğusunda uygulanmıştır.

Huang et al. [20], hem hızlı hem de yavaş şarj istasyonlarının yer seçimi için CPLEX ile çözülen iki ayrı model önermiştir. Her iki model de şarj istasyonlarının toplam maliyetini enküçüklemetedir. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, model incelendiğinde marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Öte yandan, farklı tip ve/veya kapasitelerde şarj hizmeti veren soketler dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Büyük Toronto ve Hamilton Alanı’nda ve Toronto şehir merkezinde uygulanmıştır.

Tu et al. [21], elektrikli taksi örneği ile, şarj istasyonlarının yer seçimi için Genetik Algoritma ile çözülen bir mekansal-zamansal talep kapsama modeli geliştirmiştir. Model, elektrikli taksinin hizmet seviyesini ve şarj hizmet seviyesini enbüyüklemektedir. Bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar bireysel olarak ele alınmış olup, model incelendiğinde marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, Shenzen’de uygulanmıştır.

Han et al. [22], şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için geliştirilen metodoloji kapsamında Evrimsel Algoritmaya dayalı olarak geliştirilen bir algoritma ile

özlen bir model önermiştir. Model, sabit tesis maliyeti, istasyona erişim maliyeti, işletim maliyeti ve şarj gecikme maliyetinden oluşan toplam maliyeti enküçüklemektedir. Araçlar bireysel olarak ele alınmıştır. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Daejeon’da uygulanmıştır.

Kong et al. [23], trafik ve hizmet ağıını göz önünde bulundurarak; hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için üç katmanlı bir sistem modeli önermiştir. Birinci katmanda, Akış Yakalama Konum Modeli ile şarj istasyonlarının yerleri belirlenirken, ikinci katmanda, sunulan bir ereve ile şarj cihazları tahsis edilmiştir. nc ve son katmanda ise kârı enbüyüklemek için bir istasyon politikası geliştirilmiştir. Katmandaki modeller sırasıyla kapsanan akışı enbüyüklemekte, müşteri blokajını enkklemekte ve sistem krını enbüyüklemektedir. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, model incelendiğinde marka ve model ayrımı yapılmadığı grlmştir. Öte yandan, farklı tip ve/veya kapasitelerde şarj hizmeti veren soketler dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Arizona, Raleigh ve Kuzey Dakota’da uygulanmıştır.

Lee and Han [24], seyahat menziline olasıklı bir değerlendirmesi ile, şarj istasyonlarının yer seçimi için karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirmişlerdir. Model, kapsanan beklenen talebi enbüyüklemektedir. Modeli zmek için Benders-Fiyat Algoritması geliştirilmiştir. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı grlmştir. Önerilen metodoloji, alan yazında yaygın olarak kullanılan [18], [25]–[27] 25 düğümlü bir test ağıında ve Texas’taki bir otoyol ağıında uygulanmıştır.

Zhu et al. [28], şarj istasyonu yer seçimi ve boyutlandırılması için elektrikli araçların şarj gereksinimi, ekonomisini ve elektrik şebekesi güvenliğini dikkate alan ve bir Genetik Algoritma ile üzülen bir model önermiştir. şarj istasyonlarının yerleri trafik memnuniyetine göre belirlenirken; şarj istasyonlarının kapasiteleri en küçük toplam maliyet sağlanacak şekilde belirlenir. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı grlmştir. Önerilen metodoloji, 24 düğümlü yeraltı dağıtım ağı ve 25 düğümlü bir trafik ağı üzerinde uygulanmıştır.

Zheng et al. [29], elektrikli araçların trafik dengesi ve şarj istasyonlarının yer seçimi için CPLEX ile üzülen bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Araçlar

toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, Sioux-Falls test ağı üzerinde uygulanmıştır.

Wang et al. [30], bütçe kısıtını ve hizmet kapasitesini göz önünde bulundurarak bir otoyol ağına FHEA ve TEA için hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Model, kapsanan akışı enbüyüklemektedir. Modeli çözmek için genetik algoritma, sezgisel algoritma ve her ikisinin birleşiminden oluşan bir algoritma kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, Hebei'de uygulanmıştır.

Boujelben and Gicquel [31], belirsiz sürüş menzili altında şarj istasyonlarının konumlandırılması için yeni bir karma tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Model, kapsanan beklenen araç seyahatlerini enbüyüklemektedir. Modeli çözmek için önerilen Tabu Arama Sezgiseli kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, yazarlar tarafından rassal olarak üretilen farklı yol ağlarında uygulanmıştır.

Bouguerra and Layeb [32], şarj istasyonlarının yer seçimi için CPLEX ile çözülen iki tane tamsayılı doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Modeller sırası ile kurulan toplam istasyon sayısını ve toplam istasyon kurulum maliyetini enküçüklemektedir. Önerilen metodoloji, Tunus'ta uygulanmıştır.

Wang et al. [33], sabit bir bütçe kısıtlaması altında uzun mesafeli seyahatlerin desteklenebilmesi amacıyla şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için bir tasarım modeli önermiştir. Model, aralarında seyahat süresi, şarj süresi, kuyruk süresi ve seyahat süresine ilişkin maliyetlerin bulunduğu toplam maliyeti enküçüklemektedir. Modeli çözmek için Özelleştirilen bir Komşu Arama Algoritması kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, küçük bir test ağı ve Yangtze Nehri Deltası'ndan elde edilen bir otoyol ağı üzerinde uygulanmıştır.

Bouguerra and Layeb [34], araç sürücülerinin rahatlığını göz önünde bulundurarak şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için CPLEX ile çözülen ağırlıklı küme kapsama modeline dayalı beş farklı tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Modeller sırası

ile kurulan toplam istasyon sayısını, toplam istasyon açılma maliyetlerini, altyapı açılış maliyetlerini ve şarj cihazı kurulum maliyetlerini, toplam ağırlıklı maliyetleri ve inşaat maliyetlerinin de dahil olduğu toplam ağırlıklı maliyetleri en küçükleme. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, Tunus şehir merkezinde uygulanmıştır.

Boujelben and Gicquel [35], sürüş menzili belirsizliği altında hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi problemi için iki tane stokastik tabanlı model önermişlerdir. Büyük boyutlu örneklerin çözümünde karşılaşılan hesaplama zorluklarının üstesinden gelebilmek için CPLEX ile çözülen bir karma tamsayılı programlama modeli ve tabu arama sezgiseli önerilmiştir. Her iki model de kapsanan akışı enbüyüklemektedir. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, yazarlar tarafından rassal olarak üretilen farklı ağlarda ve alan yazında Yıldız et al. [27] tarafından kullanılan Kaliforniya ve Kuby et al. [36] tarafından kullanılan Florida ağlarında uygulanmıştır.

Zhang et al. [37], hizmet riskini dikkate alarak şarj istasyonlarının yer seçimi için geliştirilen modeli çözmek için İyileştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritması kullanmıştır. Model, aralarında sabit maliyet, değişken maliyet, işletme maliyeti ve hat kaybı maliyetinin bulunduğu toplam maliyeti en küçükleme. Araçlar bireysel olarak ele alınmıştır. İstasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, seçilen bir planlama alanında uygulanmıştır.

He et al. [38], hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi için bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Tamamlanan uzun mesafe yolculuklarının sayısını veya payını enbüyükleyen modeli çözmek için Dal ve Sınır Algoritması kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, Amerika Birleşik Devletleri eyaletler arası otoyol sistemine dayalı olarak tanımlanan ağ üzerinde uygulanmıştır.

Fredriksson et al. [39], 'Rota Düğüm Kapsama' olarak adlandırılan, bir ulaşım ağında en olası rotaların kapsanma durumunu göz önünde bulundurarak; gerekli olan en az şarj istasyonu sayısının bulunması ve şarj istasyonlarının yer seçimi problemini formüle ederek, bu problemi çözmek için önerdikleri yinelemeli bir yaklaşım yöntemini kullanmıştır. Önerilen metodoloji, Sioux-Falls test ağı ve Güney İsveç ulaşım ağında uygulanmıştır.

Kong et al. [40], operatörleri, sürücüleri, araçları, trafik akışını ve elektrik şebekesini göz önünde bulundurarak, hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için iki katmanlı mimariye sahip bir planlama yöntemi önermiştir. Üst katmanda kurulan İnşaat Maliyet Modeli arazi, şarj altyapısı ve yardımcı altyapı maliyetinden oluşan toplam maliyetini enküçüklerken; Alt katmanda kurulan İşletme Maliyet Modeli, toplam şarj maliyetini enküçükler. Modelleri çözmek için aralarında Yinelemeli Optimizasyon Algoritması ve Bölgesel Dikotomi Yöntemi'nin de yer aldığı çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır. Araçlar bireysel olarak ele alınmıştır. İstasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, Pekin şehir merkezindeki 3. Çevre yolunda uygulanmıştır.

Yıldız et al. [41], şarj istasyonlarının kapasitesini ve talep belirsizliğini dikkate alarak; hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için iki tane karma tamsayılı doğrusal programlama formülasyonu önermiştir. Her iki model de şarj istasyonu ve şarj cihazlarının kurulumunu içeren toplam altyapı maliyetini enküçüklemeaktadır. Büyük boyutlu örneklerin çözümünde karşılaşılan hesaplama zorluklarının üstesinden gelebilmek için Dal ve Kesme Algoritması önerilmiştir. 24 saatlik bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, Chicago'da uygulanmıştır.

Liu et al. [42], sürücü talebi, yatırım maliyeti, toprak konumları, acil durum şarj kilometre sınırı, gerçek yol durumu ve hizmet ağı güvenilirliği gibi çeşitli faktörleri göz önünde bulundurarak; hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için Genetik Algoritma ile çözülen çok amaçlı bir model geliştirmiştir. Model, yatırım maliyetini ve sürücü şarj maliyetini enküçüklemeaktadır. Araçlar toplu olarak ele alınmıştır. İstasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, yazarlar tarafından tasarlanan bir ağda uygulanmıştır.

Yazdi et al. [43], fotovoltaiik paneller ile şarj noktalarının bütçe kısıtlaması ve müşterek kapsamasının göz önünde bulundurulduğu şebeke arasındaki sinerji içerisinde; elektrikli şarj istasyonlarının yer seçimi için CPLEX ile çözülen, karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. 12 aylık bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmıştır. Önerilen metodoloji, Meşhed'de uygulanmıştır.

Hu et al. [44], şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için bir model geliştirmiştir. Model, kapsanan toplam elektrikli araç miktarını enbüyüklemektedir. Modeli çözmek için Genetik Algoritma ve İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasını birleştiren hibrit bir sezgisel algoritma önerilmiştir. Araçlar toplu olarak ele alınmıştır. İstasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, Cixi’de uygulanmıştır.

Jia et al. [45], şarj istasyonu yer seçimi için iki aşamalı bir model geliştirmiştir. İlk aşamada elektrikli araçların talepleri Kümeleme Analizi ile kümeler halinde gruplanırken; İkinci aşamada, talep kümeleri ile şarj istasyon yerleri belirlenmiştir. Araçlar toplu olarak ele alınmıştır. Önerilen metodoloji, Tianjin’de uygulanmıştır.

Huang and Kockelman [46], hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için, sürücülerin rota seçimleri ve istasyon seçimlerine ilişkin sıkışık seyahat ve istasyon geri bildirimlerine, TEA ve diğer araç sürücülerini için esnek talep ve TEA sürücülerini için şarj esnekliği sağlayan, Genetik Algoritma ile çözülen iki seviyeli bir model önermişlerdir. Model, araçlarını durduran ve şarj etmeye karar veren elektrikli araç sahiplerinden elde edilen gelirlerin toplamından tüm maliyetlerin (alan kiralama, ekipman temini vb. masrafları) çıkarılmasıyla elde edilen kârı enbüyüklemektedir. 5 yıllık bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, Boston şehrinde uygulanmıştır.

Boujelben and Gicquel [47], batarya enerji durumundaki ve güç tüketimindeki belirsizlikleri dikkate alarak; şarj istasyonlarının yer seçimi için geliştirilen şans kısıtlı stokastik modeli çözmek için Bonferroni Yaklaşımı ve Kısmi Örnek Yaklaşımı kullanılmıştır. Model, kapsanan akışı enbüyüklemektedir. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, yazarlar tarafından rassal olarak üretilen orta büyüklükteki ağlarda ve alan yazında Yıldız vd. [27] tarafından kullanılan Kaliforniya ve Kuby vd. [36] tarafından kullanılan Florida ağlarında uygulanmıştır.

Chen et al. [48], hem operatör hem de şebekeyi dikkate alarak şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için geliştirdikleri planlama stratejisi içerisinde kârı enbüyüklemekte olan bir model önermiştir. Modeli çözmek için Genelleştirilmiş Benders Ayrıştırma Algoritması kullanılmıştır. Model incelendiğinde, araçlar için marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için

farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. 24 saatlik bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Wang vd. [49] tarafından kullanılan 56 düğümlü bir dağıtım ağında ve Xiamen’de uygulanmıştır.

MirHassani et al. [50], talep belirsizliğini dikkate alarak; şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için iki aşamalı bir stokastik programlama modeli geliştirmiştir. Modeli çözmek için, CPLEX, Benders Ayırıştırma Algoritması ve Benders Ayırıştırma Algoritması’na dayalı olarak geliştirilen bir sezgisel kullanılmıştır. Model, toplam maliyetin enküçüklenmesi ve kapsanan beklenen talebin enbüyüklenmesi arasındaki dengeyi araştırmaktadır. 12 saatlik bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Öte yandan, farklı tip ve/veya kapasitelerde şarj hizmeti veren soketler dikkate alınmıştır.

Liu et al. [51], farklı planlama senaryoları altında, inşaat maliyeti ve sürücü memnuniyetini dikkate alarak otoyollarda şarj istasyonu yer seçimi ve boyutlandırılması için geliştirilen strateji içerisindeki karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modelini çözmek için genetik algoritmaya dayalı geliştirilmiş bir yaklaşım önermiştir. Model, aralarında istasyon inşaat maliyeti, elektrikli araçların uygunsuz sürüş maliyeti ve elektrikli araçların bekleme maliyetinin bulunduğu toplam maliyeti en küçüklemektedir. 24 saatlik bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, Almanya’da uygulanmıştır.

Yazdekhesti et al. [52], rota seçim politikalarını ve sürücülerin yedek bataryaya yönelik risk tercihlerini göz önünde bulundurarak, şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için önerilen 3 aşamalı bir model içerisinde geliştirilen iki amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modelini önermiştir. Model, kapsanmayan toplam sürücü sayısını ve şarj cihazlarının toplam kurulum maliyetini enküçüklemektedir. Basılmamış çözümlerin belirlenmesi için Dağılım Arama ve Değişken Komşuluk Arama Algoritmasına dayalı yeni bir metasezgisel algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmanın performansının doğrulanması için, algoritma ile elde edilen sonuçlar, özel bir koşul aracılığıyla CPLEX ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Araçlar toplu/bireysel olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Öte yandan, farklı tip ve/veya kapasitelerde hizmeti veren soketler dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, 40 düğümlü bir test ağı ve Kaliforniya’da

uygulanmıştır. Yazarlar tarafından, istasyondaki şarj sürelerinin elektrikli araçların yayılımı için önemli olduğu ve gelecek çalışmalarda dikkate alınacağı dile getirilmiştir.

Kınay et al. [53], TEA'ların uzun mesafede ulaşım sağlamaları amacıyla hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi için geliştirilen çerçevede biçim ve içerik yönünden farklılıklara sahip olan iki model önermiştir. Bunlardan biri, şarj istasyonlarının yerini belirlemenin toplam maliyetini ve yol boyunca toplam yeniden şarj etme maliyetini enküçüklerken; diğeri yolda toplam yeniden şarj etmenin enküçüklenmesi için önceden belirlenmiş sayıda istasyonun yerlerini belirlemektedir. Büyük boyutlu örneklerin çözümünde karşılaşılan hesaplama zorluklarının üstesinden gelebilmek için bir Benders Ayırıştırma Algoritması geliştirilmiştir. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, çalışmadaki dönüşümün araçlardaki farklılığının ele alabilecek kadar genel olduğu yazarlar tarafından dile getirilmiştir. Önerilen metodoloji, alan yazında yaygın olarak kullanılan 3 farklı test ağında (25 düğümlü test ağı, Arslan et al. [54] tarafından sunulan ağ, Göpfert and Bock [55] tarafından sunulan ağ) uygulanmıştır.

Quddus et al. [56], uzun vadeli genişleme kararlarını ve kısa vadeli operasyonel kararları dikkate alarak; güç talebi belirsizliği altında şarj istasyonu ağının tasarlanması ve yönetilmesi için karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli olan iki aşamalı bir kesinti önleme modeli önermiştir. Model, her iki aşamada da maliyeti enküçükmektedir. Modeli çözmek için Senaryo Ayırıştırma Algoritması ile Örnek Ortalama Yaklaşımını birleştiren bir Hibrit Ayırıştırma Yöntemi kullanılmıştır. Uzun vadeli kararlar için 5 yıllık, kısa vadeli kararlar için her yıl temsili 24 saatlik bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, yazarlar tarafından üretilen test ağlarında ve Washington'da uygulanmıştır.

Zhang et al. [57], şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için çok kriter odaklı bir yaklaşım önermiştir. Şarj istasyonlarının yer seçimi için, 5 farklı amaç göz önünde bulundurularak geliştirilen modeli çözmek için alan yazındaki algoritmaları hızlandırmak için iki geliştirilmiş algoritma önerilmiştir. Şarj istasyonlarının boyutlandırılması için geliştirilen modeli çözmek için ise M/M/n/n Kuyruk Sistemi kullanılmıştır. Modeller sırası ile oluşturulan fonksiyonu enbüyüklemekte ve toplam şarj cihazı sayısını enküçükmektedir. Farklı tip ve/veya kapasitelerde hizmeti veren soketler dikkate alınmamıştır. Önerilen metodoloji, Pekin'de uygulanmıştır.

Aghalari et al. [58], dalgalanan ortam sıcaklığında hızlı şarj altyapısını ve ilgili yönlendirme kararlarını enküçüklemek için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Modeli çözmek için geliştirilen iki sezgisel algoritma kullanılmıştır. Araçlar bireysel olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, Fargo’da uygulanmıştır.

Bao and Xie [59], sıkışık ağlarda şarj istasyonlarının yer seçimi için iki seviyeli bir karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirmişlerdir. Üst seviye model, inşaat bütçesine tabi istasyon konumlarının seçimini düzenlerken; Alt seviye model, şarj gereksinimi olan TEA’ların denge akış modelini karakterize eder. Modeli çözmek için Dal-Sınır Algoritması ve İç İç Bölümleme Algoritması kullanılmıştır. Önerilen metodoloji, Nguyen-Dupuis ve Sioux-Falls test ağlarında uygulanmıştır.

Fazeli et al. [60], talep belirsizliği ve sürücü davranışlarını göz önünde bulundurarak; şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için iki aşamalı bir stokastik programlama modeline gömülü bir seçim modelleme yaklaşımı önermiştir. İlk aşamada, şarj istasyonlarının yerleri, şarj cihazlarının tipleri ve sayıları belirlenirken; İkinci aşamada, sürücülerin beklenen erişimleri enbüyüklenecek şekilde şarj istasyonlarına atanmaktadır. Modeli çözmek için Örnek Ortalama Yaklaşımı ve L-şekilli Ayrıştırma Yöntemi kullanılmıştır. Büyük boyutlu örneklerin çözümünde karşılaşılan hesaplama zorluklarının üstesinden gelebilmek için bir Dış Yaklaşım Ayrıştırma Algoritması geliştirilmiştir. 12 saatlik bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmıştır. Farklı tip ve/veya kapasitelerde şarj hizmeti veren soketler dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Detroit şehir merkezinde uygulanmıştır.

Li and Jenn [61], şarj istasyonlarının yer seçimi, boyutlandırılması ve TEA sürücülerinin seyahat davranışlarını, ikamet etme davranışlarını ve çalışma alanının dinamik elektrik fiyatını göz önünde bulundurarak sürücüler için toplam sistem maliyetini enküçükleyecek en uygun/elverişli şarj stratejilerini belirlemek için geliştirdikleri entegre bir eniyileme platformundaki karma tamsayılı programlama modelini GAMS’de CPLEX ile çözmüşlerdir. 24 saatlik bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Araçlar bireysel olarak ele alınmıştır. Farklı tip ve/veya kapasitelerde şarj hizmeti veren soketler dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Büyük Sacramento Bölgesi ve San Diego’da uygulanmıştır.

Liu [62], çoklu talep senaryolarını, çok tipli şarj cihazlarını ve dağıtım ağının kabul kapasitesini dikkate alarak; şarj istasyonu yer seçimi ve boyutlandırılması için önerilen iki seviyeli planlama yöntemindeki iki seviyeli karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama

modelini çözmek için Ateşböceği Algoritması kullanmıştır. Üst seviye model, yıllık inşaat ve işletme karını enbüyüklerken; Alt seviye model, elektrikli araçların kapsamlı şarj maliyetini enküçüklemektedir. Araçlar bireysel olarak ele alınmıştır. Çalışma incelendiğinde, elektrikli araçların otobüs, taksi ve özel araç olmak üzere üç grupta ele alındığı görülmektedir. Öte yandan, farklı tip ve/veya kapasitelerde şarj hizmeti veren soketler dikkate alınmıştır. 24 saatlik bir zaman ufku dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Çin'deki bir şehirde ve alan yazındaki IEEE 69 düğümlü dağıtım ağı ile birleştirilmiş bir ağ üzerinde uygulanmıştır.

Li et al. [63], otoyol ağlarında şarj istasyonlarının yer seçimi için geliştirdikleri yaklaşım içerisinde iki tane karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli önermiştir. Modeller sırası ile şarj imkanları için dolambaçlı yollardan gitmekten kaynaklanan ekstra maliyeti ve ağdaki toplam seyahat maliyeti enküçüklemektedir. Modelleri çözmek için geliştirilen sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, Nguyen-Dupuis, Sioux-Falls ve Yangtze Nehri ağlarında uygulanmıştır.

Zhong et al. [64], aşırı hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi için bir ikili tamsayılı doğrusal programlama modelinin de içerisinde yer aldığı bir algoritma önermiştir. Model, toplam şarj istasyonu sayısını enküçüklemektedir. Modeli çözmek için sezgisel bir algoritma kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, yazarlar tarafından üretilen ağlarda uygulanmıştır.

Zhang et al. [65], sürücülerin tercihlerini ve bekleme sürelerini eş zamanlı olarak dikkate alarak; şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için iki seviyeli bir model geliştirmiştir. Üst seviye model, toplam inşaat maliyetini ve sürücülerin toplam hizmet gecikmesini; Alt seviye model ise, sürücülerin toplam seyahat süresini enküçüklemektedir. Modeli çözmek için, önerilen algoritma kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte istasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, yazarlar tarafından üretilen örnek ağlarda uygulanmıştır.

Asna et al. [66], sundukları planlama metodolojisi kapsamında hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için çok amaçlı doğrusal olmayan bir model geliştirmiştir. Modelin amaçları sırası ile elektrikli araç seyahat süresinin ve istasyon maliyetlerinin enküçüklenmesidir. Modeli çözmek için önerilen Çok Amaçlı Kuantum Atom Arama Optimizasyon Algoritması kullanılmış olup, en uygun uzlaşma çözümünün bulunması için

Bulanık Karar Verme Yaklaşımı kullanılmıştır. Araçlar bireysel olarak ele alınmıştır. İstasyonlara kurulacak şarj cihazları için farklı tip ve/veya kapasiteler göz önünde bulundurulmamıştır. Önerilen metodoloji, bir dağıtım ağında uygulanmıştır. Dağıtım ağının girdi verileri ve temel durum değerleri Deb vd. [67] tarafından yapılan çalışmadan, yol ağı bilgileri ise Asna vd. [68] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır.

Xu et al. [69], şarj istasyonlarının yer seçimi için kentsel nüfusun çekirdek yoğunluk analizine dayalı olarak çok amaçlı bir model geliştirmiştir. Modelin amaçları sırası ile sürücü memnuniyetinin ve şarj kolaylığının enbüyüklenmesidir. Çalışmada tüm elektrikli araçların aynı model ve batarya kapasitesine sahip olduğu varsayılmıştır. Modeli çözmek için model özelliklerine göre geliştirilen ve optimize edilen Bağışıklık Algoritması kullanılmıştır. Araçlar toplu olarak ele alınmış olup, marka ve model ayrımı yapılmadığı görülmüştür. Önerilen metodoloji, Jinan’da uygulanmıştır.

2.1.3 Alan Yazında Eniyileme Modeli İçermeyen Çalışmalar

Wang et al. [70], şarj istasyonu yer seçimi için trafik akışı verilerini ve yoldaki araçların elektrik tüketim oranını analiz ederek şarj istasyonlarının yerlerini belirleyen bir model önermiştir. Önerilen metodoloji, örnek bir ağ üzerinde uygulanmıştır.

Micari et al. [71], şarj istasyonlarının yer seçimi ve boyutlandırılması için içerisinde önerilen algoritma ile çözülen iki seviyeli bir formülasyonun bulunduğu bir metodoloji geliştirmiştir. Çalışma kapsamında 18 marka ve model elektrikli araç dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, İtalya otoyol ağında uygulanmıştır.

Shom et al. [72], menzil kaygısı, elektrikli aracın nominal kilometresi gibi tasarım faktörlerini hesaba katan ve iki nokta arasında belirli bir elektrikli araç marka ve modeli için toplam şarj istasyonu sayısını hesaplayan bir algoritma geliştirmiştir. Çalışma kapsamında Nissan Leaf 2016 Model S24 ve Tesla Model S60 2016 olmak üzere 2 marka ve model elektrikli araç dikkate alınmıştır. Önerilen metodoloji, Nebraska’da uygulanmıştır.

Boonraksa and Marungari [73], radyal dağıtım ağında hızlı şarj istasyonlarının yer seçimi için bir analiz sunmuşlardır. Yer seçimi kararının verilmesi için Yapay Arı Kolonisi algoritması kullanılmıştır. Önerilen metodoloji, modifiye edilmiş IEEE 33 test sisteminde uygulanmıştır.

Feng et al. [74], şarj istasyonu yer seçimi için aralarında teknik, ekonomik, sosyal vb. kriterlerinin yer aldığı çok boyutlu değerlendirme kriterlerini dikkate alarak; Dilsel Entropi

Ağırlığı ve Bulanık Aksiyomatik Tasarım yöntemleri vasıtasıyla entegre çok kriterli bir karar verme yöntemi geliştirmiştir. Önerilen metodoloji, Chengdu’da uygulanmıştır.

Rani and Mishra [75], şarj istasyonu yer seçimi için çevre, teknik, ekonomik ve sosyal kriterleri dikkate alarak; MULTIMOORA yöntemi, Sapma yöntemi ve Einstein toplama operatörlerini Fermatean Bulanık Kümesi ayarları altında birleştirerek entegre bir Fermatean Bulanık-MULTIMOORA yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen metodoloji, Bihar eyaletinde uygulanmıştır.

Schmidt et al. [76], halihazırdaki mevcut istasyon yerleri dikkate alarak, binek ve ticari araçlara hizmet vermek amacıyla bir şarj istasyonu ağı tasarlamak için çok kriterli ve çok aşamalı bir metodoloji geliştirmiştir. Önerilen metodoloji, Poznan’da uygulanmıştır.

Pradhan et al. [77], olası bir şarj istasyonu yer seçimi için aralarında teknik, ekonomik, sosyal vb. kriterlerinin yer aldığı çok boyutlu değerlendirme kriterlerini dikkate alarak; Bulanık TOPSIS ve Kalite Fonksiyon Yayılımı Analizi kullanmıştır. Önerilen metodoloji, Kolkata’da uygulanmıştır.

Wei et al. [78], yeni Olasılıksal Dil Ağırlıklı Zar Benzerlik Ölçüleri ve Olasılıksal Dil Ağırlıklı Genelleştirilmiş Zar Benzerlik Ölçüleri tasarlamış ve Olasılıksal Dil Ağırlıklı Genelleştirilmiş Zar Benzerlik Ölçüleri tabanlı çoklu özellik grubu karar verme yöntemlerini sunmuştur. Önerilen metodoloji, yazarlar tarafından tasarlanan bir şarj istasyonunda uygulanmıştır.

Tamay and Inga [79], şarj istasyonlarının tasarlanması ve uygulanması kapsamında gerçekleştirdikleri bibliyometrik analizi ve akıllı bir şebekeye dahil edilmek üzere elektrik koduna dayanan düzenlemeleri göz önünde bulundurarak; şarj altyapısı tasarımı için bir metodoloji önermişlerdir. Önerilen metodoloji, yazarların önerdiği bir tasarım üzerinde uygulanmıştır.

2.2 Alan Yazındaki Çalışmaların Değerlendirilmesi ve Özgün Yaklaşım Gerekçeleri

Bu çalışmada ele alınan EAŞİYSBP ile, EA’ların şarj gereksinimini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayabilecek ve şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde hangi dönemde, nerede şarj istasyonu kapasitesinin ne kadar artırılacağı ve/veya nerede hangi kapasitede yeni istasyon kurulacağının belirlenmesi amaçlanmıştır. Doğru bir yatırım planının yapılması için bazı özellikler dikkate alınmalıdır.

Bu özelliklerden ilki, marka ve model farklılığıdır. Marka ve modeller farklı olduğunda EA'ların batarya kapasiteleri ve dönüştürücü/güç kapasiteleri değişmekte olup, bunlar şarj gereksinimi ve süresini etkilemektedir. Bu özellikler, eniyileme modeli içeren hiçbir çalışmada dikkate alınmamış olup, alan yazındaki diğer çalışmalar incelendiğinde, iki çalışma [71], [72] dışında araç marka ve model farklılığını dikkate alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmalardan birinde [71] 18 marka ve model EA dikkate alınmış olup, her bir aracın batarya kapasitesi farklılığı dikkate alınmış ancak şarj süresi hesabı gerçekçi bir şekilde hesaplanmamıştır. Diğer çalışmada [72] ise yalnızca özel 2 marka ve model EA dikkate alınmış olup, detaylı bilgiye rastlanmamıştır.

Ele alınan problemin çözümünde dikkate alınması gereken ikinci önemli özellik ise taleplerin gerçekçi bir şekilde ele alınabilmesi için bir EA'nın ve istasyonda kullanılmakta olan ve/veya yeni konulacak şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleridir. Bunların bilinmesi ve problemin çözümünde dikkate alınması gerçek çözüme ulaşabilmek için gereklidir. Alan yazında EAŞİYSBP'yi ele alan çalışmaların çoğunda şarj cihazlarının güç kapasiteleri dikkate alınsa da sınırlı sayıda çalışmada EA'nın gücüne ilişkin bilgiye rastlanmıştır. Kong vd. [23] bataryanın maksimum şarj gücünün 45 kW olduğunu varsaymışlardır. Bununla birlikte, Liu vd. [51] ve Kong vd. [40] çalışmalarında bataryanın gücü ifadesini kullanmışlardır. Bilindiği kadarıyla alan yazındaki çalışmalarda EA'nın ve istasyonundaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasitelerini birlikte dikkate alan bir çalışma bulunmamaktadır.

Bir diğer özellik, sürücülerin farklı tiplerdeki ihtiyaçlarına yanıt verme bağlamında oldukça önemli olan istasyonlarda kullanılabilecek şarj cihazı çeşitliliğidir. Alan yazın incelendiğinde az sayıdaki çalışmada [15], [20], [50], [52], [60]–[62] bu özelliğin dikkate alındığı görülmüştür.

Bu özelliklere ek olarak, gerçek hayattaki yatırım planı kararlarının çoğu birden fazla amaca sahip olmasına rağmen alan yazında yalnızca birkaç çalışmada [42], [52], [65], [66], [69] bulunan matematiksel modellerde birden fazla amaç eniyilenmiştir.

Çevre dostu özellikleri nedeniyle benimsenen ve sayıları her geçen EA'lar için şarj istasyonu yatırım planlamalarında dönemsel değişiklikler dikkate alınmalıdır. Alan yazında bu ve benzer problemler için uzun vadede dönemsel yatırım planının dikkate alındığı çok az çalışmaya rastlanmıştır [43], [46], [56].

Bu tez kapsamında ele alınan EAŞİYSBP'de yukarıda bahsedilen özelliklerin tamamı dikkate alınmış olup, EA'ların şarj gereksinimini mümkün olduğunca yakın bölgelerden

karşılayabilecek ve şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde hangi dönemde, nerede şarj istasyonu kapasitesinin ne kadar artırılacağı ve/veya hangi kapasitede yeni istasyon kurulacağının belirlenmesi amaçlanmıştır.

3. ÇOK AMAÇLI ÇOK DÖNEMLİ ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU YER SEÇİM VE BOYUTLANDIRMA PROBLEMİ

Bu bölümde, özgün ve ele alınan ÇAÇD-EAŞİYSBP ve bu problem için geliştirilen bir ÇA-KTDPM modeli sunulmuştur. Öncelikle ele alınan problemin özellikleri, yapılan varsayımlar, simgesel tanımlar ve kısıtlar belirtilerek bu problem için geliştirilen matematiksel model verilmiştir.

3.1 Problem Tanımı

Ele alınan problem, EA'ların şarj gereksinimini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayabilecek ve şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde hangi dönemde, nerede şarj istasyonu kapasitesinin ne kadar artırılacağı ve/veya nerede hangi kapasitede yeni istasyon kurulacağı kararının verilmesi olarak tanımlanabilir.

Mevcut şarj istasyonları da göz önünde bulundurularak artan yeni talebi karşılayacak genişleme planı kapsamında mevcut durumda şarj istasyonu olan yerlere ilave kapasite artışı ve/veya olmayan aday yerlerden hangilerine hangi özellikte ve kapasitede istasyonlar kurulacağı kararı verilecektir.

3.1.1 Sistemin Gereklilikleri, Yapısı ve İşleyişi

Ülkemizde şarj istasyonlarının ve EA araç teknolojilerinin genellikle kablolu şarjı desteklemesi nedeniyle bu yöntem oldukça yaygındır. Bu yöntemde farklı seviyelerde şarj işlemi söz konusu olup, şarj işlemi için farklı tipte ve/veya kapasitelerdeki şarj cihazları (soketler) kullanılmaktadır [80].

EA'ların şarj gereksinimleri alternatif akım (AC) ya da doğru akım (DC) olmak üzere iki tip akım ile karşılanabilmektedir. AC şebekede bulunurken; DC bataryalarda depolanmakta veya elektrikli cihazların gerçek güç devrelerinde kullanılmaktadır [81]. Genel olarak EA şarjı için 3 farklı seviye söz konusu olup, AC'nin DC'ye dönüştürülmesi işlemi 1. ve 2. seviyede araç üzerindeki dönüştürücüde yapılırken; 3. seviyede şarj cihazı üzerinde yapılmaktadır [81]. Bu yönüyle 1. ve 2. seviye AC şarj, 3. seviye Hızlı ya da DC şarj olarak da adlandırılabilir.

Şarj istasyonları için uygun yerler ise; kamuya açık alanlar, erişime sınırlı alanlar ve özel alanlar olarak gruplandırılabilir [80]. Aralarında alışveriş merkezlerinin otoparkları, sağlık kurumlarının otoparkları, konaklama yerlerinin otoparkları, akaryakıt istasyonları vb. alanların

yer aldığı kamuya açık alanlar, elektrikli araç kullanıcılarının araçlarını rahatlıkla şarj edebilmelerine olanak tanımaktadır. Aralarında iş merkezleri, özel siteler vb. alanların yer aldığı erişime sınırlı alanlarda girişler sınırlı olup, bu alanlara yalnızca izni olan kullanıcılar girebilmektedir. Özel alanlar ise, yalnızca istasyon sahibi veya belirli bir grup tarafından kullanılabilen cihazların bulunduğu alanlardır.

EA sürücüleri, çeşitli özelliklere göre (şarj gereksinimlerini karşılamak için tercih edecekleri şarj seviyesi, kullanılacak soketin tipi ve/veya kapasitesi, sahip oldukları zaman, ödemeyi kabul ettikleri ücret vb.) istasyon seçmektedirler. EA sürücüsü, bu kararları doğrultusunda, seçmiş olduğu istasyona gelerek aracını hizmet alacağı sokete bağlamaktadır. Bir uygulama, kart vb. ile başlatılan şarj süreci anlık olarak izlenebilmekte ve doluluk yüzdesi bir LED ekranından okunabilmektedir.

Mevcut istasyonun kapasitesinin artırılması ve/veya yeni istasyon kurulması ile ilgili planlama ufku 3 yıl olarak dikkate alınmıştır. Her bir planlama döneminde, ilgili dönemin EA sayısı tahmini dikkate alınmış, EA'ların tamamının %10 ile %80 seviyeleri arasında şarj ihtiyacı olduğu (en kötü senaryo) ve şarj taleplerinin tamamının karşılanacağı düşünülmüştür.

3.1.2 Sistemde Bilinmesi Gereken Bilgiler/Veriler

Sistem için gerekli olan bilgiler/veriler ve nasıl elde edildiklerine ilişkin bilgiler aşağıda yer almaktadır;

- Mahalle, aday ve mevcut istasyon yerleri, koordinatları Google Maps aracılığıyla elde edilmiştir.
- Önceden kurulan (mevcut) istasyonların yerleri ve istasyonlarda kurulan farklı şarj hizmeti veren soket sayıları, şarj hizmeti sağlayıcı firmaların internet sitelerinde yer alan şarj haritalarından elde edilmiştir.
- Her bir mahalledeki her bir marka ve model grubundaki EA sayıları, denklem (3.1) – (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Sırasıyla bu denklemlerdeki nüfus, gelişmişlik indeksi ve EA sayıları Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan rapor [90] ve TEHAD internet sitesindeki raporlardan elde edilmiştir. Hesaplamalara ilişkin detaylı bilgilere aşağıda yer verilmiştir.

Öncelikle, Keçeci vd. [82] tarafından yapılan çalışmadaki gibi, her bir yıl için ilgilenilen mahallelerin bulunduğu ilçedeki toplam TEA ve FHEA sayıları aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$TEA\ sayısı_{ilçe} = TEA\ sayısı_{ülke} * \frac{Nüfus_{ilçe}}{Nüfus_{ülke}} * Gelişmişlik\ indeksi_{ilçe} \quad (3.1)$$

$$FHEA\ sayısı_{ilçe} = FHEA\ sayısı_{ülke} * \frac{Nüfus_{ilçe}}{Nüfus_{ülke}} * Gelişmişlik\ indeksi_{ilçe} \quad (3.2)$$

Bölgedekilere ek olarak; her bir mahalledeki TEA ve FHEA sayılarına da gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle, her bir marka ve model EA'nın satış oranı ve her bir mahallenin nüfus oranı bilinmelidir. EA'ların satış oranları, satış miktarları; mahallelerin nüfus oranları ise, TÜİK tarafından hazırlanan raporlardan elde edilen bilgilerden yararlanılarak hesaplanmıştır.

İlgilenilen yıllar arasında her bir marka ve model EA'nın toplam satış miktarı, toplam TEA ya da FHEA (araç hangi tür ise) satış miktarına bölünmesi ile, satış oranları elde edilir. Bununla birlikte, her bir mahallenin nüfus oranı ise, mahalle nüfusunun bölge nüfusuna bölünmesi ile elde edilir. Daha sonra denklem (3.3) kullanılarak her bir mahalledeki her bir marka ve model EA sayısı hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} m.marka\ ve\ model\ EA\ sayısı_{i.mahalle} &= TEA\ ya\ da\ FHEA\ sayısı_{bölge} * \\ m.marka\ ve\ model\ EA\ satış\ oranı &* nüfus\ oranı_{i.mahalle} \end{aligned} \quad (3.3)$$

- Her bir marka ve model EA'nın farklı tip ve/veya kapasitede şarj hizmetleri veren soketleri tercih etmeleri durumunda gerekecek şarj süreleri (saat), EA'ların teknik özelliklerinin bulunduğu belge ve/veya internet sitelerinden elde edilebilen EA'nın dönüştürücü/güç kapasitesi ile hesaplanabilmektedir.

EA'ların şarj istasyonundaki gerçekçi şarj süresinin bulunması için EA'nın ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleri dikkate alınmalıdır.

Örneğin, bir TEA örneği olan BMW i3'ün üzerindeki dönüştürücüsünün kapasitesi 11 kW olup, ilgili araç kapasitesi 11 kW'dan yüksek olan bir soketten hizmet alsa bile saatlik alabileceği güç en fazla 11 kW olacaktır. Bununla birlikte, aracın kapasitesi 11 kW'dan

düşük olan bir soketten hizmet alması durumunda saatlik alabileceği güç soketin kapasitesi kadar olacaktır. Yani, EA'nın dönüştürücü/güç kapasitesi ve soketin kapasitesinden hangisi daha düşük ise, araç saatlik olarak o kadar güç alabilecektir. Saatlik alınabilecek güç miktarı elde edildikten sonra, doldurulacak bataryanın toplam enerjisine bölünerek, aracın istasyondaki şarj süresi (ne kadar kalacağı) hesaplanır. BMW i3'ün kullanılabilir batarya kapasitesi 37.9 kWh'dır [83]. Bataryanın %70'lik bir kısmı doldurulacağı için, bu durumda elde edilen 26,53 kWh değeri, aracın istasyondan almayı planladığı enerjidir. Aracın 11 kW ya da 22 kW'lık soketi tercih etmesi durumunda, istasyondaki şarj süresi 2,41 saat olarak elde edilir.

- Her bir mahallenin talebi, önceki iki bilgi de kullanılarak denklem (3.4) ile hesaplanabilmektedir.

k. tip şarj hizmeti talebi_{i. mahalle}

$$= \sum_{m=1}^M k. tip şarj hizmeti talep eden m. marka ve model EA sayısı_{i.mahalle} \quad (3.4)$$

** m. marka ve model EA'nın birim şarj talebi*

- Her bir mahalle ile aday ve mevcut istasyonlar arasındaki mesafe (km), elde edilen koordinatlar kullanılarak Haversine formülü olarak bilinen denklem (3.5) ile hesaplanmıştır [84].

Bu formülde r , dünyanın yarıçapını (6371 km), φ enlemi ve ω boylamı temsil etmektedir. Bununla birlikte, formüldeki tüm açıların radyan cinsinden olması gerekmektedir [85]. (1 derecenin 0.0174532925 radyana denk olduğu bilinmektedir [84].) i . mahallenin koordinatları (φ_i, ω_i) ve j . istasyonun koordinatları (φ_j, ω_j) iken;

$$mesafe_{i.mahalle,j.istasyon yeri} = 2 * r * \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) * \cos(\varphi_2) * \sin^2 \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} \right)} \quad (3.5)$$

- Maliyet bileşenleri ve değerleri (\$), İstanbul Kalkınma Ajansı tarafından hazırlanan İstanbul ili elektrikli araç şarj istasyonu kurulumuna ilişkin ön fizibilite raporundan elde edilmiştir.

İstasyon Altyapı Maliyeti, Soket Satın Alma Maliyeti, Soket Nakliye Maliyeti, Değişken Maliyet (Yazılım Programı Maliyeti ve İstasyon İşletme Maliyeti) ve Alan Kiralama Maliyeti bu çalışmada da dikkate alınmıştır [80]. İstasyon İşletme Maliyetinin içerisinde Kurulum Danışmanlık Maliyeti, İşletme Danışmanlık Maliyeti, Tanıtım ve Pazarlama Maliyeti, Ofis, Muhasebe, Sigorta vb. Maliyeti bulunmaktadır.

- Soket tip ve/veya kapasiteleri (kW), İstanbul Kalkınma Ajansı tarafından hazırlanan İstanbul ili elektrikli araç şarj istasyonu kurulumuna ilişkin ön fizibilite raporundan elde edilmiştir.

AC ve DC şarj hizmetleri için 22 kW ve 100 kW kapasitelerine sahip tek tip soketler dikkate alınmıştır [80].

- Şarj istasyonları ile ilgili yönetmelik, mevzuat vb. bağlayıcı bilgiler, Resmî Gazete vb. yerlerden elde edilmiştir.

Örneğin, Mevcut Otopark Yönetmeliği'ne [86] 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. Buna ek olarak; 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, EA sürücülerinin bir yerdeki istasyondan şarj hizmeti alabilmesi ve/veya o yerdeki istasyona ilave soket kurulabilmesi için, o dönem başında ya da öncesinde ilgili yerde kurulan bir istasyon olmalıdır.
- Herhangi bir planlama döneminde, bir yerdeki istasyona atanan şarj taleplerinin toplamı istasyonun hizmet kapasitesini aşmamalıdır.
- Planlama ufku boyunca bir yerdeki istasyona yeni kurulacak soket sayısı, belirtilen üst sınırı aşmamalıdır. İstasyonlar 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 DC şarj hizmeti veren gerekli sayıda soket kurulmalıdır.
- Herhangi bir planlama döneminde, bir yerde istasyon kurulursa ilgili istasyona en az bir soket kurulmalıdır.

Bu bilgi ve açıklamalar ışığında, bu çalışmada ele alınan problemin varsayımları ise aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

- 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 3 yıl olarak dikkate alınmıştır.
- Her bir planlama döneminde Türkiye geneli için elde edilen talep tahminleri, nüfus ve gelişmişlik indeksleri dikkate alınarak bir ilçeye indirgenmiştir.
- Mahalle bazında talepler toplam şarj hizmeti süresi şeklinde düzenlenmiş olup, her bir marka ve model EA’ların batarya dolulukları, kullanılabilir batarya kapasiteleri, araç ile şarj istasyonunun dönüştürücü ve güç kapasitelerine bağlı olarak hesaplanmaktadır.
- EA sürücülerinin %80’i AC şarj hizmetini, %20’si ise DC şarj hizmetini tercih etmektedir.
- Bazı marka ve model EA’lar (örneğin Smart EQ ForFour, Smart EQ ForTwo, BMW i8 vb.) teknolojik nedenlerle yalnızca AC şarj hizmeti alabilir.
- Yatırım maliyetlerinde İstasyon Altyapı Maliyeti, Soket Satın Alma Maliyeti, Soket Nakliye Maliyeti, Değişken Maliyet (Yazılım Programı Maliyeti ve İstasyon İşletme Maliyeti) ve Alan Kiralama Maliyeti dikkate alınmıştır.

İstasyon İşletme Maliyetinin içerisinde ise Kurulum Danışmanlık Maliyeti, İşletme Danışmanlık Maliyeti, Tanıtım ve Pazarlama Maliyeti, Ofis, Muhasebe, Sigorta vb.

Maliyetler bulunmaktadır.

- AC şarj hizmeti için 22 kW, DC şarj hizmeti için 100 kW kapasitelerine sahip tek tip soketler dikkate alınmıştır.
- Şarj istasyonlarında şarj hizmeti veren alanlar yıllık olarak kiralanmaktadır.
- Planlama ufkundaki Toplam Yatırım Maliyeti hesabında Net Bugünkü Değer dikkate alınmıştır.
- Maliyetler dolar cinsinden olacağı için, 2000-2022 yılları arasında doların değerindeki ortalama enflasyon %2 olarak ele alınmıştır [87]. Firmanın getiri beklentisi, dolar bazlı şirket kredi faiz oranları da göz önünde bulundurularak uzman görüşüne göre %10 olarak kararlaştırılmıştır.
- Test problemleri için ilgilenilen mahallelerin bulunduğu bölgenin gelişmişlik indeksi 2'dir ve bu değer 3 yıllık planlama ufku boyunca herhangi bir değişim olmayacaktır.

3.2 Geliştirilen Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli

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

Dizin Kümeleri

$I = \text{Mahalleler kümesi } I = \{i = 1, \dots, I\}$

$J = \text{Aday istasyon yerleri kümesi } J = \{j = 1, \dots, J\}, \quad J = J_{SSC} \cup J_{LSC} \cup J_O$

$J_{SSC} = \text{Alanı } 70000 \text{ m}^2 \text{ den küçük olan AVM'lerin kümesi}$

$J_{LSC} = \text{Alanı } 70000 \text{ m}^2 \text{ den büyük olan AVM'lerin kümesi}$

$J_O = \text{AVM dışındaki yerlerin kümesi}$

$T = \text{Planlama dönemleri kümesi } T = \{t = 1, \dots, T\}$

$K = \text{Şarj hizmeti tipleri kümesi } K = \{k = 1, \dots, K\}$

Parametreler

$g_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ yerde 1. dönem başında mevcut bir istasyon varsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$

e_{jk} : $j. \text{ yerde 1. dönem başında kurulu olan } k. \text{ tip şarj hizmeti veren soket sayısı}$

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 . dönemde k . tip şarj hizmeti veren bir adet soketin satın alma maliyeti (\$)

s_t : t . dönemde satın alınan ilave soketin nakliye maliyeti (\$)

v_t : t . dönemde istasyon işletme maliyeti (yıllık) (\$)

a_t : t . dönemde şarj hizmeti alacak araçlar için istasyonda alan kiralama maliyeti (ortalama 1 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 . mahallenin j . yerdeki istasyon tarafından t . dönemde k . tip şarj hizmeti talebinin karşılanma oranı

$$y_{jt} = \begin{cases} 1, & j. yerdeki istasyon t. dönemde kurulursa \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

z_{jtk} : j . yerdeki istasyonda t . dönemde kurulacak k . tip şarj hizmeti veren soket sayısı

Yardımcı Karar Değişkenleri

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

$$b_{jt} = \begin{cases} 1, & j. yerdeki istasyon t. dönemde kurulu ise \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

Matematiksel Model

$$Enk f_1 = \sum_{t=1}^T \frac{TC_t}{(1+r)^{t-1}} \quad (3.6)$$

$$TC_t = \sum_{j=1}^J y_{jt} * f_t + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K z_{jtk} * p_{tk} + \sum_{j=1}^J w_{jt} * s_t + \sum_{j=1}^J b_{jt} * v_t + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^t \sum_{k=1}^K z_{jlk} * a_t \quad (3.7)$$

$$Enk f_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K dm_{itk} ds_{ij} x_{ijtk} \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ijtk} = 1 \quad \forall i, t, k \quad (3.9)$$

$$x_{ijtk} \leq g_j + \sum_{l=1}^t y_{jl} \quad \forall i, j, t, k \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^I dm_{itk} * x_{ijtk} \leq h * \left(e_{jk} + \sum_{l=1}^t z_{jlk} \right) \quad \forall j, t, k \quad (3.11)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_{jtk} \leq u * \sum_{t=1}^T y_{jt} \quad \forall j \quad (3.12)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{jt} \leq 1 \quad \forall j \quad (3.13)$$

$$\sum_{k=1}^K z_{jtk} \leq u * \sum_{l=1}^t y_{jl} \quad \forall j, t \quad (3.14)$$

$$z_{jtk} + e_{jk} \geq 2 \quad j \in J_{LSC}, t = 1 \text{ ve } k = 2 \quad (3.15)$$

$$z_{jtk} + e_{jk} \geq 1 \quad j \in J_{SSC}, t = 1 \text{ ve } k = 2 \quad (3.16)$$

$$M * w_{jt} \geq \sum_{k=1}^K z_{jtk} \quad \forall j, t \quad (3.17)$$

$$w_{jt} \leq \sum_{k=1}^K z_{jtk} \quad \forall j, t \quad (3.18)$$

$$\sum_{l=1}^t w_{jl} \leq t * b_{jt} \quad \forall j, t \quad (3.19)$$

$$b_{jt} \leq \sum_{l=1}^t w_{jl} \quad \forall j, t \quad (3.20)$$

$$y_{jt} \leq \sum_{k=1}^k z_{jtk} \quad \forall j, t \quad (3.21)$$

$$x_{ijtk} \geq 0 \quad \forall i, j, t, k \quad (3.22)$$

$$y_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j, t \quad (3.23)$$

$$w_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j, t \quad (3.24)$$

$$b_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j, t \quad (3.25)$$

$$z_{jtk} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j, t, k \quad (3.26)$$

Matematiksel modelin amaç fonksiyonları denklem (3.6), toplam yatırım (kurulum ve işletim) maliyetinin net bugünkü değerini; denklem (3.8) ise talep ağırlıklı toplam mesafeyi enküçülemektedir. Denklem (3.9), herhangi bir planlama döneminde, her bir mahallenin talebinin tamamının bir veya birden fazla yerdeki istasyonlar tarafından karşılanmasını sağlar.

Denklem (3.10), bir mahallenin talebinin bir yerdeki istasyon tarafından karşılanabilmesi için o dönemde ya da daha önceki dönemlerden birinde ilgili yerde istasyon kurulmuş olmasını garanti eder. Denklem (3.11), her bir planlama döneminde bir yerdeki istasyona atanan taleplerin toplamının istasyonun hizmet kapasitesini aşmamasını sağlar. Denklem (3.12) ve (3.14), sırasıyla planlama ufku boyunca ve bir planlama döneminde farklı yerlerdeki istasyonlara yeni kurulacak soket sayılarının toplamının, belirtilen üst sınırı aşmamasını sağlarken, o dönem içerisinde ya da öncesinde ilgili yerde istasyon kurulmuş olmasını garanti eder. Denklem (3.13), planlama ufku boyunca aynı yerde en fazla bir defa istasyon kurulabileceğini, kurulan bir istasyonun planlama ufku boyunca kapanmayacağını ifade eder. Herhangi bir dönemde kurulan bir istasyon planlama ufkunun sonuna dek açık kalmalıdır.

Denklem (3.15) ve (3.16), Otopark Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmeliğin [86] 4'üncü maddesinin 5'inci fıkrasında belirtildiği üzere, ilgili yerlerdeki AVM'lerde büyüklüklerine göre hızlı şarj hizmeti veren gerekli sayıda soket kurulmasını garanti eder.

Denklem (3.17) ve (3.18) herhangi bir planlama döneminde, bir yerdeki istasyona ilave soket kurulup kurulmadığının belirlenmesi ve bununla ilişkili soket kurulumu kararlarının alınabilmesini sağlar.

Denklem (3.19) ve (3.20) herhangi bir planlama döneminde, bir yerdeki istasyona ilave soket kurulup kurulmadığı ile ilişkili istasyonun kurulu olup olmadığının belirlenmesini sağlar. Denklem (3.21), herhangi bir planlama döneminde bir yerde istasyon kurulursa ilgili istasyona o dönemde en az bir soket kurulmasını sağlar.

Denklem (3.22) – denklem (3.26) karar değişkenleri için işaret sınırlarını ifade eder.

3.3 Deneyisel Çalışmalar

ÇAÇD-EAŞİYSBP için geliştirilen modelin performansını incelemek için test problemleri üzerinde denemeler yapılmıştır. Ayrıca tez kapsamında ele alınan ÇAÇD-EAŞİYSBP'nin amaçlarının birbiriyle çelişip çelişmediği gösterilmiştir.

Gerçekleştirilen deneyisel çalışma kapsamında çözölen test problemleri, rassal olarak üretilmiştir. Matematiksel model ILOG CPLEX OPL Optimization Studio Version 20.10.0.0 çözücüsünde kodlanmış ve çözdürölmüştür. Deneyler Intel Xeon Phi 7290 CPU @ 1.50GHz ve 16 GB RAM'e sahip bir Linux bilgisayarda 16 çekirdek kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, makul olduğu değeriendirilen 24 saat (86400 sn) ile sınırlandırılmıştır. Bu bölümde test problemleri hakkında bilgi verildikten sonra elde edilen sayısal sonuçlar sunulacaktır.

3.3.1. Test problemleri

ÇAÇD-EAŞİYSBP için geliştirilen modelin performansını incelemek amacıyla, rassal olarak test problemleri üretilmiştir. Mahalle sayısı ve istasyon yeri sayısının 15-30 ile 20-56 arasında olduğu test problemleri küçük, 45 ile 60-76 olduğu test problemleri orta, 60-75 ile 80-116 olduğu problemler ise büyük boyutlu problemler olarak sınıflandırılmıştır.

Bu çalışmada mahalle ve istasyon yeri sayısına göre, 5 farklı büyüklükte problem tanımlanmış olup, her bir büyüklük için üretilen 5 farklı test problemi ile, toplam 25 test problemi oluşturulmuştur.

Tablo 3.1'de detaylı bilgilerinin bulunduğu her bir test problemi geliştirilen model ile çözdürölmüştür. Tablodaki ilk sütun problem numarasını, ikinci sütun ilçedeki toplam mahalle sayısını, üçüncü sütun istasyon kurulabilecek toplam aday yer sayısını, dördüncü sütun dikkate alınan araç marka ve model grubu sayısını, beşinci sütun mevcut durumda kurulmuş istasyon bulunan yer sayısını, altıncı ve yedinci sütunlar sırası ile mevcut durumda kurulmuş istasyonlardaki tiplerine göre mevcut soket sayılarını göstermektedir.

Örneğin, P#15_2 test probleminde toplam 15 mahalle ve 1'den 24'e kadar numaralandırılmış toplam 24 adet aday yer vardır. 3 marka ve model grubundaki EA dikkate alınış olup, daha önce kurulan bir istasyon bulunmamaktadır.

Tablo 3.1. Test problemleri

P #	I (Mahalle)	J (İstasyon Yeri)	Marka ve Model Grubu EA Sayısı	Mevcut İstasyon #	Mevcut AC Soket #	Mevcut DC 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
15_4	15	32	6	1	1	0
15_5	15	36	8	2	1	3
30_1	30	40	10	0	0	0
30_2	30	44	12	2	0	2
30_3	30	48	14	3	1	2
30_4	30	52	16	4	2	3
30_5	30	56	18	5	3	4
45_1	45	60	20	2	1	1
45_2	45	64	22	3	1	2
45_3	45	68	24	4	3	1
45_4	45	72	26	5	1	4
45_5	45	76	28	6	7	3
60_1	60	80	30	3	3	0
60_2	60	84	32	4	2	2
60_3	60	88	34	5	4	3
60_4	60	92	36	6	3	4
60_5	60	96	38	7	5	6
75_1	75	100	40	4	4	0
75_2	75	104	42	5	3	4
75_3	75	108	44	6	4	2
75_4	75	112	46	7	6	2
75_5	75	116	48	8	5	8

3.3.2. Sayısal Değerlendirme

Geliştirilen model, her bir amaç fonksiyonunun aralığının elde edilmesinde kullanılacak ödünleşme tablosunun yalnızca Pareto Eniyi Çözümlerden (PEÇ) oluşturulması için Öncelikli Eniyileme Yöntemi (ÖEY) kullanılarak çözülmüş olup, elde edilen sonuçlar Tablo 3.2’de yer almaktadır [88].

Model, ilk amaç fonksiyonu öncelikli bir şekilde dikkate alınarak çalıştırıldığında 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 çalıştırıldığında ise her bir test problemi için elde edilen f_2 ve f_1 değerleri sırasıyla f_2^{ideal} ve f_1^{nadir} sütunlarında yer almaktadır. Bununla birlikte, 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 değerleri olup, bu değerler tabloda yıldız (*) ile belirtilmiştir. Bazı test problemlerinde ise CPLEX'in çözüm süresine ilişkin sınır olan 86400 saniye boyunca bir çözüm bulunamadığından, ilgili problemlerin f_1^{ideal} ve f_2^{nadir} amaç fonksiyonu değeri “-” ile gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Test problemlerine ait ideal ve nadir çözüm değerleri ve süreleri

P#	f_1^{ideal}	f_2^{nadir}	ÇS (sn)	f_2^{ideal}	f_1^{nadir}	ÇS (sn)
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*
15_4	315330,2	5105,566	1090,35*	1147,513	693986,9	2,71*
15_5	289725,9	5646,702	183,31*	869,1629	732488,1	4,12*
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*
30_4	567167,3	5825,448	20795,84*	1118,076	1232142	13,33*
30_5	-	-	-	1164,913	1306972	18,15*
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*
45_4	-	-	-	1641,7740	2054232,0	20,93*
45_5	1047249	60738,66	86400	1566,4720	2003458,0	22,54*
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*
60_4	-	-	-	1692,053	2469104	83,66*
60_5	1277696	72295,8	86400	1567,969	2477822	102,73*
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*
75_4	1578567	87603,06	86400	1631,08	2969311	537,99*
75_5	-	-	-	1680,861	3063537	234,87*

Tablo 3.2 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 açıklanabileceğine inanılmaktadır.

Tablo 3.2’de görüldüğü üzere, f_1 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alınarak çalıştırıldığında f_2 , f_2 amacı öncelikli bir şekilde dikkate alınarak çalıştırıldığında f_1 amaç fonksiyonu değeri eniyi değerden uzaklaşmaktadır. Yani, f_1 ve f_2 amaçları birbirleri ile çelişmektedir. Her iki amaç fonksiyonunun eniyi değeri aynı anda elde edilemeyeceği için; amaçlar arasında bir ödünleşim söz konusudur.

4. ÇAÇD-EAŞİYSBP İÇİN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Tek amaçlı eniyileme problemleri tasarım uzayında tek bir nokta ile sonuçlanırken; çok amaçlı eniyileme problemleri, amaç fonksiyonu uzayında PEÇ olarak adlandırılan bir dizi nokta ile sonuçlanır [89]. Baskın çözümler olarak adlandırılan PEÇ'ler Pareto Cephesi (PC)'yi oluştururlar. PC baskınlık ilkesi kullanılarak elde edilmekte olup, her bir çözümün bir diğerine baskın olup olmadığını kontrol etmek için karşılaştırma yapılır. Örneğin; A ve B iki amaçlı bir eniyileme probleminin iki farklı noktadaki çözümü iken; A noktasındaki çözümü, tüm amaç fonksiyonları için B noktasındaki çözümünden daha kötü olmadığı ve en az bir amaç fonksiyonu için A çözümünün B çözümünden daha iyi olduğu koşullarda A çözümünün B çözümüne baskın olduğu söylenir.

Baskın çözümlerin elde edilebilmesi için aralarında Ağırlıklı Toplam Yöntemi, Epsilon Kısıt Yöntemi (EKY), Hedef Programlamanın yer aldığı çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [89]. Bununla birlikte, EKY diğer ağırlıklandırma yöntemlerine göre bazı avantajlara da sahiptir [88]. Bu avantajlar arasında; üretilen etkin çözümlerin sayısının kontrol edilebilmesi, amaç fonksiyonlarının ortak bir ölçeğe ölçeklendirilmesine gerek olmaması vb. yer almaktadır. Alan yazında, EKY'nin geliştirilmiş versiyonları bulunmakla birlikte, zayıf PEÇ'lerin üretilmesini önleyen ve gereksiz yinelemelerden kaçınarak süreci hızlandıran Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2 (AEKY 2)'nin Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi (AEKY) ve alan yazındaki bazı yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği kanıtlandığı için; ÇAÇD-EAŞİYSBP'nin çözümü için AEKY 2'nin kullanılmasına karar verilmiştir [88]. Bu yöntem ile problem aşağıdaki hale dönüşmektedir [90]–[92];

$$f_2 + s_2 = \varepsilon_2 \quad (3.27)$$

Kısıt (3.6) – (3.26)

kısıtları altında

$$\min f_1 - \delta * (s_2/r_2) \quad (3.28)$$

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. Önemli bir konu olan ε_2 değeri, $f_2^{nadir} \leq \varepsilon_2 \leq f_2^{ideal}$ aralığında olmalıdır [93].

Bu çalışmada enküçüklenecek amaç fonksiyonu f_1 , kısıt olarak eklenecek amaç fonksiyonu f_2 olarak belirlenmiştir. Toplam 10 tane çözümün yeterli olacağı değerlendirilerek, aralık sayısı $q_2 = 9$ olarak belirlenmiştir. Öncelikle, ÖEY ile oluşturulan ödünleşme

tablosundaki verilerle f_2 için aralık olan r_2 değeri hesaplanır. Ardından, f_2 için toplam 9 aralık ve 10 çözüm olacak şekilde, $adım_2 = r_2/q_2$ değeri hesaplanarak, her bir adımda $\varepsilon_2 = fmin_2 + t * adım_2$ değeri elde edilir. İlerleyen adımlarda PEÇ'lerin elde edilip edilemeyeceğini gösteren bypass katsayısı $b = int(s^2/adım_2)$ hesaplanır.

4.1 Deneysel Çalışmalar ve Sayısal Değerlendirme

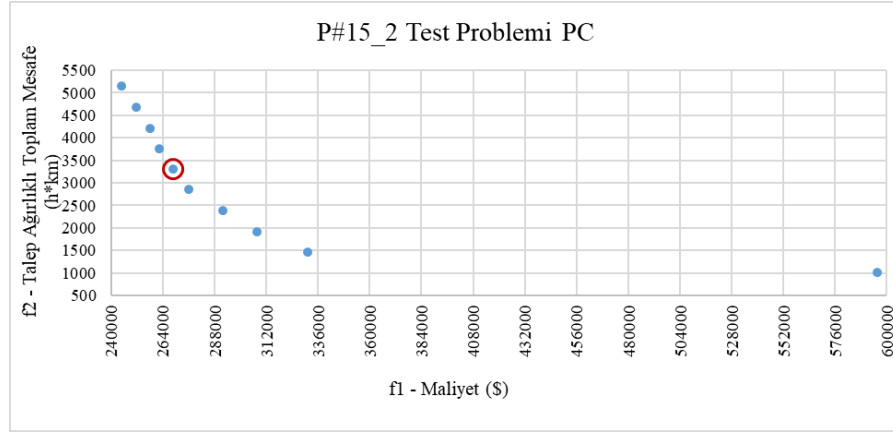
ÇAÇD-EAŞİYSBP için kullanılan AEKY 2'nin performansını değerlendirmek için test problemleri üzerinde denemeler yapılmıştır. Bu kapsamda, tüm test problemleri bu yöntem ile çözülmüştür. Her iki amaç fonksiyonu arasında farklı dengeler sağlayan bir dizi çözüm elde edebilmek için, Tablo 3.2'deki değerlerden yola çıkılarak ve AEKY 2 kullanılarak her bir test problemi için Pareto Çözümleri (PÇ) elde edilmiştir. 86400 saniyelik çözüm süresi sınırı dolmadan en iyi çözümü bulunabilen test problemleri için elde edilen PEÇ'ler kullanarak PC'ler oluşturulmuş; en iyi çözümü bulunamayan büyük boyutlu test problemleri için ise elde edilen Yaklaşık Pareto Eniyi Çözümler (YPEÇ), Yaklaşık Pareto Cephelerini (YPC) oluşturmak için kullanılmıştır.

Örnek olarak, Test Problemi P#15_2 için AEKY 2 uygulandıktan sonra elde edilen bilgiler Tablo 4.1'de yer almaktadır. İlgili tablodaki ilk sütun, elde edilen PEÇ'lerin numarasını, ikinci sütun çözüm sonucunda elde edilen f_1 değerini, üçüncü sütun f_2 ile ilişkili olarak eklenen kısıtın sağ taraf sabitini, dördüncü sütun çözüm sonucunda elde edilen f_2 değerini, beşinci sütun çözüm sonucunda elde edilen s_2 değerini, altıncı sütun bypass katsayısını, yedinci sütun ise çözüm süresini göstermektedir.

Tablo 4.1. P#15_2 için AEKY 2 ile elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

PEÇ #	f1	f2+s2=	f2	s2	b	ÇS (sn)
1	595636.5000	1001.5570	1001.5570			
2	331379.8000	1462.8006	1459.4864	3.3142	0	900.85
3	307896.1000	1924.0441	1922.9209	1.1232	0	101.45
4	291676.6000	2385.2877	2381.0982	4.1895	0	589.46
5	276017.4000	2846.5312	2845.9528	0.5784	0	377.02
6	268744.0000	3307.7748	3307.4462	0.3285	0	20819.77
7	262426.9000	3769.0183	3760.6622	8.3561	0	1727.11
8	258067.4000	4230.2619	4216.0186	14.2433	0	11580.9
9	251704.4000	4691.5054	4686.3347	5.1707	0	42693.2
10	244927.2000	5152.7490	5152.7490			

Elde edilen PEÇ'ler Şekil 4.1'de yer almaktadır. İlgili şekilde yukarıdaki tablodaki 10 tane PEÇ yer almakta olup; her bir çözüm 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 seçecektir. İlgili şekilde de görüldüğü üzere, talep ağırlıklı toplam mesafe azaldıkça, yani kullanıcıların daha yakın yerdeki istasyonlardan hizmet alması durumunda, toplam yatırım maliyeti (net bugünkü değeri) artmaktadır.



Şekil 4.1. P#15_2 test problemi PEÇ'ler

Örneğin, karar vericinin yukarıdaki şekilde kırmızı daire içerisinde yer alan çözümü seçtiği düşünüldüğünde; benimsenecek yatırım planı EK 2'deki Tablo 4.2'de özetlenmiştir. Tablo 4.2'deki ilk sütun planlama dönemini, ikinci sütun istasyon detaylarını, diğer sütunlar ise şarj istasyonu yatırımı yapılabilecek aday yerleri göstermektedir. İkinci sütundaki J istasyon yerini, K1 ve K2 sırasıyla soket türü sayısını göstermektedir. Tablo içindeki “√” işareti mevcut durumda var olan ve/veya kapasite artışı yapılacak olan istasyon yerini, “√/√” işareti ise yeni açılacak istasyon yerini göstermektedir. İlgili tabloda yer alan yatırım planında, planlama dönemleri bazında yapılacak yatırım aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- 1. Planlama döneminde 3. ve 19. yerlerde istasyon kurulacaktır. 3. yerdeki istasyona 7 adet AC soket; 19. yerdeki istasyona 9 adet AC ve 1 adet DC soket kurulacaktır.
- 2. Planlama döneminde 21. yerde istasyon kurulacaktır. 3. yerdeki istasyona ilave soket kurulumu yapılmazken, 19. yerdeki istasyona 5 adet AC soket; 21. yerdeki istasyona 6 adet AC ve 1 adet DC soket kurulacaktır.
- 3. Planlama döneminde 4. yerde istasyon kurulacaktır. 3. yerdeki istasyona 6 adet AC soket ve 1 adet DC soket; 4. yerdeki istasyona 13 adet AC soket; 21. yerdeki istasyona 7 adet AC soket kurulacaktır.

Diğer test problemleri için elde edilen PÇ'ler EK 3'te yer almaktadır.

5. UYGULAMA: YENİMAHALLE ÖRNEĞİ

Önerilen metodoloji, önceki bölümlerde rassal olarak üretilen test problemlerinin yanı sıra gerçek hayat problemi olarak Ankara ili Yenimahalle ilçesinde merkezi bir alanda uygulanmıştır.

5.1 Sistemde Bilinmesi Gereken Bilgiler/Veriler

Sistem için gerekli olan ve edinilen bilgiler aşağıda yer almaktadır,

- Mahalle, aday ve mevcut istasyon yerleri, koordinatları

Yenimahalle ilçesinde yer alan 57 mahalleye ilişkin bilgiler (mahalle ismi, mahalle nüfusu vb.) TÜİK'in hazırladığı rapordaki [94] Excel dosyasından elde edilmiştir.

Aday istasyon yerleri belirlenirken ise Yüzme Havuzu, Spor Tesisi, Eğlence Merkezi, Alışveriş Merkezi, Benzin İstasyonu, Hastane, Otel, Restoran gibi EA sürücülerinin vakit geçirebileceği farklı alan türleri dikkate alınmıştır.

Bu uygulamada incelenen alan Yenimahalle'nin merkezine yakın olacak ve farklı istasyon yerlerini içerecek şekilde seçilmiştir. Böylelikle ulaşım rahatlığı ile birlikte, EA sürücülerine farklı seçeneklerin de sunulması hedeflenmiştir. İncelenen alan içerisinde 8 mahalle, 13 aday ve mevcut istasyon yeri bulunmaktadır. Mahallelerin orta noktaları, aday ve mevcut istasyon yerlerinin koordinatları Google Maps aracılığıyla elde edilerek, Bing Haritalar ile entegre Microsoft Office Power BI paket programı aracılığı ile görselleştirilmiştir. Mahallelerin, aday ve mevcut istasyon yerlerinin isim, enlem ve boylam bilgileri sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de, harita üzerindeki görüntüleri ise Şekil 5.1'de yer almaktadır.

Tablo 5.1. İncelenen alandaki mahalleler ve koordinat bilgileri

Mahalle Adı	Enlem	Boylam
25 Mart	39.95464	32.79523
Bariş	39.96800	32.79615
Çamlıca	39.95337	32.77975
Demetevler	39.96518	32.78428
Demetgül	39.96169	32.79414
Demetlale	39.96307	32.79008
Macun	39.95377	32.76278
Mehmet Akif Ersoy	39.96801	32.77128

Tablo 5.2. İncelenen alandaki aday ve mevcut istasyon yerleri ve koordinat bilgileri

İstasyonun Bulunduğu Alan Türü	İstasyon Yeri Adı	İstasyon Bulunma Durumu	Enlem	Boylam
Benzin İstasyonu	BP #4	Hayır	39.96427	32.75481
Benzin İstasyonu	OPET #2	Hayır	39.95472	32.76999
Benzin İstasyonu	OPET #5	Hayır	39.95950	32.76449
Benzin İstasyonu	SHELL #10	Hayır	39.96074	32.77072
Benzin İstasyonu	TP #2	Hayır	39.96291	32.75707
Hastane	Onkoloji Hastanesi	Hayır	39.96858	32.77789
Eğlence Merkezi	Nazım Hikmet Kültür Merkezi	Hayır	39.96077	32.77847
Otel	Hilton Garden Inn Ankara Gimat	Hayır	39.95935	32.77200
Restoran	T.C Ankara Büyükşehir Belediyesi Halk Ekmek	Hayır	39.95510	32.77018
Yüzme Havuzu& Spor Tesisi	Bülent Ecevit Yüzme Havuzu ve Spor Tesisi	Hayır	39.96231	32.76525
Alışveriş Merkezi	Podium AVM	Evet	39.96231	32.76941
İşyeri	TEMSAN A.Ş.	Evet	39.95786	32.77900
Otel	Alegria Business Hotel	Evet	39.96373	32.77152



Şekil 5.1. İncelenen alandaki mahalleler, aday ve mevcut istasyon yerleri

- Şarj hizmeti veren firmalar tarafından önceden kurulan (mevcut) istasyonların yerleri ve istasyonlarda kurulan farklı şarj hizmeti veren soket sayıları,

Türkiye’de şarj hizmeti sağlayıcı firmaların internet sitelerindeki şarj haritaları incelenerek, incelenen alandaki mevcut istasyonlar ile ilgili elde edilen detaylı bilgilere Tablo 5.3’te yer verilmiştir.

Tablo 5.3. İncelenen alandaki mevcut istasyon bilgileri

İstasyonun Bulunduğu Yerin Adı	Şarj Hizmeti Veren Firmanın Adı	Soket Sayısı	Soket Özellikleri	
			AC/ DC	Tip& Kapasite
Podium AVM	ZES	6	AC	Type 2 Mode 3 22 kW
TEMSAN A.Ş.	ZES	2	AC	Type 2 Mode 3 22 kW
Alegria Business Hotel	VOLTRUN	2	AC	Type 2 Mode 3 22 kW

- Her bir mahalledeki her bir marka ve model grubundaki EA sayıları,
Türkiye nüfusu TÜİK tarafından hazırlanan dokümandaki [95] bir tablodan alınmıştır. Yenimahalle nüfusu ise, aynı dokümandaki başka bir tablodan elde edilen Ankara ili nüfusu yıllık ortalama artış hızı bilgisi kullanılarak hesaplanmıştır.
Yenimahalle ilçesi gelişmişlik indeksi, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan rapordan [96] alınmış olup, 2.852’dir. EA satış bilgileri ise, TEHAD internet sitesinde yer alan raporlardan elde edilmiştir. Türkiye’de 2015-2021 yılları arasında marka ve model grubu bazında satılan TEA ve FHEA sayıları ise TEHAD tarafından hazırlanan raporlardan derlenmiş olup, sırasıyla EK 4’te Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’te yer almaktadır.
- Her bir marka ve model grubundaki EA’nın farklı şarj hizmetleri veren soketleri tercih etmeleri durumundaki şarj süreleri (saat),
Çeşitli kaynaklardan yararlanılarak oluşturulan EA’ların marka ve modeline göre dönüştürücü/güç kapasitelerine ilişkin bir liste hazırlanmıştır. İstasyondaki soketin kapasitesi göz önüne alınarak, şarj süresi hesaplanmıştır.
- Her bir mahallenin talebi,
Yukarıdaki iki veri kullanılarak, Yenimahalle ilçesi için her bir planlama döneminde her bir şarj hizmeti tipi için toplam talep hesaplanmıştır.
- Her bir mahalle ile aday ve mevcut istasyon yeri arasındaki mesafe (km),

Mahallelerin orta noktaları ve istasyon yerlerinin koordinatları kullanılarak aralarındaki mesafe Haversine formülü ile hesaplanmıştır.

- Maliyet bileşenleri ve değerleri (\$).

Kullanılan tüm maliyet bileşenleri ve değerleri, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı koordinasyonunda faaliyet gösteren İstanbul Kalkınma Ajansı tarafından hazırlanan rapordan [80] alınmış olup, dolar cinsindendir. İlgili rapordaki tablo, EK 5'teki Tablo 5.6'da yer almaktadır. Tablodaki değerlerden yola çıkılarak, dikkate alınan maliyet bileşenlerinin hesaplamalarına ilişkin detaylar sırası ile aşağıda açıklanmıştır.

- İstasyon Altyapı Maliyeti: İlgili maliyet bileşeni hesaplanırken, yeni istasyon kurulan yerler dikkate alınmıştır. Yatırımcı firmalar, daha önce istasyon açılmayan yerlerde ve/veya farklı firmalar tarafından açılan istasyonların bulunduğu yerlerde istasyon açabilmektedir. Altyapı maliyeti hesaplanırken; Tasarım, Saha Kazı, Ayrı Savaş ve Ruhsat Maliyet bileşenleri hesaplamaya dahil edilmiş olup, bu maliyetlere istasyonun açıldığı planlama dönemi başında olmak suretiyle yalnızca bir defa katlanılmaktadır.
- Soket Satın Alma Maliyeti: İlgili maliyet bileşeni hesaplanırken, yeni kurulan soketler dikkate alınmıştır. Farklı şarj hizmeti veren iki tip soket bulunmakta olup, her bir soket tipi için maliyetler farklıdır. Herhangi bir tip soketin satın alma maliyetini bulmak için Tablo 5.6'daki Şarj Cihazı Maliyeti ikiye bölünmektedir.
- Soket Nakliye Maliyeti: İlgili maliyet bileşeni hesaplanırken, her bir planlama döneminde yatırımcı firma tarafından kurulacak soketlerin, ilgili yerlere nakliyesi dikkate alınmıştır.
- Değişken Maliyet (Yazılım Programı Maliyeti ve İstasyon İşletme Maliyeti): İlgili maliyet bileşeni hesaplanırken, yeni kurulan istasyonlar dikkate alınmıştır. Değişken maliyet hesaplanırken; Yazılım Programı, Kurulum Danışmanlık, İşletme Danışmanlık, Tanıtım ve Pazarlama, Diğer Maliyetler (Ofis, Muhasebe, Sigorta vb.) bileşenleri hesaplamaya dahil edilmiş olup, bu maliyetlere istasyonun açıldığı planlama döneminden itibaren her planlama döneminde katlanılmaktadır.
- Alan Kiralama Maliyeti: İlgili maliyet bileşeni hesaplanırken, yeni kurulan istasyonlar dikkate alınmıştır. Araçların şarj hizmetini alabilmesi için kurulan soket sayısı kadar araç için alan kiralanmaktadır. Bir araç için ortalama alan $10m^2$ olarak

ele alınmış olup, yatırımcı firma tarafından açılan istasyonda ilk soketin kurulmasından itibaren her bir planlama döneminde kümülatif olarak istasyonda bulunan soket sayısı kadar araçlık alan için kiralama maliyetine katlanılmaktadır.

- Şarj istasyonlarının hizmet verme süresi (saat),
Şarj istasyonlarının 24 saat kesintisiz çalıştığı varsayılmıştır.
- Planlama ufku içerisinde bir istasyona kurulabilecek toplam soket sayısının üst sınırı,
Bölgeler arasında olası aşırı bir yüklenmenin önlenmesi için, fiziksel kapasite de göz önünde bulundurularak, istasyonlara en çok 21 yeni soket kurulmasına izin verilmiştir.
- Enflasyon oranı ve firmanın getiri beklentisi
Maliyetler dolar cinsinden olacağı için, 2000-2022 yılları arasında doların değerindeki ortalama enflasyon %2 olarak ele alınmıştır [87]. Firmanın getiri beklentisi, dolar bazlı şirket kredi faiz oranları da göz önünde bulundurularak uzman görüşüne göre %10 olarak kararlaştırılmıştır.

5.2 Sayısal Değerlendirme

Geliştirilen model, her bir amaç fonksiyonunun aralığının elde edilmesinde kullanılacak ödünleşme tablosunun yalnızca Pareto Eniyi Çözümlerden (PEÇ) oluşturulması için Öncelikli Eniyileme Yöntemi (ÖEY) kullanılarak çözülmüş olup, elde edilen sonuçlar Tablo 5.8’de yer almaktadır [88].

Model, ilk amaç fonksiyonu öncelikli bir şekilde dikkate alınarak çalıştırıldığında 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 çalıştırıldığında ise elde edilen f_1 ve f_2 değerleri sırasıyla f_2^{ideal} ve f_1^{nadir} sütunlarında yer almaktadır. Bununla birlikte, çözüm süreleri ise ÇS sütunlarında saniye cinsinden yer almaktadır.

Tablo 5.7. Yenimahalle problemine ait ideal ve nadir çözüm değerleri ve süreleri

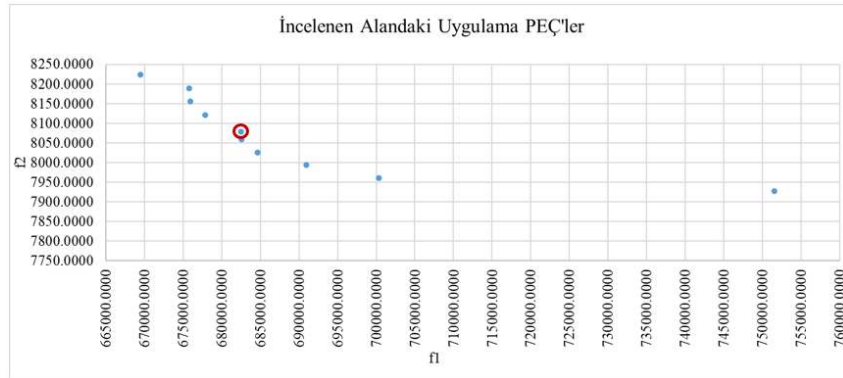
P#	f_1^{ideal}	f_2^{nadir}	ÇS (sn)	f_2^{ideal}	f_1^{nadir}	ÇS (sn)
Yenimahalle	669439.8	8224.420	79.57	7927.946	751523.2	1.16

Her iki amaç fonksiyonu arasında farklı dengeler sağlayan bir dizi çözüm elde edebilmek için, Tablo 5.7’deki değerlerden yola çıkılarak ve AEKY 2 kullanılarak PEÇ’ler elde edilmiştir. Elde edilen PEÇ’ler Tablo 5.8’de yer almaktadır.

Tablo 5.8. Yenimahalle problemi için AEKY 2 ile elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

P#	PEÇ #	f1	f2+s2=	f2	s2	b
YENİMAHALLE	1	751523.2000	7927.9460	7927.9460		
YENİMAHALLE	2	700313.5000	7960.8876	7960.4840	0.4036	0
YENİMAHALLE	3	690950.4000	7993.8291	7993.7904	0.0387	0
YENİMAHALLE	4	684669.4000	8026.7707	8026.6805	0.0901	0
YENİMAHALLE	5	682580.0000	8059.7122	8059.0523	0.6599	0
YENİMAHALLE	6	682440.3000	8092.6538	8079.4342	13.2196	0
YENİMAHALLE	7	677873.6000	8125.5953	8120.9966	4.5987	0
YENİMAHALLE	8	675907.8000	8158.5369	8156.5836	1.9533	0
YENİMAHALLE	9	675756.9000	8191.4784	8188.9520	2.5264	0
YENİMAHALLE	10	669439.8000	8224.4200	8224.4200		

Elde edilen PEÇ'lerin bulunduğu Şekil 5.2'de Tablo 5.8'deki 10 adet PEÇ yer almakta olup; her bir çözüm 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 seçecektir.



Şekil 5.2. İncelenen alandaki uygulama PEÇ'ler

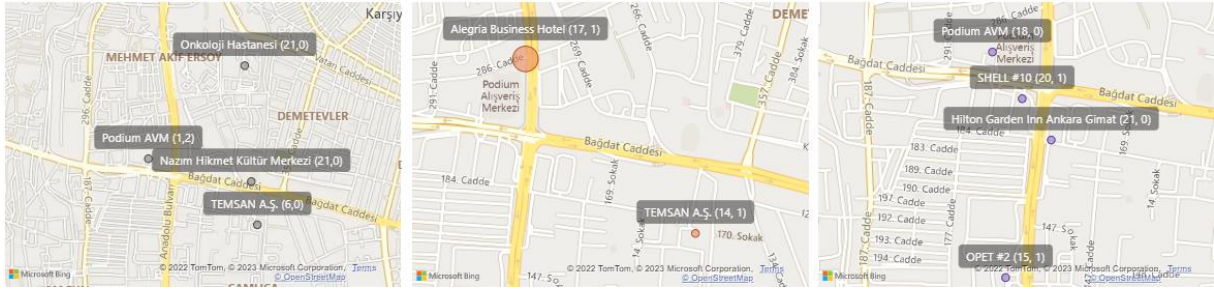
Örneğin, karar vericinin yukarıdaki şekilde kırmızı daire içerisinde yer alan çözümü seçtiği düşünüldüğünde; benimsenecek yatırım planı EK 6'daki Tablo 5.9'da özetlenmiştir.

İlgili tabloda yer alan yatırım planında, planlama dönemleri bazında yapılacak yatırım aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- 1. planlama döneminde yeni kurulan şarj istasyonlarının bulunduğu yerler; 6, 7, 11, 12
- 1. planlama döneminde ilave soket kurulan şarj istasyonlarının bulunduğu yerler; -
- 2. planlama döneminde yeni kurulan şarj istasyonlarının bulunduğu yerler; 13

2. planlama döneminde ilave soket kurulan şarj istasyonlarının bulunduğu yerler; 12
- 3. planlama döneminde yeni kurulan şarj istasyonlarının bulunduğu yerler; 2, 4, 8
3. planlama döneminde ilave soket kurulan şarj istasyonlarının bulunduğu yerler; 11

Tablo 5.9'dan elde edilen sonuçlar ile, soldan sağa her bir planlama döneminde yeni kurulan ve ilave soket kurulumu yapılan istasyonlar Şekil 5.3'teki harita üzerinde görölmektedir. Haritadaki veri etiketleri istasyonun bulunduğu yerin adı ve parantez içinde sırasıyla AC ve DC şarj hizmeti veren soket sayılarını temsil etmektedir. Örneğin, 1. Planlama dönemindeki Podium AVM (1,2) veri etiketi Podium AVM'ye 1 adet AC, 2 adet DC şarj hizmeti veren soket kurulacağını ifade etmektedir.



Şekil 5.3. İncelenen alandaki genişleme planı

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Hava kirliliği çevre problemlerinden sadece biri olup Sanayi Devrimi'nden sonra ve özellikle sanayileşmiş bölgelerde dünyanın en önemli problemi haline gelmiş, insana ve çevreye verdiği zararlar önemli boyutlara ulaşmıştır. İnsanlık tarihinin önemli dönüm noktalarından biri olarak kabul edilen Sanayi Devrimi'nin ardından çevre kirliliğinde büyük oranda artış yaşanmıştır. Bu artış, kas gücünün yerini zamanla makine gücünün alması ve böylelikle enerjiye olan bağımlılığın artması ile de ivmelenmiştir. Artan bağımlılık, endüstriyel alanda geniş kullanım alanına sahip olan fosil yakıtların tüketiminin artmasını da beraberinde getirmiştir.

Çevre konusundaki endişe ve hassasiyetin artması ile temiz ve sürdürülebilir bir gelecek endişesi ile çeşitli adımlar atılmakta, bu konu için çözümler aranmaktadır. EA'lar da çevre dostu özellikleri nedeniyle küresel ölçekte benimsenen başlıca çözümlerden biridir. Zaman içerisinde EA'lara olan ilgi, sürücülere sağlanan sessiz, konforlu ve ekonomik sürüş deneyiminin de etkisi ile artmakta ve bu ilgi satış rakamlarına yansımaktadır. Dolayısı ile bu durum, araştırmacıların da EA'larla ilgili alanda ortaya çıkan çeşitli problemler üzerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır.

Dünyada ve ülkemizde her geçen gün hızla artan EA sayıları, şarj hizmeti sağlayıcıları için mevcut altyapının uygun bir yatırım planı ile kapasitesinin artırılması ve/veya genişletilmesi gerekliliğini gündeme getirmektedir. Ülkemiz özelinde, EA'lar hızla benimsenmeye başlamış olup, önümüzdeki süreçte mevcut şarj altyapısına daha fazla yüklenme olacağı araştırmacılar tarafından değerlendirilmektedir.

Bu nedenle bu tez çalışmasında, EA'ların şarj gereksinimini mümkün olduğunca yakın bölgelerden karşılayabilecek ve şarj istasyonu kurulum ve işletim maliyetini enküçükleyecek şekilde hangi dönemde, nerede şarj istasyonu kapasitesinin ne kadar artırılacağı ve/veya nerede hangi kapasitede yeni istasyon kurulacağı kararının verilmesi problemi ele alınmıştır.

Çok Amaçlı Çok Dönemli Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçim ve Boyutlandırma Problemi (ÇAÇD-EAŞİYSBP) olarak isimlendirilen problem, mevcut şarj istasyonlarının göz önünde bulundurularak, artan yeni talebi karşılayacak şekilde kapasite artışı ve/veya yeni istasyon kurulum yerlerinin seçilmesi ve kapasitelerinin belirlenmesi şeklinde tanımlanmış ve çözüm için çok amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli (ÇA-KTDPM) geliştirilmiştir. Modelde, EA'ların marka ve modellerine bağlı şarj talepleri, farklı araç marka

ve modellerdeki araçların ve istasyondaki şarj cihazının dönüştürücü ve güç kapasiteleri gerçek hayata uygun bir şekilde birlikte ele alınmıştır.

Ele alınan problemin çözümü ile, mevcut şarj istasyonları da göz önünde bulundurularak artan talebin karşılanmasını sağlamak üzere elde edilecek dönemsel planlar ilgili kurum/firmalar ile paylaşarak EA şarj istasyonu yatırımcılarının karar vermesinde yönlendirici olacaktır.

Önerilen modelin genel performansı, hesaplamalı analiz yolu ile rassal olarak üretilen 25 farklı test problemi üzerinde incelenmiş olup, çözüm için Çok Amaçlı Eniyileme (ÇAE) yöntemlerinden Öncelikli Eniyileme Yöntemi (ÖEY) ve Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2(AEKY 2) kullanılarak Pareto Eniyi Çözümler (PEÇ) ve Yaklaşık Pareto Eniyi Çözümler (YPEÇ)'ler elde edilmiştir. Elde edilen PEÇ ve YPEÇ'ler, karar vericiye amaç fonksiyonlarının farklı düzeyleri için ödünleşim bilgisini sunmakta olup, hangi amaç fonksiyonunun eniyi değerinden ne kadar uzaklaştıkça diğer amaç fonksiyonunun eniyi değerine ne kadar yaklaşacağı görülebilmektedir. Küçük boyutlu test problemlerinden P#15 problemleri için eniyi değer makul zamanda bulunabilirken, diğer problemlerden bazıları için herhangi bir değer ve/veya eniyi değerlerin bulunamadığı görülmüştür.

Yapılan deneysel hesaplama analizi sonucunda, toplam mahalle sayısının 30'dan büyük olduğu problemlerde eniyi çözümlere ulaşmanın zor olduğu görülmektedir. 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. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise ileriki araştırmalarda sezgisel veya meta sezgisel algoritmalar geliştirilebilir.

Tezde ayrıca Ankara ili Yenimahalle ilçesindeki bir alan gerçek bir uygulama alanı olarak ele alınarak sonuçlar sunulmuştur. Sonuç olarak bu çalışmada, artan EA sayıları nedeniyle artan elektrik şarj talebinin karşılanabilmesini sağlayacak EA şarj istasyonları alt yapısının dönemsel yatırım planına cevap verecek bir model önerilmiş ve bu alanda yatırım yapmak isteyenlerin kullanımı için alan yazına kazandırılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] I. V. Muralikrishna and V. Manickam, *Environmental Management: Science and Engineering for Industry*. Elsevier, 2017.
- [2] “EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research.” edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg70 (accessed Dec. 04, 2022).
- [3] U.S. Department of Energy, “Alternative Fuels Data Center: Electric Vehicle (EV) Definition.” afdc.energy.gov/laws/12660 (accessed Nov. 16, 2022).
- [4] E. Crisostomi, R. Shorten, S. Stüdl, and F. Wirth, *Electric and Plug-in Hybrid Vehicle Networks Optimization and Control*. CRC Press, 2018.
- [5] T. Denton, *Electric and hybrid vehicles*. 2016. doi: 10.1002/9781118954454.ch7.
- [6] Milliyet.com.tr, “SON DAKİKA || Elektrikli otomobillerde şarj problemi - Otomobil Haberleri.” milliyet.com.tr/otomobil/elektrikli-otomobilde-ilginc-gelisme-1000-km-giderse-6698150 (accessed Apr. 15, 2022).
- [7] NTV, “TOGG ne zaman satışa çıkacak, fiyatı ne kadar olacak? (TOGG tanıtım tarihi) - Son Dakika Ekonomi Haberleri | Ntv Para.” ntv.com.tr/ntvpara/togg-ne-zaman-satisa-cikacak-fiyati-ne-kadar-olacak-togg-tanitim-tarihi,58kQPux80kObokb9ziOf1A (accessed Nov. 21, 2022).
- [8] D. Saygın, O. B. Tör, S. Teimourzadeh, M. Koç, J. Hildermeier, and C. Kolokathis, “Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü : Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri,” 2019. [Online]. Available: shura.org.tr
- [9] R. Z. Farahani and M. Hekmatfar, *Facility Location Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*. 2012. [Online]. Available: [icclab.nl/fileadmin/default/content/erim/research/centres/erasmus_centre_for_cooperatives_\(ecc\)/research/articles/c2_2007_orientation_in_diversification_behavior_of_coope.pdf](http://icclab.nl/fileadmin/default/content/erim/research/centres/erasmus_centre_for_cooperatives_(ecc)/research/articles/c2_2007_orientation_in_diversification_behavior_of_coope.pdf)
- [10] “2021 Yılı ‘Elektrikli ve Hibrid’ Satış Rakamları Belli Oldu | TEHAD.” tehad.org/2022/01/16/2021-yili-elektrikli-ve-hibrid-satis-rakamlari-belli-oldu/ (accessed Dec. 25, 2022).
- [11] S. Deb, K. Tammi, K. Kalita, and P. Mahanta, “Review of recent trends in charging infrastructure planning for electric vehicles,” *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, vol. 7, no. 6, 2018, doi: 10.1002/wene.306.
- [12] A. R. Kizhakkan, A. K. Rathore, and A. Awasthi, “Review of Electric Vehicle Charging Station Location Planning,” 2019. doi: 10.1109/ITEC-

India48457.2019.ITECIndia2019-226.

- [13] M. Kchaou-Boujelben, “Charging station location problem: A comprehensive review on models and solution approaches,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 132, 2021, doi: 10.1016/j.trc.2021.103376.
- [14] P. Jog, S. Shete, R. K. Kumawat, and D. K. Palwalia, “Electric Vehicle Charging Station Infrastructure: A Review,” in *6th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICRAIE52900.2021.9703969.
- [15] N. Sathaye and S. Kelley, “An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 59, pp. 15–33, 2013, doi: 10.1016/j.tre.2013.08.003.
- [16] H. Gavranović, A. Barut, G. Ertek, O. B. Yüzbaşıoğlu, O. Pekpostalci, and Ö. Tombuş, “Optimizing the electric charge station network of EŞARJ,” in *2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management, ITQM 2014*, 2014, vol. 31, pp. 15–21. doi: 10.1016/j.procs.2014.05.240.
- [17] F. Lu and G. Hua, “A location-sizing model for electric vehicle charging station deployment based on queuing theory,” in *2015 International Conference on Logistics, Informatics and Service Science, LISS 2015*, 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/LISS.2015.7369769.
- [18] M. Kuby and S. Lim, “The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles,” *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 39, no. 2, pp. 125–145, 2005, doi: 10.1016/j.seps.2004.03.001.
- [19] N. Kang, F. M. Feinberg, and P. Y. Papalambros, “Integrated decision making in electric vehicle and charging station location network design,” *J. Mech. Des. Trans. ASME*, vol. 137, no. 6, 2015, doi: 10.1115/1.4029894.
- [20] K. Huang, P. Kanaroglou, and X. Zhang, “The design of electric vehicle charging network,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 49, pp. 1–17, 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.08.028.
- [21] W. Tu, Q. Li, Z. Fang, S. lung Shaw, B. Zhou, and X. Chang, “Optimizing the locations of electric taxi charging stations: A spatial–temporal demand coverage approach,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 65, pp. 172–189, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2015.10.004.
- [22] D. Han, Y. Ahn, S. Park, and H. Yeo, “Trajectory-interception based method for

- electric vehicle taxi charging station problem with real taxi data,” *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 10, no. 8, pp. 671–682, 2016, doi: 10.1080/15568318.2015.1104565.
- [23] C. Kong, R. Jovanovic, I. S. Bayram, and M. Devetsikiotis, “A hierarchical optimization model for a network of electric vehicle charging stations,” *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017, doi: 10.3390/en10050675.
- [24] C. Lee and J. Han, “Benders-and-Price approach for electric vehicle charging station location problem under probabilistic travel range,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 106, pp. 130–152, 2017, doi: 10.1016/j.trb.2017.10.011.
- [25] S. A. MirHassani and R. Ebrazi, “A flexible reformulation of the refueling station location problem,” *Transp. Sci.*, vol. 47, no. 4, pp. 617–628, 2013, doi: 10.1287/trsc.1120.0430.
- [26] J. G. Kim and M. Kuby, “The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 6, pp. 5406–5420, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.08.108.
- [27] B. Yildiz, O. Arslan, and O. E. Karaşan, “A branch and price approach for routing and refueling station location model,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 248, no. 3, pp. 815–826, 2016, doi: 10.1016/j.ejor.2015.05.021.
- [28] J. Zhu, Y. Li, J. Yang, X. Li, S. Zeng, and Y. Chen, “Planning of electric vehicle charging station based on queuing theory,” in *The 6th International Conference on Renewable Power Generation (RPG)*, 2017, vol. 2017, no. 13, pp. 1867–1871. doi: 10.1049/joe.2017.0655.
- [29] H. Zheng, X. He, Y. Li, and S. Peeta, “Traffic Equilibrium and Charging Facility Locations for Electric Vehicles,” *Networks Spat. Econ.*, vol. 17, pp. 435–457, 2017, doi: 10.1007/s11067-016-9332-z.
- [30] Y. Wang, J. Shi, R. Wang, Z. Liu, and L. Wang, “Siting and sizing of fast charging stations in highway network with budget constraint,” *Appl. Energy*, vol. 228, pp. 1255–1271, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.025.
- [31] M. Kchaou Boujelben and C. Gicquel, “Location of electric vehicle charging stations under uncertainty on the driving range,” in *International Conference on Computational Logistics*, 2018, pp. 475–486. doi: 10.1007/978-3-030-00898-7_32.
- [32] S. Bouguerra and S. B. Layeb, “Optimal locations determination for an electric vehicle charging infrastructure in the city of tunis, tunisia,” in *Advances in Science, Technology and Innovation*, 2018, pp. 979–981. doi: 10.1007/978-3-319-70548-4_283.

- [33] C. Wang, F. He, X. Lin, Z. J. M. Shen, and M. Li, "Designing locations and capacities for charging stations to support intercity travel of electric vehicles: An expanded network approach," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 102, pp. 210–232, 2019, doi: 10.1016/j.trc.2019.03.013.
- [34] S. Bouguerra and S. Bhar Layeb, "Determining optimal deployment of electric vehicles charging stations: Case of Tunis City, Tunisia," *Case Stud. Transp. Policy*, vol. 7, pp. 628–642, 2019, doi: 10.1016/j.cstp.2019.06.003.
- [35] M. Kchaou Boujelben and C. Gicquel, "Efficient solution approaches for locating electric vehicle fast charging stations under driving range uncertainty," *Comput. Oper. Res.*, vol. 109, pp. 288–299, 2019, doi: 10.1016/j.cor.2019.05.012.
- [36] M. Kubry, L. Lines, R. Schultz, Z. Xie, J. G. Kim, and S. Lim, "Optimization of hydrogen stations in Florida using the Flow-Refueling Location Model," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 15, pp. 6045–6064, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.05.050.
- [37] H. Zhang, L. Tang, C. Yang, and S. Lan, "Locating electric vehicle charging stations with service capacity using the improved whale optimization algorithm," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 41, 2019, doi: 10.1016/j.aei.2019.02.006.
- [38] Y. He, K. M. Kockelman, and K. A. Perrine, "Optimal locations of U.S. fast charging stations for long-distance trip completion by battery electric vehicles," *J. Clean. Prod.*, vol. 214, pp. 452–461, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.188.
- [39] H. Fredriksson, M. Dahl, and J. Holmgren, "Optimal placement of charging stations for electric vehicles in large-scale transportation networks," in *The 10th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks*, 2019, vol. 160, pp. 77–84. doi: 10.1016/j.procs.2019.09.446.
- [40] W. Kong, Y. Luo, G. Feng, K. Li, and H. Peng, "Optimal location planning method of fast charging station for electric vehicles considering operators, drivers, vehicles, traffic flow and power grid," *Energy*, vol. 186, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.07.156.
- [41] B. Yıldız, E. Olcaytu, and A. Şen, "The urban recharging infrastructure design problem with stochastic demands and capacitated charging stations," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 119, pp. 22–44, 2019, doi: 10.1016/j.trb.2018.11.001.
- [42] W. Liu, Y. Tang, F. Yang, Y. Dou, and J. Wang, "A multi-objective decision-making approach for the optimal location of electric vehicle charging facilities," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 60, no. 2, pp. 813–834, 2019, doi: 10.32604/cmc.2019.06754.

- [43] L. Yazdi, R. Ahadi, and B. Rezaee, "Optimal Electric Vehicle Charging Station Placing with Integration of Renewable Energy," in *Proceedings of 2019 15th Iran International Industrial Engineering Conference, IIIEC 2019*, 2019, pp. 47–51. doi: 10.1109/IIIEC.2019.8720644.
- [44] D. Hu, J. Zhang, and Q. Zhang, "Optimization design of electric vehicle charging stations based on the forecasting data with service balance consideration," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 75, pp. 215–226, 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2018.07.063.
- [45] J. Jia, C. Liu, and T. Wan, "Planning of the charging station for electric vehicles utilizing cellular signaling data," *Sustainability*, vol. 11, no. 3, 2019, doi: 10.3390/su11030643.
- [46] Y. Huang and K. M. Kockelman, "Electric vehicle charging station locations: Elastic demand, station congestion, and network equilibrium," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 78, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2019.11.008.
- [47] M. Kchaou-Boujelben and C. Gicquel, "Locating electric vehicle charging stations under uncertain battery energy status and power consumption," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 149, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106752.
- [48] Z. Chen, C. Li, X. Chen, and Q. Yang, "Towards optimal planning of EV charging stations under grid constraints," in *IFAC-PapersOnLine*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 14103–14108. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1005.
- [49] G. Wang, V. Kekatos, A. J. Conejo, and G. B. Giannakis, "Ergodic Energy Management Leveraging Resource Variability in Distribution Grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 6, pp. 4765–4775, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2524679.
- [50] S. A. MirHassani, A. Khaleghi, and F. Hooshmand, "Two-stage stochastic programming model to locate capacitated EV-charging stations in urban areas under demand uncertainty," *EURO J. Transp. Logist.*, vol. 9, 2020, doi: 10.1016/j.ejtl.2020.100025.
- [51] J. Liu *et al.*, "A planning strategy considering multiple factors for electric vehicle charging stations along German motorways," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 124, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106379.
- [52] A. Yazdekhashti, M. A. Jazi, and J. Ma, "Electric vehicle charging station location determination with consideration of routing selection policies and driver's risk preference," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 162, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107674.
- [53] Ö. B. Kınay, F. Gzara, and S. A. Alumur, "Full cover charging station location problem

- with routing,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 144, pp. 1–22, 2021, doi: 10.1016/j.trb.2020.12.001.
- [54] O. Arslan, B. Yildiz, and O. E. Karasan, “Impacts of battery characteristics, driver preferences and road network features on travel costs of a plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) for long-distance trips,” *Energy Policy*, vol. 74, no. C, pp. 168–178, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.08.015.
- [55] P. Göpfert and S. Bock, “A Branch&Cut approach to recharging and refueling infrastructure planning,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 279, no. 3, pp. 808–823, 2019, doi: 10.1016/j.ejor.2019.06.031.
- [56] M. A. Quddus, O. Shahvari, M. Marufuzzaman, S. D. Ekşioğlu, and K. K. Castillo-Villar, “Designing a reliable electric vehicle charging station expansion under uncertainty,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 236, 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2021.108132.
- [57] Y. Zhang, Y. Wang, F. Li, B. Wu, Y. Y. Chiang, and X. Zhang, “Efficient Deployment of Electric Vehicle Charging Infrastructure: Simultaneous Optimization of Charging Station Placement and Charging Pile Assignment,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 10, pp. 6654–6659, 2021, doi: 10.1109/TITS.2020.2990694.
- [58] A. Aghalari, D. E. Salamah, C. Marino, and M. Marufuzzaman, “Electric vehicles fast charger location-routing problem under ambient temperature,” *Ann. Oper. Res.*, 2021, doi: 10.1007/s10479-021-04375-8.
- [59] Z. Bao and C. Xie, “Optimal station locations for en-route charging of electric vehicles in congested intercity networks: A new problem formulation and exact and approximate partitioning algorithms,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 133, 2021, doi: 10.1016/j.trc.2021.103447.
- [60] S. S. Fazeli, S. Venkatachalam, R. B. Chinnam, and A. Murat, “Two-Stage Stochastic Choice Modeling Approach for Electric Vehicle Charging Station Network Design in Urban Communities,” in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, vol. 22, no. 5, pp. 3038–3053. doi: 10.1109/TITS.2020.2979363.
- [61] X. Li and A. Jenn, “An integrated optimization platform for spatial-temporal modeling of electric vehicle charging infrastructure,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 104, 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103177.
- [62] X. Liu, “Bi-level planning method of urban electric vehicle charging station considering multiple demand scenarios and multi-type charging piles,” *J. Energy Storage*, vol. 48, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104012.

- [63] J. Li, C. Xie, and Z. Bao, "Optimal En-Route Charging Station Locations for Electric Vehicles: A Comparative Evaluation of Network-Based and Metanetwork-Based Approaches," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 142, 2021, doi: 10.1016/j.trc.2022.103781.
- [64] P. Zhong, A. Xu, Y. Kang, S. Zhang, and Y. Zhang, "An optimal deployment scheme for extremely fast charging stations," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 15, pp. 1486–1504, 2022, doi: 10.1007/s12083-022-01306-7.
- [65] B. Zhang, M. Zhao, and X. Hu, "Location planning of electric vehicle charging station with users' preferences and waiting time: multi-objective bi-level programming model and HNSGA-II algorithm," *Int. J. Prod. Res.*, 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.2023832.
- [66] M. Asna, H. Shareef, M. A. Muhammad, L. Ismail, and A. Prasanthi, "Multi-objective quantum atom search optimization algorithm for electric vehicle charging station planning," *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, no. 12, pp. 17308–17331, 2022, doi: 10.1002/er.8399.
- [67] S. Deb, K. Tammi, K. Kalita, and P. Mahanta, "Impact of electric vehicle charging station load on distribution network," *Energies*, vol. 11, no. 1, pp. 1–25, 2018, doi: 10.3390/en11010178.
- [68] M. Asna, H. Shareef, P. Achikkulath, H. Mokhlis, R. Errouissi, and A. Wahyudie, "Analysis of an Optimal Planning Model for Electric Vehicle Fast-Charging Stations in Al Ain City, United Arab Emirates," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 73678–73694, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3081020.
- [69] D. Xu, W. Pei, and Q. Zhang, "Optimal Planning of Electric Vehicle Charging Stations Considering User Satisfaction and Charging Convenience," *Energies*, vol. 15, no. 14, 2022, doi: 10.3390/en15145027.
- [70] Z. Wang, P. Liu, H. Han, C. Lu, and T. Xin, "A distribution model of electric vehicle charging station," in *Applied Mechanics and Materials*, 2010, vol. 44–47, pp. 1543–1548. doi: 10.4028/scientific.net/AMM.44-47.1543.
- [71] S. Micari, A. Polimeni, G. Napoli, L. Andaloro, and V. Antonucci, "Electric vehicle charging infrastructure planning in a road network," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 98–108, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.022.
- [72] S. Shom, F. Al Juheshi, A. Rayyan, M. Alahmad, M. Abdul-Hafez, and K. Shuaib, "Case studies validating algorithm to determine the number of charging station placed

- in an Interstate and US-Highway,” in *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, 2017, pp. 50–55. doi: 10.1109/EIT.2017.8053329.
- [73] T. Boonraksa and B. Marungsri, “Optimal Fast Charging Station Location for Public Electric Transportation in Smart Power Distribution Network,” in *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEECON.2018.8712176.
- [74] J. Feng, S. X. Xu, and M. Li, “A novel multi-criteria decision-making method for selecting the site of an electric-vehicle charging station from a sustainable perspective,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 65, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102623.
- [75] P. Rani and A. R. Mishra, “Fermatean fuzzy Einstein aggregation operators-based MULTIMOORA method for electric vehicle charging station selection,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 182, 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115267.
- [76] M. Schmidt, P. Zmuda-trzebiatowski, M. Kiciński, P. Sawicki, and K. Lasak, “Multiple-criteria-based electric vehicle charging infrastructure design problem,” *Energies*, vol. 14, 2021, doi: 10.3390/en14113214.
- [77] S. Pradhan, D. Ghose, and Shabbiruddin, “Planning and design of suitable sites for electric vehicle charging station— a case study,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 404–418, 2021, doi: 10.1080/19397038.2020.1862347.
- [78] G. Wei, C. Wei, J. Wu, and Y. Guo, “Probabilistic linguistic multiple attribute group decision making for location planning of electric vehicle charging stations based on the generalized Dice similarity measures,” *Artif. Intell. Rev.*, vol. 54, pp. 4137–4167, 2021, doi: 10.1007/s10462-020-09950-2.
- [79] P. Tamay and E. Inga, “Charging Infrastructure for Electric Vehicles Considering Their Integration into the Smart Grid,” *Sustainability*, vol. 14, no. 14, pp. 0–20, 2022, doi: 10.3390/su14148248.
- [80] “İstanbul İli Elektrikli Araçlar İçin Şarj İstasyonu Kurulumu Ön Fizibilite Raporu,” 2021.
- [81] “EV charging Levels explained | EVBox.” blog.evbox.com/uk-en/ev-charging-levels (accessed Dec. 25, 2022).
- [82] B. Keçeci *et al.*, “AEEE tahmini ve toplama noktalarının belirlenmesi: Çankaya Belediyesi için bir uygulama,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 24, no. 4, pp. 692–704, 2018, doi: 10.5505/pajes.2018.23434.
- [83] “BMW i3 120 Ah (2018-2022) price and specifications - EV Database.” [ev-](https://ev-database.org/)

- database.org/uk/car/1145/BMW-i3-120-Ah (accessed Jan. 10, 2023).
- [84] M. Basyir, M. Nasir, S. Suryati, and W. Mellyssa, "Determination of Nearest Emergency Service Office using Haversine Formula Based on Android Platform," *Emit. Int. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 270–278, 2017, doi: 10.24003/emitter.v5i2.220.
- [85] ESRI, "Distance on a sphere: The Haversine Formula - Esri Community." community.esri.com/t5/coordinate-reference-systems-blog/distance-on-a-sphere-the-haversine-formula/ba-p/902128 (accessed Oct. 25, 2022).
- [86] "OTOPARK YÖNETMELİĞİNDE DEĞİŞİKLİK YAPILMASINA DAİR YÖNETMELİK," 2021.
- [87] Smart Asset, "Best Inflation Calculator (2022) - Historical & Future Value | SmartAsset.com." smartasset.com/investing/inflation-calculator (accessed Sep. 24, 2022).
- [88] G. Mavrotas, "Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems," *Appl. Math. Comput.*, vol. 213, pp. 455–465, 2009, doi: 10.1016/j.amc.2009.03.037.
- [89] R. K. Arora, *Optimization: algorithms and applications*. 2015. doi: 10.5860/choice.195857.
- [90] G. Mavrotas and K. Florios, "AUGMECON2: A novel version of the ϵ -constraint method for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems."
- [91] M. Rabbani, K. R. Mokarrari, and N. Akbarian-saravi, "A multi-objective location inventory routing problem with pricing decisions in a sustainable waste management system," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 75, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103319.
- [92] K. Govindan, S. Nosrati-Abarghoee, M. M. Nasiri, and F. Jolai, "Green reverse logistics network design for medical waste management: A circular economy transition through case approach," *J. Environ. Manage.*, vol. 322, 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115888.
- [93] M. Parvizi, E. Shadkam, and N. Jahani, "A Hybrid COA/ ϵ -Constraint Method for Solving Multi-Objective Problems," in *International Journal in Foundations of Computer Science & Technology*, 2015, vol. 5, no. 5, pp. 27–40. doi: 10.5121/ijfcst.2015.5503.
- [94] "TÜİK Raporu." [Online]. Available: tuik.gov.tr/indir/duyuru/favori_raporlar.xlsx

- [95] “TÜİK Tablolar.” [Online]. Available: tuik.gov.tr/
- [96] “İlçelerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Sıralaması Araştırması Sege-2017,” 2017. [Online]. Available: sanayi.gov.tr/merkez-birimi/b94224510b7b/sege/ilce-sege-raporlari

EK 1: EAŞİYSP ve EAŞİYSBP İLE İLGİLİ ALAN YAZINDAKİ ÇALIŞMALAR

Tablo 2.1. EAŞİYSP ve EAŞİYSBP ile ilgili araştırma çalışmaları

Çalışma	Eniyileme Modeli Kullanımı	Aracın Toplu/ Bireysel Ele Alınması	Yer Seçimi Kararı	Boyutlandırma Kararı	Tek Amaçlı	Çok Amaçlı	Marka ve Model Ayrımı	Farklı Tip ve/veya Kapasitedeki Soketlerin Kullanımı
<i>Sathaye and Kelley</i> [15]	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	Evet
<i>Gavranović et al.</i> [16]	Evet	T	Evet	Hayır	X		NM	NM
<i>Lu and Hua</i> [17]	Evet	T	Evet	Evet	X		NM	Hayır
<i>Kang et al.</i> [19]	Evet	T	Evet	Hayır	X		NM	NM
<i>Huang et al.</i> [20]	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	Evet
<i>Tu et al.</i> [21]	Evet	B	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Han et al.</i> [22]	Evet	B	Evet	Evet	X		NM	Hayır
<i>Kong et al.</i> [23]	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
<i>Lee and Han</i> [24]	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Zhu et al.</i> [28]	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	NM
<i>Zheng et al.</i> [29]	Evet	T	Evet	Hayır			Hayır	NM
<i>Wang et al.</i> [30]	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır

Tablo 2.1. EAŞİYSP ve EAŞİYSBP ile ilgili araştırma çalışmaları (devam ediyor)

Çalışma	Eniyileme Modeli Kullanımı	Aracın Toplu/ Bireysel Ele Alınması	Yer Seçimi Kararı	Boyutlandırma Kararı	Tek Amaçlı	Çok Amaçlı	Marka ve Model Ayrımı	Farklı Tip ve/veya Kapasitedeki Soketlerin Kullanımı
<i>Boujelben and Gicquel [31]</i>	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Bouguerra and Layeb [32]</i>	Evet	NM	Evet	Hayır	X		NM	NM
<i>Wang et al. [33]</i>	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
<i>Bouguerra and Layeb [34]</i>	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
<i>Boujelben and Gicquel [35]</i>	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Zhang et al. [37]</i>	Evet	B	Evet	Hayır	X		NM	Hayır
<i>He et al. [38]</i>	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	Hayır
<i>Fredriksson et al. [39]</i>	Evet	NM	Evet	Hayır	X		NM	NM
<i>Kong et al. [40]</i>	Evet	B	Evet	Evet	X		NM	Hayır
<i>Yıldız et al. [41]</i>	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
<i>Liu et al. [42]</i>	Evet	T	Evet	Evet		X	NM	Hayır
<i>Yazdi et al. [43]</i>	Evet	T	Evet	Hayır	X		NM	NM
<i>Hu et al. [44]</i>	Evet	T	Evet	Evet	X		NM	Hayır
<i>Jia et al. [45]</i>	Evet	T	Evet	Hayır	X		NM	NM

Tablo 2.1. EAŞİYSP ve EAŞİYSBP ile ilgili araştırma çalışmaları (devam ediyor)

Çalışma	Eniyileme Modeli Kullanımı	Aracın Toplu/ Bireysel Ele Alınması	Yer Seçimi Kararı	Boyutlandırma Kararı	Tek Amaçlı	Çok Amaçlı	Marka ve Model Ayrımı	Farklı Tip ve/veya Kapasitedeki Soketlerin Kullanımı
<i>Huang and Kockelman</i> [46]	Evet	T	Evet	Evet			Hayır	Hayır
<i>Boujelben and Gicquel</i> [47]	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Chen et al.</i> [48]	Evet	NM	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
<i>MirHassani et al.</i> [50]	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	Evet
<i>Liu et al.</i> [51]	Evet	T	Evet	Evet	X		Hayır	Hayır
<i>Yazdekhosti et al.</i> [52]	Evet	TB	Evet	Evet		X	Hayır	Evet
<i>Kınay et al.</i> [53]	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Quddus et al.</i> [56]	Evet	T	Evet	Evet			Hayır	NM
<i>Zhang et al.</i> [57]	Evet	NM	Evet	Evet			NM	Hayır
<i>Aghalari et al.</i> [58]	Evet	B	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Bao and Xie</i> [59]	Evet	T	Evet	Hayır			NM	NM
<i>Fazeli et al.</i> [60]	Evet	T	Evet	Evet			NM	Evet
<i>Li and Jenn</i> [61]	Evet	B	Evet	Evet	X		NM	Evet
<i>Liu</i> [62]	Evet	B	Evet	Evet			Hayır	Evet

Tablo 2.1. EAŞİYSP ve EAŞİYSBP ile ilgili araştırma çalışmaları (devam ediyor)

Çalışma	Eniyileme Modeli Kullanımı	Aracın Toplu/ Bireysel Ele Alınması	Yer Seçimi Kararı	Boyutlandırma Kararı	Tek Amaçlı	Çok Amaçlı	Marka ve Model Ayrımı	Farklı Tip ve/veya Kapasitedeki Soketlerin Kullanımı
<i>Li et al.</i> [63]	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Zhong et al.</i> [64]	Evet	T	Evet	Hayır	X		Hayır	NM
<i>Zhang et al.</i> [65]	Evet	T	Evet	Evet			Hayır	Hayır
<i>Asna et al.</i> [66]	Evet	B	Evet	Evet		X	NM	Hayır
<i>Xu et al.</i> [69]	Evet	T	Evet	Hayır		X	Hayır	NM
<i>Wang et al.</i> [70]	Hayır							
<i>Micari et al.</i> [71]	Hayır							
<i>Shom et al.</i> [72]	Hayır							
<i>Boonraksa and Marungsri</i> [73]	Hayır							
<i>Feng et al.</i> [74]	Hayır							
<i>Rani and Mishra</i> [75]	Hayır							
<i>Schmidt et al.</i> [76]	Hayır							
<i>Pradhan et al.</i> [77]	Hayır							
<i>Wei et al.</i> [78]	Hayır							

Tablo 2.1. EAŞİYSP ve EAŞİYSBP ile ilgili araştırma çalışmaları (devam ediyor)

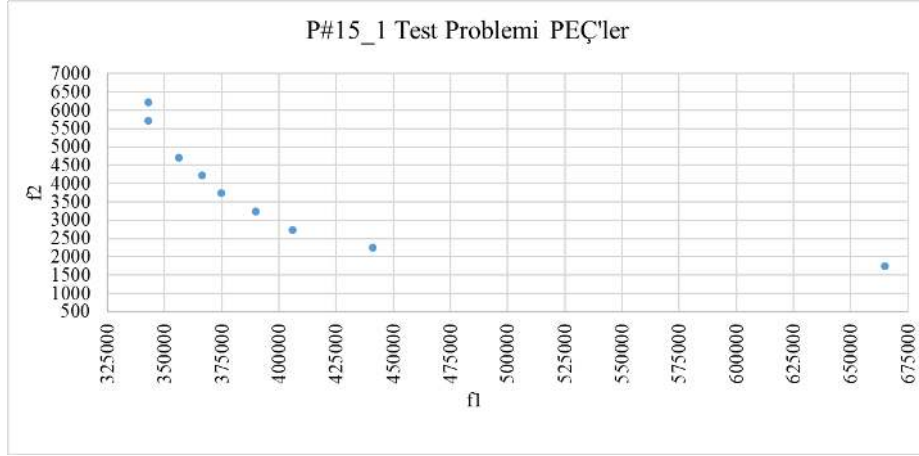
Çalışma	Eniyileme Modeli Kullanımı	Aracın Toplu/ Bireysel Ele Alınması	Yer Seçimi Kararı	Boyutlandırma Kararı	Tek Amaçlı	Çok Amaçlı	Marka ve Model Ayrımı	Farklı Tip ve/veya Kapasitedeki Soketlerin Kullanımı
<i>Tamay and Inga [79]</i>	Hayır							

EK 2: P#15_2 TEST PROBLEMİ İÇİN ÖRNEK YATIRIM PLANI DETAYLARI

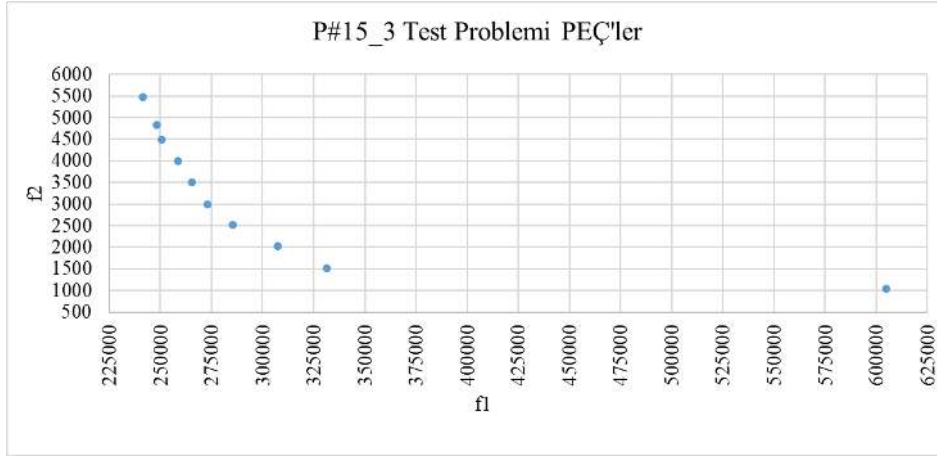
Tablo 4.2. P#15_2 test problemi için örnek çözüme ait yatırım planı

[illegible]

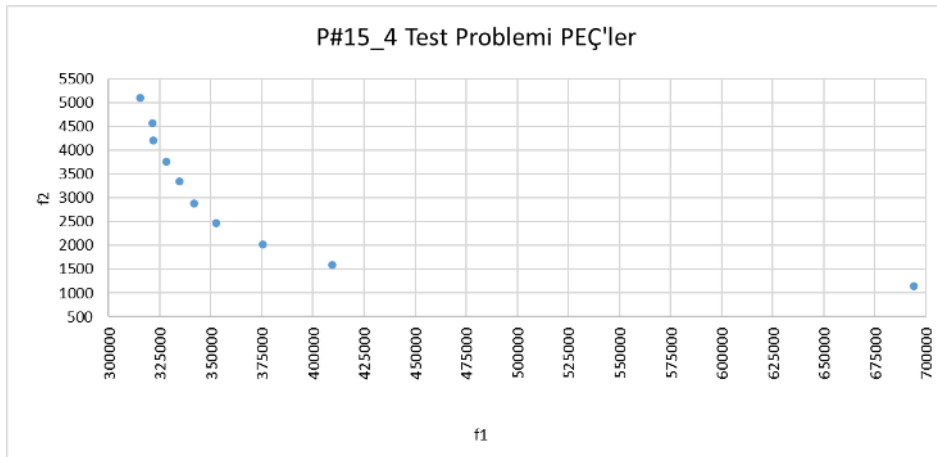
EK 3: TEST PROBLEMLERİ İÇİN ELDE EDİLEN PARETO ÇÖZÜMLER



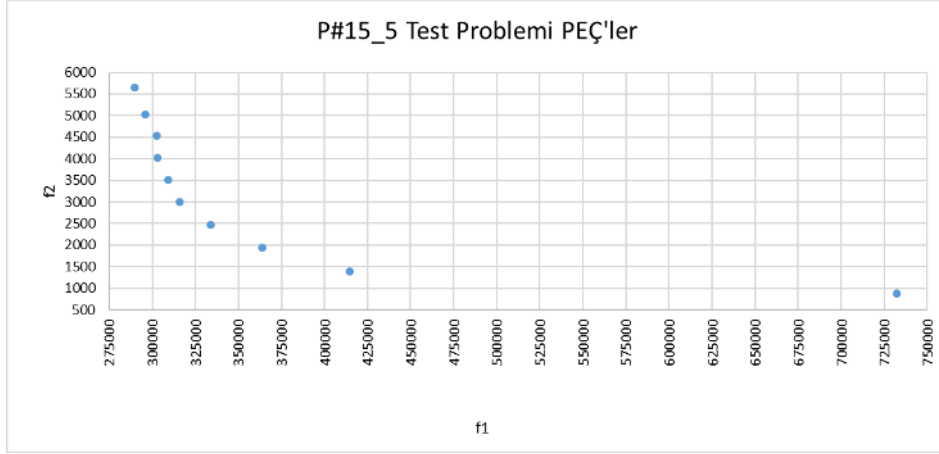
Şekil 4.2. P#15_1 test problemi PEÇ'ler



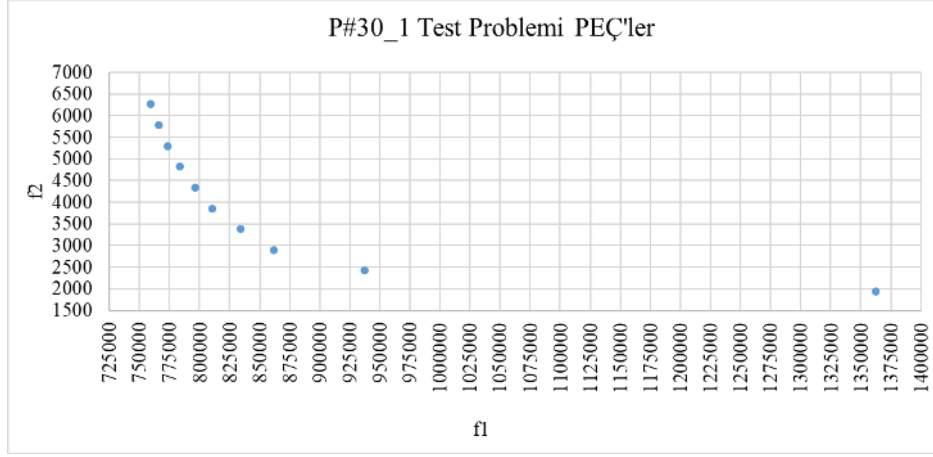
Şekil 4.3. P#15_3 test problemi PEÇ'ler



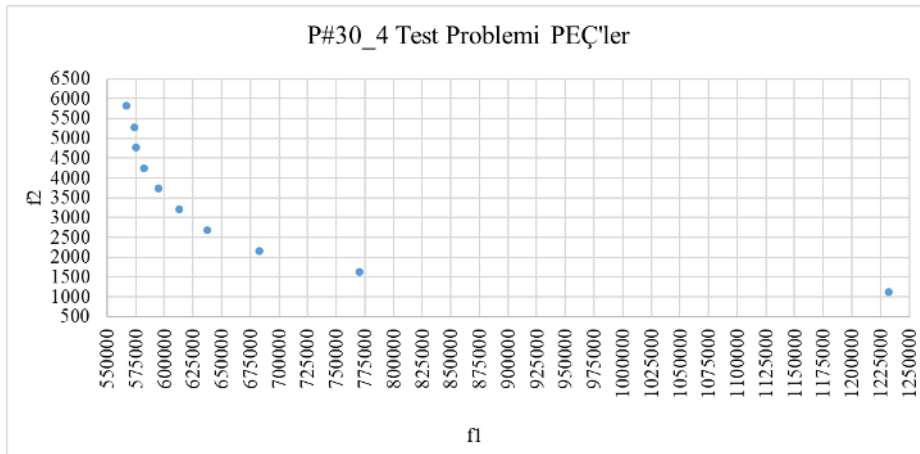
Şekil 4.4. P#15_4 test problemi PEÇ'ler



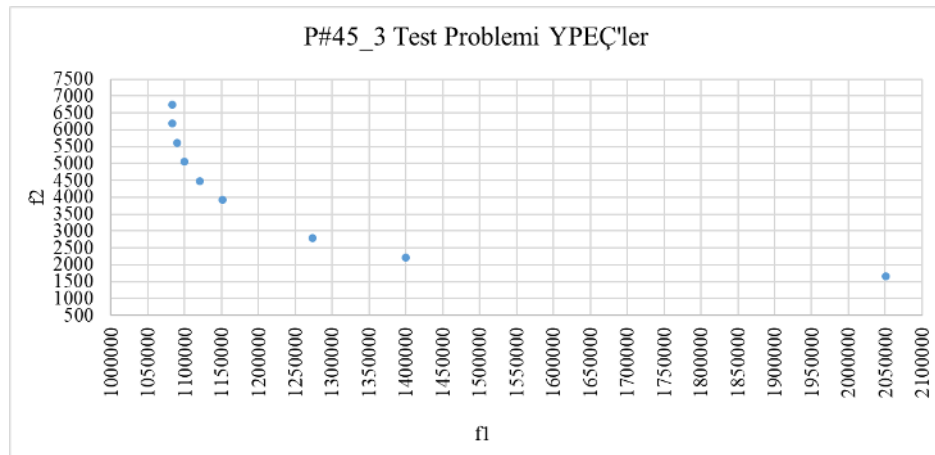
Şekil 4.5. P#15_5 test problemi PEÇ'ler



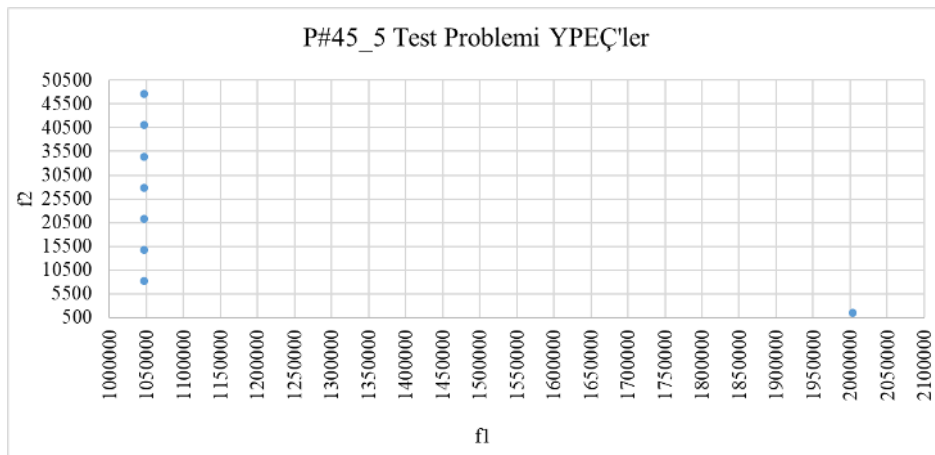
Şekil 4.6. P#30_1 test problemi PEÇ'ler



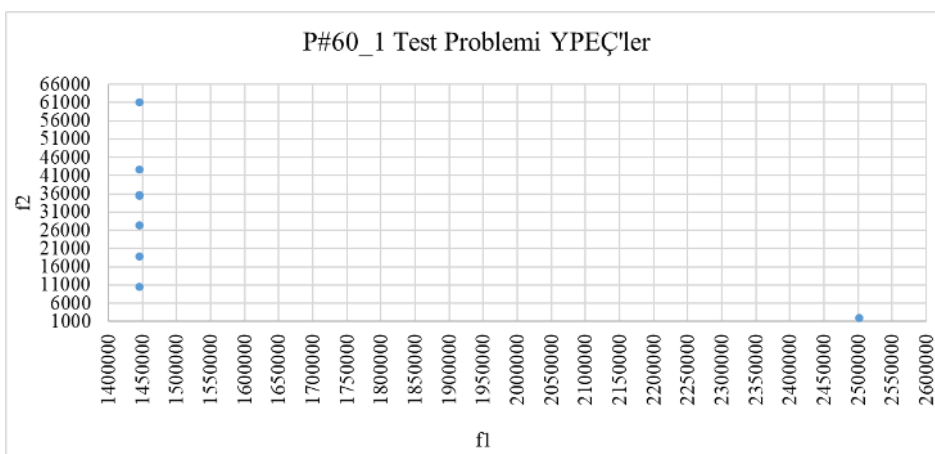
Şekil 4.7. P#30_4 test problemi PEÇ'ler



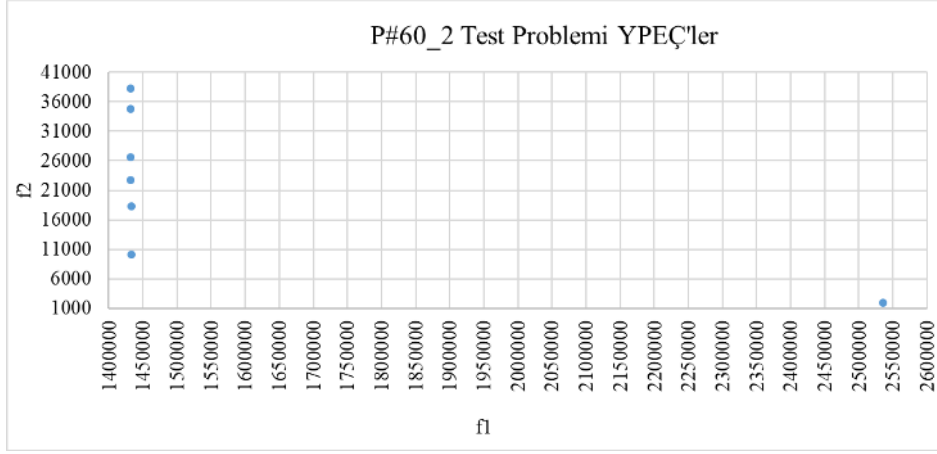
Şekil 4.8. P#45_3 test problemi YPEÇ'ler



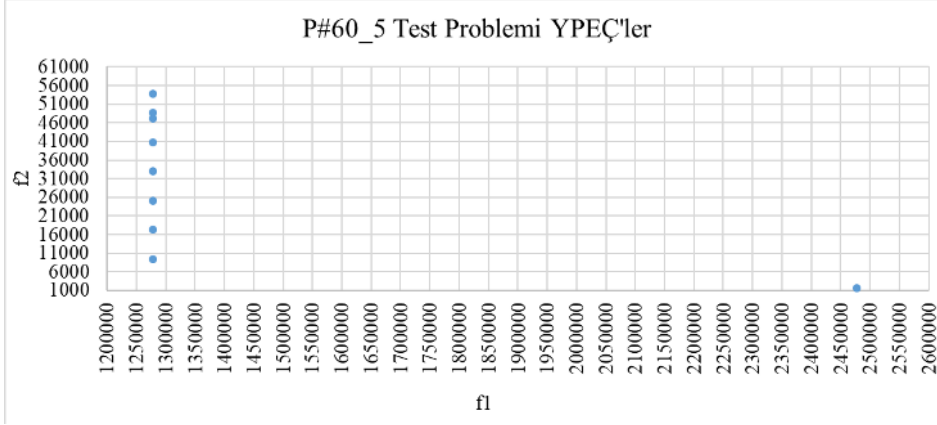
Şekil 4.9. P#45_5 test problemi YPEÇ'ler



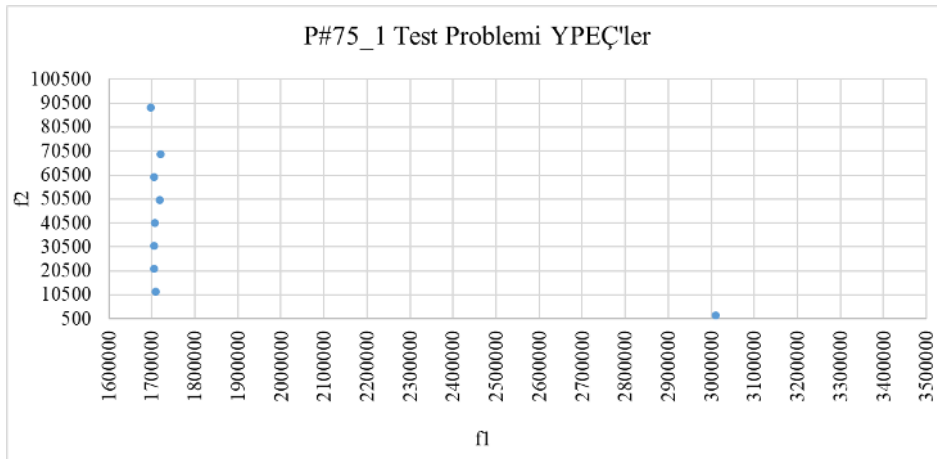
Şekil 4.10. P#60_1 test problemi YPEÇ'ler



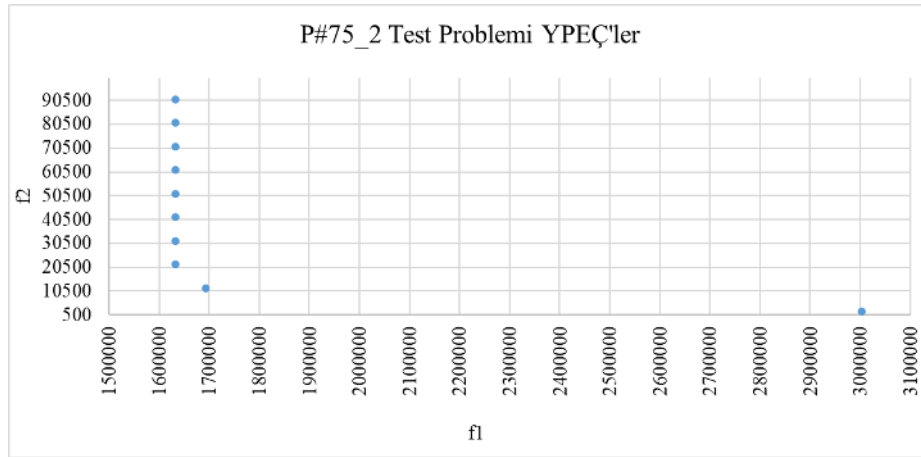
Şekil 4.11. P#60_2 test problemi YPEÇ'ler



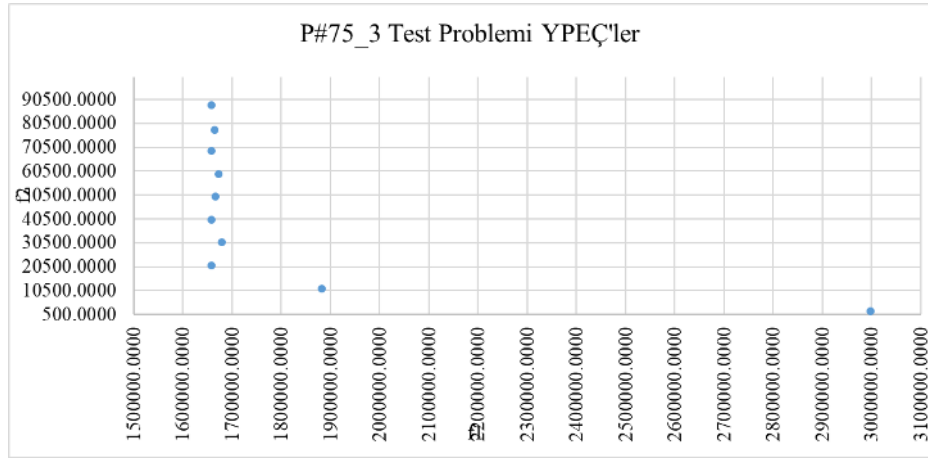
Şekil 4.12. P#60_5 test problemi YPEÇ'ler



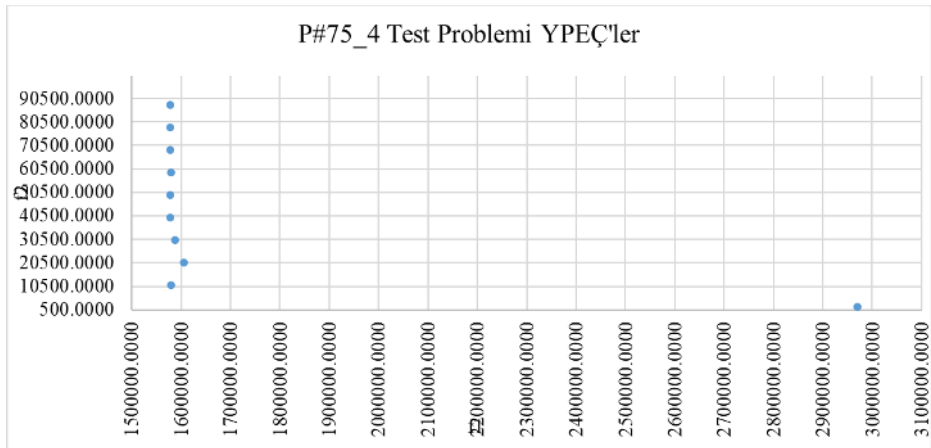
Şekil 4.13. P#75_1 test problemi YPEÇ'ler



Şekil 4.14. P#75_2 test problemi YPEÇ'ler



Şekil 4.15. P#75_3 test problemi YPEÇ'ler



Şekil 4.16. P#75_4 test problemi YPEÇ'ler

EK 4: MARKA ve MODEL GRUBU BAZINDA SATILAN TEA ve FHEA SAYILARI**Tablo 5.4.** Türkiye’de 2015-2021 yılları arasında marka ve model grubu bazında satılan TEA sayıları

Aracın Marka ve Modeli	Toplam SM*	2021 Yılı SM	2020 Yılı SM	2019 Yılı SM	2018 Yılı SM	2017 Yılı SM	2016 Yılı SM	2015 Yılı SM
Audi e-Tron	44	0	44	0	0	0	0	0
BMW i3	301	33	39	50	37	35	24	83
BMW iX	146	146	0	0	0	0	0	0
BMW iX3	663	663	0	0	0	0	0	0
Citroen C4	3	3	0	0	0	0	0	0
DFSK Seres 3	53	53	0	0	0	0	0	0
Fiat 500e	2	0	2	0	0	0	0	0
Honda e	22	0	22	0	0	0	0	0
Hyundai Kona	76	64	12	0	0	0	0	0
Jaquar I-Pace	366	31	178	119	38	0	0	0
Mercedes Benz EQC	537	331	206	0	0	0	0	0
Mercedes Benz EQS	4	4	0	0	0	0	0	0
MG ZS EV	318	318	0	0	0	0	0	0
Mini Cooper SE	156	41	115	0	0	0	0	0
Peugeot 2008e	2	2	0	0	0	0	0	0
Porsche Taycan	1158	353	805	0	0	0	0	0
Renault Zoe	1115	772	135	31	79	42	20	36
Smart EQ ForFour	32	0	9	22	1	0	0	0
Smart EQ ForTwo	44	9	35	0	0	0	0	0
XEV IEV7S	3	3	0	0	0	0	0	0
Volvo XC40	23	23	0	0	0	0	0	0
VW ID3	8	0	8	0	0	0	0	0
Toplam	5076							

SM*: Satış Miktarı

Tablo 5.5. Türkiye’de 2015-2021 yılları arasında marka ve model grubu bazında satılan FHEA sayıları

Aracın Marka& Modeli	Toplam SM*	2021 Yılı SM	2020 Yılı SM	2019 Yılı SM	2018 Yılı SM	2017 Yılı SM	2016 Yılı SM	2015 Yılı SM
BMW i8	186	0	6	2	5	16	51	106
BMW 740Le xDrive	18	0	0	8	10	0	0	0
Cupra Leon	1	1	0	0	0	0	0	0
DS Auto DS7	110	71	39	0	0	0	0	0
Jeep Compass	39	30	9	0	0	0	0	0
Land Rover Discovery Sport	74	35	39	0	0	0	0	0
Land Rover RR	672	217	275	180	0	0	0	0
Land Rover Defender	1	1	0	0	0	0	0	0
Land Rover RR Evoque	51	0	51	0	0	0	0	0
Land Rover RR Sport SE	92	0	53	39	0	0	0	0
Mercedes Benz GLC350e	25	1	4	7	13	0	0	0
MG EHS	50	50	0	0	0	0	0	0
Volvo S90	6	6	0	0	0	0	0	0
Volvo XC 40	317	272	45	0	0	0	0	0
Volvo XC60 T8	99	88	11	0	0	0	0	0
Volvo XC90 T8	230	95	59	22	11	11	32	0
Toplam	1971							

SM*: Satış Miktarı

EK 5: ŞARJ İSTASYONU MALİYETLERİ

Tablo 5.6. Ticari şarj istasyonu yaklaşık birim maliyetleri [80]

Maliyetler	Miktar	AC2 Şarj Cihazı >22 kW-2'li Soket	DC Hızlı Şarj Cihazı -100 kW-2'li Soket
Altyapı Maliyeti			
Alan Kiralama Ortalama Maliyeti (2 Araç İçin)	20m ² /yıl	180,00 \$	180,00 \$
Tasarım Maliyetleri	1 adet	1.715,00 \$	1.715,00 \$
Saha Kazı Maliyeti	1 adet	1.905,00 \$	1.905,00 \$
Ayrı Sayaç Maliyeti	1 adet	35,00 \$	35,00 \$
Ruhsat Maliyeti	1 adet	1.905,00 \$	1.905,00 \$
Donanım-Yazılım Maliyeti			
Şarj Cihazı Maliyeti	1 adet	6.000,00 \$	18.000,00 \$
Yazılım Programı Maliyeti	1 adet/yıl	5.000,00 \$	5.000,00 \$
Nakliye Maliyeti	1 adet	150,00 \$	150,00 \$
Danışmanlık Maliyeti			
Kurulum Danışmanlık Maliyeti	1 adet/yıl	100,00 \$	100,00 \$
İşletme Danışmanlık Maliyeti	1 adet/yıl	100,00 \$	100,00 \$
Tanıtım ve Pazarlama Maliyeti	1 adet/yıl	50,00 \$	50,00 \$
Diğer maliyetler			
Ofis, Muhasebe, Sigorta vb. toplam maliyete %10 ilave olarak eklenmiştir.	1 adet/yıl	500,00 \$	500,00 \$
Toplam Birim Maliyet		17.640,00 \$	31.640,00 \$

[illegible]