

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANA BİLİM / ANA SANAT DALI

ELEKTRİKLİ TİCARİ ARAÇLARDA ROTALAMA VE ŞARJ İSTASYONU
KURULUŞ YERİ SEÇİMİ OPTİMİZASYONU

İpek ÖZENİR

DOKTORA TEZİ

ADANA / 2021

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANA BİLİM / ANA SANAT DALI**

**ELEKTRİKLİ TİCARİ ARAÇLARDA ROTALAMA VE ŞARJ İSTASYONU
KURULUŞ YERİ SEÇİMİ OPTİMİZASYONU**

İpek ÖZENİR

**Danışman: Doç.Dr. Behiye Gülsün NAKİBOĞLU
Jüri Üyesi: Prof. Dr. Selçuk ÇOLAK
Jüri Üyesi: Doç. Dr. Mustafa GÖÇKEN
Jüri Üyesi: Dr. Öğretim Üyesi Mert DEMİRCİOĞLU
Jüri Üyesi: Dr. Öğretim Üyesi Ayşe Tuğba DOSDOĞRU**

DOKTORA TEZİ

ADANA / 2021

Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğüne;

Bu çalışma, jürimiz tarafından İşletme Ana Bilim/Ana Sanat Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç.Dr. Behiye Gülsün NAKİBOĞLU
(Danışman)

Üye: Prof. Dr. Selçuk ÇOLAK

Üye: Doç. Dr. Mustafa GÖÇKEN

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Mert DEMİRCİOĞLU

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Ayşe Tuğba DOSDOĞRU

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim elemanlarına ait olduklarını onaylarım.

.../.../20...

Prof. Dr. Serap ÇABUK
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

ETİK BEYANI

Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 01/09/2021

İpek ÖZENİR

ÖZET

ELEKTRİKLİ TİCARİ ARAÇLARDA ROTALAMA VE ŞARJ İSTASYONU KURULUŞ YERİ SEÇİMİ OPTİMİZASYONU

İpek ÖZENİR

Doktora Tezi, İşletme Ana Bilim / Ana Sanat Dalı

Danışman: Doç.Dr. Behiye Gülsün Nakıboğlu

Ağustos 2021, 155 sayfa

Günümüzde yeşil sektör olma yolunda ilerleyen, özellikle kapıdan kapıya taşımacılık hizmeti sunması sebebiyle en çok tercih edilen ve en yaygın kullanılan taşıma türü olan karayolu taşımacılığında, çevreye daha az zarar verecek araçlar kullanılması yönünde bir eğilim söz konusudur. Alternatif yakıtlı araç olarak tanımlanan bu araçlardan biri de elektrikli ticari araçlardır. Ancak popülaritesi gün geçtikçe artan bu araçların yaygınlaşmasının önünde bazı engeller bulunmaktadır. Araçların sahip oldukları sınırlı menzil, uzun şarj süreleri, şarj istasyonu sayısının az olması, araç satın alma maliyetlerinin yüksek olması bu engellerden bazılarıdır.

Bu sebeple tez çalışmasında lojistik ve optimizasyonunun temel konularından olan araç rotalama ve yer seçimi problemleri eş zamanlı olarak Elektrikli Araç Yer Seçimi-Araç Rotalama Problemi başlığı altında elektrikli ticari araçlar için ele alınmıştır. Çalışmada enerji tüketimi, batarya aşınması ve sürücünün çalışma süresi gibi kısıtlar diğer çalışmalardan farklı olarak bir araya getirilerek, elektrikli ticari araçlar için araç rotalarının, şarj istasyonu konumlarının ve şarj istasyonlarının türlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Problem Karma Tamsayılı Nonlinear Kısıtlı Optimizasyon Modeli olarak modellenmiş, araç satın alma maliyeti, seyahat maliyeti ve araç şarj etme maliyetinin toplamının minimizasyonu amaçlanmıştır. Problemin çözümü için Schneider, Stenger ve Goeke (2014) tarafından geliştirilen veri seti kullanılmıştır. Problem boyutunun büyük olması ve nonlinear kısıt içermesi sebebiyle problemin kesin çözüm yöntemleri ile çözümü elde edilemediğinden çözüm için metasezgisel yöntemlerden biri olan Genetik Algoritma yöntemi kullanılmıştır.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, problemin birçok kısıtı bir araya getirmesi, genetik algoritma kullanılarak çözülmüş bir probleme rastlanılmamış olması, Türkçe literatürde bu konuda yapılan çalışma sayısının az olması sebepleriyle literatüre katkıda bulunulacağı düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde önerilen genetik algoritmanın çözüm süresi açısından makul sürelerde çözüm verdiği, gerçekçi enerji tüketim fonksiyonu kullanıldığından enerji tüketiminin daha az olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca

matematiksel modelde araç sayısı kısıtlanmamasına ve eklenen farklı kısıtlara rağmen küçük boyutlu örnek problemlerde kesin yöntemlerle çözümle kıyaslandığında birçok problemde aynı sayıda veya daha az sayıda araç çıkarıldığı gözlemlenmiştir. Problemde şarj istasyonu yeri olarak müşterilerin konumları da seçilebildiğinden, çözümde şarj istasyonu konumu olarak çoğunlukla müşteri konumlarının seçildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Elektrikli Araç Yer Seçimi-Araç Rotalama Problemi, E-YS-ARP, Yeşil Lojistik, Genetik Algoritma, Metasezgisel Yöntemler.



ABSTRACT**OPTIMIZING THE ROUTING AND CHARGING STATION INSTALLATION
LOCATION FOR ELECTRIC COMMERCIAL VEHICLES****İpek ÖZENİR****Ph.D. Thesis, Department of Business****Supervisor: Assoc. Prof. Behiye Gülsün Nakıboğlu****August 2021, 155 pages**

Land transport, the most preferred and widely used type of transport especially as it offers door-to-door transportation services, is on its way to becoming a green sector; and today, there is a tendency in this sector towards using vehicles that will be less harmful to the environment. One of these vehicles defined as alternative fuel vehicles is electric commercial vehicles. Although their popularity is increasing day by day, there are some obstacles that prevent them from becoming widespread. Some of these obstacles are the vehicles' limited range in terms of the distance they can go, their long charging time, the low number of charging stations, and the high cost of purchasing these vehicles.

This thesis therefore examines two of the main topics of logistics and optimization, i.e., vehicle routing and location selection problems, for electric commercial vehicles both in terms of Electric Vehicle Location-Routing Problem. Differing from other studies, this study aims to determine vehicle routes, charging station locations and types of charging stations for electric commercial vehicles by bringing together constraints such as energy consumption, battery wear and tear, and drivers' working hours.

The problem is modeled as a Mixed-Integer Nonlinearly Constrained Optimization Model, and the aim has been determined as minimizing the sum of vehicle purchasing cost, travel cost and vehicle charging cost. In order to solve the problem, the data set developed by Schneider, Stenger, and Goeke (2014) is used. Since the problem is large-sized and contains nonlinear constraints, it cannot be solved using exact solution methods; therefore, the study uses the Genetic Algorithm method, which is a metaheuristic method.

Based on an examination of the existing surveys, it is believed that the study will prove successful in contributing to the literature since the problem incorporates many constraints, since no other study has been encountered that solves the problem using genetic algorithm, and since the number of studies on this subject within the Turkish literature is quite low.

When we examine the study results, we see that the proposed genetic algorithm offers a solution within a reasonable time, and the energy consumption is less since a realistic energy consumption function is utilized. Furthermore, although the number of vehicles was not limited in the mathematical model, it has been observed that in comparison to the optimization-oriented solution, in most small-sized sample problems, the route can be completed with the same number of vehicles or less. Since the problem allows charging stations to be installed at customers' locations, decisions have been made in this direction when solving the problem, which reduced the completion time of the route. It is observed that mostly fast charging stations are installed in the solution. When similar studies are examined, it is seen that the decision to install fast charging stations in order to meet the time window constraint is compatible with the rest of the literature.

Keywords: Electric Vehicle Location-Routing Problem, E-LRP, Green Logistics, Genetic Algorithm, Metaheuristic Techniques.

ÖN SÖZ

Teknolojinin gelişmesi, kaynakların azalması, küresel ısınma gibi problemler yeni dünyaya uyum sağlama, mevcudu koruma zorunluluğunu da beraber getirmiştir. Bu zorunlulukların yaşandığı sektörlerden biri olan lojistik sektöründe son yıllarda gelişen teknolojiyi çevreyi koruma adına karayolu taşımacılığında elektrikli araçların kullanımı konusu yer almaktadır. Bu sebeple tez çalışması kapsamında, lojistik işletmelerinin problemlerinden biri olan araç rotalama konusu elektrikli araçlar için ele alınmış ve elektrikli araçların rotada şarj etme ihtiyacı duyabilmesi sebebiyle şarj istasyonu yer seçimi de rotalama problemiyle birlikte eş zamanlı olarak ele alınmıştır.

Doktora eğitimim süresi boyunca danışmanım olmasından büyük mutluluk duyduğum, bilgilerini, desteğini benden esirgemeyen, gelişmemi sağlayan, öğreten, ömür boyu birlikte çalışmaktan gurur duyacağım danışmanım Doç.Dr. Behiye Gülsün Nakıboğlu'na,

Genetik Algoritmanın geliştirilmesi sırasında takıldığım konulara yardımcı olan hocalarım Doç.Dr. Mustafa Göçken'e ve Dr.Öğr. Üyesi Ayşe Tuğba Dosdoğru'ya,

Savunma esnasındaki yapıcı eleştirileri için hocam Prof. Dr. Selçuk Çolak'a, matematiksel modelin geliştirilmesi sürecinde katkıları için hocam Dr.Öğr. Üyesi Mert Demircioğlu'na,

Akademik hayatım boyunca bana yol gösteren, destek olan hocalarım Prof.Dr. Nizami Duran, Doç.Dr. Melik Koyuncu, Dr.Öğr. Üyesi Metin Reyhanoğlu'na, Adana'ya gidiş dönemimde desteğini esirgemeyen müdürüm Prof. Dr. Soner Soylu'ya,

Adana'da bana evlerini açan, hep yanımda olan Özlem ve İbrahim'e, tezimi benim kadar dert edinen Gamze, Pınar, Kübra, Zeynep, Ebru'ya,

Sevgili anneme ve babama, varlıklarıyla beni mutlu eden kardeşlerim Dilek, Zeynep, Deniz'e,

Elde ettiğim tüm başarılarımın “asıl sahibine” Adnan'a teşekkür ederim.

İpek ÖZENİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖN SÖZ.....	viii
KISALTMALAR	xii
TABLolar LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1. Problem Tanımı	4
1.2. Çalışmanın Amacı	5
1.3. Çalışmanın Önemi	6

BÖLÜM II

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞARJ SİSTEMLERİ

2.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi.....	14
2.2. Elektrikli Araç Türleri.....	19
2.2.1. Bataryalı Elektrikli Araçlar	19
2.2.2. Hibrit Elektrikli Araçlar	20
2.2.3. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar	21
2.2.4. Yakıt Hücresi Araçlar.....	21
2.3. Elektrikli Araç Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları.....	22
2.4. Elektrikli Araçların Şarj Sistemleri.....	27
2.4.1. Kondüktif Şarj Sistemi.....	28
2.4.2. Batarya Değişirme Şarj Sistemi.....	30
2.4.3. Endüktif Şarj Sistemi	32
2.4.4. Elektrikli Araç Şarj Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	33
2.4.5. Türkiye’deki Mevcut Şarj İstasyonları Hakkında Bilgi.....	35

BÖLÜM III

LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Araç Rotalama Problemi.....	37
3.2. Yer Seçimi Problemi.....	42
3.3. Yer Seçimi-Araç Rotalama Problemi	44
3.4. Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi	48
3.4.1. Elektrikli Araç Rotalama Problemi	48
3.4.2. Şarj İstasyonu Yer Seçimi Problemi.....	49
3.4.3. Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi.....	50
3.5. Elektrikli Araç Yer Seçimi-Araç Rotalama Problemi Çözüm Yöntemleri.....	51
3.5.1. Kesin Çözüm Yöntemleri	52
3.5.2. Sezgisel Çözüm Yöntemleri	52
3.5.3. Metasezgisel Çözüm Yöntemleri.....	53
3.5.4. Genetik Algoritma	55
3.5.4.1. Genetik Algoritma Terminolojisi	58
3.5.4.2. Genetik Algoritmanın Genel Akış Diyagramı	60
3.6. Önceki Çalışmalar.....	68
3.6.1. Elektrikli Araç Rotalama Problemi İle İlgili Çalışmalar	68
3.6.2. Şarj İstasyonu Yer Seçimi İle İlgili Çalışmalar	82
3.6.3. Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi İle İlgili Çalışmalar.....	87

BÖLÜM IV

ELEKTRİKLİ ARAÇ YER SEÇİMİ-ROTALAMA PROBLEMİ

4.1. Enerji Tüketimi Modeli.....	94
4.2. Problemin Açıklaması.....	96
4.3. Problemin Matematiksel Modeli.....	98

BÖLÜM V

ELEKTRİKLİ ARAÇ YER SEÇİMİ-ROTALAMA PROBLEMİ (E-YS-ARP)

İÇİN GENETİK ALGORİTMA UYGULAMASI

5.1. Genetik Algoritma Adımları	105
---------------------------------------	-----

5.2. Problem Çözümünde Kullanılan Verilere İlişkin Bilgiler	109
5.3. Bulgular ve Yorum	110
SONUÇ	129
KAYNAKÇA	132



KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
ARP	: Araç Rotalama Problemi
DC	: Doğrusal Akım
EA	: Elektrikli Araç
EARP	: Elektrikli Araç Rotalama Problemi
E-YS-ARP	: Elektrikli Araç Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi
GA	: Genetik Algoritma
NP-hard	: Non Polynomial-Time Hardness
VRP	: Vehicle Routing Problem
YS-ARP	: Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi
ZP-EARP	: Zaman Pencereci Elektrikli Araç Rotalama Problemi

TABLOLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1. Sera Gazı Emisyon İstatistikleri.....	3
Tablo 2. Literatürde Bulunan E-YS-ARP Çalışmaları.....	9
Tablo 3. Elektrikli Araçlar ve Fosil Yakıtlı Araçların Genel ve Kullanım Esnasındaki Performansları	25
Tablo 4. Şarj Güç Seviyelerine İlişkin Teknik Bilgiler.....	30
Tablo 5. Şarj Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	34
Tablo 6. Doğal Evrim, Genetik Algoritma Terminolojisinin Karşılaştırması.....	58
Tablo 7. GA Parametre Değerleri	108
Tablo 8. Enerji Tüketimine İlişkin Bilgiler.....	110
Tablo 9. Şarj Türlerine İlişkin Bilgiler.....	110
Tablo 10. 5 Çalıştırma Sonucu Elde Edilen Amaç Fonksiyonu Değerleri.....	111
Tablo 11. 5 Çalıştırmaya İlişkin Çözüm Süreleri (CPU Times)	114
Tablo 12. Amaç Fonksiyonu Değerlerine İlişkin İstatistiksel Bilgiler.....	117
Tablo 13. Amaç Fonksiyonun En İyi Değeri Aldığı Çözüme İlişkin Bilgiler	120
Tablo 14. Büyük Boyutlu Örnek Problemler (100 müşteri) İçin Ortalama Araç Sayıları	124

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. Türkiye elektrikli araç şarj haritası.....	35
Şekil 2. Genetik Algoritmada popülasyon, kromozom ve gen gösterimi.....	59
Şekil 3. Kodlama ve kod çözme yöntemi	60
Şekil 4. Tek noktalı ve iki noktalı çaprazlama	66
Şekil 5. Mutasyon örneği.....	66
Şekil 6. Problemin örnek gösterimi	97
Şekil 7. Önerilen GA'nın akış diyagramı.....	106
Şekil 8. Örnek kromozom yapısı	107
Şekil 9. c103C5 örnek problemi çözümü	125
Şekil 10. r104C5 örnek problemi çözümü.....	125
Şekil 11. rc108C10 örnek problemi çözümü	126
Şekil 12. r209C15 örnek problemi çözümü.....	126
Şekil 13. c206C5 örnek problemi için GA yakınsama grafiği	127
Şekil 14. c205C10 örnek problemi için GA yakınsama grafiği	127
Şekil 15. r105C15 örnek problemi için GA yakınsama grafiği.....	127
Şekil 16. rc206C100 örnek problemi için GA yakınsama grafiği	128

BÖLÜM I

GİRİŞ

İnsanlığın gelişimi, beraberinde birçok sorunu da getirmiştir. Günümüz dünyası için bu sorunlardan en önemlileri çevre ile ilgili sorunlardır. Çevre sorunlarına katkısı yadsınamayacak boyutta olan sektörlerden biri de lojistik sektörüdür. Lojistik sektöründe kullanılan araçların emisyonları ve enerji tüketimi, günlük seyahatlerde kullanılan binek araçlardan çok daha fazladır (Shao, Guan ve Bi, 2017). Lojistik sektörünün Avrupa Birliği'nde CO₂ emisyonunun %30'unun, kentsel alanlarda %40'ının (Afroditi, Boilea, Theofanisb, Sdoukopoulos ve Margaritis, 2014:453), Amerika'da sera gazlarının %28'nin (Juan, Mendez, Faulin, Armas ve Grasman, 2016), dünyadaki sera gazlarının yaklaşık %15'inin (OECD, 2010) sebebi olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak dünya üzerinde olumsuz etkileri olsa da 2019 yılının sonlarında Covid-19 salgını da lojistik sektörünün dünya için ne kadar önemli ve vazgeçilmez olduğunu göstermiştir.

İnsan hayatı var olduğu sürece devam edecek olan lojistik faaliyetleri, küreselleşme ile yüksek oranda artmıştır. Küreselleşme ve bireylerin satın alma güçlerinin artması eşya hareketinin ulusal sınırlardan uluslararası boyutlara ulaşması, taşıma faaliyetlerinin ve taşımacılıkta kullanılan araç sayısının artmasına yol açmıştır. Araç sayısı ile doğru orantılı olarak artan emisyon gazları hava kirliliğine ve beraberinde toplum sağlığı üzerinde ciddi etkilere sebep olmuştur. Uzun yıllar boyunca benzin kullanımının çevreye en çok zarar veren yakıt türü olduğu belirtilmiş, dizel yakıtların kullanımı teşvik edilmiştir. Ancak son yıllarda dizel yakıtların çevreye verdiği zararın daha büyük boyutlarda olduğu ortaya çıkmıştır. Öyle ki Alman hükümeti tarafından egzoz gazı emisyonundaki nitrik oksit miktarı üst sınırı aşan dizel araçların trafikten menedilmesine yönelik karar verilmiş ve birçok Avrupa ülkesinde önümüzdeki yıllarda dizel yakıtlı araç kullanımının yasaklanacağı duyurulmuştur (Dalaman, 2018).

Çevre sorunlarının yanı sıra günümüzde petrol kaynaklarının azaldığı, yakıt fiyatlarının ve enerji konusunda dışa bağılılığın ciddi oranlarda arttığı aşikârdır ve bu durumun yansıması olarak taşımacılıkta navlun fiyatlarının arttığı da görülmektedir. Önümüzdeki 50 yıl içinde, dünya nüfusunun 6 milyardan 10 milyara ve dünyadaki araç sayısının 700 milyondan 2,5 milyara çıkması beklenmektedir (Chan, 2002). Nüfusun ihtiyacını karşılamak için kullanılacak araçların tamamının içten yanmalı

motorlu araçlar olması durumunda bu araçların petrol gereksiniminin nasıl karşılanacağı, araç emisyonlarının dünyaya vereceği zararların nasıl ortadan kaldırılacağı soruları karşımıza çıkmaktadır (Chan, 2002). Bu durum ulaştırma sektörünün evrimini tetiklemekte, işletmeleri alternatif çözümler bulma yoluna sevk etmektedir. Alternatif çözüm yöntemlerinden biri de elektrikli araçlardır.

Son yıllarda teknolojinin çevre yararına geliştirildiğinin en güzel örneklerinden biri olan çevre dostu, tam elektrikli versiyonları sıfır emisyonlu olarak adlandırılan, fosil yakıtlı araçlara nazaran daha sessiz çalışan elektrikli araçlar oldukça popüler araştırma konularından biri haline gelmiştir. Tamamen elektrikli versiyonunun motorun çalışması için gerekli olan enerjiyi fosil yakıtlar yerine elektrik enerjisinden karşılayan bu araçların kullanım oranları gün geçtikçe artmaktadır. 2019 sonunda küresel elektrikli otomobil filosu 7,2 milyon adedi aşmış, 2018 yılına göre elektrikli araç kullanımı % 40'tan fazla artmış, tüm dünya bölgelerinde bataryalı elektrikli araçların satışı Plug-in hibrit araçların satışlarını geçmiştir (International Transport Forum, 2020). Taşımacılığın elektrifikasyonu olarak adlandırılan bu süreçte kullanılan elektrikli araçlar üç tekerlekli, moped, kick-scooter ve e-bisiklet gibi kentsel geziler için kullanılan küçük kişisel mobil araçlardan elektrikli otomobillere, otobüslere ve teslimat araçlarına kadar çok çeşitlidir (International Transport Forum, 2020).

Özellikle Avrupa ülkelerinde binek araç olarak yaygın bir şekilde kullanılan elektrikli araçlar lojistik sektöründe öncü konumda olan FedEx Express, General Electric, Coca-Cola Refreshments, UPS, Frito-Lay, Staples, Enterprise, Hertz gibi işletmelerde lojistik faaliyetlerde de kullanılmaya başlanmıştır (Electrification Coalition, 2013).

Elektrikli araç teknolojisindeki gelişmeler taşımacılık sektörünü derinden etkileyecek kadar önemli boyutlardadır. Özellikle araçların tasarımında menzilin artırılması, şarj süresinin azaltılması, aracı hızlı şarj edecek şarj türünün geliştirilmesi, şarj istasyonlarının sayısının artırılması, bataryaların ağırlığının düşürülmesi, taşınacak yük miktarının artırılması, seyahat sırasında şarj edilme işlemini beklemek yerine bataryanın değiştirilmesi gibi değişimler ve teknolojiler gerçekleştirilmiştir. Çevre ile ilgili gürültü ve egzoz emisyonları konusundaki endişeler, batarya ve yakıt hücrelerinde yaşanan yeni gelişmelere bağlı olarak dengeyi elektrikli araçlar lehine çevirecektir (Larminie ve Lowry, 2012:1). Ayrıca CO₂ salınımının büyük bir kısmına sebep olan taşımacılık sektörünün verdiği zararlar elektrikli araçlar sayesinde azaltılabilecektir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik üretilmesi halinde petrole eskisi

kadar ihtiyaç kalmayacak olması, petrol konusunda birçok ülkenin dışa bağımlılığını ortadan kalkacaktır. Ayrıca doğalgaz gibi pahalı kaynaklarla elektrik üretimine gerek kalmaması sebebiyle elektrik üretim maliyetlerinin azalacak olması elektrikli araçların şarj maliyetlerinin düşük olmasını sağlayacak, bu durum hem çevre hem de ülkelerin ekonomisi için büyük bir avantaj sağlayacaktır. Örneğin Fransa 2030, Danimarka 2050 yılına kadar taşımacılık sektöründe petrole ihtiyaç duymamayı hedeflemektedir (Schmidt, Staudt ve Weinhardt, 2020).

Özellikle Türkiye gibi yılın büyük bir bölümünün güneşli olduğu, kendi enerjisini kendi üretebilecek düzeyde olan ülkeler için elektrikli araçların kullanımı kaçınılmaz olacaktır. Türkiye’de genel anlamda elektrikli araçların (binek ve hafif ticari) kullanımı henüz yaygın değildir. Türkiye’de ticari amaçla Aras Kargo, Sürat Kargo, TNT Express, Migros Sanal Market, PTT, Ülker, Sofra Grup, Borusan Lojistik, Kühne Nagel gibi işletmeler elektrikli araçları şehir içi taşımacılıkta kullanmaktadırlar (BDOTO, 2013). Ancak TÜİK’in 2018’de yayınladığı sera gazı istatistikleri incelendiğinde (Tablo 1) önümüzdeki yıllarda elektrikli araçların kullanımında ciddi miktarda artış olacağı ve dizel araçların yasaklanma konusunun Türkiye için de geçerli olacağı düşünülmektedir.

Tablo 1
Sera Gazı Emisyon İstatistikleri

Sera gazı kaynakları (Bin ton)	2012	2013	2014	2015	2016
Çevrim ve enerji sektörü	125.578,0	120.178,1	130.648,0	135.132,7	143.327,0
İmalat sanayi ve inşaat	57.488,5	51.579,4	52.088,3	57.084,7	59.461,3
Ulaştırma	61.248,5	67.478,1	72.084,3	74.271,6	80.207,8
Diğer sektörler	59.979,0	54.665,2	50.243,8	62.204,2	63.752,7

Kaynak: TÜİK, 2018 Erişim tarihi: 02.01.2019

Elektrikli araçların geleceğin lojistik sektöründe önemli rol oynayacağı düşüncesi ve çevreyle ilgili endişelerin artmasından dolayı tez çalışmasının konusu, lojistik sürecinde elektrikli araçların kullanımına dairdir. Tez kapsamında lojistik işletmelerinin temel problemlerinden biri olan araç rotalama konusu, araç filosunun elektrikli araçlardan oluşması durumu için ele alınmıştır. Müşteri taleplerini karşılamak için hangi rotaların izlenmesi gerektiği, elektrikli araçların teknik özellikleri sebebiyle rotada şarj ihtiyacı

duyabileceği göz önüne alınarak şarj istasyonu yer seçimi problemi ile birlikte ele alınmıştır.

Çalışmanın *ilk bölümünde* ele alınan problem tanımlanmış, çalışmanın amacı ve önemine yer verilmiştir. Çalışmanın *ikinci bölümünde* elektrikli araçlar ve elektrikli araçların şarj sistemleri hakkında bilgi verilmiş, *üçüncü bölümde*, araç rotalama problemi, yer seçimi problemi, yer seçimi-arac rotalama problemleri, elektrikli araç yer seçimi rotalama problemi, çözüm yöntemleri açıklanmış ve literatürde elektrikli araçlar üzerine bu konularda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Çalışmanın *dördüncü bölümünde* probleme ilişkin matematiksel model kurulmuş, *beşinci bölümde* model GAMS ve Genetik Algoritma metasezgiseli kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Çalışmanın *sonuç bölümünde* elde edilen çözüm değerlendirilmiş, gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

1.1. Problem Tanımı

Günümüz lojistik stratejileri ve operasyonları, çevre ve toplum üzerinde negatif etkileri olmadan gerçekleştirilecek düzeyde değildir (Schneider, Stenger ve Goeke, 2014). Bu sebeple işletmeler çevreye daha az zarar veren teknolojilere yönelmeye çalışmaktadırlar. Elektrikli araçlar bu teknolojilerden biridir. Dünyada ve ülkemizde bulunan işletmeler şehirlerarası ve uluslararası taşımacılıkta (uzun yol) elektrikli araç kullanımına henüz geçmemişlerdir. Ancak Tesla'nın sektörde yapmış olduğu elektrikli kamyon çıkışı ve onu izleyen Ford Otosan, Daimler, Mercedes gibi diğer işletmelerin çalışmaları elektrikli ağır ticari araçların şehirlerarası ve uluslararası taşımacılıkta kullanılacağını göstermektedir.

Elektrikli araçların bir türü olan elektrikli kamyonların başlangıç yatırım maliyetleri yüksek olmasına karşın, yapılan araştırmalar araçların işletme maliyetlerinden elde edilecek olan tasarrufların piyasada rekabet etmek için yeterli olacağını göstermektedir (Davis ve Figliozzi, 2013:22; Schiffer ve Walther, 2017a). Ayrıca Avrupa Birliği 510/2011 düzenlemesi kapsamında 2020 yılından itibaren hafif ticari araçlarda CO₂ salınım miktarı 147gr CO₂/km olarak belirlenmiş ve bu miktarı aşan üreticiler için gram CO₂/km başına 95 Euro ceza verilmesi planlanmıştır (Regulation (Eu) No 510/2011 of the European Parliament and of the Council, 2011). Bu tip düzenlemeler lojistik faaliyetlerde elektrikli araç kullanımına olan ilgiyi arttıracaktır. Ancak elektrikli araçların lojistik sektöründe yaygınlaşmasının önünde bazı engeller mevcuttur. Araçların sahip olduğu sınırlı menzil, bu sebeple seyahat sırasında şarj

edilme ihtiyacı duymaları, şarj istasyonlarının sayıca yetersiz olması, araçların şarj edilme sürelerinin uzun olması bu engellerden birkaçıdır.

Elektrikli araçların piyasada yaygınlaşması ve şarj istasyonlarının yetersizliği sebebiyle bu çalışmada elektrikli ticari araçların taşımacılık sürecinde kullanımının araştırılması gereklilik olarak görülmüştür. Elektrikli ticari araçların enerji tüketimini de dikkate alarak hangi rotaları izlemeleri gerektiği, uzun mesafelerin şarj edilme gerekliliği duyurması sebebiyle şarj istasyonlarının hangi noktalarda kurulması ve istasyonlarda hangi şarj türü kullanılarak şarj edilmesi gerektiğinin belirlenmesi önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çalışmada, araç rotalama ve şarj istasyonu yer seçimi problemleri eş zamanlı olarak ele alınarak elektrikli ticari araç kullanımı kapsamında incelenecektir. Problem literatürde Elektrikli Araç Yer Seçimi ve Rotalama Problemi (E-YS-ARP) olarak adlandırılmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Elektrikli araçların ulaşımında verimliliğin nasıl arttırılacağı önemli bir sorun olarak tanımlanmaktadır (Shao vd., 2017). Elektrikli araçların ulaşımında verimliliğinin arttırılabilmesi için planlamalarının iyi yapılması gerekmektedir ve planlama için geleneksel fosil yakıtlı araçlarda olmayan rota sırasında şarj istasyonu ziyaretlerinin nasıl düzenleneceği, seyahat hızının nasıl optimize edileceği ve şarj süresinin uzunluğunun nasıl belirleneceği gibi birçok yeni uygulama konusunun dikkate alınması gerekmektedir (Zuo, Xiao, Zhu ve You, 2018).

Bu sebeple bu çalışmada elektrikli araç rotalama ve şarj istasyonu yer seçim problemleri eş zamanlı olarak Elektrikli Araç Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi şeklinde ele alınmıştır. Bu bağlamda toplam maliyeti (araç satın alma maliyeti, toplam mesafe maliyeti, kullanılan şarj türüne göre toplam şarj maliyeti) minimize eden rotaların, şarj istasyonlarının yerlerinin, sayılarının ve türlerinin ve elektrikli araç sayılarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada ilgili literatür taraması esnasında,

- Lojistik faaliyetlerde elektrikli araçların kullanımının avantaj ve dezavantajları,
- Elektrikli araçların önümüzdeki yıllardaki gelişim seyri,

- Elektrikli araçların şarj edilmesinde kullanılan şarj türlerinin avantaj ve dezavantajları konularına da değinilmiştir.

1.3. Çalışmanın Önemi

Dünya kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sağlanmasının en önemli konulardan biri olduğu günümüzde, lojistik sektörü kaynakların tükenmesine sebep olan sektörlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. 1997’den 2007 yılına kadar olan sürede, taşıma sektöründen kaynaklı olarak CO₂ emisyon oranı %45 oranında artmıştır (OECD, 2010). Gri sektör olarak tanımlanan lojistik sektörü bu kötü imajı ortadan kaldırmak için yeşil sektör olmaya çalışmaktadır.

Çevreye daha az zarar verecek alternatif taşıma modları olmasına karşın kapıdan kapıya teslim avantajı sebebiyle dünyada karayolu taşımacılığı günümüzde en etkin kullanılan taşımacılık modudur ve uzun yıllar boyunca tercih edilmeye devam edecektir. Araştırmalar incelendiğinde küresel havacılık ve uluslararası sevkiyattan kaynaklı emisyonların, 2007 yılında toplam CO₂ emisyonlarının sadece %2,5 ve %3’ünü oluşturduğu görülmektedir (OECD, 2010). Oranlara bakıldığında en büyük payın karayolu taşımacılığına ait olduğu görülmektedir (OECD, 2010). Bu sebeple karayolu taşımacılığı ile alınan mesafe azaltılmaya ya da alternatif yakıtlı araçlar kullanılmaya çalışılmaktadır. Alternatif yakıtlı araçlar sınıfında yer alan elektrikli araçlar, özellikle lojistik sektörü için fosil yakıtlara nazaran karbon emisyon oranının ciddi miktarlarda azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üreterek kullanılabilir olması, çevre dostu olması açılarından umut verici bir seçenek olarak görülmektedir (Yang, Yang, Xu, Cao, Lai ve Dong, 2015). Elektrikli araçlar, optimizasyon ve lojistiğin bir araya geldiği **Elektrikli Araç Rotalama Problemi (EARP)** konusunda son yılların en popüler çalışma konularından biri haline gelmiştir. Sektördeki gelişmeler dikkate alındığında konunun uzun yıllar daha literatürde yer alacağı aşikârdır.

Ancak günümüzde henüz elektrikli araçlar için yeterli sayıda şarj istasyonu bulunmamaktadır ve bu durum elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki engellerden biridir. “Yeterince elektrikli araç yolda olursa şarj istasyonları inşa edilecektir, şarj istasyonları sayısı yeterli olursa elektrikli araçlar kullanılacaktır” şeklinde bir ikilem ortaya çıkmaktadır (Meng ve Kai, 2011; Touati-Moungla ve Jost, 2012; Schiffer ve Walther, 2017a). Elektrikli araçlar için **Şarj İstasyonu Yer Seçimi Problemi** aracın vereceği hizmetin kalitesini ve verimliliğini etkilediğinden önemli bir problemdir (Liu, Yang, Zhou ve Tian, 2018). Yanlış yere konumlandırılan şarj

istasyonları elektrikli araçlardan elde edilecek faydaları olumsuz yönde etkileyebilecektir (Liu vd., 2018). Elektrikli araçların rotalarının uzunluğu batarya kapasiteleri ile kısıtlıdır ve eğer müşteri depodan uzakta ise araç tek şarjla müşteriye gidip gelemeyebilir (Worley, Klabjan ve Sweda, 2012). Şarj işlemi elektrikli aracın rotadan ayrılıp bir şarj istasyonuna yönelmesine ve şarj istasyonunda zaman harcamasına sebep olur ki bu durum maliyetlerin artması (ve nakliye süresinin uzaması) anlamına gelmektedir (Froger, Mendoza, Jabali ve Laporte, 2019). İşletmeler için önemli bir kavram olan zaman, şarj istasyonunun konumundan etkilenmektedir ve rotalama kararları verilirken şarj istasyonu konumlarının da müşteri teslim zamanlarında problem yaşanmaması için dikkate alınması gereken bir unsurdur (Schiffer ve Walther, 2017a; Paz vd., 2018). Bu yüzden EARP’de şarj yerleri ve elektrikli araçların ne kadar süre şarj edilecekleri probleme dâhil edilmesi gereken önemli kararlar olarak karşımıza çıkmaktadırlar (Froger vd., 2019). Ayrıca Türkiye’de hem hızlı hem de yavaş şarj eden istasyonların sayısı henüz yeterli seviyeye ulaşmamıştır. Bu durum elektrikli ticari araçların lojistikte kullanılmasını sağlamak için öncelikle çözülmesi gereken konulardan biridir. İşletmeler açısından bakıldığında toplu kullanıma açık yerlerde elektrikli araçlar için şarj imkânlarının genellikle bulunmaması sebebiyle depodan uzak noktalara elektrikli araç filosu ile taşıma yapılabilmesi için elektrikli araç filo sahipleri kendi şarj istasyonlarını kurmaya veya kiralamaya ihtiyaç duymaktadırlar (Worley vd., 2012). Şarj istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi kararı rotaların tanımlanmasını önemli derecede etkilemektedir çünkü rota kararları şarj istasyonlarının yerlerinin belirlenmesinde talep girdisi olarak ele alınmaktadır (Paz, vd., 2018). Dolayısıyla şarj istasyonlarının optimum yerleri belirlenerek, şarj işlemi için kaybedilecek sürenin en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu sebeple çalışma kapsamında elektrikli ticari araçlar için şarj istasyonu yer seçiminin ele alınması gereklilik olarak görülmüştür. Elektrikli araçlar, evde, toplu kullanıma açık olan yerlerde (alışveriş merkezi gibi), işyerlerinde ve elektrikli araç şarj istasyonlarında şarj edilebilmekte (O’Connell, 1995) ve potansiyel şarj istasyonu konumları olarak genellikle bu tip yerler seçilmektedir (Boulanger, Chu, Maxx ve Waltz, 2011).

Belirtilen her iki konunun güncel olması sebebiyle çalışma kapsamında elektrikli araçlar için rotalama ve şarj istasyonu yer seçimi problemleri ele alınacaktır. Problemler ayrı ayrı incelenmek yerine eş zamanlı olarak ***Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi (E-YS-ARP)*** olarak ele alınacaktır. Literatürün geneline bakıldığında elektrikli araçlarla ilgili problemlerin şarj istasyonu yer seçimi, elektrikli araç rotalama

problemi ve her ikisini birlikte ele alan çalışmalar şeklinde yoğunlaştığı görülmektedir (Schiffer ve Walther, 2018). Ancak Tablo 2’de de belirtildiği üzere literatürde her iki problemi aynı anda ele alan çalışma sayısı azdır.



Tablo 2
Literatürde Bulunan E-YS-ARP Çalışmaları

Çalışma	Filo		Şarj türü			Şarj fonksiyonu		Şarj etme		Enerji tüketimi		Şarj istasyonu konumu		Zaman Penceresi	Amaç Fonksiyonu
	Homojen	Heterojen	Tekli	Çoklu	BSS	Linier	Nonlineer	Full	Kısmi	Linier	Nonlineer	İstasyon	Müşteri		
Worley, Klabjan ve Sweda (2012)	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	1,3,4
Li-ying ve Yuan-bin (2015)	✓	-	-	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	3,4,5
Yang ve Sun (2015)	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	1,3
Schiffer ve Walther (2017a)	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	1,2,3,10,11,12
Schiffer ve Walther (2017b)	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	2,3,6,9
Hof, Schneider ve Goeke (2017)	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	1,3
Schiffer, Stütz ve Walther (2016)	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	1,2,3
Paz, Granada-Echeverri ve Escobar (2018)	✓	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	10
Schiffer, Schneider ve Laporte (2018)	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	2,3,6,9
Schiffer ve Walther (2018)	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	2,3,9

Schiffer, Stütz ve Walther (2018)	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	2,3,5,9,**
Calik, Oulamara, Prodhon ve Salhi (2018)	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	1,2,3,4
Cui, Zhao ve Zhang (2018)	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	✓	10
Koç, Jabali, Mendoza ve Laporte (2019)	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	3,5
Liu, Gao ve Liu (2019)	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	10,11,12,7
Zhang, Chen ve Zhang (2019)	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	1,3
Hulagu ve Celikoglu (2020)	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	*	*	-	8
Affi, Derbel, Jarbou ve Siarry (2020)	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	1,3
Mao, Shi, Zhou ve Zhang(2020)	✓	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	1,2,4,13
Schiffer, Klein, Laporte ve Walther (2021)	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	2,3,5,9
Bu çalışmada ele alınan model	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	1,2,4

1: Toplam seyahat maliyeti 2: Araç satın alma maliyeti 3:Şarj istasyonu kurma maliyeti 4: Şarj etme maliyeti (istasyon veya depo) 5: Sürücü maliyeti

6: Intra-route (şarj, yükleme veya her ikisinin birlikte kurulduğu) tesis kurma maliyeti 7: Kullanılacak batarya sayısı 8:Enerji miktarı

9: Sürüş maliyeti 10: Toplam seyahat mesafesi 11: Araç sayısı 12: Şarj istasyonu sayısı 13: Bekleme maliyeti

**Araçla ilgili sabit maliyetlerde eklenmiştir * Araç durakları

Bazı yazarlara göre rotalama ve şarj istasyonu problemlerinin eş zamanlı olarak ele alınması gerekmektedir (Worley vd., 2012; Schiffer ve Walther, 2017a; Schiffer ve Walther, 2017b; Paz vd., 2018). Şarj istasyonu yerleşimi ve rota kararları farklı oyuncular tarafından alındığında (örneğin, hükümetler yerleşimin altyapısına karar verirken özel sektör rotalara karar verirse) elektrikli araçların sağladığı avantajların tamamının, elde edilemeyeceği belirtilmektedir (Schiffer ve Walther, 2017a). Çünkü elektrikli ticari araçların aktif olarak kullanımı hala düşük seviyelerde olduğundan şarj istasyonu yerleşimi seyrek olarak nitelenebileceğinden, şarj istasyonu yerlerinin ve araç güzergâhlarının belirlenmesi aynı anda değerlendirilmesi durumunda elektrikli ticari araçlardan beklenen faydaların gerçekten sağlanabileceği belirtilmektedir (Schiffer ve Walther, 2017a). Ayrıca her iki problemin eş zamanlı olarak ele alınmasıyla amaç fonksiyonun optimizasyonunun daha iyi sonuçlar verebileceği (Li-ying ve Yuan-bin, 2015; Paz vd., 2018) ve, bu iki kararın birbirlerini etkileyen ve birbirlerine bağlı kararlar olduğu ifade edilmektedir (Yang ve Sun, 2015; Paz vd., 2018). İhtiyaç duyulan elektrikli araç sayısı doğrudan şarj istasyonlarının konumundan ve sayısından etkileneceği için her iki kararın eş zamanlı ele alınması daha doğru bir yaklaşım olacaktır (Schiffer ve Walther, 2017a).

Şarj istasyonlarının konumları kadar önemli olan bir diğer konu da şarj istasyonunda konumlandırılacak olan *şarj türleridir*. Şarj türü, istasyonun konumunu, rotalamayı ve maliyeti etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında şarj istasyonlarının konumları ile birlikte istasyonda yer alacak şarj türüne de karar verilecektir. Aracın şarj süresi batarya tipine, şarj ekipmanına ve kullanılan şarj türüne bağlı olarak değişmektedir (Çatay ve Keskin, 2017) ve şarj süresi, rotalama kararlarını etkilemektedir. Çalışmada kondüktif şarj sistemi türleri olan yavaş, normal ve hızlı olmak üzere üç şarj tipinin kurulması seçenekleri ele alınmıştır. Mevcut teknolojiye şarj istasyonlarında en yaygın kullanılan şarj teknolojisi kondüktif şarj sistemidir. Bu sebeple çalışmada kondüktif şarj sistemini kullanan istasyon baz alınmıştır. Yavaş şarj türü genellikle şarj işlemi için yeterli zaman olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Örneğin gece evde veya depoda bekleyen araçları şarj etmek için uygun bir şarj türüdür. Hızlı şarj seçeneği her ne kadar menzil arttırma konusunda elektrikli araçlara katkı sağlıyor olsa da, hızlı şarj seçeneğinin nadiren kullanılması tercih edilmektedir. Çünkü neredeyse tüm lityum iyon akü kimyasalları, hızlı şarj edilmeleri durumunda, daha düşük ömürlü olmaktadır (Boulanger vd., 2011).

Elektrikli araçlar için *enerji tüketimi*, aracın şarj istasyonunda geçireceği süreyi ve aracın gidebileceği maksimum mesafeyi belirlediği için oldukça önemli bir kavramdır (Goeke ve Schneider, 2015). Literatürde yer alan çalışmaların birçoğunda enerji tüketiminin yalnızca mesafeyle doğru orantılı olarak değiştiği kabul edilmektedir. Enerji tüketimi bu şekilde hesaplandığında çalışmalarda enerji tüketim miktarı yüksek bir değer olarak bulunmaktadır ancak günlük hayatta durum bu şekilde gerçekleşmemektedir. Aracın enerji tüketimi; aracın boş ağırlığı, taşınan yük miktarı, aracın hızı, aracın teknik özellikleri, yol sürtünme katsayısı, hava yoğunluğu, seyahat mesafesi, trafik, araç kullanım şekli (Schneider vd., 2014; Goeke ve Schneider, 2015; De Cauwer, Van Mierlo ve Coosemans, 2015; Shao vd., 2017; Zhang, Gajpal, Appadoo ve Abdulkader, 2018; Macrina, Laporte, Guerriero ve Pugliese, 2019) ve ortam sıcaklığı (De Cauwer vd., 2015; Rastani, Yüksel ve Çatay, 2019) gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Çalışma kapsamında enerji tüketiminin aracın boş ağırlığı, taşınan yük miktarı, aracın hızı, aracın teknik özellikleri, hava yoğunluğu, seyahat mesafesi faktörlerinden etkilendiği durum dikkate alınacaktır.

Çalışmalarda, araçların şarj edilmeye ihtiyaç duyduklarında şarj istasyonlarında *tam ya da kısmi şarj* edilebilecekleri durumlar ele alınmaktadır. Elektrikli araçların şarj politikası olarak da tanımlanan bu kavramlar elektrikli aracın şarj istasyonuna uğraması durumunda bataryasının kapasitesinin ne kadarının doldurulacağını ifade etmektedir (Montoya, Gueret, Mendoza ve Villegas, 2016). Tam şarj durumunda elektrikli araç şarj istasyonuna uğradığında bataryanın kapasitesi tamamen doldurulurken, kısmi şarj durumunda şarj miktarı karşımıza bir karar değişkeni olarak çıkmaktadır (Montoya vd., 2016). Kısmi şarj durumunda batarya kapasitesini aşmayacak şekilde herhangi bir miktara kadar batarya şarj edilebilmektedir (Keskin ve Çatay, 2018). Literatürde çoğunlukta araçların tam şarj edildiği durumlara ilişkin problemler yer almaktadır. Çalışma kapsamında kısmi şarj durumu ele alınacaktır. Kısmi şarj seçeneği rotaların belirlenmesinde büyük bir esneklik sağlamaktadır (Bruglieri vd., 2015).

Elektrikli araçlarda bataryanın tamamen (%100) şarj edilmesi çok istenilen bir durum değildir. Çünkü bataryanın tamamen şarj edilmesi veya sürekli şarj edilmesi bataryanın ömrünü kısaltmaktadır (Sweda, Dolinskaya ve Klabjan, 2016; Tao, Huang ve Yang, 2018). Ayrıca aracın bataryasındaki enerji miktarı batarya kapasitesinin %10'unun altına düştüğü durumlarda şarj süresi uzun zaman almaktadır. Bu sebeplerden dolayı çalışmada bataryanın zarar görmemesi için bataryadaki enerji oranı

%10 ile %90 arasında tutulması durumu da göz önüne alınmıştır (Pelletier, Jabali, Laporte ve Veneroni, 2017; Keskin, Laporte ve Çatay, 2019, Macrina vd., 2019).

Elektrikli araç teknolojisindeki gelişmeler ve elektrikli araç üretimi yapan işletmelerin kabiliyetleri, araçların tek şarjla gidebileceği mesafe üzerinden ölçülmektedir. Ancak gerçek hayatta taşımacılık faaliyetlerinde amaçlar ve kısıtlar sadece gidilebilen en uzun mesafe ile ilgili değildir. Günlük hayatta **sürücülerin çalışma süreleri** mevcuttur. Çalışma kapsamında problemin gerçek hayata uygunluğunun arttırılması amacıyla bir sürücünün günlük olarak çalışabileceği süre kısıtı da ele alınmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde E-YS-ARP için çözüm yöntemi olarak kesin yöntemlerin, sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür. Çalışma kapsamında oluşturulan matematiksel model, öncelikle GAMS programı kullanılarak çözülmeye çalışılmış ancak problemin NP-hard olması sebebiyle optimum çözüm bulunamamıştır. Problemin çözümü için metasezgisel yöntemlerden biri olan **Genetik Algoritma** kullanılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda bilindiği kadarıyla çözüm tekniği olarak genetik algoritmanın kullanıldığı bir çalışmayla karşılaşılmamıştır. Bu açıdan da çalışmanın literatüre katkısı olacağı düşünülmektedir.

Modelin yukarıda belirtilen gerçek hayatta mevcut olan kısıtları dikkate alarak oluşturulması ve her iki problemi eş zamanlı ele alan çalışmaların Türkçe literatürde çok az sayıda bulunması sebebiyle, yapılan çalışmanın Türkiye’de elektrikli ticari araçların kullanımı, enerji tüketimini dikkate alarak şarj istasyonlarının konumlarının ve türlerinin belirlenmesi konusunda gerek sektöre gerekse akademik çalışmalara öncülük edeceği, sektörde meydana gelecek problemlerin çözümünde önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM II

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞARJ SİSTEMLERİ

2.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi

Son zamanlarda popülerliğinin artması sebebiyle yeni bir teknoloji olarak görünüyorsa da, elektrikli araçların tarihçesi oldukça geçmişe dayanmaktadır. Elektrikli araçlarla ilgili ilk başarılı girişim 1800 yılında İtalya’da Alessandro Volta’nın elektrik enerjisini depolayabilmek için geliştirdiği ve kendi adıyla anılan Volta pilini bulmasıyla başlamaktadır (Westbrook, 2001). Devamında 1821’de Micheal Faraday elektrik motorunun çalışma prensiplerini ortaya koymuştur (Westbrook, 2001). Daha sonraki yıllarda Robert Anderson (1832-1839) şarj edilemeyen primer hücreler tarafından çalıştırılan ilk ham elektrikli vagonu icat etmiştir (PBS, 2010).

1830’lu yıllarda elektrikli araçlar konusunda birçok gelişme yaşanmıştır. 1835 yılında Francis Watkins küçük işletim motorunu icat etmiş ve Londra’da sergilemiş, Profesör Stratingh küçük model araç geliştirmiş, 1834-1836 yılları arasında Thomas Davenport elektrikli yol aracı üretmiştir (Westbrook, 2001). 1859 yılında Plante tarafından sekonder hücre ve kurşun asit batarya geliştirilmiş, 1869 yılında Gramme tarafından doğru akım (DC) ile çalışan elektrikli motor icat edilmiştir (Westbrook, 2001).

1881 yılında Frenchman Gustave Trouve tarafından 0,1 beygir gücü doğru akım motorlu, kurşun asit bataryadan beslenen üç tekerlekli bisiklet üretilmiştir (Ehsansi, Gao, Longo ve Ebrahimi, 2018). 1880’li yılların başlarında, ABD ve İngiltere’de de benzer şekilde kurşun akülü elektrikli üç tekerlekli bisikletler ortaya çıkmıştır (Høyer, 2008). Gerçekleştirilen bu girişimler araç hızının saatte 15 km ve menzilin 16 km olması sebebiyle müşterilerde heyecan yaratmamış, ancak 1864 yılındaki Paris-Rouen yarışı herşeyin değişmesine sebep olmuştur (Ehsani vd., 2018). 1135 km’lik yarış, 48 saat 53 dakikada ortalama 23,3 km/s hızla tamamlanmış ve at arabalarının yapacağı hızdan daha fazla olan bu hız toplumun elektrikli otomobillere ilgisini çekmiştir (Ehsani vd., 2018).

Piyasada ilk ticari elektrikli araç Morris ve Salom’un Electrobat adı verilen aracıdır (Ehsani vd., 2018). New York’ta taksi olarak kullanılan bu araç dörder saatten üç vardiya olarak, minimum 90 dakikalık şarj etme periyodları ile kullanılmıştır (Ehsani

vd., 2018). Elektrikli araçlar üzerine teknik gelişmelerden en önemlilerinden biri Frenchman Darracq'ın (1897) icadı olan, aracı frenlemek için sarfedilen kinetik enerjinin depolanmasını ve bu sayede aracın menzilin artmasını sağlayan rejeneratif frenlemedir (Ehsani vd., 2018). Rejeneratif frenleme, günümüzde de kullanılmaya devam edilen, elektrikli araçlar için önemli bir buluştur. Elektrikli araçlar üzerine bir diğer gelişme Frenchman Camille Jenatzy tarafından yapılan “La Jamais Contente” adlı 100 km hıza ulaşan araçtır (Ehsani vd., 2018). Ancak akaryakıtlı araçların daha güçlü, daha esnek, kullanımının daha kolay olması, elektrikli araçların sınırlı menzil ve performans yapısına sahip olması elektrikli araçların piyasadan kaybolmasına sebep olmuştur (Ehsani vd., 2018).

1897’de İngiltere’de bir taksi şirketi, 15 adet elektrikli taksi satın alarak, bu araçları ticari olarak kullanmaya başlamıştır (TÜBİTAK, 2003). 1899’da Japonlar elektrikli araçların ithalatına başlamış, benzinli araçlardaki gelişme, elektrikli araçların gelişmesinde bir dizi ilerlemeye sebep olmuştur (Shibusawa ve Miyata, 2017).

1900’lü yıllarda elektrikli araçlar için daha verimli bataryalar geliştirmeye çalışan Thomas Edison, 1901 yılında nikel-demir bataryayı geliştirmiştir (Høyer, 2008). Kurşun bataryaya kıyasla ağırlık birimi başına %40 daha fazla enerji depolayabilen, ancak üretim maliyetleri çok daha yüksek olan nikel-demir batarya, maliyet kaynaklı problemler sebebiyle ticari elektrikli araçlarda yaygın bir şekilde kullanılamamıştır (Høyer, 2008).

1900-1912 yılları akaryakıt gücüyle çalışan araçların icad edilmesine ve hızla yayılmasına rağmen elektrikli araçların “altın çağı” olarak adlandırılmaktadır (Westbrook, 2001). Bu dönemde elektrikli araçların menzillerini arttırmak amacıyla çalışmalara başlanmış, hibrit adı verilen, elektrikli-benzinli araçlar ortaya çıkmıştır, Ferdinand Porsche tarafından hibrit elektrikli aracın ilk defa deneysel tasarımı yapılmış, bataryaların şarjı içten yanmalı motorlarla sağlanmıştır (TÜBİTAK, 2003). 1903 yılında pazarda elektrikli araç sayısı içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha fazla olmasına rağmen bu durum uzun sürmemiş, 1906’da Ford Model K’yı üretmeye başlamıştır (Westbrook, 2001). 1908’de Henry Ford, ABD otomobil pazarı üzerinde derin bir etkisi olacak olan seri üretilen ve benzinle çalışan Model T’yi piyasaya sürmüştür (PBS, 2010).

1912’de Charles Kettering, otomobiller için elektrikli marşı icat etmiştir (PBS, 2010). Kettering’in bu buluşu, hantal el krank marşını ortadan kaldırarak benzinli

arabaları tüketiciler için daha çekici hale getirmiş ve elektrikli otomobillerin piyasadan kaybolmasının önünü açmıştır (PBS, 2010).

1916'da benzinli motorun elektrikli tahrikli kombinasyonu olan hibrit araçlar geliştirilmiş, 1920'lerin başında neredeyse tüm elektrikli otomobil üreticileri ya işsiz kalmış ya da benzinli motorlu otomobiller üreterek piyasada kalmaya devam etmişlerdir (Westbrook, 2001). Elektrikli araçların bataryaları ile ilgili problemler ve içten yanmalı motorlu araçlardaki hızlı gelişmeler, elektrikli araçların 1930'lardan itibaren piyasadan kaybolmasına neden olmuştur (Chan, 2002). Bu sebeplerden dolayı 1925 ve 1960 yılları arası elektrikli araçlar için "karanlık çağ" olarak ifade edilmektedir (Westbrook, 2001).

1937-1954 yılları arasında savaş zamanı akaryakıt kısıtlamaları sebebiyle Japonya'da elektrikli araçlar kullanılmıştır (Westbrook, 2001). Benzer şekilde İngiltere'de 1940'lı yılların sonlarından 1950'li yılların başlarına kadar süt dağıtımında elektrikli araçlar kullanılmıştır (Westbrook, 2001). 1945'li yıllarda Bell Laboratuvarları'nda transistör icat edilmiş, 1966'da General Motors tarafından Electrovan adlı araç üretilmiştir (Ehsani vd., 2018). Apollo astronotlarının ayda kullandıkları Lunar Roving, elektrikli araç alanında önemli gelişmelerden biridir (Ehsani vd., 2018). 1968'de General Electric GE Delta aracını sunmuş, Ford ise E-Car adını verdiği nikel-kadmiyum bataryaların kullanıldığı deneysel aracının prototipini geliştirmiştir (TÜBİTAK, 2003).

1970'li yıllarda yaşanan petrol krizinin zorladığı ülkeler elektrikli araçların gelişimini yeniden hızlandırmıştır (Chan, 2007). 1973'te bir Fransız firması içten yanmalı motorlu araçları elektrikli araçlara dönüştürmüş, Daimler ve Volkswagen elektrikli araçlarla ilgili çalışmalar yapmış, 1975'te Fiat deneysel prototip geliştirmiştir (TÜBİTAK, 2003). 1976'da ABD'de 94-413 sayılı sayılı Elektrik ve Hibrit Araç Araştırma, Geliştirme ve Gösterme Yasası yürürlüğe girmiştir (Chan, 2007). Japon hükümeti 1971-1976 yılları arasında elektrikli araçların geliştirilmesi konusunda ciddi teşvikler vermiştir (TÜBİTAK, 2003).

Modern elektrikli araç dönemi 1980'lerde ve 1990'ların başında General Motors, Peugeot Societe Anonyme gibi firmalar tarafından birkaç gerçekçi elektrikli aracın piyasaya sürülmesiyle sonuçlanmıştır, ancak bu araçlar menzil ve performans açısından benzinli otomobillerle yarışacak seviyeye gelmemiştir (Ehsani vd., 2018). 1970'li yılların sonunda benzin fiyatlarının düşmesi ile elektrikli araçlara olan ilgi azalırken, 1980'li yıllarda çevre konusundaki endişeler, ortaya çıkan çevre problemleri elektrikli araçların geliştirilmesi konusunda yeniden ana motivasyon kaynağı olmuştur

(Rajashekara, 1994). Üretilen ilk araçlarda doğru akım kullanılırken, 1980'li yıllarda alternatif akım kullanılmaya başlanmıştır (TÜBİTAK, 2003). 1988 yılında Peugeot 205 ve Citroen C15 modelleri elektrikli araç olarak modifiye edilmiş, bu araçların kullanımı denenmiş, İtalya'da Fiat yine kendi modellerinden biri olan içten yanmalı motorlu aracını elektrikli araca dönüştürmüştür (TÜBİTAK, 2003). 1990'lı yıllarda küresel ısınma problemi sebebiyle elektrikli araçlar yeniden ilgi odağı olmuştur (Shibusawa ve Miyata, 2017). 1991'den itibaren araç üreticilerinin birçoğu elektrikli araç üretmiş, alternatif akım kullanılmış, elektrikli araçların menzil ve bataryadan kaynaklı problemlerinin giderilmesi amacıyla hibrit elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir (TÜBİTAK, 2003).

1997'de Toyota ilk üretim yılında 18.000 adet satılan, dünyanın ilk ticari seri üretilen ve pazarlanan hibrit otomobili Prius'u tanıtmıştır (PBS, 2010). Toyota Prius yollardaki elektrikli otomobil sayısını iki kattan fazla arttırdığı söylenen modern elektrikli hibrit araç olarak kabul edilmektedir (Larminie and Lowry 2012).

1997-2000 yılları arasında, birkaç bin elektrikli otomobil (Honda EV Plus, GM EV1, Ford Ranger kamyonet EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV ve Toyota RAV4 EV gibi) büyük otomobil üreticileri tarafından üretilmiştir (PBS, 2010). Ancak bu araçların çoğu satın alınmak yerine kiralama için kullanılabilmiş ve büyük otomobil üreticilerinin gelişmiş elektrikli üretim programları 2000'li yılların başında durdurulmuştur (PBS, 2010). General Motors EV1 araçlarında, araç kiralamak için artık parça tedarik edemediğini ve arabaları 2004 yılının sonuna kadar geri almayı planladığını söyleyerek kiralamaları yenilemeyeceğini açıklamıştır (PBS, 2010).

2006-2008 döneminde Amerika'da yakıt fiyatlarının neredeyse üç katına çıktığı petrol krizi sırasında, sağladıkları menzil açısından hibrit araçlar popüler hale gelmişlerdir (Anderson ve Anderson, 2010). 2008 yılında Tesla'nın Tesla Roadster modelini piyasaya sunması (621 mil menzil), Rusya'nın elektrikli araçları desteklemek amacıyla 2015 yılında akaryakıt istasyonlarına elektrikli araç şarj ünitesinin yerleştirilmesini zorunlu kılması, sektörde gelişmeleri hızlandırmıştır (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Derneği, 2018).

2009-2013 yılları arasında Amerika'da Enerji Departmanı tarafından tüketicilerin hareket halindeyken araçlarını şarj etmelerine yardımcı olmak için konut, ticari ve kamu şarj cihazı kurularak ülke çapında bir şarj altyapısına yatırım yapılmıştır (Energy. Gov, 2014). 2010'da General Motors, Chevrolet Volt'u piyasaya sürerek ilk ticari olarak kullanıma hazır plug-in hibrit aracı üretmiştir (Energy. Gov, 2014). 2010

yılında BEV Nissan LEAF piyasaya sürülmüş, bu araç 2011’de Avrupa Yılın Aracı ödülünü kazanmıştır (International Energy Agency, 2013). 2012’de PHEV Chevrolet Volt, ABD pazarındaki otomobil modellerinin yarısından daha çok satar duruma gelmiştir (International Energy Agency, 2013). 2013 yılında Amerika’da Enerji Departmanı tarafından yapılan yatırımlar sayesinde, batarya maliyetleri sadece dört yılda %50 oranında düşerek elektrikli araçların tüketiciler için daha uygun hale getirilmesi sağlanmıştır (Energy. Gov, 2014).

21. yüzyılda yeni teknolojik inovasyonlar, sürdürülebilir kalkınma ile ilgili zorunlu politikalar ve iklim değişikliği ile ilgili mücadeleye duyulan ihtiyaçlar sebebiyle, ucuz, yenilenebilir enerji gücünden tam olarak yararlanmayı sağlayan “akıllı” dijital teknolojilerle birlikte, temel bir yakıt olarak “temiz elektriğe” yönelik acil bir enerji geçişi sağlanmaya çalışılmaktadır (IRENA, 2019). Bu sebeple bu dönemde elektrikli araçlar ilgi odağı haline gelmiştir. Özellikle Tesla’nın yapmış olduğu çıkışlar elektrikli araç teknolojisindeki gelişmeleri hızlandırmıştır. Binek araçlarda Tesla Roadster’in 621 mil menzile sahip olması, lojistik sektöründe tek şarjla 800km kat edebilen Tesla Semi Truck modelinin ve Ford’un otonom kamyonunun tanıtımını yapması ve önümüzdeki yıllarda piyasaya sürecekt olmaları sektördeki gelişmelerden bazılarıdır. Son yıllarda elektrikli araç teknolojisindeki gelişmelerden biri de araçların üretiminde kenevir liflerinin kullanılmasıdır. Her ne kadar bu fikir 1941 yılında Henry Ford tarafından T model aracın kenevir ile üretilmesine (Hemp Foundation, 2020) kadar dayanıyor olsa da süreç ilginçliğini korumaya devam etmektedir. Örneğin BMW ve Audi gibi işletmeler, bitki bazlı malzemeleri termoplastiklerle karıştırarak çelikten 2-3 kat daha güçlü bir malzeme elde ederek bu malzemeyi araçlarında kullanmaktadırlar (Cash Crop Today, 2020). BMW’nin ürettiği i3 model araçlar endüstriyel kenevir kullanılarak geliştirilmiş, böylece kullanılan metal miktarının azaltılması ve aracın ağırlığının düşürülmesiyle aracın menzili arttırılmıştır (Cash Crop Today, 2020). Elektrikli araçların bataryalarının ağır olması araçların önündeki engellerden biridir. Bu sebeple ağırlığın azaltılması araçlar açısından önemli bir gelişmedir. Benzer bir şekilde kenevirden yapılmış elektrikli araç bir grup Kanadalı işletme tarafından 2010 yılında geliştirilmiştir (CBC.CA, 2010) Bunlara ek olarak şarj teknolojisindeki gelişmeler, insanların akşamları evlerinde uyurken araçlarını şarj edebilecekleri düşüncesi, hızlı şarj sayısının dünya çapında arttırılması, bataryaların ağırlığının azaltılması bu sayede taşınabilecek yük miktarının arttırılmaya çalışılması, değiştirilebilir bataryaların üretilerek olması, elektrikli araçları yolda giderken şarj

edebilecek kablosuz şarj sisteminin geliştirilmesi, araçların otonom versiyonları sayesinde sürücüye ihtiyaç duyulmayacak olması elektrikli araçlardaki son yıllarda gerçekleşen/gerçekleşmeye devam eden gelişmelerdir.

Birçok markanın önce binek araçlar ile başlayan serüveni günümüzde ticari araçlarda devam etmektedir. Lojistik faaliyetlerin maliyetli olması, işletmelerin sektörün teknolojisinde lider olmak istemeleri, dünyanın çevresel açıdan yaşadığı dönüşüm, elektrikli araçların geliştirilme ve iyileştirilme süreçlerini hızlandırmaktadır.

2.2.Elektrikli Araç Türleri

Otomotiv sanayide uzun yıllardır petrole kıyasla doğaya daha az zarar veren, daha az yakıt maliyetli, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji elde eden, geleceğin lideri olan araçlar geliştirme çabası mevcuttur. Geliştirilen bu araçlardan günümüzde en gündemde olanlardan biri elektrikli araçlardır. Elektrikli araçlar fosil yakıt enerji kaynağı krizini ve çevre kirliliğini gidermek amacıyla bir umut olarak görülmektedirler (Liu vd., 2018). Elektrikli araçlar ile ilgili birçok sınıflandırma mevcuttur. Aşağıda adı en çok duyulan elektrikli araç türleri açıklanmış, ancak çalışma kapsamında bataryalı elektrikli araçlar ele alındığından bataryalı elektrikli araçlar ya da diğer adıyla tamamen elektrikli araçlar daha detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2.1.Bataryalı Elektrikli Araçlar

Tamamen elektrik gücüyle çalışan araçlara bataryalı elektrikli araç adı verilmektedir (Tie ve Tan, 2013; Barazesh, Saebi ve Javidi, 2015). Bataryalı (sadece/tamamen) elektrikli araçlarda, aracın hareket edebilmesi için gerekli olan güç elektrik motorlarından sağlanmaktadır (TÜBİTAK, 2003). İtme kuvvetinin artırılabilmesi için daha fazla sayıda elektrik motoru kullanılabilmekte, elektrik motorunun gücü ise motora depolanan elektrik enerjisinden elde edilmektedir (TÜBİTAK, 2003). Elektrik enerjisi bataryalar/piller sayesinde depolanabildiğinden tamamen elektrikli olan araçlarda aracın çalışması sırasında herhangi bir fosil yakıt kullanılmamakta, bu sebeple egzoz emisyonu meydana gelmemekte, bu araçlar da çevre dostu veya sıfır emisyonlu araçlar olarak tanımlanmaktadır (TÜBİTAK, 2003). Bataryalı elektrikli araç, enerji depolamak için bir elektrikli batarya/akü, bir elektrikli motor ve bir kontrol cihazından

oluşmaktadır, kontrol cihazı ileri ve geri hareketlerde motora verilen gücü ve dolayısıyla araç hızını kontrol etmektedir (Larminie ve Lowry, 2012). Bataryalı elektrikli araçlar içten yanmalı motoru veya geleneksel yakıt sistemini içermeyen, hibrit elektrikli araçlara ve plug-in hibrit araçlara nazaran daha büyük bataryalara sahip olan araçlardır (Electrification Coalition, 2013).

Elektrikli araçlarda, içten yanmalı motor olmadığı için aracın menzili, bataryasında olan enerji miktarı kadardır. Bu yüzden bataryadaki enerji bittiğinde aracın kullanılmaya devam edilebilmesi için şarj edilmesi gerekmektedir. Batarya normal olarak bir elektrik prizinden ya da şarj noktasına takılabilen veya araca takılmış vaziyette bulunan bir batarya şarj ünitesi aracılığıyla elektrik şebekesinden şarj edilebilmektedir (Larminie ve Lowry, 2012).

Bataryalı elektrikli araçlar diğer elektrikli araçlara kıyasla içten yanmalı motorlu araçlarla egzoz emisyonundan kaynaklı kirliliği azaltma konusunda, daha fazla rekabet edebilir konumdadırlar (Liu ve Wang, 2017). Bataryalı elektrikli araçlar benzin, dizel gibi yakıtlar gerektirmemektedirler (Egbue ve Long, 2012). Ayrıca bu araçlar petrole olan bağımlılığı azaltmakta ve sessiz çalışmaktadırlar. Ancak bataryalı elektrikli araçların piyasada yayılmasını engelleyen durumlar söz konusudur. Bu engeller araçların satın alma maliyetlerinin yüksek olması, menzilinin düşük olması, elektrikli araçlar için yeterli sayıda şarj istasyonunun bulunmaması, şarj süresinin içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha uzun sürmesi (Liu ve Wang, 2017), araçların bataryalarının büyük boyutlarda olması (Barazesh vd., 2015) olarak belirtilmektedir.

2.2.2. Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha çevreci olan araç tipidir. Hibrit elektrikli araçlar, içten yanmalı motor, tahrik için elektrik motoru ve elektrik enerjisi depolamak için akü kullanan araç türüdür (Pelletier, Jabali, Laporte ve Veneroni, 2017). Hibrit elektrikli aracın iki veya daha fazla güç kaynağı vardır ve çok sayıda farklı tipleri bulunmaktadır (Larminie ve Lowry, 2012).

Hibrit elektrikli araçlar, frenleme sırasında kinetik enerjinin geri kazanılması ve motor hareketlerinin optimizasyonu sayesinde klasik içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha çok yakıt tasarrufu sağlamaktadırlar (Chan, 2007). Bu araç türünün ikinci güç kaynağı olan yakıtın olması bataryalı elektrikli araçlara kıyasla daha uzun menzili

olmasını sağlamaktadır (Yılmaz ve Krein, 2013). Hibrit elektrikli araçlar 30-60 km'ye kadar bir sürüş aralığı için sadece elektrikli modda çalıştırılabilmektedir (Chan, 2007).

2.2.3. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit elektrikli araçların geliştirilmiş bir versiyonu olarak karşımıza çıkan plug-in hibrit elektrikli araçlar; daha küçük içten yanmalı motorlu ve şarj edilebilen daha güçlü elektrikli akülere sahip olan, hibrit elektrikli araçlara kıyasla daha az yakıt tüketen, daha düşük emisyon oranına sahip olan araçlar olarak tanımlanmaktadırlar (Amjad, Neelakrishnan ve Rudramoorthy, 2010; Egbue ve Long, 2012; Pelletier vd., 2017). Bu araçlar geceleri prize takılarak şarj edilebilmektedirler (Sovacool ve Hirsh, 2009; Tie ve Tan, 2013).

Plug-in hibrit araçların iki çalışma modu bulunmaktadır: şarj besleme modundayken şarjın belirli bir düzeyde kalması için alternatif olarak benzin ve elektrik kullanılmakta, şarj tüketme modundayken bataryada bulunan elektrik enerjisi tüketilene kadar araç elektrik enerjisi ile çalışmakta ve elektrik enerjisinin bitiminde araç benzin kullanmaya devam etmektedir (Barazesh vd., 2015).

Plug-in hibrit araçlar petrol tüketimi içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla önemli derecede azaltmakta, buna ek olarak, bu araçlar hava kirliliği ve sera gazı salınımının azalması, evde şarj imkânı tanınması, daha az bakım gerektirmesi, yeşil araç görünümü sağlaması gibi avantajlar da sunmaktadırlar (Markel ve Simpson, 2007).

2.2.4. Yakıt Hücreli Araçlar

Yakıt kullanan elektrikli araçların temel prensibi, elektrikli araçla aynıdır. Farklılık olarak şarj edilebilir elektrikli batarya yerine yakıt hücresi veya metal hava bataryası mevcuttur (Larminie ve Lowry, 2012). Bu araçlarda bulunan yakıt hücreleri hidrojen ve oksijendeki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedirler (Delucchi ve Lipman, 2010). Bu araçların 2030'lu yıllarda pazara girmesi beklenmekle birlikte (Yağcıtekin, Uzunoğlu ve Karakaş, 2011) 2021 yılı itibarıyla Hyundai ilk hidrojen yakıtlı kamyonlarını Avrupa'daki müşterilerine teslim etmiştir (Nepori, 2021).

Yakıt hücreli araçların en büyük avantajları, yakıt hücrelerinin bataryalara kıyasla daha hafif ve daha küçük olmaları ve yakıt sağlandığı sürece elektrik enerjisi üretebilmeleridir (Pollet, Staffell ve Shang, 2012). Aynı zamanda bu araçların verimliliği yüksektir, sessiz çalışırlar ve uzun ömürlü araçlardır (Delucchi ve Lipman,

2010). Yakıt hücresi araçlar elektrik üretmek için yakıt olarak hidrojeni kullanmaktadırlar, dolayısıyla temel olarak emisyonludur (Chan, 2007). Ancak hidrojen üretimi, depolaması ve teknik sıkıntılardan dolayı bu araçlar yaygın olarak kullanılamamaktadır (Chan, 2007). Bu araçların maliyetlerinin yüksek olması, alt yapı ve teknik zorluklar da araçların pazarda daha fazla yer almasının önüne geçmektedir (Amjad vd., 2010).

Bu araçların yaygınlaşabilmesi için hidrojen fiyatlarının düşürülmesi, hidrojen depolama teknolojisinin geliştirilmesi, yakıt hücresi maliyetlerinin azaltılması ve yakıt hücrelerinin dayanıklılığının artırılması gerekmektedir (Pollet vd., 2012).

2.3. Elektrikli Araç Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları

Fosil yakıtlardan daha temiz ve enerji kullanımı açısından daha verimli olan alternatif yakıtlı araçlara geçmek karayolu taşımacılığı sera gazı emisyonunun azaltılmasında hayati bir adımdır (Liu ve Wang, 2017). Alternatif yakıtlar arasında en çok dikkat çeken teknoloji sahip olduğu yaygın ağ, elde edilebilirliği ve verimliliği sebebiyle elektriktir (Liu ve Wang, 2017). Bu sebeple alternatif yakıtlı araçlar sınıfında yer alan elektrikli ticari araçlar geleceğin sürdürülebilir hareketliliği için önemli bir rol oynayacak büyük bir fırsat olarak görülmektedir (Schiffer ve Walther, 2017a). Elektrikli araçlar, hibrit araçlar, yakıt hücresi/pilli araçları da içeren yeni nesil araçların ortaya çıkmasının altında yatan faktörler arasında CO₂ azaltımı, enerji tasarrufu, küresel ısınmanın önlenmesi gibi çevresel faktörlerin yanında, çöküşün yol açtığı durgunluğun ardından toparlanmayı teşvik edecek bir ekonomik politika aracı olarak kullanılması da yer almaktadır (Shibusawa ve Miyata, 2017).

Elektrikli araç sayısındaki artışın, kamu politikalarına ve pillerin maliyetine bağlı olarak değişeceği beklenmekle birlikte, yapılan çalışmalarda 2050 yılında dünyada yaklaşık bir milyar elektrikli aracın kullanılıyor olacağı tahmin edilmektedir (IRENA, 2019). Bloomberg NEF (2018) tarafından yapılan tahmin çalışmaları incelendiğinde 2040 yılı itibarıyla, Çin'in dünyanın en büyük elektrikli araç pazarı olmaya devam edeceği (pazarın %50'sine sahip olacağı), tüm yeni otomobil satışlarının %55'inin ve küresel filonun %33'ünün elektrik olacağı söylenmektedir. Yine 2040 yılında elektrikli otobüslerin ve otomobillerin, günlük 7,3 milyon varil yakıtın yerini alacağı, elektrikli otobüslerin hafif ticari araçlardan daha hızlı gideceği öngörülmektedir (Bloomberg NEF, 2018). Çalışmada ayrıca elektrikli araçların satış rakamlarının 2025'te 11 milyona çıkacağı, 2030'da içten

yanmalı motorlu otomobillerden daha ucuz hale geldiklerinde bu rakamın 30 milyona yükseleceği belirtilmektedir (Bloomberg NEF, 2018).

Elektrikli araç pazarında satışların artmasını etkileyen birçok sebep vardır. Avrupa'ya bakıldığında Alman hükümeti tarafından egzoz gazı emisyonundaki nitrik oksit miktarı üst sınırı aşan dizel araçların trafikten men edilmesine yönelik karar verilmesi ve birçok Avrupa ülkesinde önümüzdeki yıllarda dizel yakıtlı araç kullanımının yasaklanacağını duyurulması bu sebeplerden biridir (Dalaman, 2018). Petrol kaynaklarının azaldığı, yakıt fiyatlarının ve enerji konusunda dışa bağılılığın ciddi oranlarda arttığı aşîkârdır ve bu durumun yansımaları olarak taşımacılıkta navlun fiyatlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca petrol kaynaklarına sahip olma geçmişte de günümüzde de büyük gerilimlere sebep olmaya devam etmektedir. Bireylerin satın alma güçlerinin artması beraberinde bireysel araçların kullanımını da arttırmakta, petrol kaynaklarına olan talep artmakta ve bu durum dünyada petrol savaşlarının ortaya çıkmasına katkıda bulunmaktadır. Elektrikli araç sayılarının artması petrol kaynaklarına duyulan ihtiyacın azalmasını sağlayacaktır.

Son yıllarda lityum-iyon batarya fiyatlarının düşmesi, elektrikli araç bataryalarının ortalama enerji yoğunluğunun yılda yaklaşık %5-7 oranında artması, hükümetlerin elektrikli araçlar için verdikleri teşvikler gibi sebeplerle, Daimler, Volvo, Volkswagen, Nissan gibi lider otomobil üreticilerinin önümüzdeki dokuz yıl içinde araçlarını elektrikli araç haline getirme planları elektrikli araç pazarını etkilemektedir (Bloomberg NEF, 2018). Elektrikli araç kullanımının sağladığı birçok fayda mevcuttur. İzleyen paragraflarda bunlara değinilmektedir.

Özellikle yoğun nüfuslu şehirlerde navlun dağılımı, tıkanıklık, hava ve gürültü kirliliği, enerji verimsizlikleri, yol güvenliğinin azalması, altyapının bozulması, yol kapasitesinin yetersizliği ve park yeri ulaşımın olumsuz sonuçlarından bazılarıdır (Juan, Mendez, Faulin, Armas ve Grasman, 2016). Kamu şebekesinden elektrik kullanan elektrikli araçlar, sera gazı emisyonlarının ve ulaşımın bu gibi olumsuz etkilerinin azaltılmasında önemli bir rol oynayacaktır (Juan vd., 2016).

Elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla sessiz olmaları, egzoz emisyonu üretmemeleri gibi avantajları mevcuttur (Larminie ve Lowry, 2012; Bruglieri vd., 2015; Schiffer vd., 2016; Schiffer ve Walther, 2017a; Basso, Kulcsár, Egardt, Lindroth ve Diaz-Sanchez, 2019). Bu durum elektrikli araçları depo gibi kapalı alanlarda kullanılmak için tercih edilir duruma getirmektedir (Larminie ve Lowry, 2012). Akü şarjı için elektrik üreten elektrik santrallerinden kaynaklanan emisyonları

hesaba dahil edilse bile (elektrikli araç kullanımıyla ilgili tek emisyon), elektrikli araçlar diğer alternatif yakıtlı araçlardan çok daha temizdir (O'Connell, 1995). Yapılan bir çalışmada aynı mesafeyi alan elektrikli aracın elektrik tüketiminin yakıtlı aracın yakıt maliyetinin %10-%15'ine denk geldiği ortaya çıkmıştır (Xiao, Zuo, Kaku, Zhou ve Pan, 2019). Elektrikli araçların sahip olduğu rejeneratif frenleme teknolojisi sayesinde toplam enerjinin %95'i geri kazanılmaktadır (Bruglieri vd., 2015). Ayrıca elektrikli araçlarda egzoz gazı ortaya çıkmaması sebebiyle, egzoz gazlarından kaynaklı ısı artışı da engellenecek, devletlerin CO₂ salınımı için katlandıkları maliyetlerde azalma sağlanacaktır (Varol, Öztürk ve Öztürk, 2018). Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlarla karşılaştırıldığında, durma/kalkma sırasında verimliliklerini korumaya devam etmektedirler (Larminie ve Lowry, 2012). İçten yanmalı motorlu araçlar, duruş ve kalkışları esnasında hava kirliliğine sebep olurlarken, elektrikli araçlarda böyle bir durum söz konusu değildir (Larminie ve Lowry, 2012).

Elektrikli araçların güç şebekesinin yükünü dengelemek için düşük talep zamanlarında şarj edilebilir olması (Xiao vd., 2019), enerji kullanımında daha yüksek verimliliğe sahip olmaları da elektrikli araçlar için avantaj olarak görülmektedir (Ma, Tao, Zhou ve Gao, 2018). Bazı ülkelerde gece elektrik fiyatları daha düşük olduğu için araçların gece şarj edilmesi durumunda şarj maliyetleri de azaltılabilecektir (Afroditi vd., 2014). Elektrikli ticari araçların küçük merkezi olmayan enerji depoları olarak hizmet edebildiği (Tie ve Tan, 2013) ve değişken yenilenebilir enerji arzını dengeleyebildiği için yenilenebilir enerji kaynaklarının payının arttırılmasına katkıda bulunabilmektedirler (Schiffer ve Walther, 2017a). Ayrıca elektrikli araçlar mobil enerji dönüştürücü olarak da kullanılabileceklerdir (Tie ve Tan, 2013). Hükümetler ve özel şirketler, gerekli şarj altyapısını sağlamak için yatırım yapmaktadırlar (Desaulniers, Errico, Irnich ve Schneider, 2016). Aynı zamanda elektrikli araçlar için kurulacak şarj istasyonlarında enerji depolama sistemlerinin kurulması elektrik enerjisi ile ilgili problemlerin azaltılmasını sağlayabilecektir (Abdalrahman ve Zhuang, 2017). Şarj işlemi için talebin düşük olduğu zamanlarda yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen elektriğin depolanması ile hem elektrik şebekesindeki yükün azaltılması hem de şarj maliyetlerinin düşürülmesi sağlanabilecektir (Abdalrahman ve Zhuang, 2017).

Tüketici bilincinin gün geçtikçe arttığı günümüz dünyasında işletmeler için “çevre dostu işletme” olarak tanınmak oldukça önemlidir. Fiyatlara çok müdahale edilemeyen, ürün ve hizmet kalitelerinin birbirine çok yakın olduğu piyasada tüketiciler çevreye duyarlı ürün veya hizmetleri sunan işletmeleri tercih etmektedirler. Bu sebeple

elektrikli ticari araçlar lojistik şirketlerinin günümüzde rekabet stratejisi olarak kullanılan yeşil işletme olmak konusunda fırsatlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Günümüzde en çok yaşanan problemlerden biri yavaş akan trafiktir. İçten yanmalı motorlu araçlar trafiğin yavaş akması durumunda düşük hızda hareket ederken yakıt tüketimleri ciddi bir biçimde artmakta ve daha çok hava kirliliğine sebep olmaktadır. Elektrikli araçlar yavaş akan trafikte düşük hızda kullanılmaları durumunda (motor verimliliklerinde ufak bir azalma olmasına rağmen) kurşun asit gibi bataryaların verimliliği artmakta ve düşük hız aralığında oldukça istikrarlı bir verimlilik sağlamaktadırlar (Larminie ve Lowry, 2012).

Tablo 3'te elektrikli araçlar ve içten yanmalı motorlu araçların performanslarının özet olarak karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

Tablo 3 Elektrikli Araçlar ve Fosil Yakıtlı Araçların Genel ve Kullanım Esnasındaki Performansları

Elektrikli araçlar ve fosil yakıtlı araçların genel performansları		
Performans	Elektrikli Araç	Yakıtlı araç
Manevra kabiliyeti	İyi	İyi
Egzoz emisyonu	İyi	Kötü
Gürültü ve titreşim	İyi	Ortalama
Bakım	İyi	Kötü
Enerji kaynakları	Kötü	İyi
Satın alma maliyeti	Yüksek	Ortalama
Kullanma aşamasında elektrikli araçlar ve yakıtlı araçları		
Araç tipi	Elektrikli araç	Yakıtlı araç
İklim şartları gereği düşük sıcaklık durumlarında çalışma	İyi	Kötü
Düşük gürültü seviyesi	İyi	Ortalama
Çalışmanın devamlılığı	Kötü	İyi

Kaynak: Ma vd., 2018

Elektrikli araçların avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Ticari elektrikli araçların pazarda rekabetini kısıtlayan rota uygulanabilirliği,

minimum filo büyüklüğü, kat edilen mesafe, pil ömrü, satın alma maliyetlerinin yüksek olması gibi faktörler söz konusudur (Davis ve Figliozi, 2013).

Elektrikli araçların üretim maliyetleri bataryaların üretim maliyetleri sebebiyle yüksektir ve bu da elektrikli araç sayısının artmasının önündeki engellerden biridir (Varol vd., 2018; Basso vd., 2019). Ancak dünya genelinde birçok hükümetin sunduğu yüklü sübvansiyonlar nedeniyle maliyet açısından cazip hale gelmeye başladığı da unutulmamalıdır (Desaulniers vd., 2016). Ayrıca Schiffer vd. (2016) tarafından yapılan çalışma elektrikli araçların toplam maliyet açısından daha avantajlı olduğunu göstermiştir.

Elektrikli araçlarda menzil konusu ve şarj sürelerinin uzunluğu da problem olarak tanımlanmaktadır (Morita, 2003). Elektrikli aracın sıcak veya soğuk ortamlarda çalışması menzilin düşürmektedir (Boulanger vd., 2011). Aracın soğutulması veya ısıtılması için de enerji harcanmakta, bu durum bataryadaki enerjinin bu işlemler için harcanması sebebiyle azalmasına ve menzilin düşmesine sebep olmaktadır (Boulanger vd., 2011). Ancak günümüzdeki gelişmeler bu problemlerin yakın zamanda çözüleceğini göstermektedir. Son zamanlarda, endüktif şarjdan yararlanan ve toprağa gömülü elektrik bobinleri üzerinden kablosuz olarak şarj edebilen online elektrikli araçlar (OLEV'ler) normal elektrikli araçların bir üst modeli olarak ortaya çıkmıştır (Mpousdra, Iliopoulou, Kepaptsoglou, Vlahogianni ve Tyrinopoulos, 2018).

İçten yanmalı motorlu araçların üretiminde 20.000-30.000 adet parça kullanılmakta, bu da çok sayıda tedarikçi ve alt seviye tedarikçi anlamına gelmektedir (Shibusawa ve Miyata, 2017). Ancak elektrikli araçlarda kullanılan parça sayısı içten yanmalı motorlu araçlarda kullanılan parça sayısının neredeyse üçte ikisi kadardır ve bu durum otomobil parçası üreticileri üzerinde tedarikçilerin azalması, sektörde işsizlik gibi ciddi etkiler yaratacaktır (Shibusawa ve Miyata, 2017). Ancak daha az sayıda parça kullanılıyor olması daha az bakım (yağ değişimi, filtre, yakıt pompası, alternatör vb. gibi parça değişiminin olmaması) anlamına gelmektedir (Anderson ve Anderson, 2010). Bu durum kullanıcının lehinedir. Bununla birlikte, elektrikli araçların kendi başlarına bir sektör oluşturacağı ve ülke ekonomilerine katkı da bulunacakları da unutulmamalıdır.

Elektrikli araçların satış fiyatlarının yüksek olması, bakım-onarım servislerinin yeterli sayıda olmaması (her ne kadar uzun kilometrelerde bakım-onarıma ihtiyaç duyulmayacağının garantisi veriliyor olsa da), içten yanmalı motorlu araçların yakıt ikmal süresinin kısalığına karşın uzun süren şarj süreleri, bataryalarının ağır olması gibi dezavantajları da mevcuttur (TÜBİTAK, 2003). Benzer şekilde, taşıyabilecekleri yük

miktarının ve yolcu sayısının sınırlı olması elektrikli araçların diğer olumsuz yönleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Chan, 2007).

Elektrikli araçların en önemli dezavantajlarından bir diğeri şarj istasyonlarına ilişkin altyapının henüz yeterli olmamasıdır. Buradaki zorluk, elektriği mümkün olan birçok yerde, minimum sistem maliyetinde ve kabul edilebilir bir şarj süresinde çok çeşitli araçlara ulaştırmaktır (Boulanger vd., 2011). Bu zorlukların ortadan kaldırılabilmesi için şarj cihazlarının ve elektrikli araçların birlikte çalışabilirliği sağlanmalı (haberleşmelerin, fişlerin, ara yüzlerin standardizasyonu ve güç), şarj cihazlarının kurulumu için açık yönetmelikler ve standartlar hazırlanmalı, şarj altyapısına güvenilir erişim sağlanmalı, uzun yolculukların yapılabilmesi için yaygın hızlı şarj imkânı sağlanmalıdır (Boulanger vd., 2011).

Enerji üretimi ve karayolu taşımacılığı dünyada yaşanan iklim değişikliği gibi birçok sorunun en önemli sebebidir (Scheiper, Schiffer ve Walther, 2019). Elektrik üretiminin, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilme oranı %10'un altındadır, bu durum elektrikli araçların kullandığı elektrik enerjisinin üretiminin petrol, kömür, doğalgaz kullanılarak sağlanacağını göstermektedir (Larmine ve Lowry, 2012:239). Elektrikli araçların sağlayacağı asıl faydalar yalnızca elektrik üretiminin yenilenebilir kaynaklardan yapılması durumunda gerçekleşecektir (Granovskii, Dincer ve Rosen, 2006). Aksi takdirde çevreye verilecek zarar daha büyük olacaktır. Nitekim yapılan bir çalışmada İstanbul'daki toplu taşıma araçlarının tamamının elektrikli araç olması durumunda elektrik enerjisi ihtiyacının artacağı, bu enerjinin yenilenebilir kaynaklardan üretilmemesi durumunda çevreye daha çok zarar verileceği sonucu ortaya çıkmıştır (Varol vd., 2018). Son yıllarda çalışılan yeni bir konu olmakla birlikte yeşil şarj istasyonları kurulmasıyla bu sorunun ortadan kalkacağı düşünülmektedir (Yağcıtekin vd., 2011).

2.4. Elektrikli Araçların Şarj Sistemleri

İşletmeler, düşük maliyetler, emisyon oranını azaltma, toplumsal imajlarını geliştirme gibi sebeplerle araç filolarını elektrikle çalışan filolar haline getirmekte, ancak araçlarının yolculuğuna devam edebilmeleri için şarj imkanı sağlama problemi ile karşı karşıya kalmaktadırlar (Worley vd., 2012).

Elektrikli araçların fosil yakıtlı araçlara kıyasla daha düşük kullanım oranlarına sahip olmalarının ve daha yavaş yaygınlaşmalarının sebeplerinden biri bataryalarının sınırlı kapasiteye sahip olması, ortaya çıkan şarj ihtiyacı ve uzun şarj süreleridir (Zuo,

Xiao, Zhu ve You, 2018). Çoğu zaman elektrikli araçların şarj süreleri zamanla doğru orantılı olduğu (lineer) kabul edilmektedir. Ancak gerçekte elektrikli araçların şarjı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada (bataryanın %80'ine kadar dolması) şarj akımı sabit tutulmakta, şarj seviyesi pilin terminal voltajı belirli bir maksimum değere ulaşıncaya kadar zamanla doğrusal olarak artmaktadır (Montoya, 2016). İkinci aşamada (bataryanın %80'den %100'e kadar olan bölümünün dolması) akım üstel bir şekilde azalmakta ve bataryada hasarı önlemek için terminal voltajı sabit tutulmaktadır yani ikinci aşama zamanla doğrusal olarak gerçekleşmemektedir (Montoya, 2016). Bu durumun sebebi terminal voltajının ve akımının değişmesidir (Montoya, 2016).

Elektrikli araçların içten yanmalı motorlu yakıtlı araçlarla rekabet edebilmeleri için en az bu araçlar kadar hızlı şarj edilmelerinin sağlanması gereklidir (Kaptan ve Cansever, 2018). Elektrikli araçlar için oluşturulacak şarj altyapısı, mevcut yakıtlı araç altyapısının rahatlığını ve birlikte çalışabilirliğini taklit etmelidir, mümkün olan en düşük maliyetle en fazla sayıda potansiyel kullanıcı için şarj altyapısı oluşturması gerekmektedir (Boulanger vd., 2011). Ancak bu şekilde elektrikli araçların sürdürülebilirliği sağlanabilecektir.

Elektrikli araçların şarj edilmesini sağlamak için şarj cihazları kullanılmaktadır. Elektrikli araç şarj cihazı, bataryanın enerjisini yenilemek için alternatif akım enerjisini düzenlenmiş doğru akıma dönüştüren ve ayrıca aracın diğer elektrik sistemlerinin çalıştırılması için gerekli enerjiyi sağlayabilen bir elektrikli cihazdır (Dericioğlu, Yirik, Unal, Cuma, Onur ve Tumay, 2018). Elektrikli araçlar kondüktif şarj, endüktif şarj ve batarya değiştirme şeklinde üç farklı yolla şarj edilebilmektedir (Çatay ve Keskin, 2017; Sutopo, Nizam, Rahmawatie ve Fahma, 2018; Dericioğlu vd., 2018). Elektrikli araçların şarj sistemleri izleyen başlıklarda detaylı olarak ele alınmıştır.

2.4.1. Kondüktif Şarj Sistemi

Mevcut teknolojiler içinde şarj istasyonlarında en yaygın kullanılan şarj teknolojisi (Liu ve Wang, 2017), daha ucuz ve daha verimli olması sebebiyle kondüktif şarj sistemidir (Dericioğlu vd., 2018). Kondüktif şarj sistemi, aracı 110 V veya 220 V'luk şarj etme yöntemidir ve sistemde yerel elektrik şebekesinden veya başka bir kaynaktan gelen AC elektrik batarya takımı için gereken akıma dönüştürülerek (DC'ye dönüştürülür), metal-metal temas yoluyla (kablo) bataryalar şarj edilmektedir (Kaptan ve Cansever, 2018). Şarj cihazları, çoğu cihazda ve elektronik cihazda olduğu gibi metal-metal temasını kullanır (fiziksel temas vardır) ve sistemin en büyük dezavantajı

şarj işleminin yapılabilmesi için kabloya ihtiyaç duyulması ve kablonun prize takılması gerekliliğidir (Yılmaz ve Krein, 2013).

Aracın şarj süresi bataryanın türüne ve boyutuna, şarj cihazının tipine (Kaptan ve Cansever, 2018) ve şarj cihazı güç seviyesine göre değişmektedir (Keskin Özel, 2018). Şarj cihazı güç seviyesi, şarj çıkışının güç seviyesini tanımlamaktadır (Kaptan ve Cansever, 2018). Güç seviyeleri yavaş, orta, hızlı (Froger vd., 2019) veya AC Level 1 Şarj, AC Level 2 Şarj, Level 3 DC Hızlı Şarj şeklinde tanımlanmaktadır (Yılmaz ve Krein, 2013; Alternative Fuels Data Center, 2019). Şarj cihazı güç seviyeleri gücü, şarj süresini ve şarj yerini, maliyeti, ekipmanı ve elektrik şebekesi üzerindeki etkilerini göstermektedir (Yılmaz ve Krein, 2013). Üç şarj seviyesine ilişkin bilgiler aşağıda açıklanmıştır.

- **LEVEL 1 (Yavaş):** Bu şarj tipi, elektrikli aracın normal bir prize takılarak şarj edilmesine imkân tanıyan şarj tipidir ve elektrikli araçların kullanımını kolaylaştırmaktadır (O'Connell, 1995). Bireyler gece evlerinde uyurken aracı şarja takarak sabaha kadar bataryanın dolmasını sağlayabilmektedirler (Yılmaz ve Krein, 2013). Bu sebeple ev şarjı olarak da bilinmektedir (Kaptan ve Cansever, 2018). Yavaş şarj olarak da adlandırılmaktadırlar (Yılmaz ve Krein, 2013). AC gücünü, elektrik kaynağından uygun bir kablo seti kullanarak en yaygın topraklanmış elektrik prizinden dâhili (on-board-aracın kendisine monte edilmiş) bir şarj cihazına aktaran şarj yöntemidir (Dericioğlu vd., 2018). Level 1 şarj aracın kısmi şarj edileceği ya da şarj işlemi için uzun zamanın olduğu durumlarda kullanıldığı takdirde verimli olacak olan şarj tipidir çünkü bataryanın tamamen dolması uzun zaman almaktadır (O'Connell, 1995). Uzun zaman almakla birlikte elektrik şebekesine çok fazla yüklenilmemektedir (Yağcıtekin vd., 2011).
- **LEVEL 2 (Normal):** Hem özel hem de kamu tesisleri için ana yöntem olarak tanımlanan bu şarj seviyesi (Yılmaz ve Krein, 2013), özel AC kullanan bir yöntemdir ve bu yöntemin kullanılabilmesi için araç, elektrikli araç besleme ekipmanından alternatif akım enerji alabilen dâhili (on-board-aracın kendisine monte edilmiş) bir şarj cihazı ile donatılmış olmalıdır (Dericioğlu vd., 2018). Aracın şarj işlemi orta hızda yapılmaktadır. Daha hızlı şarj etmesi ve standart hale getirilmiş araç-şarj bağlantısı sayesinde araç kullanıcıları Level 2 teknolojisini tercih etmektedirler (Yılmaz ve Krein, 2013).

- **LEVEL 3 (Hızlı):** Uygun harici (off-board-araç üzerine monte edilmemiş) bir şarj cihazından elektrikli araca özel veya halka açık yerlerde enerji sağlamak için özel doğru akım elektrikli araç besleme ekipmanı kullanan bir şarj yöntemidir (Dericioğlu vd., 2018). Dolum istasyonu gibi çalışan bu sistemler ticari ve kamu alanlarında kullanım için uygundur (Yılmaz ve Krein, 2013). Bir saatten daha kısa bir sürede aracın şarj edilmesine imkân tanıyan şarj türü, otobanlarda dinlenme alanlarına, benzin istasyonlarına, şehir içi yakıt doldurma noktalarına kurulabilmektedir (Yılmaz ve Krein, 2013). Hızlı şarj seçeneği her ne kadar menzil arttırma konusunda elektrikli araçlara katkı sağlıyor olsa da, hızlı şarj seçeneği nadiren kullanılması durumunda faydalı olabilmektedir, çünkü neredeyse tüm lityum iyon akü kimyasalları, hızlı şarj edilmeleri durumunda, daha düşük ömürlü olmaktadır (Boulanger vd., 2011). Hızlı şarj özelliğine sahip batarya daha az enerji, daha yüksek maliyet ve/veya daha kısa ömür gibi istenmeyen özelliklere sahiptir (Boulanger vd., 2011; Yağcıtekin vd., 2011). Elektrikli aracın sürekli hızlı şarj ile şarj edilmesi durumunda, batarya ömrü kısılacak ve bataryanın değişmesi gerekecektir, bu da daha yüksek maliyet anlamına gelmektedir (Boulanger vd., 2011).

Tablo 4’de şarj güç seviyelerinin kullanım alanları ve şarj sürelerine ilişkin teknik bilgilere yer verilmiştir (Yılmaz ve Krein, 2013).

Tablo 4
Şarj Güç Seviyelerine İlişkin Teknik Bilgiler

Güç Seviye Tipi	Kullanım yeri	Çıkış güç seviyesi	Şarj süresi	Araç teknolojisi
Level 1	Evde veya ofiste şarj	1,4 kW (12A)	4-11 s	PHEA (5-15 kWh)
		1,9 kW (20A)	11-36 s	EA (16-50 kWh)
Level 2	Özel veya kamu alanlarında şarj	4 kW (17A)	1-4 s	PHEA (5-15 kWh)
		8 kW (32A)	2-6 s	EA (16-50 kWh)
		19,2 kW (80A)	2-3 s	EA (3-50 kWh)
Level 3	Ticari dolum istasyonları	50 kW	0,4-1 s	EA (20-50 kWh)
		100 kW	0,2-0,5 s	

Kaynak: Yılmaz ve Krein, 2013

2.4.2. Batarya Değiştirme Şarj Sistemi

Batarya değiştirme (battery swapping) diğer şarj yöntemlerinden biridir ve bitmiş bir bataryayı birkaç dakika içinde yenisiyle değiştirmek olarak tanımlanmaktadır

(Liu ve Wang, 2017). Batarya değiştirme işlemi batarya değişim istasyonlarında (Sutopo vd., 2018) ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Yang ve Sun, 2015).

Bataryalar elektrikli araç sisteminin en pahalı ekipmanlarıdır, batarya değiştirme istasyonları sayesinde kullanıcılar bataryalarını yedeklemek yerine batarya değiştirme istasyonlarından kiralayabilmektedirler (Verma, 2018). Bu durum bataryaların ömrünü de uzatmaktadır (Verma, 2018). Sistem sayesinde uzun řarj süreleri, halka açık řarj istasyonlarının sayısının yetersiz olması, evlerde bulunan řarj tesisatlarını yüksek güç řarj cihazlarına yükseltme maliyetleri, batarya yedekleme maliyeti, elektrikli araç menzıl kısıtı ortadan kalkmaktadır (Sarker, Pandžić ve Ortega-Vazquez, 2014).

Sistemin en önemli avantajlardan biri, batarya değiştirme istasyonlarının elektrik şebekesiyle iki yönlü güç akışı sağlama (elektrik şebekesinden g alır, elektrik şebekesine g verir) kabiliyetidir (Sutopo vd., 2018). Yoğun şarj talebi sırasında, bataryalarda depolanan enerji şebekeye elektrik olarak enjekte edilebilecek, enerji talebinin düşük olduğu zamanlarda elektrik şebekesinden bataryalara enerji depolanabilecektir (Sutopo vd., 2018). Bu durum işletmelere kar elde etme açısından avantaj sağlayacaktır. İşletme gün içinde elektrik fiyatlarının düşük olduğu (talebin düşük olduğu) dönemlerde bataryaları elektrik şebekesini kullanarak şarj eder (G2B-Grid to Battery), bu şekilde elektrik enerjisi düşük fiyata satın alınmış olur, elektrik fiyatlarının yüksek olduğu (talebin yüksek olduğu) dönemlerde bataryalardaki enerji elektrik şebekesine verilerek (B2G-Battery to Grid), enerji satılarak kar elde edilmesi sağlanabilecektir (Sarker vd., 2014). Ayrıca batarya değiştirme istasyonları bazı bataryaları diğer bataryalarda depolanan enerjiyi kullanarak şarj etmek için Bataryadan-Bataryaya (B2B) hizmetlerini de verebilir (Sarker vd., 2014).

Sistemin olumsuz yönleri de mevcuttur. Batarya değiştirme sistemi, bataryada güvenlik problemleri ve sık sık batarya değişiminin aracın şasesinde meydana getireceği dengesizlik bu teknolojinin kullanımı konusunda endişelere sebep olmaktadır (Lin, Zhang, Shen, Ye ve Miao, 2019). Ayrıca batarya değiştirme istasyonlarının yapımının ve alt yapılarının pahalı olması, batarya değiştirme makineleri, batarya şarj cihazları, ekstra bataryalar için oldukça büyük alanlara ihtiyaç duyulması, bu istasyonlarda depolanan ekstra bataryaların pahalı olması bu istasyonların yaygınlaşmasına engel olmaktadır (Adler ve Mirchandani, 2014). Bataryaların, değişimin kolay yapılabilmesi için taşınabilir ve standart olması gerekmektedir (Liu ve Wang, 2017). Ancak henüz bataryalarda standartlaşma sağlanamamıştır.

2.4.3. Endüktif Şarj Sistemi

Günümüzün şarj teknolojilerinden bir diğeri, manyetik prensipler kullanarak şarj cihazından araca 220 VAC elektrik aktaran (Kaptan ve Cansever, 2018) endüktif şarj sistemidir. Elektrik gücünü manyetik olarak aktaran ve kablo kullanmadan şarj etme imkânı tanıyan sistem, Level 1 ve Level 2 şarj seviyeleri için araştırılmış olup, otobanlara kurulabilme imkânının olması, seyahat halindeyken şarjın mümkün olması gibi faktörlerden dolayı hızlı şarj altyapısına olan ihtiyacı azaltabilir (Yılmaz ve Krein, 2013).

Kablosuz şarj olarak da adlandırılan yöntemde, elektrik enerjisinin araca aktarımı, araçla şarj cihazı arasında herhangi bir fiziksel temas gerektirmeyen kablosuz güç aktarımı teknolojisi (wireless power transfer technology) kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Jang, 2018). Endüktif şarjın türleri bulunmaktadır, çalışmalarda farklı farklı isimler verilmekle birlikte, Jang (2018) tarafından yapılan çalışmada üç sınıfa ayrılan şarj türleri kısaca aşağıdaki şekildedir:

- **Sabit kablosuz şarj sistemi (Stationary wireless charging systems):** Şarj işleminin elektrikli araç park halinde ve sabit bir noktada uzun bir süre boyunca çalışmaması durumunda kullanılabilen şarj sistemidir. Örneğin garajlarda ve park yerlerinde bu sistem kullanılarak araç şarj edilebilmektedir.
- **Yarı dinamik kablosuz şarj sistemi (Quasi-dynamic wireless charging systems):** Şarj işleminin elektrikli araç düşük hızda hareket (araç yavaşlarken veya araç hızlanırken) ederken yapıldığı şarj sistemidir. Örneğin trafik ışıklarında kısa süreli durması durumunda araç şarj edilebilmektedir (Ahmad, Alam ve Chabaan, 2017).
- **Dinamik kablosuz şarj sistemi (Dynamic wireless charging systems):** Elektrikli aracın tam hareketli olması durumunda bile şarj edilebilmesine imkân tanıyan sistemdir. Tipik bir dinamik kablosuz şarj edilebilen elektrikli araç, yol yüzeyinin altına monte edilmiş bir kablosuz şarj cihazından, elektriksel yükünü uzaktan harekete geçiren, yalnızca bataryadan oluşan klasik bir elektrikli araçtır. Kablosuz şarj edilebilen elektrikli araçlara elektrik gücü sağlayabilen yollara elektrikli yol veya şarj şeridi adı verilmektedir.

Bataryalı elektrikli araçlara monte edilecek olan bu teknoloji şarj işlemi için herhangi bir kablo bağlantısına ihtiyaç duymamakta, aracın yalnızca park halinde iken

şarj edilebilmesi zorunluluğunu ortadan kaldırmakta, aracın yolda bulunan sensorlar sayesinde hareket halindeyken şarj edilmesine imkân tanımakta, bu sayede aracın menzilini arttırırken aracın şarj süresini azaltmakta, aracın bataryasının ağırlık olarak küçülmesi sayesinde aracın hızının da artmasını sağlamaktadır (Liu ve Wang, 2017). Aracın ağırlığının azalması ile birlikte aracın enerji tüketiminin azalması sağlanacak, böylece aracın alabileceği mesafe de arttırılacaktır (Chen, Taylor ve Kringos, 2015). Sistemin çevreye de enerji tüketiminin ve sera gazının azalması şeklinde faydaları da olacaktır (Chen vd., 2015). Sınırlı menzil kısıtını ortadan kaldıran bu teknoloji yakın gelecekte elektrikli araçların kullanımını da yaygınlaştıracaktır.

Ancak sistemin oluşturulması ve uygulanması aşamasında yaşanabilecek problemler mevcuttur. Sistemin yol döşemesine entegre edilmesi gerekmektedir (Chen vd., 2015). Sistemin kırılğan malzemeleri için bu durum sakıncalı olabilecektir, hem yolun hem de sistemin parçalarının korunması gerekecektir ki bu durum ekstra maliyet anlamına gelmektedir (Chen vd., 2015). Sistemin başlangıç yatırım maliyetleri yüksektir, sistemin hasar görmesi durumunda olağan trafik akışı engellenmesi, bakım-onarım maliyetlerinin zaman alması ve yüksek maliyetli olması söz konusudur (Chen vd., 2015).

Her ne kadar kablosuz şarj sistemi kondüktif şarj sistemine kıyasla daha efektif olsa da uzun vadede kablosuz şarj sisteminin özellikle Türkiye’de gelişmesi mümkün görünmemektedir. Yolların tamamının sensorlarla döşenmesi, bakım maliyetleri vb. sebepler sistemin kısa vadede yaygınlaşmasının önünde engel olarak görünmektedir.

2.4.4. Elektrikli Araç Şarj Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

Yukarıda bahsedildiği üzere her şarj sisteminin kendine özgü yapısı, türleri mevcuttur. Tablo 5’te bu sistemlere ilişkin özet bilgilere ve karşılaştırmalara yer verilmiştir.

Tablo 5

Şarj Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

Şarj Sistemi	Avantajları	Dezavantajları
Kondüktif	Şarj işlemi yavaş, hızlı ve süper hızlı şekilde yapılabilir.	Konnektörlerin standardize edilmesi gerekmektedir.
	Şarj işlemi birçok yerde yapılabilir.	Karmaşık şarj altyapısı gerektirir.
	Direkt şarj edilmesi durumunda yüksek verimlilik elde edilir.	Elektrik şebekesine erişimde kısıtlamalar mevcuttur.
Endüktif	Konnektörlerin standardizasyon problemi bulunmamaktadır.	Vericinin ve alıcının bulunduğu yerde karmaşıklık artar.
	Araç hareket halindeyken şarj işlemi yapılabilir.	Konnektör sistemi kullanıldığında maliyet artmaktadır.
	Kondüktif şarjda bulunan kablolama tehlikesi bulunmamaktadır.	Sistem henüz geliştirilme aşamasındadır. (Standartlar mevcut değil ve sistem geliştirme ticari ölçekte)
Batarya değiştirme	Şarj ıslak, kumlu, tozlu veya karlı koşullarda yapılabilir.	
	Batarya 1 dakikadan daha kısa bir sürede tamamen şarj edilebilmektedir.	Yüksek maliyetlerde özel şarj istasyonlarının kurulmasını gerektirir.
	Kullanıcılar bataryanın bakım maliyetlerinden sorumlu değildir.	Bir aylık muhtemel batarya maliyetleri içten yanmalı motorlu araçların yakıt maliyetinden daha yüksek olabilir.
	Menzil problemi tamamen ortadan kalkmaktadır.	Batarya modellerinde standardizasyonun olmaması önemli bir problemidir.
	Şarj işlemi için sürücünün araçtan inmesi gerekmemektedir. (araba / otobüs için otomatik değiştirme)	
	İstasyonlarda depolanan bataryalar V2G (Vehicle to Grid) için kullanılabilir.	

Kaynak: Sutopo vd., 2018

Elektrikli araçların kullanımı durumunda Türkiye ve diğer birçok ülkede yaşanacak sıkıntıların başında enerji ihtiyacının nasıl karşılanacağı ve enerji ihtiyacının karşılanması durumunda da enerji iletimini sağlayacak altyapının yetersiz olması gelmektedir. Elektrikli araçların piyasada başarılı olabilmelerini sağlamak için enerji tedarik ağının tasarlanması gerekmektedir (Paz vd., 2018). Yapılan araştırmalarda elektrik şebekesine erişim maliyetinin şarj istasyonu inşaatının toplam maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturduğu ortaya çıkmıştır (Lin vd., 2019). Bu maliyetlerin

azaltılması amacıyla optimum yer seçimi ve şarj istasyonu büyüklüğünün sağlanması gerekmektedir. Şarj istasyonlarının yerlerinin seçimi ve büyüklüklerinin belirlenmesi sürecinin başlangıcında elektrik şebekesi faktörlerini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu faktörün erken aşamada karar dahil edilmesi istasyonlar inşa edildikten sonra elektrik şebekesi üzerindeki etkileri azaltmak için şarj yüklerinin istasyonlara yeniden tahsis edilmesinden daha iyi bir seçenek olacaktır (Lin vd., 2019).

2.4.5. Türkiye’deki Mevcut Şarj İstasyonları Hakkında Bilgi

Dünyada elektrikli araçların şarj istasyonlarının kurulumu hızla devam etmektedir. Elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki önemli engellerden biri olan elektrikli araç şarj istasyonlarının kurulumu konusunda yapılan çalışmalar Türkiye’de henüz yeterli seviyeye ulaşmamıştır. Her ne kadar her ilde şarj istasyonu bulunsa da (Şekil 1) şehirlerarası yolculuklar için, bir ilde aynı anda çok sayıda aracın şarj edilebilmesi için sistem altyapısı henüz yeterli değildir.



Şekil 1. Türkiye elektrikli araç şarj haritası

Kaynak: <https://www.plugshare.com/> Erişim tarihi: 22.07.2021. Turuncu Renkli: Hızlı şarj Yeşil Renkli: Toplu Kullanıma Açık

Elektrikli araç teknolojisine uyum sağlayabilmek ve elektrikli araç kullanımını arttırmak amacıyla şarj istasyonu yer seçimine ve kurulum işlemlerine önem verilmesi ve yeterli sayıda şarj istasyonu kurulması gerekmektedir. Konuyla ilgili Türkiye’de çalışan birçok işletme vardır ve son yıllarda yurtdışından elektrikli araç üreticileri

Türkiye’de şarj istasyonlarının kurulması amacıyla bu işletmelerle anlaşmalar yapmaktadırlar (Sardohan, 2017).

Binek ve hafif ticari elektrikli araçlar için şarj istasyonu kurulum yerleri olarak öncelikle alışveriş merkezleri, oteller, evler gibi toplu kullanımın olduğu yerler seçilmektedir. İşletmeler açısından bakıldığında kuruluş yeri kendi tesisleri olabileceği gibi müşterilerin konumları da olabilecektir, araçların müşterilere ürün teslimi yaparken araçların şarj edilebilme olanağının olması işletmeler için çalışma süresi ve şarj etme süresi açısından da avantaj sağlayacaktır (Schiffer ve Walther, 2017a). Örneğin büyük bir işletmenin tedarikçileri için işletmede kurulan şarj istasyonları çok avantajlı olacaktır. Tedarikçiler bir araya gelerek şarj istasyonu kuruluş maliyetlerini ve şarj maliyetlerini azaltmak için ortak bir şekilde müşteride şarj istasyonu kurabileceklerdir (Koç, Jabali, Mendoza ve Laporte, 2019), bu şekilde kurulacak olan şarj istasyonu sayısı da azaltılabilecek ve şarj istasyonunun daha aktif bir şekilde kullanılması sağlanacaktır (Schiffer ve Walther, 2017a). Gelecekte özellikle devletin vereceği desteklerle birlikte elektrikli araç sayılarının ve beraberinde şarj istasyonlarının sayısının artacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM III

LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Araç Rotalama Problemi

Lojistik süreci ve özelinde taşımacılık, dünya çapında ekonomilere yön vermesi, toplumun sosyal ve ekonomik ilerlemesine katkıları olan bir sektör olması ve bu sektörün daha verimli olmasının amaçlanması sebebiyle yıllardır Yöneylem Araştırmaları/Bilgisayar Bilimleri alanlarında araştırma konusu olmaya devam etmektedir (Juan vd., 2016).

Lojistik sürecinin ve taşımacılık faaliyetlerinin gerçek hayattaki operasyonlara yönelik uygulamaları sebebiyle araştırılmaya devam edilen ve çok incelenen konularından biri, araç rotalarının belirlenmesi ve optimizasyonudur (Kalkancı, 2014; Juan vd., 2016). Taşımacılık, üretim ve dağıtım sürecinin neredeyse her safhasında olan ve ürün maliyetlerin ortalama %15-%20'sine karşılık gelen bir süreçtir (Toth ve Vigo, 2002). Araç Rotalama Problemleri'nde (ARP) verilen kararlar lojistik firmalarının daha fazla kar elde etmelerinde etkisi büyük olan dağıtım faaliyetlerinin performansını ve verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Zuo, Zhu, Huang ve Xiao, 2017). Bu sebeple lojistik ve fiziksel dağıtım süreçlerinde ARP önemli bir rol oynamaktadır (Laporte, 1992).

ARP ilk olarak 1959 yılında Dantzig ve Ramser tarafından ele alınmıştır. Merkez (ana) benzin dağıtım terminalinden çok sayıda benzin istasyonuna kamyon filosu ile yapılan rotalama problemi ele alınmıştır (Dantzig ve Ramser, 1959). Problemden, istasyon taleplerinin karşılanabileceği ve filonun kapsadığı toplam kilometre minimum düzeyde olacak şekilde istasyonları kamyonlara atamanın yolu bulunmaya çalışılmıştır (Dantzig ve Ramser, 1959).

ARP, Laporte (1992) tarafından bir veya birkaç depodan, coğrafi olarak dağılmış birkaç şehre veya müşteriye, belirli kısıtlar doğrultusunda optimum teslimat veya toplama rotalarının belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. ARP'nin ana amacı, lojistik dağıtım faaliyetlerinin yürütülmesinde, toplam sürüş mesafesi, toplam sürüş süresi, toplam yakıt maliyeti, araç sayısı veya bunların kombinasyonlarının en uygun maliyetle gerçekleşmesini sağlamak için araçların çizelgelenmesi ve taşıma rotalarının planlanmasıdır (Baker ve Ayeche, 2003; Zuo vd., 2017). Problemin gerçek hayatta olduğu gibi araç kapasitesi sınırı, müşteriye hizmet verilecek zaman pencereleri sınırı,

rotaların uzunluğu sınırı, sürücünün çalışma süresi sınırı gibi kısıtları olabilmektedir (Mazzeo ve Loiseau, 2004). Literatürde ARP’de en çok kullanılan kısıtlar kapasite kısıtı, zaman pencereleri kısıtı, bir rotada uğranacak noktaların sayısı kısıtı, toplam rota zaman kısıtı, noktalar arası öncelik kısıtları olarak tanımlanmaktadır (Laporte, 1992).

Klasik ARP’de rotalar belirlenirken genellikle şu noktalar göz önünde bulundurulmaktadır (Stewart ve Golden, 1983; Baker ve Ayechev, 2003; Ho, Ho, Ji ve Lau, 2008):

- Her müşterinin talebi yalnızca bir araç tarafından karşılanacaktır.
- Her rotanın toplam talebi, rota için atanmış aracın kapasitesine eşit veya daha küçük olacaktır.
- Her araç bir rotaya atanacaktır.
- Her rota depoda başlayıp depoda sona erecektir.

Ayrıca her müşterinin talebinin önceden bilindiği kabul edilmektedir (Stewart ve Golden, 1983).

ARP, çözümü için gerekli olan hesaplamaların süresi problemin büyüklüğü ile üstel olarak artması sebebiyle NP-hard problemler olarak tanımlanmaktadır (Wu, Low ve Bai, 2002; Talbi, 2009; Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012; Li-ying ve Yuan-bin, 2015). ARP’nin çözümünde kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Temel olarak üç başlık altında toplanan bu yöntemlerden kesin yöntemlerde optimum çözümün elde edilmesi mümkünken, sezgisel ve metasezgisel yöntemler kullanılarak daha kısa sürede problem çözülebilmekte ve optimum değere yakın değerler elde edilebilmektedir (Keskintürk, Topuk ve Özyeşil, 2015). ARP’de problemin boyutu büyüdükçe problemin çözüm süresinin üstel olarak artması (Talbi, 2009) sebebiyle günümüzde genellikle sezgisel ve metasezgisel yöntemler çözüm amaçlı kullanılmaktadır.

ARP’nin birçok türü mevcuttur ve aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- **Stokastik ARP (Stochastic VRP):** Stokastik ARP, ARP’de bazı değişkenlerin rassal olduğu problem türüdür, genellikle müşteri talepleri, seyahat süreleri rassal olmaktadır (Gendreau, Laporte ve Séguin, 1996). Örneğin araç müşteri düğümüne gelene kadar müşterinin talebi bilinmeyen rassal bir değişken olabilmektedir (Stewart ve Golden, 1983; Zhang, Chen ve Zhang, 2019).

- **Çoklu Depolu ARP (Multi Depot VRP):** Birçok ARP’de işletmelerin tek depodan dağıtım yaptığı kabul edilmektedir. Çoklu depolu ARP’de işletmenin birden fazla deposunun olduğu ve birden fazla depodan müşterilere dağıtım yapıldığı durum ele alınmaktadır (Ho vd., 2008). Bu problem türünde öncelikle hangi depodan hangi müşteriye hizmet verileceği belirlenmekte daha sonra rotalar belirlenmektedir (Ho vd., 2008).
- **Zaman Bağımlı ARP (Time Dependent VRP):** Klasik ARP’nin kentin yoğunluğunu göz önünde bulunduran modelidir (Malandraki ve Daskin, 1992). Klasik ARP’de iki nokta arasındaki seyahat süresi veya maliyeti bilinmektedir ve sabit olarak alınmaktadır (Malandraki ve Daskin, 1992). Ancak Zaman Bağımlı ARP’de müşteriler arasındaki veya müşteri ile depo arasındaki seyahat süresi, noktalar arasındaki mesafeye ve günün zamanına bağlı olarak değişmektedir (Malandraki ve Daskin, 1992). Bu problem türünde sürücünün iki nokta arasındaki yolu alması seyahatin başlangıç düğümünden başladığı günün saatine bağlı olarak değişmektedir (Donati, Montemanni, Casagrande, Rizzoli ve Gambardella, 2008).
- **Periyodik ARP (Periodic VRP):** Periyodik ARP, belirli bir planlama ufkunun her günü için minimum maliyetli güzergâhların belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Cacchiani, Hemmelmayr ve Tricoire, 2014). Problemin T günleri gibi bir zaman periyodu vardır ve her müşteri için bu T-gün döneminde bu müşterinin ne sıklıkta ziyaret edilmesi gerektiğini belirten bir frekans vardır (Coene, Arnout ve Spieksma, 2010). Problemin çözümü müşteri ziyaret kısıtlamalarını ve talep kısıtlamalarını karşılayan T-rotadan oluşmaktadır (Coene vd., 2010).
- **Topla-Dağıt ARP (Pick-up and Delivery VRP):** ARP’nin ürün toplama ve ürün teslimat süreçlerini içeren türüdür. Teslimat depodan müşterilere ürün teslimatını ifade ederken, ürün toplama müşteriden depoya gönderilecek ürünlerin toplanmasını ifade etmektedir (Mosheiov, 1998). Bu problem türü kendi içinde alt problem türlerine ayrılmaktadır. *Eş zamanlı dağıt topla ARP’de;* her müşteride, müşteriye ürün teslimi ve müşteriden ürün alınması eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir (Ganesh ve Narendran, 2007). *Önce dağıt sonra topla ARP’de;* müşteri düğümlerine öncelikle ürün dağıtımı gerçekleştirilmekte, müşteriden ürün toplama işlemi daha sonra yapılmaktadır (Ganesh ve

Narendran, 2007). *Karışık dağıt topla ARP'de*; ise bazı müşteri düğümlerinde ürün teslimi, bazı müşteri noktalarında toplama işlemi gerçekleştirilmektedir ancak aracın toplama-dağıtma işleminin sıralaması, bir müşteriye birden çok ziyaretin yapılması durumları kısıtlanmamıştır (Ganesh ve Narendran, 2007).

- **Kapasite Kısıtlı ARP (Capacity Constraint VRP):** Bu problem türünde araçların rotalarına başladıkları ve rotalarını tamamladıkları bir depo söz konusudur (Mazzeo ve Loiseau, 2004). Müşteriler ve talep miktarları, araçlar ve araçların maksimum yükleyebilecekleri yük miktarları veya hacimleri, müşteriler ve depo ile müşteriler arasındaki mesafe veya maliyetler bilinmektedir ve müşteri taleplerini minimum maliyetle karşılayacak rotaların belirlenmesi amaçlanmaktadır (Mazzeo ve Loiseau, 2004).
- **Parçalı Dağıtım ARP (Split Delivery VRP):** Klasik ARP'de her müşterinin talebi yalnızca bir araç tarafından karşılanmaktadır, parçalı dağıtım ARP'de ise bir müşterinin talebinin birden fazla araçla karşılanmasına izin verilmekte, yani müşterinin talebi birden fazla araç arasında bölünebilmektedir (Dror ve Trudeau, 1990).
- **Zaman Pencere ARP (Time Window Constraints VRP):** Bu problem türü araç rotalama ve çizelgeleme problemlerinin birleşimi olarak da tanımlanabilmektedir (Liong, Wan Rosmanira, Khairuddin ve Zirour, 2008). Bu problem türünde rotaların müşterilerin belirli bir zaman aralığı veya zaman penceresi içinde, bir araç tarafından yalnızca bir kez ziyaret edileceği, rotanın depoda başlayıp depoda sona ereceği, bir rotada bulunan müşteri taleplerinin toplamının araç kapasitesini aşmayacağı şekilde tasarlanması gerekmektedir (Bräysy ve Gendreau, 2005). Bu problemlerde müşterilerin, hizmetin başlaması için gereken en erken ve izin verilen en son zamanlarla karakterize edilen sıkı ve esnek zaman pencereleri vardır (Calvete, Galé, Oliveros ve Sánchez-Valverde, 2007). *Sıkı zaman penceresi durumunda* müşteriye yalnızca müşterinin zaman aralıklarında hizmet verilmesi zorunludur, müşteri deposuna erken varılması durumunda araç hizmet vermek için beklerken, müşteri deposuna geç varılması durumunda müşteriye hizmet verilememektedir (Göçken, Yaktubay ve Kılıç, 2018). *Esnek zaman penceresi durumunda* müşteri talebi zaman penceresi sınırları içinde karşılanmak zorunda değildir ancak zamanında karşılanmayan talepler için ceza maliyeti söz konusudur (Calvete vd., 2007).

- **Mesafe Kısıtlı ARP (Distance-Constrained VRP):** Her rotanın uzunluğunun daha önceden tanımlanmış rota uzunluğunu aşmasına izin verilmediği ARP türüdür (Laporte, Desrochers ve Nobert, 1984; Gendreau vd., 1996).
- **Heterojen Filolu ARP (Heterogeneous VRP):** Klasik ARP’de araç filosu homojen (araçlar birbiriyle özdeş hacme sahiptirler) olarak ele alınmaktadır. Araç filosunun bileşimine karar veren ARP türü Heterojen Filo Araç Rotalama Problemi olarak tanımlanmaktadır (Koç, Bektaş, Jabali ve Laporte, 2016). Problemde klasik araç rotalama probleminden farklı olarak müşteri taleplerinin karşılanabilmesi için hangi araç türünden kaç adet kullanılacağına da karar verilmektedir (Koç vd., 2016).
- **Simetrik ARP (Symmetric VRP):** Bir ARP’de i düğümünden j düğümüne seyahatin maliyetinin j düğümünden i düğümüne seyahatin maliyetine eşit olduğu problem türüdür (Eksioglu, Vural ve Reisman, 2009; Herrero, Rodríguez Villalobos, Cáceres-Cruz ve Juan, 2014).
- **Asimetrik ARP (Asymmetric VRP):** Bir ARP’nde i düğümünden j düğümüne seyahatin maliyetinin j düğümünden i düğümüne seyahatin maliyetine eşit olmadığı problem türüdür (Eksioglu vd., 2009).
- **Açık Uçlu ARP (Open VRP):** Klasik ARP’de araçların rotaya depoda başlayacağı ve rotayı depoda sonlandıracağı kabul edilmektedir (Stewart ve Golden, 1983). Açık uçlu ARP’de durum tersidir, bu problem türü araçların rotalarını tamamladıktan sonra depoya dönmelerine izin verilmediği problem türüdür (Tavakkoli-Moghaddam, Meskini, Nasserı ve Tavakkoli-Moghaddam, 2019).
- **Kapalı Uçlu ARP (Close VRP):** Araçların rotalarını tamamladıktan sonra rotaya başladıkları depoya geri dönmelerinin zorunlu olduğu problem türüdür (Tavakkoli-Moghaddam vd., 2019).
- **Dinamik ARP (Dynamic VRP):** Bu problem türünde optimizasyon sırasında rotalamaya ilişkin bilgiler değişebilmekte veya yeni bilgiler eklenebilmekte ve rotalama bu güncellenen bilgilere göre yapılmaktadır (Hanshar ve Ombuki-Berman, 2007). Örneğin müşteri siparişlerinin bazılarının günün başında bilindiği ancak gün ilerledikçe yeni gelen müşteri siparişlerinin rotaya dâhil edildiği durumlar olabilmektedir, sürücüler kendi üzerlerine yeni atanan

müşteriler hakkında bilgilendirilmekte ve bu müşterilerde ziyaret edilmektedirler (Kumar ve Panneerselvam, 2012).

- **Statik ARP(Static VRP):** Bu problem türünde optimizasyon süreci başlamadan önce rotalamaya ilişkin tüm bilgiler önceden kesin olarak bilinmekte ve optimizasyon sırasında rotalamaya ilişkin yeni bir bilgi elde edilmemektedir (Hanshar ve Ombuki-Berman, 2007).

3.2. Yer Seçimi Problemi

Yer seçimi problemi, ortalama seyahat süresinin en aza indirilmesi veya talepler ile tesisler arasındaki mesafenin asgariye indirilmesi gibi konuma bağlı olarak bir hedefi optimize etmek için tesislerin yerlerinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Touati-Moungla ve Jost, 2012). Yer seçimi problemi, çok uzun zamandır çalışılan bir problem türüdür ve matematik, yöneylem araştırması, bilgisayar bilimleri gibi birçok bilim dalını ilgilendirmekte ve hastaneler, üretim fabrikaları, itfaiye merkezleri, perakende mağazaları, depolar gibi birçok tesis göz önüne alınabileceğinden şehir planlama, işletme yönetimi, nakliye, telekomünikasyon, finans ve coğrafya gibi birçok alanla da bağdaştırılabilmektedir.

Yer seçimi problemi literatürde ilk defa Alfred Weber tarafından ele alınmış ve problemde iki tedarikçi ve bir müşteri arasında taşıma maliyetinin minimize edecek tesis yeri bulmaya çalışmıştır (ReVelle ve Swain, 1970). Yer seçimi problemlerinde aşağıda belirtilen temel sorulara cevap aranmaktadır (Daskin, 2011):

- Kaç adet tesis açılmalıdır?
- Tesislerin konumları nerelerde olmalıdır?
- Her bir tesisin büyüklüğü ne kadar olmalıdır?
- Talepler tesislere nasıl atanmalıdır?

Birçok yer seçimi problemi modeli olsa da, yer seçimi problemlerinin genel olarak temel özellikleri benzerdir: problemde metrik içeren bir *alan*, konumları önceden bilinen *müşteriler*, kısıtlar doğrultusunda seçimi yapılacak *tesisler* mevcuttur (ReVelle, Eiselt ve Daskin, 2008). Yer seçimi kararı işletmelerin maliyetlerinin azaltılmasında veya arttırılmasında önemli rol oynayan uzun vadeli ve stratejik bir karardır. İşletme yeri tesis yeri seçimi modelleri olarak adlandırılan optimizasyon modelleri kullanılarak optimum şekilde bulunabilmektedir ve modelde yer alan karar değişkenleri herhangi bir

tesisin kapasitesi, yeri ve maksimum kapsama alanını ifade etmektedir (Frade, Ribeiro, Gonçalves ve Antunes, 2011).

Yer seçimi problemleri toplam maliyetlerin minimizasyonu amaç fonksiyonu olarak ele alındığında *sabit maliyetli yer seçimi problemleri*, ulaşım maliyetlerinin minimizasyonu amaç fonksiyonu olarak ele alındığında *p-medyan yer seçimi problemleri* talep kapsamının en st düzeye çıkarılması amaç fonksiyonu olarak ele alındığında *maksimum kapsama yer seçimi problemleri* olarak adlandırılmaktadır (Frade vd., 2011). Yer seçimi problemlerinde farklı amaç fonksiyonları da kullanılabilir. Aşağıda literatürde yer alan bazı yer seçimi problemleri açıklanmıştır.

- **Sabit Maliyetli Tesis Yer Seçimi Problemi (Fixed Charge Location Problem):** Tesis açma maliyetinin ve taşıma maliyetinin minimizasyonunun amaçlandığı problem türüdür (Current, Daskin ve Schilling, 2002).
- **Kapasite Kısıtlı Tesis Yer Seçimi Problemi (Capacitated Facility Location Problem):** Aday tesis yerlerinin sınırlı kapasiteye sahip oldukları problem türü kapasite kısıtlı tesis yer seçimi problemi olarak adlandırılmaktadır (Cornujols, Nemhauser ve Wolsey, 1990).
- **Kapasite Kısıtsız Tesis Yer Seçimi Problemi (Uncapacitated Facility Location Problem):** Aday tesis yerlerinin kapasite sınırlarının olmadığı problem türüdür (Cornujols vd., 1983).
- **Maksimum Kapsama Yer Seçimi Problemi (Maximum Covering Location Problem):** Yer seçimi problemlerinde talep kapsamının en st düzeye çıkarılması amaç fonksiyonu olarak ele alındığında maksimum kapsama yer seçimi problemleri olarak adlandırılmaktadır (Frade vd., 2011).
- **p-Medyan Problemi (Minsum Problemi, p-Median Problem):** Toplam maliyeti minimize edecek p adet tesisin bir ağı üzerindeki yerini bulmayı amaçlayan problem türüdür (Daskin, 2011). Daha çok özel sektöre ilişkin yer seçimlerinde kullanılmaktadır (Klose ve Drexl 2001).
- **p-Merkez Problemi (Minmax Problemi, p-Center Problem):** Bir talep noktası ile talep noktasına en yakın tesis arasındaki maksimum mesafeyi minimize etmeye çalışan problem türüdür (Daskin, 2011). Genellikle kamu sektörüne ilişkin yer seçimlerinde kullanılmaktadır (Klose ve Drexl 2001).

- **Küme Kapsama Problemi (Set Covering Problem):** Tüm talep düğümlerini kapsamak için gerekli olan minimum sayıdaki tesisin bulunmasının amaçlandığı problem türüdür (Current vd., 2002).

Tesis yer seçimi problemi kombinatoriyel optimizasyon problemlerinden biridir (Kratica, Tošić, Filipović ve Ljubić, 2001). Problemin NP-hard olması sebebiyle (Li-ying ve Yuan-bin, 2015) özellikle büyük problemlerde mantıklı süreler içinde optimum çözüm bulunması oldukça güçtür. Yer seçimi problemleri kesin yöntemler, sezgisel yöntemler, metasezgisel yöntemler kullanılarak çözülebilmektedir. Son yıllarda Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri kullanılarak da yer seçimi problemleri çözülebilmektedir.

3.3. Yer Seçimi-Araç Rotalama Problemi

Tesis yer seçimi problemleri ve araç rotalama problemleri literatürde son yıllarda en çok çalışılan konular arasında yer almaktadır. Genellikle araçların rotalarının belirlenmesi ve tesislerin konumlarının belirlenmesi birbirinden bağımsız olarak ele alınır ancak her iki problem birbiriyle ilişkilidir (Salhi ve Rand, 1989; Nagy ve Salhi, 2007; Lopes, Ferreira, Santos ve Barreto, 2013).

Yer seçimi problemlerinde yer seçiminin etkinliğinin yalnızca taleplerden uzaklığa bağlı olmadığı, birden fazla talebe hizmet vermek için gereken araç rotalarına bağlı olduğu durumların söz konusu olduğu problemler Yer Seçimi-Araç Rotalama Problemi (YS-ARP) olarak karşımıza çıkmaktadır (Current vd., 2002). YS-ARP'nin temeli "Boventer (1961), Maranzana (1965), Webb (1968), Lawrence ve Pengilly (1969), Higgins (1972), Christofides ve Eilon (1969)" tarafından atılmıştır (Hassanzadeh, Mohseninezhad, Tirdad, Dadgostari ve Zolfagharinia, 2009). İlk YS-ARP Salhi ve Rand (1983) tarafından formülize edilmiştir. YS-ARP toplam maliyeti minimize etmek için, depoların optimum sayısının ve konumlarının, araç çizelgeleri ve dağıtım rotalarıyla eş zamanlı olarak belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Wu vd., 2002). Nagy ve Salhi (2007) tarafından yapılan tanımlamada yer seçimi probleminin ana problem, araç rotalama probleminin alt problem olduğu belirtilmiş, YS-ARP'nin tesis yerleşim yeri sorununu çözmek için araç rotalama probleminin de eşzamanlı olarak çözülmesi gereken bir problem olduğu belirtilmiştir. Genel olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde amacın optimum depo sayısının belirlenmesi ve depo konumlarının optimum dağıtım rotalarıyla eş zamanlı olarak tespit edilmesi olduğu görülmektedir (Yang ve Sun, 2015).

YS-ARP, stratejik ve taktiksel iki karar seviyesini birleştirmektedir, yer seçimi kararı stratejik, araç rotalarının belirlenmesi kararı taktiksel seviyede olan karardır (Prodhon ve Prins, 2014; Yang ve Sun, 2015). Rotaların sürekli değiştirilebilen kısa vadeli kararlar olduğu, tesis yeri belirlenmenin uzun vadeli kararlar olduğu ve planlama ufuklarının farklı olması sebebiyle bu kararların birlikte ele alınmaması gerektiği düşünülse de, bu iki kararın birlikte ele alınmasının rotaların değişmesine izin verilen uzun bir planlama ufku üzerinde maliyetleri azaltabileceği bulunmuştur (Nagy ve Salhi, 2007).

Klasik YS-ARP'nin özellikleri şu şekildedir (Schneider ve Drexl, 2017):

- Verilerin tamamı deterministiktir, önceden bilinmektedir.
- Statik bir planlama dönemi vardır.
- Aday tesis yerleri kümesi sonludur.
- Sayısal, ölçülebilir bir amaç fonksiyonu mevcuttur.
- Her müşterinin aday tesislerden karşılanması gereken bir talebi vardır ve ara konumlarda yük transferine izin verilmemektedir.
- Her müşteriye yalnızca bir araç tarafından ve bir kez teslimat yapılmaktadır.
- Müşterilerde ve depolarda stok kavramı dikkate alınmamaktadır.

Son yıllarda çevre kavramının önem kazanması, enerji kaynaklarının tükeniyor olması YS-ARP problem türünün sürdürülebilirlik açısından da ele alınmasını sağlamıştır (Zhang, Chen ve Zhang, 2019). YS-ARP'nin sınıflandırılması çok çeşitli şekillerde yapılmakla birlikte, aşağıda Nagy ve Salhi (2007) ve Drexl ve Schneider (2015) tarafından yapılan çalışmalardan derlenerek elde edilen bilgiler kullanılarak YS-ARP türleri kısaca açıklanmıştır.

- **Giriş verilerinin yapısına göre:** Nagy ve Salhi (2007) tarafından giriş verilerinin yapısına göre problem stokastik YS-ARP ve deterministik YS-ARP şeklinde ayrılmış, Drexl ve Schneider (2015) tarafından yapılan çalışmada bulanık YS-ARP de bir tür olarak eklenmiştir. Verilerin problemin başında bilindiği ve değişmediği problem türü deterministik YS-ARP olarak tanımlanırken, verilerin değişmesinin söz konusu olduğu problem türleri stokastik YS-ARP'dir (Nagy ve Salhi, 2007). Bulanık YS-ARP bazı verilerin

bulanık sayılarla ifade edildiği problem türü olarak tanımlanmaktadır (Drexl ve Schneider, 2015).

- **Planlama periyoduna göre:** Planlama periyoduna göre problem, tek periyodlu ve çok periyodlu YS-ARP olarak ikiye ayrılmaktadır (Nagy ve Salhi, 2007). Drexl ve Schneider (2015) tarafından yapılan çalışmada statik, dinamik ve periyodik YS-ARP olarak sınıflandırılmıştır. Statik YS-ARP, tek planlama periyodunu içeren problem türü, dinamik YS-ARP çoklu planlama periyodunun olduğu ve problemin başlangıcında bazı verilerin bilinmediği ancak daha sonra bilinebilir hale geldiği problem türüdür (Drexl ve Schneider, 2015). Periyodik YS-ARP ise çoklu planlama periyodunu içeren ve verilerin tamamı problemin başında bilindiği problem türü olarak tanımlanmaktadır (Drexl ve Schneider, 2015).
- **Çözüm yöntemine göre:** Kesin çözüm yöntemleri kullanılan YS-ARP ve sezgisel çözüm yöntemleri kullanılan YS-ARP şeklinde sınıflandırılmaktadır (Nagy ve Salhi, 2007). Günümüzde metasezgisel yöntemler kullanılarak da YS-ARP çözülebilmektedir (Prodhon ve Prins, 2014).
- **Araç sayısı ve araç tipine göre:** Araç sayısı problemin ilk aşamasında kısıtlanabilmekte veya kısıtlanmamaktadır, aynı zamanda araç filosu homojen veya heterojen olabilmektedir (Nagy ve Salhi, 2007).
- **Depoların sayısına göre:** Tek depolu ve çok depolu olarak ikiye ayrılmaktadır (Nagy ve Salhi, 2007). Müşterilere hizmet tek bir depodan veya birden fazla sayıdaki depodan verilmektedir. Çoklu depo durumunda müşterilerin depolara atanması gerekmektedir.
- **Amaç fonksiyonuna göre:** Genellikle amaç fonksiyonu toplam maliyetin minimizasyonu şeklinde olmaktadır (Nagy ve Salhi, 2007). Çalışmalarda tek bir amaç fonksiyonu olabildiği gibi çoklu amaç fonksiyonu da olabilmektedir (Drexl ve Schneider, 2015). Maliyet fonksiyonunda tesis açmanın sabit maliyeti veya araç rotalamanın sabit ve değişken maliyetlerinin minimizasyonu olarak ele alınmaktadır (Drexl ve Schneider, 2015).
- **Çözüm uzayına göre:** Kesikli, network ve sürekli olmak üzere üç başlık altında toplanmaktadır (Nagy ve Salhi, 2007; Drexl ve Schneider, 2015). *Kesikli problemlerde*, açılacak tesisler için aday tesis yerleri bir grafiğin köşe noktaları kümesi olarak verilmektedir, *network problemlerinde* bir tesis bir ağın herhangi

bir tepe noktasında veya bir bağlantı üzerinde herhangi bir yerde konumlandırılabilir (Drexl ve Schneider, 2015). *Sürekli (planar) problemlerde*, aday tesis yerlerinin seçimi ayrı bir set olarak sınırlandırılmamakta, tesisler düzlemde serbestçe konumlandırılabilir (Drexl ve Schneider, 2015).

- **Hiyerarşik yapıya göre:** Drexl ve Schneider (2015) tarafından tek aşamalı ve çok aşamalı YS-ARP olarak sınıflandırılmıştır. *Tek aşamalı YS-ARP'de* müşteriye ürün teslimatı doğrudan merkezi depodan yapılırken, *çok aşamalı YS-ARP'de* müşteriye ürün teslimatı merkezi depodan değil, ara depolardan gerçekleştirilmektedir ve ara depoların seviyeleri aşamaları ifade etmektedir (Drexl ve Schneider, 2015).
- **Rota yapısına göre:** Genellikle klasik rota yapısı rotanın depo düğümünde başladığı ve müşteri düğümüne ürün teslimi yapıldıktan sonra rotanın yine depo düğümünde tamamlandığı yapıdır (Nagy ve Salhi, 2007). Bu durum *düğüm rotalama* olarak da bilinmektedir. Düğüm rotalama problemlerinde müşteriye hizmetin düğümlerde, *ark rotalama problemlerinde* ise hizmetin ağdaki tüm arklarda gerçekleştirildiği dikkate alınmaktadır (Drexl ve Schneider, 2015). Aday tesis yerleşim yerlerinin birinden müşteriye hem ürün teslim etme hem de müşteriden ürün toplama işlemlerinin eş zamanlı olarak yapılabilirdiği problem türü *eş zamanlı topla-dağıt YS-ARP*; malların taşınması için ara tesisler ağı bulunmasını amaçlayan problem *çoktan çoğa topla-dağıt YS-ARP'dir* (Drexl ve Schneider, 2015). *Ayrık Dağıtım YS-ARP*, bir müşterinin taleplerinin karşılanmasının bir veya birden fazla araçla, bir veya birden fazla kez ziyaret edilerek gerçekleştirildiği problem türü olarak tanımlanmaktadır (Drexl ve Schneider, 2015).
- **Stok YS-ARP:** Stok yönetimi kararlarının YS-ARP'ye dâhil edildiği problem türüdür. Burada hangi depoda ne kadar stok tutulacağı, hangi depoya ne zaman ne kadar mal sipariş verileceği bilgisi de probleme dâhil edilmektedir (Drexl ve Schneider, 2015).
- **Genelleştirilmiş YS-ARP:** Bu problem türünde bir tesisten başlayan ve biten rotaların belirlenmesi amacıyla müşteriler kümelerine ayrılır, her bir kümedeki müşterinin bir kez ziyaret edilmesi sağlanır (Drexl ve Schneider, 2015).

- **Ödül toplayan YS-ARP:** Bazı müşterilerin herhangi bir tur tarafından ziyaret edilmemesine izin verildiği problem türüdür, bu müşteriler için müşteri başına bir ceza maliyeti verilmektedir (Drexl ve Schneider, 2015).

YS-ARP’de genellikle amaç fonksiyonu, depo maliyetleri ve araç maliyetlerinden oluşan, toplam maliyetin minimizasyonu olarak ele alınmaktadır (Nagy ve Salhi, 2007; Schneider ve Drexl, 2017). YS-ARP, temel bileşenleri olan yer seçimi probleminin ve araç rotalama probleminin NP-hard olması sebebiyle, NP-hard sınıfında yer alan kombinatoriyel optimizasyon problemi olarak tanımlanmaktadır (Wu vd., 2002; Nagy ve Salhi, 2007; Vincent, Lin, Lee ve Ting, 2010; Touati-Moungla ve Jost, 2012; Li-ying ve Yuan-bin, 2015).

3.4. Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi

Bu başlık altında öncelikle Elektrikli Araç Rotalama Problemi ve Şarj İstasyonu Yer Seçimi Problemi açıklanacak devamında bu problemlerin birleşimi ve tez çalışmasının konusu olan Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi açıklanacaktır.

3.4.1. Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Elektrikli araçlar ve araç rotalama problemlerinin kombinasyonu Genişletilmiş Araç Rotalama Problemi’dir, elektrikli araçların sınırlı menzil aralığına sahip olması ve araç bataryasının şarj süresinin uzun olması sebebiyle Elektrikli Araç Rotalama Problemi (EARP) klasik araç rotalama probleminden farklı bir problem olarak ele alınmaktadır (Montoya, Guéret, Mendoza ve Villegas, 2015; Shao vd., 2017; Schiffer ve Walther, 2017a; Paz vd., 2018; Rezgui, Siala, Aggoune-Mtalaa ve Bouziri, 2019; Rastani vd., 2019; Zuo, Xiao, You, Kaku ve Xu, 2019). Elektrikli araçlar, yakıt türü olarak elektriği kullandıkları için yeşil araç olarak da tanımlanmakta ve alternatif yakıtlı araçlar altında ele alınmaktadırlar (Davis, Diegel ve Boundy, 2010). Bu sebeple EARP Yeşil Araç Rotalama Problemi olarak da adlandırılabilir (Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012; Schneider vd., 2014; Macrina, Laporte, Guerriero ve Pugliese, 2019). Klasik araç rotalama problemlerinde olduğu gibi Yeşil Araç Rotalama Problemleri’nde seyahat mesafesini, seyahat süresinin minimize etmeye çalışmaktadır ancak kullanılan araçların çevreye verdikleri zarar yok ya da çok az düzeyde olduğu için çevre durumu göz ardı edilmektedir (Zhang, Gajpal, Appadoo ve Abdulkader, 2018).

EARP’de ana amaç bir işletmede müşteri taleplerinin karşılanması amacıyla elektrikli araçların izleyeceği rotaların belirlenmesidir. Ancak klasik ARP’den farklı

olarak EARP'de, sınırlı sürüş aralığı ve bir rota boyunca şarj istasyonlarını ziyaret etme olasılığı hesaba katılmaktadır (Desaulniers vd., 2016). Araçlar çalışma sürelerinin bir kısmını aracı şarj etmek amacıyla şarj istasyonunda geçirebilmektedir (Paz vd., 2018).

Conrad ve Figliozzi (2011) tarafından yapılan çalışmada, literatürde ilk kez EARP formülasyonu sunulmuştur. Çalışmada şarj işleminin yalnızca müşterilerde yapılabileceği durum ele alınmıştır. Devamında Erdoğan ve Miller-Hooks (2012) tarafından yapılan ve Yeşil Araç Rotalama Problemi olarak adlandırılan çalışmada matematiksel modelde şarj istasyonları için ayrı düğümler oluşturulmuştur. Elektrikli araçların yaygınlaşması açısından verimli elektrikli araç rotalama önemli bir rol oynamaktadır (Touati-Moungla ve Jost, 2012).

3.4.2. Şarj İstasyonu Yer Seçimi Problemi

Elektrikli araçlar için Şarj İstasyonu Yer Seçimi Problemi, tesis kuruluş maliyetlerini ve taşıma maliyetlerini diğer faktörleri de dikkate alacak şekilde maliyetleri minimize edecek optimum şarj istasyonu yerlerinin bulunması olarak tanımlanmaktadır (Chen, Qian, Miao ve Ukkusuri, 2020). Şarj istasyonları için uygun yerlerin ve kapasitelerinin belirlenmesi birçok kısıta sahip çok amaçlı optimizasyon problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Gagarin ve Corcoran, 2018). Şarj istasyonlarının konumlarının belirlenmesinde devletin planlamaları, belirlenen konumlardaki çevre sakinlerinin görüşü, elektrikli araçların konumlarda kullanım oranı, arazinin uygunluğu, trafik koşulları, hava koşulları, coğrafi koşullar, yangın vb. tehlikeli durumlara ilişkin koşullar, istasyon harmonik kirliliği problemi, elektrik şebekesinin durumu, istasyon yükü, şarj modeli, toplam yatırım ve yönetim maliyetleri gibi birçok faktörün göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Meng ve Kai, 2011). Şarj istasyonu yer seçimine ilişkin bilinen ilk çalışma Li, Li, Yong, Yao ve Li (2011) tarafından yapılmıştır.

Kombinatoriyel optimizasyon problemleri sınıfına giren şarj istasyonu yer seçimi problemi için (Touati-Moungla ve Jost, 2012), Lin vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada literatürde kullanılan dört yaklaşım olduğu belirtilmiştir;

- **Düğüm temelli yaklaşım (Node-based approach):** Belirlenen noktaların talebini karşılamaya ilişkin klasik yer seçimi modellerinin kullanıldığı yaklaşımdır.

- **Akış temelli yaklaşım (Flow-based approach):** Trafik akışlarıyla ifade edilen talepleri karşılamaya çalışan yaklaşımdır, bu yaklaşımda araçlar sabitlenmiş noktalar olarak görülmek yerine yolda hareket etmektedir.
- **Yol temelli yaklaşım (Path-based approach):** Bu yaklaşım araçlar yerine yollara odaklanırken, yollardaki tüm yakıt taleplerini karşılamaya çalışmaktadır.
- **Denge temelli yaklaşım (Equilibrium-based approach):** Şarj altyapısının elektrikli araç sürücülerinin seyahat seçimleri ve ulaşım ağındaki denge akış dağılımı üzerindeki etkilerini göz önünde bulunduran yaklaşımdır.

3.4.3. Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi

Elektrikli araçlarla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde optimizasyon modellerinin temel üç başlık altında toplandığı görülmektedir (Schiffer ve Walther, 2018);

1. Elektrikli araçların menzil ve şarj sürelerini baz alan Elektrikli Araç Rotalama Problemi,
2. Elektrikli araçlar için şarj istasyonlarının yerlerini belirlemek amacıyla Şarj İstasyonu Yer Seçimi Problemi,
3. Şarj istasyonu için yer seçimini ve araçlar için optimum rotaların belirlenmesini eş zamanlı olarak ele alan Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi (E-YS-ARP) olarak sınıflandırılmaktadır.

Her üç problem türüne ilişkin çalışmalar incelendiğinde son yıllarda en çok EARP devamında şarj istasyonu yer seçimi problemi konuları ele alınmıştır, elektrikli araçlar için yer seçimi ve rotalama işlemini eş zamanlı olarak ele alan çalışma sayısı azdır. Ancak daha önce de belirtildiği üzere yer seçimi ve araç rotalama kararları birbirleri ile ilişkili olan kararlardır (Nagy ve Salhi, 2007). İhtiyaç duyulan elektrikli araçların sayısı şarj istasyonlarının sayısından ve konumundan etkilendiği ve bu durumun tersi de geçerli olduğundan her iki kararın eş zamanlı olarak ele alınması gerekmektedir (Schiffer ve Walther, 2017a). Özellikle elektrikli araçlar için şarj istasyonu yer seçimi ve kullanılacak şarj istasyonu teknolojisinin seçiminde elektrikli araçların rotaları oldukça önemli bir konumdadır (Paz vd., 2018; Macrina vd., 2019). Birçok çalışmada her iki problem birbirinden bağımsız olarak ele alınıyor olsa da uzun

vadede her iki kararın birlikte ele alınmasının maliyetlerin azalmasını sağladığı sonucu ortaya çıkmıştır (Nagy ve Salhi, 2007; Schiffer ve Walther, 2017b). Piyasada elektrikli araçların yaygınlaşmasının sağlanması içinde her iki konunun birlikte ele alınması gerekmektedir (Schiffer ve Walther, 2017a). E-YS-ARP kendi içinde bulundurduğu iki ana problemde NP-hard olması sebebiyle NP-hard problemidir.

Elektrikli araçlar için rotada eş zamanlı olarak yer seçimi ve rotalama problemi, batarya değiştirme istasyonlarının yer seçimi için ilk defa Yang ve Sun (2015) tarafından batarya değiştirme istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi ve araçların rotalaması üzerine yapılmıştır. Devamında Schiffer ve Walther (2017a) tarafından rotada şarj istasyonlarının konumlarının belirlenmesi ve araçların rotalarının belirlenmesi şeklinde ele alınmıştır. Bu çalışmalarda klasik YS-ARP problemlerinden farklı olarak araçların rotaya başlayacakları ve rotalarını sonlandıracakları depoların konumlarının belirlenmesinin yerine, araçların rotalarında bataryalarını şarj etmek amacıyla duracakları şarj tesislerinin yerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır (Schiffer ve Walther, 2017a).

E-YS-ARP'nin çözümünde YS-ARP çözümünde kullanılan kesin çözüm yöntemleri, sezgisel yöntemler ve metasezgisel yöntemler kullanılabilmektedir. Küçük boyutlu örneklerin çözümünde kesin çözüm yöntemleri kullanılabılırken, büyük boyutlu problemlerde çözüm süresinin üstel olarak artması sebebiyle sezgisel ve metasezgisel yöntemler daha çok tercih edilmektedir. İzleyen başlıklarda çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.5. Elektrikli Araç Yer Seçimi-Araç Rotalama Problemi Çözüm Yöntemleri

E-YS-ARP'nin çözümünde YS-ARP çözümünde de başvuru olan yöntemlerin kullanılması sebebiyle bu başlık altında YS-ARP çözüm teknikleri açıklanmıştır. YS-ARP çözümünde küçük boyutlu örneklerde çözüm için kesin yöntemler kullanılabilmekte, ancak büyük boyutlu örneklerde problemin yapısal karmaşıklığı sebebiyle kesin yöntemler yetersiz kalabilmektedir (Wu vd., 2002; Nagy ve Salhi, 2007; Vincent vd., 2010; Yang ve Sun, 2015; Li-ying ve Yuan-bin, 2015).

YS-ARP'nin çözümü için birçok sezgisel yöntem kullanılmaktadır ve sezgisellerin çoğu karar seviyelerini önce alt problemlere ayırmakta ve problemleri sıralı veya iteratif olarak çözmektedir (Yang ve Sun, 2015). Sezgisel ve metasezgisel yöntemler kesin çözüm yöntemlerine kıyasla daha hızlılardır ve daha kısa sürede

optimuma yakın çözümlere ulaşılabilmektedir. Karşılaştırılan bu üç çözüm yöntemi ile ilgili bilgiler izleyen bölümde yer almaktadır.

3.5.1. Kesin Çözüm Yöntemleri

Kesin çözüm yöntemleri matematiksel programlama formülasyonlarına dayanmaktadır (Nagy ve Salhi, 2007). Bu yöntemler genellikle kısıtların gevşetilmesini ve yeniden kullanılmasını içermektedir (Nagy ve Salhi, 2007).

YS-ARP problemlerin çözümünde kullanılan kesin çözüm yöntemleri şu şekildedir (Lopes vd., 2013):

- Dal sınır algoritması,
- Dal kesme algoritması,
- Dal fiyat algoritması,
- Kesme düzlemi algoritması,
- Dinamik programlama.

Kesin çözüm yöntemleri, daha çok küçük ve orta boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmaktadırlar. Yer seçimi problemlerinin ve araç rotalama problemlerinin NP-hard problemler olmaları sebebiyle büyük boyutlu problemlerde kesin çözüm yöntemleri kullanılarak çözülmesi mümkün olmamaktadır (Nagy ve Salhi, 2007; Lopes vd., 2013).

3.5.2. Sezgisel Çözüm Yöntemleri

Sezgisel teknikler gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin birçoğunun olası tüm çözümlerinin tek tek incelenemeyecek kadar büyük olması durumunda kullanılan, makul bir sürede optimum çözüme yakın çözüm bulmak amacıyla kullanılan tekniklerdir (Cura, 2008).

Geçmişten günümüze sezgisel yaklaşımlar kesin çözüm yöntemlerine göre pratik uygulamalarda daha güvenilir yöntemler olmaya devam etmektedir, örneğin zaman penceresi, dağıtma ve toplama kısıtlarının dâhil olduğu problemlerde sezgiseller daha iyi bir çözüm yöntemi seçeneği konumuna gelmektedirler (Cordeau, Gendreau, Hertz, Laporte ve Sormany, 2005). Sezgisel yöntemler daha büyük boyutlu problemlerde ve daha fazla kısıtı dikkate alarak problemi çözebilmektedirler (Laporte, Nobert ve

Taillefer, 1988). YS-ARP çözümünde kullanılan birçok sezgisel teknik söz konusudur. Nagy ve Salhi (2007) YS-ARP çözümünde kullanılan sezgiselleri aşağıdaki şekilde sınıflandırmışlardır:

- **Kümeleme tabanlı yöntemler:** Kümeleme tabanlı yöntemler, müşterilerin kümelere bölünmesiyle başlamaktadır. Bu bölünme potansiyel depo başına bir küme veya her bir araç rotası başına bir küme şeklinde yapılmaktadır. Devamında iki şekilde çözüme ulaşılmaktadır. Önce her bir küme için depo yeri seçilmekte ardından rotalama problemi çözülmekte veya önce her bir küme için rotalama problemi, sonrasında depo yer seçimi problemi çözülmektedir.
- **İteratif sezgisel yöntemler:** İteratif sezgisel yöntemler, problemi iki bileşenli alt problemlere ayırırlar. Daha sonra yöntemleri bir aşamadan diğer aşamaya bilgi besleyerek alt problemleri tekrarlayarak çözerler.
- **Hiyerarşik sezgisel yöntemler:** Hiyerarşik sezgisel yöntemler daha iyi çözümler vereceği düşünülen, ana algoritmanın yer seçimi problemini çözmeye ayrıldığı ve her adımda rotalama problemini çözen bir alt programa başvurduğu sezgisellerdir. Ana problem olarak yer seçimi problemi ele alınmakta ve rotalama alt problem olarak görülmektedir (Nagy ve Salhi, 1996).

3.5.3. Metasezgisel Çözüm Yöntemleri

Metasezgisel yöntemler temel sezgisel yöntemleri, bir arama alanını verimli ve etkili bir şekilde keşfetmeyi amaçlayan daha üst düzey çerçevelerde birleştirmeye çalışan yöntemlerdir (Blum ve Roli, 2003). Metasezgisel yöntemler genel olarak yerel arama, popülasyon arama ve öğrenen mekanizmalar olarak sınıflandırılmaktadırlar (Laporte, 2009). Aşağıda YS-ARP’nde çözüm yöntemi olarak kullanılan bazı metasezgisel yöntemler açıklanmıştır.

- **Tabu Arama Algoritması:** Tabu Arama Algoritması kombinatoriyel optimizasyon problemlerinin çözümü için literatürde en çok kullanılan ve en çok atıf alan metasezgisellerden biridir (Blum ve Roli, 2003). Bu yöntemde bir çözümün ardışık komşuları incelenmekte ve en iyi çözüm seçilmektedir ancak çözümler arasında döngü oluşmasını engellemek için yakın zamanda incelenen çözümler yasaklanmakta ve yasaklanan çözümler sürekli güncellenen tabu

listesine eklenmektedir (Gendreau, Hertz ve Laporte, 1994). Tabu Arama Algoritması, iyi bir çözüm bulmak için çözüm alanını daha detaylı olarak incelemektedir (Li ve Zhang, 2014).

- **Genetik Algoritma:** Genetik algoritma, genetik ve doğal seleksiyon üzerine kurulu bir optimizasyon ve arama tekniğidir (Haupt ve Haupt, 2004). Genetik algoritma, sezgisel olarak diğer çözümlere kıyasla daha iyi olan çözümü bulmak için çözümlerin oluşturduğu popülasyonu eş zamanlı inceleyerek doğal seleksiyon yasasında olduğu gibi güçlü olanın sistemde yaşamaya devam edeceğini, güçsüz olanın sistemden eleneceği prensibine dayanarak problemin optimum çözümünün bulunacağını varsayar (Öztürk, 2008). Genetik algoritma, popülasyon büyüklüğü kadar çözüm üzerinde eş zamanlı olarak çalışarak çözümü bulmaya çalışan, stokastik bir arama yöntemidir (Kulluk ve Türkbey, 2004).
- **Karınca Koloni Algoritması:** Gerçek hayatta karıncaların yiyecek bulma sürecindeki davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş, iki nokta arasındaki en kısa yol bulunmaya çalışan bir yöntemdir (Mazzeo ve Loiseau, 2004). Doğada karıncalar yiyecek bulma sürecinde kullandıkları yolu işaretlemek ve birbirleriyle iletişim kurmak için feromon adı verilen maddeyi kullanmaktadırlar ve bir karıncanın hangi yolu seçeceği yol üzerindeki feromon miktarına göre değişmektedir (Wang, Liu ve Zhong, 2005). Koloninin sürekli hareketi ile daha kısa yollar daha sık ziyaret edilir, yoldaki feromon miktarı artar ve sonraki karıncalar için daha çekici hale gelir, bu şekilde yuvadan yiyecek kaynağına olan en kısa yol bulunmuş olur (Wang vd., 2005).
- **Tavlama Benzetimi Algoritması:** Fiziksel tavlama işlemindeki yavaş soğutma sürecini taklit ederek maliyet fonksiyonunun global minimum değerini bulmaya çalışan bir tekniktir (Vincent vd., 2010). Tavlama Benzetimi Algoritması, iyi bir çözüm bulmak için çözüm alanını daha detaylı olarak incelemektedir (Li ve Zhang, 2014). Bu algoritma karmaşık kombinatoriyel optimizasyon problemlerinin ve gerçek hayat uygulamalarının çözümünde başarılı bir şekilde kullanılabilir (Vincent vd., 2010).
- **Parçacık Sürü Optimizasyonu:** Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından sürekli nonlinear fonksiyonların çözümü için geliştirilmiş bir yöntemdir. Yöntemin yapay yaşamla (özellikle kuşların sürü halinde hareket etmeleri, balık eğitimi ve

sürü teorisi ile) ve evrimsel hesaplamada kökleri vardır (Kennedy ve Eberhart, 1995). Yöntem rastgele bir çözüm popülasyonu ile sistemin başlatılması sebebiyle genetik algorithmaya benzerken, parçacık adı verilen her bir potansiyel çözüme rastgele bir hız atanması ve parçacıkların hiper uzayda akmaya başlamasıyla genetik algorithmadan farklılaşmaktadır (Kennedy ve Eberhart, 1995).

Tez çalışması kapsamında önerilen matematiksel modelin çözümünde genetik algoritma metasezgiseli kullanıldığı için ilerleyen başlıkta genetik algoritma metasezgiseli detaylı olarak ele alınmıştır.

3.5.4. Genetik Algoritma

Günümüzde bilgisayar sistemleri üzerine kurulu yöntemler, biyolojik evrimden esinlenerek evrimsel hesaplama adı altında toplanmışlardır (Karr ve Freeman, 1999:2). Evrimsel hesaplamanın 3 ana elementi şu şekildedir (Karr ve Freeman, 1999:2):

- Evrimsel Stratejiler,
- Evrimsel Programlama,
- Genetik Algoritma,

Her üç teknik de doğal evrimde gözlenen süreçleri taklit eder, belirli bir problem için aday çözüm popülasyonunu geliştirerek verimli arama motorları sağlar, ancak genetik algoritma evrimsel hesaplamalar teknikleri içinde en etkin olan tekniktir (Karr ve Freeman, 1999:2).

Genetik algoritma (GA) doğal evrimdeki bazı spontan optimizasyon süreçlerini taklit eden stokastik arama teknikleri olup, arama ve optimizasyon sorunlarını çözmek için kullanılabilecek robast (sağlam) ve uyarlanabilir bir yöntemdir (Kratka vd., 2001; Maric, 2010). GA, mevcut popülasyona doğal seçim ve genetik rekombinasyona dayalı operatörleri tekrar tekrar uygulayarak aday çözüm popülasyonunu geliştiren optimizasyon yöntemidir (Correa, Steiner, Freitas ve Carnieri, 2004). Bireysel çözümlerin performansını geliştirmek/iyileştirmek yerine popülasyonun performansını iyileştirerek/geliştirerek daha iyi çözüm bulmaya yöneldiğinden dolayı GA popülasyon temelli yöntem olarak da adlandırılmaktadır (Jang, Sun ve Mizutani, 1997).

GA çok çeşitli problem türlerinin çözümünde kullanılabilen bir tekniktir (Jia, Ordóñez ve Dessouky, 2007). GA, John Holland tarafından önerilmiş ve David E. Goldberg tarafından da detaylandırılmıştır (Jaramillo, Bhadury ve Batta, 2002). 1960'li yıllarda Michigan Üniversitesi'nde Holland ve öğrencileri, GA üzerinde çalışmışlar ve GA üzerine ciddi katkılarda bulunmuşlardır, ancak Genetik Algoritma terimi ilk olarak 1967'de Bagley'in doktora tezinde kullanılmıştır (Eberhart ve Shi, 2007). GA, 1970'li yıllarda Michigan Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar ile birlikte duyulmuş, John Holland'ın 1975 yılında yayınladığı Doğal ve Yapay Sistemlerin Uygulanması kitabında yayınlanmış, ancak 1985'te Holland'ın öğrencisi olan David E. Goldberg'ın 1989'da yazdığı Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning adlı kitaba kadar kullanışlı bir yöntem olarak değerlendirilmemiştir (İşçi ve Korukoğlu, 2003). Lawrance Davis (1991)'ın kitabı Handbook of Genetic Algorithms, örnek çalışmaları da içermektedir (Eberhart ve Shi, 2007; Reeves, 2010). Bu çok okunan iki kitapla popüler olan teknik günümüzde de bu popülerliğini korumakta, yöntem birçok çalışmada kullanılmakta ve geniş ölçekli kombinatoriyel optimizasyon problemlerinde güçlü bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır (Jaramillo vd., 2002).

Karmaşık arama problemlerinde birçok potansiyel optimal çözümler sunan GA'nın sağladığı birçok avantaj vardır. Modellemesi kolay ve hızlı hesaplama süresine sahip olan (Shao vd., 2017) GA'nın avantajlarından bazıları şu şekildedir (Haupt ve Haupt, 2004:23):

- Sürekli veya kesikli değişkenler kullanılarak optimizasyon yapılır,
- Türev bilgisine ihtiyaç duyulmaz,
- Eş zamanlı olarak geniş bir örneklem üzerinde arama yaparak amaç fonksiyonunu optimum değerini bulmaya çalışır,
- Değişken sayısı kısıtlı değildir,
- Paralel bilgisayarlar için çok uygundur (Haupt ve Haupt, 2004). Çünkü GA'lar, operasyonlarını büyük ölçüde hızlandırmak için paralel işleme makinelerinde uygulanabilen paralel arama prosedürleridir (Jang vd., 1997),
- Optimizasyonun kodlanmış değişkenlerle yapılabilmesine imkân tanır,
- Sadece tek bir çözüm değil, optimum değişkenlerin listesini çözüm olarak sunar,
- Son derece karmaşık maliyet yüzeylerine sahip değişkenleri optimize eder (yerel minimumun dışına çıkabilirler),

- Sayısal olarak oluşturulmuş veriler, deneysel veriler veya analitik fonksiyonlarla çalışabilir,
- Yerel minimuma takılma olasılıkları düşüktür (Jang vd., 1997).

GA'nın avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlardan bazılarını şu şekilde sıralanabilir:

- GA oldukça yavaştır (Abramson ve Abela, 1992),
- Yerel çözüm bulma konusunda çok başarılı değildirler (Sivanandam ve Deepa, 2008),
- Algoritmanın özenli tasarlanması ve popülasyon büyüklüğü ve diğer parametre seçimlerinin dikkatli yapılması gerekmektedir (Carter, 2003; Sivanandam ve Deepa, 2008; Meyer-Baese ve Schmid, 2014),
- Çok sayıda uygunluk fonksiyonunun değerlendirmesini gerektirmektedir (Sivanandam ve Deepa, 2008),
- Kesin global optimumun bulunmasında problem yaşanmaktadır (Sivanandam ve Deepa, 2008),
- Uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi zordur (Sivanandam ve Deepa, 2008),
- Yerel bir arama tekniği ile birleştirilmesi gerekmektedir (Carter, 2003; Sivanandam ve Deepa, 2008).

GA, doğrusal olmayan dinamik sistemler (tahmin, veri analizi), çizelgeleme (üretim, tesis çizelgeleme, kaynak tahsisi), makine öğrenmesi, kombinatoriyel optimizasyon (kapsama, gezgin satıcı problem, sıralama, çizelgeleme, rotalama, bin-packing) problemleri gibi birçok alanda kullanılabilir (Sivanandam ve Deepa, 2008).

Karmaşık rotalama problemlerinde, özellikle büyük ve gerçekçi yol ağlarını içeren rotalama problemleri türlerinde GA yaygın olarak kullanılmıştır ve yöntem kabul edilebilir daha iyi bir çözüm elde edebilmektedir (Shao vd., 2017). Klasik optimizasyon teknikleri tek bir noktada arama yaparken GA tek bir çözüm yerine çözüm popülasyonunu kullanır bu da GA'nın robastlığında (sağlamlığında) önemli bir rol oynar, yerele takılmasından kaçınmasına yardımcı olur ve global optimum ulaşma şansını artırır (Sivanandam ve Deepa, 2008).

Ayrıca GA'nın kendi kendine çalışabilme (self study), kendi kendini organize edebilme (self-organizing) ve kendi kendini uyarlayabilme (self-adaption) özellikleri EARP çözümü için GA'yı uygun bir çözüm yöntemi haline getirmektedir (Zhenfeng, Yang, Xiaodan ve Sheng, 2017).

3.5.4.1. Genetik Algoritma Terminolojisi

GA'nın kendine özgü bir terminolojisi bulunmaktadır ve bu terminoloji genetik biliminin terminolojisine çok benzemektedir. GA terminolojisi açıklanmadan önce Tablo 6'da doğal evrim ve GA terminolojisi karşılaştırılmış, devamında GA'da kullanılan terimlere ilişkin açıklamalara yer verilmiştir.

Tablo 6

Doğal Evrim, Genetik Algoritma Terminolojisinin Karşılaştırması

Doğal evrim	Genetik Algoritma
Popülasyon	Çözüm havuzu
Kromozom	Dizi (bir birey)
Gen	Özellik veya karakter
Allel	Özellik değeri
Genotip	Kodlanmış dizi
Fenotip	Kodu çözülmüş yapı/uygunluk değeri

Kaynak: Yaktubay, 2018

- **Arama uzayı (Search space):** Araştırılan soruna mümkün olan tüm çözümleri tanımlayan kavramsal bir alandır (Carter, 2003).
- **Genom (Genome):** Bir bireyi tanımlayan bilgi genomu oluşturur (Carter, 2003).
- **Popülasyon (Population):** GA'da bireylerin (aday çözümlerin, kromozomların) toplamı popülasyonu oluşturur (Carter, 2003). Popülasyonla ilgili iki önemli nokta bulunmaktadır, birincisi başlangıç popülasyonunun oluşturulması ikincisi popülasyon büyüklüğüdür (Sivanandam ve Deepa, 2008).
- **Birey (Individual):** Tek bir çözümdür (Sivanandam ve Deepa, 2008). Arama uzayındaki olası çözümlerden herhangi biri kullanılarak üretilen sonuç modelini ifade eder (Carter, 2003).
- **Kromozom (Chromosome):** Genlerin bir araya gelerek oluşturduğu yapıdır. Bir kromozom, bir bireyin tüm genetik bilgilerinin depolandığı belirli uzunlukta bir diziyi ifade eder (Kumar, 2013).

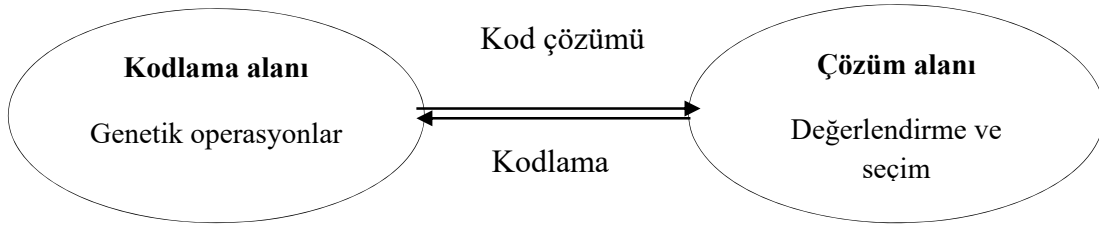
- **Gen (Gene):** Gen, “kendi başına anlamlı genetik bilgi taşıyan en küçük genetik yapıdır” (Taşkın ve Emel, 2009). Genler bir türün özelliklerini, yani bireyin özelliklerini kodlar (Sivanandam ve Deepa, 2008). Bir kromozom içinde bir grup sayı, belirli bir özelliği ortaklaşa kodlayabilir (örn. göz rengi veya kanat uzunluğu) bu grupta gen olarak bilinir (Carter, 2003). Şekil 2’de popülasyon, kromozom ve gen gösterimine örnek verilmiştir.
- **Allel (Allele):** Genlerin bir özellik için olasılıklarına allel adı verilir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Kromozomların üzerindeki en küçük bilgidir (Kumar, 2013).
- **Lokus (Locus):** Lokus, genomda tutulan en küçük bilgi parçasının yeridir (Carter, 2003). Genom içinde bir ikili kod kullanıyorsak, o zaman bu ikili bitlerden sadece birinin yeridir (Carter, 2003).

Popülasyon	Kromozom 1	1 1 1 0 0 0 1 0
	Kromozom 2	0 1 1 1 1 0 1 1 → Gen
	Kromozom 3	1 0 1 0 1 0 1 0
	Kromozom 4	1 1 0 0 1 1 0 0

Şekil 2. Genetik Algoritmada popülasyon, kromozom ve gen gösterimi
Kaynak: Sivanandam ve Deepa, 2008

- **Genotip (Genotype):** Bir allel koleksiyonu genotipi oluşturur (Carter, 2003), bireyin kodlanmış bir dizi olarak temsili şeklinde de ifade edilebilmektedir (Yaktubay, 2018).
- **Fenotip (Phenotype):** Genotipin fiziksel temsilidir (Carter, 2003), kromozomun kod çözülmesini sağlayan genotip bilgilerinden inşa edilen yapıdır (de Araujo Lima ve de Araújo, 2020).
- **Uygunluk fonksiyonu (Fitness function):** Bir bireyin GA’da uygunluğu, fenotipi için amaç fonksiyonunun değeridir (Sivanandam ve Deepa, 2008).
- **Kodlama ve kod çözme (Encoding and decoding):** GA alternatif olarak kodlama alanı (genotip) ve çözüm alanı (fenotip) olmak üzere iki tip alan (Şekil 3) üzerinde çalışmaktadır (Kumar, 2013). Kodlama, bir çözümü fenotipten genotip alanına dönüştüren bir işlemdir, kod çözme ise bir çözümü genotipten fenotip alanına dönüştürme işlemidir (de Araujo Lima ve de Araújo, 2020). Genotip ve fenotip arasındaki eşleştirme, çözüm setlerini modelden GA’nın

çalışabileceği bir forma dönüştürmek için ve yeni bireyleri GA'dan modelin değerlendirebileceği bir forma dönüştürmek için gereklidir (Sivanandam ve Deepa, 2008).



Şekil 3. Kodlama ve kod çözme yöntemi
Kaynak: Kumar, 2013

3.5.4.2. Genetik Algoritmanın Genel Akış Diyagramı

GA'nın genel akış diyagramı şu şekildedir (Mitchell, 1998);

1. Rastgele başlangıç popülasyonunu oluştur, n sayıda 1 (dizi uzunluğu)-bit kromozomlar (problemin aday çözümleri). Her çözüm bir kromozomla ifade edilir (Sivanandam ve Deepa, 2008).
2. Popülasyondaki her x kromozomu için $f(x)$ uygunluk değerini hesapla.
3. n tane yavru oluşturuluncaya kadar aşağıdaki adımları tekrarla:
 - 3.1. Mevcut popülasyondan bir çift ebeveyn kromozomu seç, seçilen kromozomların fonksiyonun uygunluk değerini artırma olasılığı vardır. Uygunluk değeri iyi olan kromozomların seçilme şansı daha yüksektir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Seçim “değiştirilerek” yapılır, yani aynı kromozom ebeveyn olmak için birden fazla kez seçilebilir.
 - 3.2. Pc (çaprazlama olasılığı veya çaprazlama oranı) ile iki yavru oluşturmak için seçilen çift üzerinde çaprazlama yap. Eğer çaprazlama gerçekleşmezse, ebeveynlerin tam kopyası olan iki yavru oluştur.
 - 3.3. Pm (mutasyon oranı veya mutasyon olasılığı) ile her iki yavruda mutasyonu gerçekleştir, ortaya çıkan kromozomları yeni popülasyona yerleştir. Eğer n hala en iyi değilse, bir yeni popülasyon üyesi rastgele atılabilir. Mutasyon bir bireyin yeni bir versiyonunu üretmek için orijinal genetik materyalinin bir bölümünün rastgele değiştirildiği aşamadır (Sivanandam ve Deepa, 2008).
4. Mevcut popülasyonu yeni popülasyonla değiştir.

5. İkinci adıma geri dön.

Bu sürecin her tekrarına-yinelenmesine-iterasyonuna *jenerasyon* (*generation*) adı verilir ve bir genetik algoritma genellikle 50 ila 500 veya daha fazla jenerasyon için yinelenir (Mitchell, 1998). Jenerasyon setinin tamamına *çalıştırma* (*run*) adı verilir (Mitchell, 1998). Süreç bir durdurma kriterine ulaşana kadar devam eder. Durdurma kriteri olarak aşağıda belirtilen durumlar seçilebilir (Haupt ve Haupt, 2004):

- Eğer seçilen kromozom en iyi sonucu veren kromozom ise,
- Her jenerasyonda aynı kromozom sonuç olarak ortaya çıkıyorsa, daha iyi bir sonuç ortaya çıkmıyorsa,
- Popülasyonun maliyetinin ortalama veya standart sapması belli bir seviyeye ulaşıyor ve değişmiyorsa,
- Algoritma, yukarıdaki nedenlerden biri için durmuyorsa, maksimum jenerasyon sayısını sınırlayın. Belirlenen jenerasyon sayısına ulaşıldığında algoritma çalışmayı durduracaktır.

İlerleyen başlıklarda GA'nın adımları daha detaylı ele alınmış ve açıklanmıştır.

3.5.4.2.1. Kodlama

GA kullanılarak bir problemin çözümünün gerçekleştirilebilmesi için ilk adım kodlama işleminin yapılmasıdır. GA'da kodlama bireyleri temsil edecek yapıyı oluşturmaktır ve kodlama bitler, sayılar, ağaçlar, diziler, listeler veya diğer nesneler kullanılarak oluşturulabilmektedir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Kodlama şemaları, probleme özgü bilgilerin doğrudan GA'ya dönüştürülmesini sağlamaktadır ve bu yüzden GA'nın performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Jang vd., 1997). Aşağıda literatürde yer alan bazı kodlama türleri kısaca açıklanmıştır.

- **İkili Kodlama (Binary Encoding):** En yaygın kodlama biçimidir, bu kodlamada her bir kromozom, ikili bir dizi (0 veya 1) kullanılarak temsil edilir (Kumar, 2013). Örneğin bir kromozom şu şekilde ifade edilebilir: Kromozom 1:010010001.
- **Sekizli Kodlama (Octal Encoding):** Kromozom sekizlik sayılar (0-7) kullanılarak temsil edilir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Örneğin bir kromozom şu şekilde ifade edilebilir: Kromozom 1:01256734.
- **On Altılı Kodlama (Hexadecimal Encoding):** Bu kodlamada kromozom onaltılık sayılar (0-9, A-F) kullanılarak temsil edilir (Sivanandam ve Deepa,

2008; Kumar, 2013). Örneğin bir kromozom şu şekilde ifade edilebilir: Kromozom 1: 87AB.

- **Permütasyon Kodlama (Permutation Encoding):** Sıralama problemleri için elverişli bir kodlama türüdür (Sivanandam ve Deepa, 2008; Kumar, 2013). Her bir kromozom bir dizideki konumu temsil eder (Kumar, 2013). Örneğin bir kromozom şu şekilde ifade edilebilir: Kromozom 1: 231456789, 9 şehir ziyaret edilecekse ziyaret edilecek şehirlerin sıralaması kromozom 1’de ifade edildiği şekildedir.
- **Değer Kodlama (Value Encoding):** Her kromozom bir değerler dizisidir ve değerler soruna bağlı herhangi bir şey olabilmektedir (Kumar, 2013). Değerler tamsayı, gerçek sayı, karakter veya herhangi bir nesne olabilir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Örneğin bir kromozom şu şekilde ifade edilebilir: Kromozom 1: 2.331 5.456 6.898, Kromozom 2: AABB CCDD EDCE.
- **Ağaç Kodlama (Tree Encoding):** Bu kodlama türü, temel olarak genetik programlama için programları veya ifadeleri geliştirmek için kullanılır (Kumar, 2013). Her kromozom, bir programlama dilinin işlevleri ve komutları gibi bazı nesnelerin bir ağacıdır (Sivanandam ve Deepa, 2008).

Çalışma kapsamında sıralama problemleri açısından kullanışlı olması sebebiyle permütasyon kodlama türü seçilmiştir.

3.5.4.2.2. Başlangıç Popülasyonun Oluşturulması

GA’da çözüme başlayabilmek için başlangıç popülasyonun oluşturulması gerekmektedir. Başlangıç popülasyonun nasıl oluşturulacağı GA için önemli bir karardır. Bir popülasyon, test edilen birkaç kişiden, bireyleri tanımlayan fenotip parametrelerinden ve arama uzayıyla ilgili bazı bilgilerden oluşmaktadır (Sivanandam ve Deepa, 2008). Başlangıç popülasyonun, arama alanının tamamı kapsanacak şekilde oluşturulması gerekmektedir (Carter, 2003). Genellikle başlangıç popülasyonu rassal olarak belirlenmekle birlikte sezgisel tekniklerde başlangıç popülasyonun oluşturulmasında kullanılabilmektedir (Sivanandam ve Deepa, 2008; Dosdoğru, Göçken ve Geyik, 2015).

Popülasyonla ilgili bir diğer konu popülasyon büyüklüğünün belirlenmesidir. Popülasyon boyutu ne kadar büyükse, başlangıç popülasyonunun en uygun çözümü temsil eden bir kromozom içermesi o kadar artmaktadır (Rylander ve Gotshall, 2002). Popülasyonun büyük olması önemli bir avantajken diğer taraftan işlem süresinin

uzamasına ve daha fazla hafızaya gereksinim duyulmasına sebep olmaktadır (Sivanandam ve Deepa, 2008). Ancak başlangıç popülasyonunu küçük olması da algoritmanın kısa sürede yakınsamasına sebep olmaktadır (Arabas, Michalewicz, Mulawka, 1994).

3.5.4.2.3. Uygunluk Değerlerinin Hesaplanması

Bir jenerasyonu oluşturduktan sonraki ilk adım popülasyon üyelerinin uygunluk değerlerini hesaplamaktır, maksimizasyon problemleri için bir kromozomun uygunluk değeri genellikle amaç fonksiyonu değerine eşittir (Jang vd., 1997). GA'da uygunluk değerinin negatif olmaması gerektiğinden (Jang vd., 1997), minimizasyon problemlerinde uygunluk değeri amaç fonksiyonunun tersi şeklinde (Taşkın ve Emel, 2009) veya sistem uygunluk değeri düşük olan bireyleri daha iyi kabul edecek şekilde uyarlanarak hesaplanmaktadır (Sivanandam ve Deepa, 2008).

3.5.4.2.4. Genetik Algoritma Operatörleri

GA operatörleri, popülasyon içinde yer alan bireyler üzerinde yapılan işlemlerdir. Bu operatörlerin amacı uygunluk fonksiyonu değerini arttıran daha iyi nesiller meydana getirebilmektir. Literatürde genel olarak kullanılan GA operatörleri şunlardır:

- Seçim (Selection),
- Çaprazlama (Crossover),
- Mutasyon (Mutation) operatörleridir.

Aşağıda sırasıyla bu operatörler açıklanmıştır.

3.5.4.2.4.1. Seçim

GA'da seçim işlemi, hangi ebeveynlerin gelecek nesil için yavru üretmeye katılacağını belirleme işlemidir (Jang vd., 1997). Amaç gelecek nesilde uygunluk değeri daha yüksek bireyleri oluşturmak için başlangıç popülasyonundan uygunluk değeri yüksek olan bireylerin (kromozomların) seçilmesidir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Bu sebeple bir bireyin uygunluk fonksiyonu değeri ne kadar yüksekse seçilme olasılığı da o kadar yüksek olacaktır (Sivanandam ve Deepa, 2008). En iyi kromozomu seçmek ve bir sonraki nesle aktarımını sağlamak için farklı yöntemler vardır (Abbasi, Rafiee,

Khosravi, Jolfaei, Menon ve Koushyar, 2020). Aşağıda bu yöntemlerden bazıları açıklanmıştır.

- **Rulet Tekeri Seçimi (Roulette Wheel Selection):** Belirli bir popülasyon üyesini, uygunluğunun popülasyonun toplam uygunluğuna bölünmesine eşit bir olasılıkla ebeveyn olarak seçen yöntemdir (Haupt ve Haupt, 2004). Bu yöntemde her birey rulet çarkının bir dilimine atanır, dilimin büyüklüğü uygunluk değeriyle orantılıdır, çark N kez döndürülür (N popülasyondaki birey sayısı), her dönüşte, tekerleğin işaretinin altındaki birey, gelecek nesil için ebeveyn havuzunda olacak şekilde seçilir (Sivanandam ve Deepa, 2008).
- **Rassal Seçim (Random Selection):** Popülasyondan rasgele bir ebeveyn seçilmesi şeklindedir (Sivanandam ve Deepa, 2008).
- **Sıralama Seçimi (Rank Selection):** Bu yöntemde kromozomlar uygunluk değerlerine göre en düşükten en yükseğe doğru sıralanır, bireye popülasyondaki sıralamasına göre yeni bir uygunluk değeri verilir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Seçim bu yeni uygunluk değeri üzerinden yapılır (Yaktubay, 2018). Sıralama seçim yöntemi yavaş yakınsamaya neden olur, ancak çok hızlı yakınsamayı önler ayrıca çeşitliliği korur ve dolayısıyla başarılı bir aramayı sağlar (Sivanandam ve Deepa, 2008).
- **Turnuva Seçimi (Tournament Selection):** Turnuva seçimi, S turnuva büyüklüğü olmak üzere, S rakip arasında bir turnuva düzenleyerek seçim baskısı sağlar (Miller ve Goldberg, 1995). Turnuvanın galibi, S turnuva yarışmacısı arasında en yüksek uygunluk değerine sahip olan bireydir ve kazanan eşleşme havuzuna eklenir (Miller ve Goldberg, 1995). Turnuva eşleşme havuzu dolana kadar tekrarlanır (Sivanandam ve Deepa, 2008). Turnuva kazananlarından oluşan eşleşme havuzu, ortalama popülasyon uygunluğundan daha yüksek bir ortalama uygunluğa sahiptir (Miller ve Goldberg, 1995). Büyük popülasyonlar için sıralama işleminin zaman alması sebebiyle en iyi sonucu veren bir yöntemdir (Haupt ve Haupt, 2004).
- **Elitizm (Elitist):** Her neslin en iyi çözümünün bir sonraki nesle aktarılmasını sağlayan operatördür (Carter, 2003; Haupt ve Haupt, 2004). Her nesildeki en iyi bireyler eşleşme için seçilmezlerse veya çaprazlama-mutasyon operatörleri tarafından yok edilirse kaybedilebilirler, bunu engellemek için elitizm

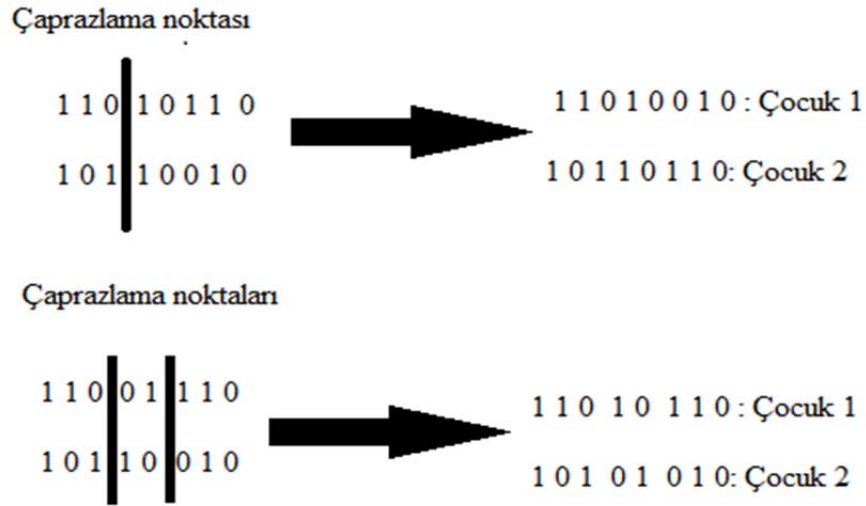
operatörü kullanılmaktadır (Sivanandam ve Deepa, 2008). Elitizm GA'nın performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir (Sivanandam ve Deepa, 2008).

3.5.4.2.4.2. Çaprazlama

Çaprazlama süreci daha iyi çözümler elde etmek amacıyla iki ebeveynin çözüm havuzundan alınarak bir çocuk üretilmesi sürecidir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Bu operatör eşleşme sürecinden (eşleşmiş kromozomlar arasında bilgi alışverişi) ve ayrıca GA'nın yakınsama hızından sorumludur (Abbasi vd., 2020). Öncelikle eşleşme için iki ebeveyn rastgele seçilir, kromozom uzunluğu boyunca çaprazlama noktası belirlenir, üretilcek olan çocuklar ebeveynlerin çaprazlama noktasından itibaren genlerinin değiştirilmesiyle elde edilir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Çaprazlama, seçilen bir çift ebeveyne çaprazlama oranı olarak verilen bir olasılık dâhilinde uygulanır (Jang vd., 1997). Pc adı verilen çaprazlama oranı genellikle 0,6 ile 0,9 arasında değerler almaktadır (Abbasi vd., 2020). Çaprazlama yapılmadığı durumlarda çocuklar ebeveynlerin aynısı olacaktır (Sivanandam ve Deepa, 2008). Çaprazlama yalnızca bir noktada yapılabileceği gibi farklı noktalarda da yapılabilir. Literatürde kullanılan çaprazlama türlerinden bazıları şu şekildedir:

- **Tek Noktalı Çaprazlama (Single Point Crossover):** Tek bir çaprazlama noktası genetik kod üzerinde rastgele seçilir ve iki ebeveyn kromozomları bu noktadan itibaren değiştirilir (Jang vd., 1997).
- **İki Noktalı Çaprazlama (Two Point Crossover):** İki çaprazlama noktası seçilir, kromozom dizilerinin bu iki nokta arasındaki kısmı iki çocuk oluşturmak için değiştirilir (Jang vd., 1997).
- **Uniform Çaprazlama (Uniform Crossover):** Yavrudaki her gen, kromozomlarla aynı uzunluktaki rastgele oluşturulmuş ikili çaprazlama maskesine göre seçilen bir veya diğer ebeveynden karşılık gelen genin kopyalanmasıyla oluşturulur. Bunun için çaprazlama maskesi oluşturulur. (Sivanandam ve Deepa, 2008). Çaprazlama maskesinde yer alan 1 değeri genin 1. ebeveynden, 0 değeri genin 2. ebeveynden geleceği anlamına gelir ve yavrular bu şekilde oluşturulur (Sivanandam ve Deepa, 2008).

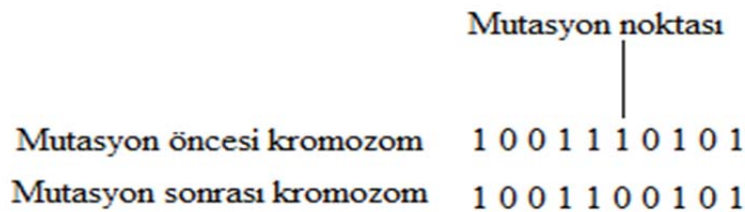
Şekil 4'te tek noktalı ve iki noktalı çaprazlamaya ilişkin örneklere yer verilmiştir.



Şekil 4. Tek noktalı ve iki noktalı çaprazlama

3.5.4.2.4.3. Mutasyon

Mutasyon operatörü bir kromozomdaki genlerin değerlerini rastgele değiştiren (Haupt ve Haupt, 2004), yeni bilgi oluşturulmasından sorumlu bir diğer operatördür (Abbasi vd, 2020). Çaprazlama tamamlandıktan sonra bir yavru genomunda yapılan rastgele bir değişikliktir (Carter, 2003). Pm olarak ifade edilen mutasyon oranı kromozomun parçalarının ne sıklıkla mutasyona uğrayacağını belirlemektedir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Genel olarak mutasyon oranı kromozom uzunluğu L olan bir popülasyon için, $1/L$ olarak alınmaktadır (Sivanandam ve Deepa, 2008). Mutasyon oranı iyi kromozomların kaybolmaması için düşük tutulmaktadır, eğer bu oran yüksek olursa (0,1'in üzerinde) GA rassal aramaya dönüşecektir (Jang vd., 1997). GA'da mutasyon erken yakınsamanın önlenmesi için gereklidir (de Araujo Lima ve de Araújo, 2020), yerel minimuma takılmayı engeller ve popülasyondaki çeşitliliği sağlar (Sivanandam ve Deepa, 2008). İkili kodlanmış bir kromozomdaki mutasyon şu şekilde gösterilebilir (Şekil 5):



Şekil 5. Mutasyon örneği

Literatürde kullanılan mutasyon türlerinden bazıları şu şekildedir:

- **Tersine Çevirme (Inversion):** Bir kromozomda iki kesme noktası belirlenir ve bu iki nokta arasındaki tüm genlerin sırası tersine çevrilerek mutasyon gerçekleştirilir (Haupt ve Haupt, 2004).
- **Takas Mutasyonu (Interchanging):** Kromozom üzerinde iki konum rasgele seçilir ve bu konumlara karşılık gelen genler birbirleriyle değiştirilir (Sivanandam ve Deepa, 2008).
- **Ekleme (Insertion):** Bir kromozom üzerinde rasgele bir gen seçilir, gen kromozomdan çıkarılır ve rasgele seçilen bir yere eklenerek mutasyon gerçekleştirilir (Larranaga, Kuijpers, Murga, Inza ve Dizdarevic, 1999).

3.5.4.2.4.4. Değiştirme

GA'da popülasyon büyüklüğünün sabit olması sebebiyle, yavruların üretimi tamamlandıktan sonra yeni popülasyonda kimlerin yer alacağına karar verilmesi gerekmektedir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Değiştirme olarak tanımlanan bu adım yavru popülasyonu ile ebeveyn popülasyonu ile popülasyonunun boyutu aynı kalacak şekilde birleştirilmesi sürecidir (Carter, 2003).

Farklı yaklaşımlar olmakla birlikte, sık kullanılan yaklaşımlardan biri üretilen yavru kromozomlarıyla ebeveyn popülasyondaki bireylerin tamamen değiştirilmesidir (Carter, 2003).

Bir diğer yaklaşım kararlı durum değiştirme stratejisidir, bu stratejide bir önceki stratejinin aksine yeni bireyler üretildikleri anda popülasyona dâhil edilirler (Sivanandam ve Deepa, 2008). Ancak popülasyon boyutu sabit olduğundan yeni bireylerin eklenebilmesi için mevcut popülasyonda yer alan bireylerin bazılarıyla yer değiştirmeleri gerekmektedir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Yer değiştirecek bireyler ebeveyn popülasyonunda yer alan en kötü bireyler olabilir ancak bu durum düşük performansa ve hızlı bir şekilde genetik çeşitliliğin kaybolmasına sebep olacaktır (Carter, 2003). Genellikle kararlı durum değiştirme stratejisinde, turnuva değişimi adı verilen bir teknik kullanılmaktadır (Sivanandam ve Deepa, 2008). Turnuva değişikliği, daha az iyi olan çözümlerin iyi olanlardan daha sık seçilmesi dışında, turnuva seçimine tamamen benzer (Sivanandam ve Deepa, 2008). Her yavru popülasyondaki bir yer için ebeveyn popülasyonundan bir ya da daha fazla bireyle rekabet etmek zorunda kalır ve turnuvanın kaybedenleri popülasyondan silinir (Carter, 2003).

3.6. Önceki Çalışmalar

Tez çalışmasının bu bölümünde elektrikli araç rotalama, şarj istasyonu yer seçimi ve her iki konuyu birlikte ele alan elektrikli araç yer seçimi-rotalama problemiyle ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalara yer verilmiştir.

3.6.1. Elektrikli Araç Rotalama Problemi İle İlgili Çalışmalar

Keskin, Laporte ve Çatay (2019) tarafından yapılan çalışmada Zaman Pencereci Elektrikli Araç Rotalama Problemi (ZP-EARP) şarj istasyonlarında kuyruk olma durumu baz alınarak, istasyonda zamana bağlı kuyruk süreleri dahil edilerek ele alınmıştır. Problemde müşterilere ve depoya geç gelmeye izin verilmiş ancak geç gelme süreleri ceza maliyeti olarak ele alınmıştır. Problemde araç maliyetleri, sürücü maliyetleri, enerji maliyetleri ve geç kalmalardan kaynaklı ceza maliyetlerinin minimizasyonu amaçlanmıştır. Problem, karma tamsayılı lineer programlama modeli olarak tanımlanmış, küçük boyutlu örnekler için CPLEX kullanılarak çözülmüş, büyük boyutlu örnekler için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Algoritması (Adaptive Large Neighborhood Search) ve karma tamsayılı lineer programlama modeli çözümünün kombinasyonundan oluşan bir mat-sezgisel (matematiksel modelleme ve sezgiselleri birleştiren yöntem) geliştirilmiştir. Genişletilmiş deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek şarj istasyonlarında kuyruğun rota kararları üzerindeki etkisi araştırılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde istasyonda beklemenin (problemin tipine ve kuyruk uzunluğuna bağlı olarak değişmekle birlikte) toplam maliyeti %1-%26 oranında arttırabileceği ortaya çıkmıştır. Zaman bağlı bekleme sürelerinden dolayı şarj işlemlerinin gündüz saatlerinin ortasında daha az kalabalık olma eğiliminde olduğu görülmüştür.

Hiermann, Hartl, Puchinger ve Vidal (2019) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP, içten yanmalı motorlu araç, Plug-in hibrit ve elektrikli araçlardan oluşan heterojen filo için ele alınmıştır. Problem çözümü için Genetik Algoritma, Yerel Komşuluk Arama (Local Neighborhood Search) ve Büyük Komşuluk Arama (Large Neighborhood Search) metasezgisellerinin kombinasyonundan oluşan bir metasezgisel kullanılmıştır. Önerilen model literatürde mevcut çalışmaların sonuçlarıyla da kıyaslanmıştır. Dikkatli kullanımda heterojen araç filosu kullanımının homojen araç filosu kullanım maliyetlerine nazaran operasyonel maliyetleri önemli derecede azalttığı ortaya çıkmıştır.

Goeke (2019) tarafından yapılan çalışmada, Zaman Pencereleli Topla-Dağıt EARP kısmi şarj seçeneği ile ele alınmıştır. Aracın rota sırasında şarj edilmesi gereken miktarı belirlemek amacıyla Tanecikli Tabu Arama Algoritması (Granular Tabu Search Algorithm) geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın küçük boyutlu örnekler için (100 lokasyona kadar) çalışma süresi ve çözüm kalitesi açısından literatürdeki en iyi beş yöntemle karşılaştırıldığında mükemmel bir performansa sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Büyük ölçekli örneklerde, kısmi şarja izin vermenin, gerekli olan araç sayısını ve kat edilen seyahat mesafesini azalttığı ortaya çıkarılmıştır.

Rezgui, Siala, Aggoune-Mtalaa ve Bouziri (2019) tarafından yapılan çalışmada, heterojen elektrikli modüler araçların kullandığı araç rotalama problemi ele alınmıştır. Elektrikli modüler araçlar, sürücünün oturduğu bir kabin modülüne bağlı, yük için birkaç yük modülünden oluşmaktadır, her modülün kendi pili vardır ve şarj ve tüketim açısından özektir. Araçların müşteride şarj edilmesine izin verilmiş ancak şarj süresinin müşteri servis süresini aşması halinde ceza durumu söz konusu olmuştur. Çalışmada, araç satın alma maliyeti, seyahat maliyeti ve şarj maliyetinin minimizasyonu amaçlanmıştır. Problem karma tamsayılı liner programlama modeli olarak modellenmiş, problemin NP-hard olması sebebiyle çözümünde Değişken Komşuluk Arama Sezgiseli (Variable Neighborhood Search Heuristic) kullanılmıştır. Kıyaslama örnekleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar önerilen sezgiselin literatürün en iyi çözüme yaklaşımlarına kıyasla iyi performans gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.

Basso, Kulcsár, Egardt, Lindroth ve Diaz-Sanchez (2019) tarafından yapılan çalışmada, araç hız profilleri ve yolların detaylı topografyaları göz önünde bulundurularak, şehir içi dağıtımda, enerji tüketimini iyileştiren İki Aşamalı EARP ele alınmıştır. Problemden enerji tüketiminin minimizasyonu amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen modelin zaman ve enerji tüketimi tahminlerinin mevcut yöntemlere kıyasla çok daha iyi olduğunu göstermiştir.

Macrina, Laporte, Guerriero ve Pugliese (2019) tarafından yapılan çalışmada, enerji verimliliği göz önünde bulundurularak içten yanmalı motorlu araçlardan ve elektrikli araçlardan oluşan heterojen filo için ZP-EARP ele alınmıştır. Problemden şarj istasyonlarında kısmi şarj imkânı tanınmış, enerji tüketimini etkileyen hız, ivmelenme, yavaşlama, araç yükü ve yolun eğim açısı modelde ele alınmıştır. Problemin çözümü için Büyük Komşuluk Arama (Large Neighborhood Search) temeline dayalı mat-sezgisel kullanılmış, küçük boyutlu örnek için problem CPLEX kullanılarak çözülmüştür.

Pelletier, Jabali ve Laporte (2019) tarafından yapılan çalışmada, EARP enerji tüketiminin belirsizliği durumu için ele alınmıştır. Çalışmada aracın rotada iken şarjının tükenmeyeceğine ilişkin güçlü garantiler sunan minimum maliyetli rotaların belirlenmesi amaçlanmıştır. Problem robast karma tamsayılı lineer programlama modeli olarak modellenmiş, robast optimizasyon teknikleri kullanılarak küçük boyutlu örnekler için çözülmüştür. Büyük boyutlu örnekler için Büyük Komşuluk Arama (Large Neighborhood Search) sezgiseline dayalı iki aşamalı sezgisel kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda maliyet ve risk arasında ödünleşim olduğu ortaya çıkmış, ayrıca önerilen model robast araç rotalama problemlerine ilişkin örnekler üzerinde test edildiğinde 42 yeni en iyi çözüm elde edilmiştir.

Zuo, Xiao, You, Kaku ve Xu (2019) tarafından yapılan çalışmada, EARP için yeni bir formülasyon geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde çoğaltılmış kukla düğümlerin ve arkların kullanımını azaltılarak mevcut rotalama formülasyonunun karmaşıklığı azaltılmıştır. Ayrıca non-lineer şarj fonksiyonunun doğrusallaştırılması için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Şarj süresi sürekli bir değişken olarak ele alınmış ve literatürdeki mevcut modellere kıyasla daha az değişken kullanılmıştır. Model karma tamsayılı lineer programlama modeli olarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde mevcut rotalama modellerine kıyasla önerilen modelin daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkarılmıştır.

Xiao, Zuo, Kaku, Zhou ve Pan (2019) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP, elektrikli aracın birim mesafe başına enerji/ elektrik tüketim oranı, aracın yükü ve hızının bir fonksiyonu olarak ele alınarak incelenmiştir. Çalışmada elektrikli aracın maksimum menzili rotadaki hızlarına ve yüklerine göre dinamik olarak tahmin edilmektedir. Problem karma tamsayılı lineer programlama modeli olarak modellenmiştir. Elektrikli aracın hızı sürekli karar değişkeni olarak ele alınmış ve batarya kapasitesi sabit mesafe yerine menzil kısıtlayıcısı olarak ele alınmıştır. İki doğrusallaştırma yöntemi kullanılmış, önerilen modelin verimliliğini ve etkinliğini test etmek amacıyla literatürde mevcut veri setleri kullanılarak hesaplama deneyleri yapılmıştır. Önerilen karma tamsayılı lineer programlama modelinin 25 müşteriye kadar CPLEX programı ile çözülebileceği, 100 müşteriye kadar olan örnek için sezgisel kullanılarak çözülebildiği ve her iki yaklaşımda da optimum sonuçlar verdiği görülmüştür.

Cortés-Murcia, Prodhon ve Afsar (2019) tarafından yapılan çalışmada, EARP ele alınmıştır. Ancak klasik rotalama problemlerinden farklı olarak araçların şarj

istasyonunda şarj işlemi için geçirdikleri sürede alternatif taşıma modu kullanılarak diğer müşterilere ürün teslimatı yapıldığı durum ele alınmıştır. Problemin çözümünde İteratif Yerel Arama (Iterated Local Search) metasezgiseli kullanılmış, algoritma Değişken Komşu İniş Algoritması (Variable Neighborhood Descent) ve Küme Bölme (Set-Partitioning) ile kuvvetlendirilmiştir. Şarj istasyonunda geçirilen sürenin minimizasyonun amaçlandığı problemde, aracın şarj edildiği sürede alternatif mod kullanılarak teslimat işleminin yapılmasının toplam şarj etme süresini ve rota içinde şarj işlemi süresinde boşa kalınan zamanı azalttığını gösterilmiştir.

Rastani, Yüksel ve Çatay (2019) tarafından yapılan çalışmada, ortam sıcaklığının elektrikli araçlarda rota planını nasıl etkilediği konusu ele alınmıştır. Çalışmada son kilometre teslim operasyonlarında ortam sıcaklığının filonun büyüklüğünü, enerji tüketimini ve rota belirleme kararı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Problem için önerilen karma tamsayılı programlama modeli küçük boyutlu örnekler için CPLEX kullanılarak, büyük boyutlu örnekler için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Algoritması (Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm) kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar operasyon verimliliği için ortam sıcaklığının göz önünde bulundurulması gereken bir kriter olduğunu göstermiştir.

Jie, Yang, Zhang ve Huang (2019) tarafından yapılan çalışmada, iki kademeli tedarik zinciri için Kapasite Kısıtlı EARP, batarya değiştirme istasyonlarını içerecek şekilde ele alınmıştır. Bu problem için sistem şu şekilde tanımlanmıştır: bir depoda bulunan yükler, uydu adı verilen aktarma istasyonlarına büyük elektrikli araçlarla taşınmakta, daha sonra küçük elektrikli araçlar kullanılarak uydulardaki yükün müşterilere teslimatı sağlanmaktadır. Farklı sürüş mesafesine sahip olan farklı kademelerde çalışan elektrikli araçlar bataryaları bitmeden batarya değiştirme istasyonlarına uğramaktadırlar. Problemde yükleme kapasitelerinin sınırlandırılması dikkate alınarak uyduların ve bu uydulara taşınan sevkiyatların optimizasyonu, her kademede uyduların veya müşterilerin elektrikli araçlara dağılımı, yeterli enerji ile teslimatı gerçekleştirmek için batarya değiştirme istasyonlarını ziyaret ederek her iki kademedeki elektrikli araçların güzergâhlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada heterojen araç filosu farklı kademelerde kullanılmıştır. Problemin çözümü için Sütun Oluşturma (Column Generation) ve Uyarlamalı Büyük Komşuluk Arama Algoritması'nı (Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm) (CG-ALNS) birleştiren bir tam sayılı programlama formülasyonu ve bir karma algoritma geliştirilmiştir. Kapsamlı hesaplama

deneyleri yapılarak önerilen modelin uygulanabilirliği ve geliştirilen algoritmanın etkinliği ortaya çıkarılmıştır.

Froger, Mendoza, Jabali ve Laporte (2019) tarafından yapılan çalışmada EARP için geliştirilen karma tamsayılı doğrusal modelleme formülasyonu, yeni geliştirilen doğrusal olmayan şarj fonksiyonunu içeren modeller ile karşılaştırılmıştır. Model, Montoya vd. (2017) tarafından geliştirilen, düğüme dayalı değişkenlerin (node-based variables) kullanılmasıyla her bir rotadaki sürenin ve elektrikli araçtaki şarj seviyesinin izlenmesi sağlayan formülasyonun, arklara dayalı değişkenlerin (arc-based variables) kullanılması önerilerek geliştirilmiştir. Hesaplamalı deneyler, bu alternatif izleme stratejisinin sonuçları büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir.

Mavrovouniotis, Ellinas ve Polycarpou (2018), tarafından yapılan çalışmada, EARP ele alınmış, problem Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization) yöntemi ile çözülmüştür. Problem karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak kurulmuştur. Çalışmada, toplam seyahat süresinin (sürüş süresi, şarj süresi, şarj istasyonunda şarj için bekleme süresi) minimizasyonu amaçlanmıştır. Aracın enerji tüketiminin mesafe ile doğru orantılı olmadığı, enerji tüketiminin aracın hızı, yük miktarı gibi durumlardan etkilendiği durum ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Karınca Kolonisi Optimizasyonu'nun (Ant Colony Optimization) elektrikli araç filosu için enerji açısından uygun rotalar çıkarabileceğini göstermiştir.

Zuo, Xiao, Zhu ve You (2018) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş, elektrikli aracın doğrusal şarj edildiği kabul edilmiştir. Çalışmada rotalama problemine yeni değişkenler eklenmiştir. Şarj istasyonu seçimi için, araçların planlanan turlarına şarj istasyonları yerleştirmenin en uygun yollarını belirleyen yeni bir değişken eklenmiştir. Aynı zamanda, dağıtım faaliyetlerinin zamanında gerçekleştirilirken, turu bitirmek için uygun bir şarj süresi ayarlayabilen şarj süresi hakkında yeni bir değişken ortaya konmuştur. Ortaya konulan model müşteri düğümünün talebi ile elektrikli aracın kapasitesi, ziyaret sırası ve zaman gereksinimi arasındaki ilişki hakkındaki kısıtlamaları sunmaktadır. Modelin çözümü için Solomon'un geliştirmiş olduğu veri seti kullanılmış, bazı müşteri düğümleri elektrikli araçlar için yeterli gücü sağlayabilecek şarj istasyonlarına dönüştürülmüş, model AMPL/CPLEX ortamında yapılan hesaplama deneyleriyle doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen modelin ZP-EARP modelinin uygulanabilirliğini daha da doğrulayan, en uygun çözümü bulabileceğini ve mevcut

elektrikli araçların en düşük lojistik maliyetle maksimum kullanımını sağlamak için sürüş rotalarını daha iyi programlayabileceğini ortaya çıkarmıştır.

Zhang, Gajpal, Appadoo ve Abdulkader (2018) tarafından yapılan çalışmada, EARP ele alınmış, enerji tüketiminin minimizasyonu amaçlanmıştır. Problemin çözümü için metasezgisel tekniklerden biri olan Karınca Kolonisi Algoritması (Ant Colony Algorithm) kullanılmıştır. Önerilen algoritmaların etkinliği, yeni oluşturulan örnekler üzerinde kapsamlı sayısal deneylerle değerlendirilmiş, elektrikli araçların rotalarının belirlenmesi için mesafeyi minimize eden bir amaç fonksiyonu yerine, enerji tüketimini minimize eden amaç fonksiyonu kullanmanın faydaları ortaya çıkarılmıştır.

Verma (2018) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP ele alınmıştır. Klasik problemlerden farklı olarak şarj istasyonlarında araçların normal şarj edilmesine imkân veren şarj cihazlarının ve batarya değiştirme seçeneklerinin bir arada olduğu istasyonlar probleme dâhil edilmiştir. Model karma tamsayılı programlama modeli olarak geliştirilmiştir. Problemde; araç maliyeti, taşıma maliyeti, şarj maliyeti, batarya değiştirme maliyeti, zaman penceresi ihlali durumunda meydana gelecek ceza maliyetinin minimizasyonu amaçlanmıştır. Kısıtlı sürede yüksek kalitede çözümler üretebilmek için Genetik Algoritma ile birleştirilmiş Yerel Arama Sezgiseli'ni (Local Search Heuristic) içeren sezgisel geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bir şarj istasyonundaki ilave batarya değiştirme seçeneğinin daha iyi teslimat rotalarının belirlenmesine ve batarya değiştirme zamanının ve batarya değiştirme maliyetinin nispeten düşük olduğu durumlarda toplam maliyetleri azalttığını göstermektedir.

Keskin ve Çatay (2018) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP, üç şarj türü için (normal, hızlı, süper hızlı) ve parçalı (kısmi) şarj baz alınarak modellenmiştir. Çalışmada amaç, toplam şarj maliyetinin ve elektrikli araç sayısının minimizasyonudur. Problem karma tamsayılı doğrusal modelleme ile modellenmiş ve küçük boyutlu örnekler için CPLEX kullanılarak çözülmüştür. Büyük boyutlu problemler için mat-sezgisel yöntem kullanılmıştır. Hızlı şarjın faydalarını araştırmak ve geliştirilen algoritmayı test etmek amacıyla literatürdeki örnekler kullanılmıştır. Sonuçlar geliştirilen algoritmanın etkinliğini gösterirken, hızlı şarjın filo büyüklüğünde ve enerji maliyetlerinde avantaj sağladığı ortaya çıkarılmıştır.

Chen, Zhang, Pourbabak, Kavousi-Fard ve Su (2018) tarafından yapılan çalışmada enerji verimliliği ve şarj fiyatı dikkate alınarak, bir elektrikli araç filosunun yüksek verimli dinamik transit sistemleri için en uygun şekilde rotalarının belirlenmesi ve şarj edilmesi için matematiksel model oluşturulmuştur. Genişletilmiş

toplama/dağıtım problemi temel alınarak model karma tamsayılı karesel kısıtlı programlama problemi (mixed-integer quadratically constrained programming problem) olarak kurulmuştur. Model oldukça küçük şehir bölgelerinde ekonomik açıdan verimli, küçük bataryalı elektrikli araç filosu üzerinde uygulanmıştır. Problemden enerji verimliliğini en üst seviyeye çıkarırken (örneğin yakıtı ve şarj maliyetini düşürerek), tüm yolcuların refahını (örneğin, seyahat süresi ve yolcuların seyahat mesafesini) sağlamak için, yerel/küresel kısıtlamalar dikkate alınarak (örneğin, şarj istasyonunun mevcudiyeti ve akünün şarj durumu dinamikleri) her elektrikli araç için başlangıç noktasından nihai varış noktasına en iyi rotayı belirlemek amaçlanmıştır. Model GUROBI çözücü ile MATLAB ortamında çözülmüştür. Optimum gezi öncesi karar vermeye dayalı olarak seyahat mesafesi veya elektrikli araç şarj ücretlerinin ürettiği maliyeti makul derecede azaltılabileceği ortaya çıkarılmıştır. Önerilen model çok kentleşmiş şehirlerdeki ilk sermaye yatırımı azaltmak için yaygın elektrikli araç şarj altyapısından faydalanma olasılığını ve bunun güç sistemleri ile potansiyel etkileşiminin olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Aksoy, Yalçın, Küçükkoğlu ve Öztürk (2018) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli kamyonlar için Açık Uçlu EARP ele alınmış, üç problem matematiksel olarak modellenmiştir. İlk problem elektrikli kamyonun aldığı toplam yolun minimizasyonu üzerine, ikinci problem kullanılacak elektrikli kamyon sayısının minimizasyonu üzerine, üçüncü problem elektrikli kamyonların harcadığı toplam enerjinin minimizasyonu üzerine kurulmuştur. 15 adet küçük boyutlu problem için veri üretilmiş ve modeller bu veri setleri üzerinde denenerek sonuçlar bulunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde modelin küçük boyutlu gerçek hayat problemlerinde kısa sürede çözüm vermesi sebebiyle kullanılabileceği ortaya çıkarılmıştır.

Koç ve Özceylan (2018) tarafından Yeşil Araç Rotalama ve EARP üzerine literatür taraması yapmış ve yeni çalışma alanlarını tespit edilmiştir. Geliştirilen EARP'lerinin deterministik yapıda olduğu, araç hızları gibi stokastik veriler üzerine yapılan çalışmaların eksik olduğu belirtilmiştir. Çok sayıda işletmenin, ortak şarj istasyonu kurmaları durumunda şarj istasyonlarının kapasite kısıtından dolayı şarj çizelgelemesinin nasıl yapılacağı, bu durumun problem çözüm yöntemlerini nasıl etkileyeceği, çok sayıda depo ve depolara ait müşterilerin olmasının, araç filosunun homojen veya heterojen olmasının problem çözümünü ve çözüm yöntemlerini nasıl etkileyeceği gibi konularda çalışmalar yapılması önerilmiştir.

Bruglieri, Mancini, Pezzella, Pisacane ve Suraci (2017) tarafından yapılan çalışmada, hiyerarşik amaç fonksiyonları belirlenmiş, ilk amaç fonksiyonunda kullanılan elektrikli araç sayısının minimize edilmesi, ikinci amaç fonksiyonunda toplam zamanın (seyahat süreleri, şarj süreleri ve müşteri zaman penceresinden kaynaklı bekleme süreleri) minimize edilmesi amaçlanmıştır. Üç aşamalı mat-sezgisel kullanılarak problem çözülmüştür.

Schiffer, Laporte, Schneider ve Walther (2017) tarafından ZP-EARP sürücü çizelgeleme problemiyle birlikte ele alınmıştır. Problemde Avrupa ülkelerinde ve Amerika'daki uzun yol sürücülerin araç kullanma sürelerine ilişkin düzenlemeler baz alınarak sürücülerin araç kullanma sürelerinin ortalama üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Problem karma tamsayılı programlama modeli olarak modellenmiş, büyük boyutlu problemlerin çözümü için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Sezgiseli (Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic) kullanılmıştır. Sürücülerin uzun yolda araç kullanma sürelerine ilişkin yapılan düzenlemelerin hem elektrikli araçların hem de içten yanmalı motorlu araçların rekabet gücünü etkilediği, maliyet tasarrufu amacıyla içten yanmalı motorlu araçlar yerine elektrikli araçlar kullanıldığı takdirde % 20 oranında tasarruf yapılabileceği ortaya çıkmıştır.

Zhenfeng, Yang, Xiaodan ve Sheng (2017) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP ele alınmıştır. Sürüş maliyetleri ve zaman pencerelerinin ihlali için ceza maliyeti, en uygun rotaların belirlenmesinde amaç fonksiyonunda yer almıştır. Müşteri düğümlerinde enerji tüketimi olmadığı kabul edilmiştir. Tek depodan dağıtım yapıldığı, aracın şarj istasyonunda şarj edildiği kabul edilmiş, aracın müşteriye erken varması durumunda bekleme süresi de modellemede dikkate alınmıştır. Modelin çözümü için Genetik Algoritma kullanılmış, tekniğin ZP-EARP'ini çözmek için robast bir yöntem olduğu ortaya çıkarılmıştır. Yapılan deneyler, geliştirilen modelin elektrikli araç teslimatının özelliklerini yakaladığını göstermiştir.

Zuo, Zhu, Huang ve Xiao (2017) tarafından, EARP ele alınmış, model matematiksel programlama yazılımlarından biri olan AMPL/CPLEX ile çözülmüş, veri olarak Solomon'un örnek veri seti kullanılmış ve şarj istasyonlarının koordinatları dahil edilmiştir. Tüm araçların depodan tam şarj edilmiş olarak yola çıkmasını sağlamak için depo aynı zamanda şarj istasyonu olarak da tanımlanmıştır. EARP için kesin bir çözüm yaklaşımı olarak bir programlama algoritması önerilmiştir. Çalışmada her aracın rotasına depodan başladığı, her aracın kalan gücün sürüş mesafesinin, tam şarjlı aracın en uzun mesafesine eşit olduğu şarj istasyonundan çıktığında tamamen şarj olduğu

kabul edilmiştir. Çalışmanın sonunda her aracın nihai yükünün araçlar için kapasite sınırından daha düşük olduğu ve aracın toplam yükünün aynı rota döngüsünde yer alan müşterilerin taleplerinin toplamına eşit olduğu görülmüştür.

Shao, Guan ve Bi (2017) tarafından yapılan çalışmada, şarj talebi ve enerji tüketimi problemleri dikkate alınarak EARP ele alınmıştır. Gerçekçi trafik koşulları ve elektrikli araçların özellikleri göz önünde bulundurulmuş, elektrikli araçların enerji tüketiminin aracın yük miktarından ve seyahat hızından etkilendiği kabul edilerek model geliştirilmiştir. Klasik Dijkstra Algoritması üzerinde bazı iyileştirmelere sahip Dinamik Dijkstra Algoritması güzergahlardaki komşu iki ziyaret düğümü arasındaki en verimli enerji yolu olarak adlandırılan sürüş yollarını bulmak için kullanılmıştır. Modelin performansını test etmek ve rotalardan, şarj planından ve sürüş yollarından oluşan optimum operasyon planını elde etmek amacıyla Pekin kentinin karayolu ağında 100 müşteri ve 30 şarj istasyonu ile geniş ve gerçekçi bir vaka çalışması yapılmıştır. Model rotaları ve şarj planını elde etmek için Genetik Algoritma ve Yerel Arama Algoritması'ndan (Local Search Algorithm) oluşan Hibrit Genetik Algoritma (Hybrid Genetic Algorithm) ile çözülmüştür. Sonuçlar, önerilen algoritmanın hesaplama çabası ve çözüm performansı konusunda üstün olduğunu göstermiştir.

Çatay ve Keskin (2017) tarafından ZP-EARP istasyonlarda yavaş ve hızlı şarj seçeneklerinin bulunması durumunda ele alınmıştır. Amaç toplam enerji maliyetini ve filo için gerekli olan elektrikli araç sayısının minimizasyonudur. Hızlı şarj istasyonlarının çözüm üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Problem için iki karma tamsayılı matematiksel model kurulmuş ve modeller CPLEX kullanılarak çözülmüştür. Hızlı şarjların toplam enerji maliyetini ve filodaki araç sayısını azalttığı sonucu ortaya çıkarılmıştır.

Montoya, Guéret, Mendoza ve Villegas (2017) tarafından doğrusal olmayan şarj fonksiyonunu içeren EARP ele alınmıştır. Genellikle EARP'de bataryadaki şarj seviyesinin şarj süresinin doğrusal (lineer) fonksiyonu olduğu kabul edilmektedir, ancak gerçekte durum biraz daha farklı olmaktadır. Bu sebeple literatürdeki bileşenler ve bu sorunu çözmek için özel olarak tasarlanmış bileşenleri birlikte ele alan bir hibrit metasezgisel geliştirilmiştir. Literatürde kabul edilen doğrusal şarj fonksiyonu ile doğrusal olmayan şarj fonksiyonu karşılaştırılmış, doğrusal olmayan şarjın ihmal edilmesinin mümkün olmayan ve oldukça yüksek maliyetli çözümlere yol açabileceği ortaya çıkarılmıştır.

Desaulniers, Errico, Irnich ve Schneider (2016) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP için Dal-Fiyat ve Kesme Algoritmaları geliştirilmiştir. ZP-EARP, şarj istasyonuna varıştaki şarj seviyesine bağlı olarak değişen şarj süresini, aracın kapasitesi, müşteri zaman penceresini içermektedir. Çalışmada dört farklı durum ele alınmıştır. İlk durumda aracın rota başına en fazla bir kere şarj olmasına izin verilmekte ve piller bir şarj istasyonunun ziyareti sırasında tamamen şarj edilmektedir. İkinci durumda rota başına çoklu şarja izin verilmekte ve piller şarj istasyonunun ziyareti sırasında tamamen şarj edilmektedir. Üçüncü durumda kısmi şarjının mümkün olduğu, rota başına en fazla bir kez şarja izin verildiği durum ele alınmıştır. Dördüncü durumda çok sayıda şarja ve kısmi şarjlara izin verilen durum ele alınmıştır. Her bir durum için, uygulanabilir araç rotaları oluşturmak için özelleştirilmiş tek yönlü ve çift yönlü etiketleme algoritmalarına dayanan Kesin Dal-Fiyat ve Kesme Algoritmaları geliştirilmiştir. Hem çoklu hem de kısmi şarjlara izin vermenin hem rota maliyetlerini hem de kullanılan araç sayısını, tekli ve tam şarjlı durumlara kıyasla azaltmaya yardımcı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Chen, Qi ve Miao (2016) tarafından yapılan çalışmada ZP-EARP batarya değiştirme istasyonları ile birlikte ele alınmıştır. Batarya değiştirme istasyonları elektrikli araçların menzil aralığını arttırmak için tasarlanan bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Problemde, aynı batarya tipine sahip elektrikli taşıtlardan oluşan bir filo, servis alanı içindeki tüm müşterilerin talebini, sabit bir batarya değiştirme süresi ile karşılayacağı durum ele alınmıştır. Problemde müşterilerin zaman pencereleri dikkate alınmış, toplam seyahat mesafesinin minimizasyonu amaçlanmıştır. Küçük kıyaslama problemi örnekleri genişletilmiş, model karma tamsayılı programlama ile geliştirilmiş ve GUROBI kullanılarak çözülmüştür. Batarya değiştirme ve şarj etme seçenekleri aynı parametrelerle karşılaştırılmış, batarya değiştirme modunun araç sayısını azaltabileceği sonucu elde edilmiştir.

Lin, Zhou ve Wolfson (2016) tarafından, EARP'nde seyahat süresini, şarj maliyetini ve şarj süresi için beklenen sürenin maliyetini minimize edecek matematiksel model oluşturulmuştur. Şarj istasyonlarının yerinin bilindiği ve hizmet alanları içinde olduğu kabul edilmiştir. Şarj süreleri ve araç kullanım hızı sabit olarak ele alınmıştır. Problemde tek depo ele alınmış, model araçların rotalarına depoda başlayıp depoda son bulacakları şekilde kurulmuştur. Problemde aracın yükünün ve aracın hızının enerji tüketimi üzerindeki etkisi de göz önüne alınmıştır. Problem karma tamsayılı doğrusal modeli olarak kurulmuş, gerçek veriler kullanılarak MATLAB ile çözülmüştür. Aracın yükünün rotanın tamamlanması üzerinde etkili olduğu, dizel kamyon ARP'ye kıyasla,

EARP'nin karşılaştırılabilir seyahat süresine ve mesafesine sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak bir elektrikli aracın uzun şarj edilme süresinin önemli miktarda ek işgücü maliyetine dönüştüğü tespit edilmiş, şarj istasyonlarının müşteri noktalarına göreceli olarak dağıtılmasının, yönlendirme stratejilerini büyük ölçüde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Hiermann, Puchinger, Ropke ve Hartl (2016) şarj istasyonlu ve ZP-EARP'ni elektrikli araç filosunun heterojen olduğu durumlar için ele almışlardır. Tüm araç filosu farklı boyutlardaki elektrikli araçlardan oluşmaktadır. Mevcut araç tipleri taşıma kapasitelerine, akü boyutlarına ve satın alma maliyetlerine göre farklılık göstermektedir. Problemi tanımlamak amacıyla karma tamsayılı programlama modeli oluşturulmuş ve Küme Bölme (Set-Partitioning) formülasyonu Dal-Fiyat Algoritması kullanılarak çözülmüştür. Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama (Adaptive Large Neighborhood Search) gömülü bir yoğunlaştırma mekanizmasıyla genişletilmiş ve problemi çözmek için hibrit metasezgisel teknikler kullanılmıştır. Küçük örneklerde, Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama'nın (Adaptive Large Neighborhood Search) tüm en uygun çözümleri bulabildiği ortaya çıkarılmıştır. Algoritmaların daha büyük örnekler için, ilgili problemler için yayınlanan kıyaslama örnekleri ile karşılaştırılabilir büyüklükteki sonuçları da sunulmuştur. Sezgisel çözücünün, en iyi bilinen çözüme yaklaşık yüzde biri kadar bir aralıkta çözümler bulabildiği ortaya çıkarılmıştır. En iyi bilinen çözümlerin birçoğunun Dal-Fiyat Prosedürü ile optimal olduğu kanıtlanmıştır.

Keskin ve Çatay (2016) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP gerçek hayat problemlerine biraz daha yaklaştırılmış ve şarj oranları parçalı (kısmi) olarak ele alınmıştır. Problemde araçların rota üzerinde bulunan şarj istasyonlarına uğramaları durumunda şarj işlemini %100 olacak şekilde yapmaları kısıtı gevşetilmiş, parçalı (kısmi) şarj kısıtı geliştirilmiştir. Problem 0-1 karma tamsayılı matematiksel model oluşturulmuş ve Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Algoritması (Adaptive Large Neighborhood Search) ile literatürdeki veri setleri kullanılarak model test edilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin yüksek kaliteli çözümler bulmakta etkili olduğunu ve parçalı (kısmi) şarj seçeneğinin tam şarj seçeneğine göre rotalama kararlarını önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir.

Küçükoğlu ve Öztürk (2016), heterojen filoya sahip elektrikli araçların şarj istasyonlarını da kapsayan rota optimizasyonu konusunu ele almışlardır. Karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiş, klasik araç rotalama problemlerine ek olarak elektrikli araçların şarj kapasiteleri ve araçların şarj istasyonunda şarj edilme süreleri de

modelde dikkate alınmıştır. Veri seti üzerinde yapılan çalışmada homojen filo ile heterojen filo sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuçlar heterojen filonun toplam mesafe için kullanılan araç sayısında azalış sağladığını ortaya çıkarmıştır.

Schneider, Stenger ve Goeke (2014) tarafından gerçek hayat uygulamaları düşünülerek müşteri hizmet zamanları, kısıtlı araç kapasitesi ve elektrikli araç şarj istasyonları ele alınarak ZP-EARP çözülmeye çalışılmıştır. Problemin çözümü için hibrit sezgiseller kullanılmıştır. Tabu Arama Algoritması (Tabu Search Algorithm) ve Değişken Komşuluk Arama Algoritması (Variable Neighborhood Search Algorithm) birleştirilmiştir. Çalışmada sezgisellerin performansının yüksek olduğu görülmüştür.

Yang, Yang, Xu, Cao, Lai ve Dong (2015), tarafından Gezgin Satıcı Problemi temel alınarak yapılan çalışmada, elektrik piyasasında kullanım süresi fiyatı altında (time of use price) hızlı şarj ve normal şarj dikkate alındığında yeni bir optimum elektrikli araç rotalama modeli önerilmiştir. Model, batarya kapasitesi, şarj süresi ve dağıtım/toplama talepleri ile araç yüklenmesinin mil başına birim elektrik tüketimi üzerindeki etkisi kısıtlarını karşılayarak elektrikli araç rotasının toplam dağıtım maliyetlerini minimize etmeyi amaçlamıştır. Önerilen modeli çözmek için elektrikli araç şarj istasyonu ve müşteri seçimiyle ilgili uzman bilgisinin entegrasyonu ile Öğrenilebilir Partenojen Genetik Algoritma (Learnable Partheno-Genetic Algorithm) geliştirmiştir. 36 düğüm ve 112 düğüm sistemlerinde kapsamlı bir sayısal test yapılmış, sonuçlar önerilen model ve çözüm algoritmasının uygulanabilirliğini ve etkinliğini doğrulamıştır.

Goeke ve Schneider (2015) tarafından yapılan çalışmada, içten yanmalı motorlu araçlar ve elektrikli araçlardan oluşan heterojen araç filosu ele alınmıştır. Mevcut EARP'den farklı olarak enerji tüketiminin araç seyahat süresiyle doğru orantılı olarak ele almak yerine, enerji tüketiminin araç hızı, yolun eğimi, aracın yük miktarından da etkilendiği hesaba katılarak daha gerçekçi enerji tüketim modeli geliştirilerek rotalama problemi çözülmeye çalışılmıştır. Problemin çözümü için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Algoritması (Adaptive Large Neighborhood Search) ve Yerel Arama Algoritması (Local Search Algorithm) kullanılmıştır. Yeni tasarlanan modelin test örnekleri üzerinde yapılan sayısal çalışmalarda, gerçek yük dikkate alındığında, yük tahminlerine dayanarak üretilen çözümlere kıyasla üretilen çözümlerin kalitesinin büyük ölçüde artırdığı ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, "iyimser" yük tahminleriyle üretilen çok sayıda çözümün, pil kapasitesi veya zaman penceresi ihlalleri nedeniyle gerçekte mümkün olmadığı sonucu da elde edilmiştir. Ayrıca Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Algoritması'nın (Adaptive Large Neighborhood Search) araştırılan tüm maliyet

fonksiyonlarıyla etkin bir şekilde çalıştığını ve yakıt, işçilik ve batarya amortismanı dâhil olmak üzere yönlendirme maliyetleri göz önüne alındığında, seyahat mesafesinin asgariye indirilmesi amaç fonksiyonunun yüksek kaliteli çözümler üretmediği ortaya çıkarılmıştır. Amaç fonksiyonu seçiminin elektrikli araçların filodaki kullanım düzeyi üzerinde de güçlü bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. ZP-EARP örneklerinde, Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Algoritması'nın (Adaptive Large Neighborhood Search) hem çözüm kalitesi hem de çalışma zamanı açısından tüm karşılaştırma yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkarılmıştır.

Bruglieri, Pezzella, Pisacane ve Suraci (2015) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP, rota planlaması sürecinde esneklik sağlaması sebebiyle aracın şarj istasyonuna uğradığında tam şarj edilmesi seçeneği yerine kısmi şarj seçeneğini içerecek şekilde ele alınmıştır. Problem karma tam sayılı lineer programlama modeli olarak tanımlanmıştır. Problemden, araç sayısı, toplam seyahat süresi, toplam şarj süresi ve toplam servis süresi minimizasyonu amaçlanmıştır. Problemin çözümü için Değişken Komşuluk Arama (Variable Neighborhood Search) ve Yerel Dallanma Metodu (Local Branching Method) birlikte kullanılmıştır.

Pelletier, Laporte, Jabali ve Veneroni (2015) tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlarla eşya taşımacılığı konusu ele alınmış, bu alanda araştırma yapmak için gerekli teknolojik ve pazarlama altyapısına genel bir bakış sağlamak, mevcut araştırmalar hakkında bilgi vermek ve gelecekteki araştırmalar için bir bakış açısı sunmak amaçlanmıştır. Çalışmada, mevcut literatür filo büyüklüğü ve karmaşıklığı, araç güzergahı ve optimal yollar şeklinde üç bölüme ayrılarak özetlenmiştir.

Keskin (2014) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP ele alınmış, araç filosunun tamamının elektrikli araçlardan oluştuğu kabul edilmiştir. Matematiksel model, 0-1 karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak oluşturulmuş, amaç fonksiyonu olarak toplam seyahat mesafesinin minimizasyonu ele alınmıştır. Modelde araç şarjının alınan mesafe ile doğru orantılı olarak azaldığı kabul edilmiştir. Problemi çözmek için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Algoritması (Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm) önerilmiş, önerilen yöntemin performansının ölçümü için Schneider vd. (2014) geliştirdiği, temeli Solomon'un ARP için geliştirdiği örneğe dayanan 36 küçük ve 56 büyük örnek kullanılmıştır. Önerilen yöntemin, kabul edilebilir sonuçlar vermede etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Afroditi, Boile, Theofanis, Sdoukopoulos ve Margaritis (2014), tarafından yapılan çalışmada EARP ele alınmış ve problemin gerçek hayata uygun olması için

müşteri zaman kısıtı ve araç kapasitesi, araçların şarj durumları göz önünde bulundurularak ZP-EARP modeli geliştirilmiştir. Modelde toplam seyahat süresini ve toplam araç sayısını minimize etmek amaçlanmıştır. Ancak model çözülmemiştir.

Sassi, Cherif ve Oulamara (2014) tarafından yapılan çalışmada, EARP, heterojen filolu (farklı batarya kapasitesine sahip elektrikli araçlardan ve içten yanmalı motorlu araçlardan oluşan) ve zaman bağımlı şarj maliyetlerini içerecek şekilde ele alınmıştır. Problemde rota maliyetlerinin ve şarj maliyetlerinin minimizasyonu amaçlanmıştır. Problemde şarj istasyonlarında farklı şarj cihazları bulunmakta, şarj maliyetleri zamana bağlı olarak değişmektedir. Aynı zamanda depoda şarj işlemine imkân verilmiş ancak şarj işlemi elektrik şebekesi ve şarj cihazlarının kısıtlamalarına tabi tutulmuştur. Problem, karma tamsayılı lineer programlama modeli olarak modellenmiş, sezgiseller kullanılarak çözülmüştür.

Felipe, Ortuño, Righini ve Tirado (2014) tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçların rotaları belirlenirken araçların şarj teknolojileri de (hangi şarj türünde ne kadar şarj ettiği) dikkate alınmıştır. Problemde elektrikli araçların kullandıkları şarj türüne göre şarj süreleri de probleme dâhil edilmiştir. Maliyet minimizasyonu amaçlandığı problemde önerilen modelin çözümü için sezgiseller kullanılmıştır.

Erdoğan ve Miller-Hooks (2012) tarafından yapılan çalışmada, literatürde ilk kez Yeşil Araç Rotalama Problemi sunulmuştur. Problem karma tamsayılı liner programlama modeli olarak formülize edilmiştir. Problemde alternatif yakıtlı araçların mesafe kısıtı göz önünde bulundurulmuş, şarj istasyonları ve şarj istasyonlarında bataryayı tamamen şarj etme durumları da probleme dâhil edilmiştir. Problemin çözümünde sezgisel teknikler kullanılmıştır. Sonuçlar sezgisellerin performansının iyi olduğunu ancak problemin uygulanabilirliğinin müşterinin ve şarj istasyonunun konumuna bağlı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Touati-Moungla ve Jost (2012) tarafından yapılan çalışmada, EARP'nin rotada enerji tüketimini minimize etmeye çalışan Enerji En Kısa Yol Problemi, Enerji Araç Rotalama Problemi formülize edilmiştir. Önerilen modellerin çözümü yapılmamıştır.

Bozkurt (2011) tarafından yapılan çalışmada, optimum rota seçimi için elektrikli aracın şarj durumu göz önünde bulundurulmuş, aracın belirlenen rotalar içinde en az enerji harcayacağı, en kısa rotanın seçimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada enerji maliyetlerinden ve işgücünden tasarruf etmek, şarj sayısını en aza indirmek için şarj işlemi mesai saatleri dışında ve elektrik enerjisinin daha ucuz olduğu zamanlarda gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Conrad ve Figliozi (2011) tarafından yapılan çalışmada, literatürde ilk kez şarj edilebilir araçlar için EARP formülasyonu sunulmuştur. Problemden araçların müşteri konumlarında şarj edilebileceği, sabit şarj süresi ele alınmıştır. Problem zaman pencereli, kapasite kısıtlı olarak ele alınmıştır. Problemden; araç sayısının minimizasyonu ve seyahat mesafesi, servis süresi ve şarj maliyetlerinin toplamından oluşan maliyet minimizasyonu amaçlanmıştır.

3.6.2. Şarj İstasyonu Yer Seçimi İle İlgili Çalışmalar

Chen, Qian, Miao ve Ukkusuri (2020) tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlar için şarj istasyonlarının konumlarının ve kapasitelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Problemden rota seçimi ve şarj işlemi için bekleme süresindeki denge gözetilerek iki seviyeli bir matematiksel model önerilmiştir. Problemden şarj istasyonlarının inşa maliyetlerinin ve sürücülerin seyahat süresinin ve bekleme sürelerinin minimizasyonu amaçlanmıştır.

Lin, Zhang, Shen, Ye ve Miao (2019) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli otobüsler için şarj istasyonu problemi ele alınmıştır. Toplu taşıma amaçlı kullanılan elektrikli otobüslerin özellikleri baz alınarak yapılan çalışmada büyük ölçekli hızlı şarj istasyonlarının planlanmasına odaklanılmıştır. Şarj istasyonlarının alanlarını ve boyutlarını belirleyen mekânsal-zamansal bir model önerilmiş ve çok aşamalı altyapı planlaması için çeşitli stratejiler öne sürülmüştür. Model yüksek hesaplama verimine sahip karma tamsayılı ikinci dereceden koni programlama modeline dönüştürülmüş, Çin'in Shenzhen kentinde örnek olay incelemesi yapılarak modelin uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Boujelben ve Gicquel (2019) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlar için sürüş aralığının belirsizliği durumunda hızlı şarj istasyonlarının en iyi nereye konumlandırılabilirliği belirlenmeye çalışılmıştır. Stokastik akış yakıt ikmali yer seçimi problemi olarak tanımlanan problem için iki stokastik programlama modeli ve iki çözüm yöntemi önerilmiştir. Birincisi literatüre kazandırılan yeni yer seçimi-atama (location-allocation) modeli çözmek için karma tamsayılı lineer programlama modeli ve ikincisi Tabu Arama Sezgiseli'dir (Tabu Search Heuristic). Sonuçlar incelendiğinde literatürde mevcut karma tamsayılı lineer programlama modellerine göre önerilen modelin optimum sonucu daha kısa sürede verdiği, Tabu Arama Sezgiseli'nin (Tabu Search Heuristic) kısa hesaplama sürelerinde tutarlı bir şekilde kaliteli çözümler sunduğunu ortaya çıkarılmıştır.

Scheiper, Schiffer ve Walther (2019) tarafından yapılan çalışmada, literatürde ilk defa şarj istasyonu yer seçiminin elektrik şebekesi üzerindeki olumsuz etkilerini göz önünde bulunduran, bu olumsuz etkileri en aza indirmeye çalışan bir model geliştirilmiştir. Şarj istasyonu yer seçimi modeli ve enerji depolarına sahip güç akış modeli birleştirilerek ele alınmıştır. Mevcut yer seçimi modeli gidiş-dönüşleri ve sürülen mesafeye göre şarj talebini göz önünde bulundurarak genişletilmiştir. Ayrıca yer seçimi modeli şarj talebi, yenilenebilir enerji üretim ve merkezi olmayan enerji depoları arasındaki karşılıklı bağımlılıkları modelleyebilmek için zamana bağlı şarj talebine göre genişletilmiştir.

Dong, Ma, Wei ve Haycox (2019) tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlar şarj istasyonu yerlerinin belirlenmesi amacıyla iki aşamalı bir yaklaşım önerilmiştir. Çalışmada mekânsal istatistikler ve maksimum kapsama yer seçimi modeli birlikte kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde Londra için şarj talebi ile işyerinin popülasyon yoğunluğu, seyahat akışları, taşımacılık, perakende ve ticari mekanların yoğunluğu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır.

Rathnayake, Jayawickrama ve Melagoda (2019) yapılan çalışmada Sri Lanka’da elektrikli araçlar için şarj istasyonlarının kurulacağı optimum noktalar tespit edilmeye çalışılmıştır. Aday kuruluş yerleri teknik, ekonomik, yasal, kültürel, çevresel ve pazar olmak üzere altı farklı açıdan incelenerek fizibilitelerinin yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada veri toplamak için görüşme yöntemi ve anket yöntemi kullanılmıştır. Kalitatif verilerin analizi için içerik analizi, kantitatif verilerin analizi için Basit Geri Ödeme Periyodu ve Göreceli Önem İndeksi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda Sri Lanka için en uygun elektrikli araç şarj istasyonu konumunun oteller olduğu ortaya çıkmıştır.

Csiszár, Csonka, Földes, Wirth ve Lovas (2019) tarafından yapılan çalışmada iki seviyeli şarj istasyonu yer seçimi modeli geliştirilmiştir. Çalışmada kullanıcıların fikirlerinin dâhil edilmesi amacıyla ağırlıklandırılmış toplam modeli geliştirilmiştir. Çalışma makro seviyede Macaristan, mikro seviyede Budapeşte için ele alınmıştır. Bölge segmentlerini değerlendirmek için ağırlıklandırılmış çok kriterli yöntemi kullanılmıştır. Şarj istasyonlarının segment içinde dağıtımı için Altıgen Tabanlı Yaklaşım (Hexagon-based Approach) ve Açgözlü Algoritması (Greedy Algorithm) kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada; makro seviye için elektrikli araç kullanma potansiyeli ve mikro seviyede şarj istasyonlarının olası yerleri için arazi kullanımına odaklanılmıştır. Çalışmada park ve otoparklardaki şarj

istasyonlarının, yoğunlaştırılmış hizmetlere yakın ve yüksek yoğunluklu alanların, şehir içi halka açık şarj talebini karşılamak için benzin istasyonlarına göre daha uygun olduğu bulunmuştur.

Hosseini ve Sarder (2019) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçların şarj istasyonları için yer seçimi klasik optimizasyon problemlerinden farklı olarak ele alınmaya çalışılmıştır. Çalışmada kantitatif kriterlerle birlikte kalitatif kriterlerde göz önüne alınmış, Bayes Ağı Modeli önerilmiş, değerlendirme için kullanılan kriterler sürdürülebilirlik ve alt boyutları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Önerilen model duyarlılık analizi ile doğrulanmıştır.

Zhang, Tang, Yang ve Lan (2019) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlar için şarj istasyonu yer seçimi problemi; kullanıcı kaygısı, istasyon kapasitesi gibi servis riskleri probleme dâhil edilerek ele alınmıştır. Modelin çözümü için Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm) geliştirilerek Geliştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritması (Improved Whale Optimization Algorithm) elde edilmiş, problemin çözümü için algoritma kullanılmıştır. Büyük ölçekli örneğe dayalı hesaplama sonuçları incelendiğinde, modelin ve algoritmanın günlük hayatta yer belirleme projelerinde ve sosyal maliyetlerin azaltılmasında etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Arayıcı ve Poyrazoğlu (2018) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlar için şarj istasyonlarının yatırım maliyetlerini ve kullanım kolaylığı açısından nereye konumlandırılması gerektiği sorusuna cevap aranmıştır. Problemin optimizasyon modeli MATLAB üzerinde modellenmiş, girdi olarak araç sayısı, araç rotaları, şarj istasyonlarının olası konumları kullanılmış ve CPLEX kullanılarak modelin çözümü yapılmıştır. İstanbul ilinde vaka çalışması olarak önerilen model uygulanmıştır. Modelin veri boyutundan bağımsız olarak optimum çözümü verebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tao, Huang ve Yang (2018) tarafından Wuhan'daki 196 elektrikli aracın gerçek dünya sürüş verilerine dayanarak şarj altyapısının yerleşimini optimize etmek amacıyla matematiksel bir model oluşturulmuştur. Bu veriler analiz edilerek 233 aday şarj istasyonu kuruluş yeri belirlenmiştir. Problemden, araçların şarj seviyesinin %20'nin altına düşmesini engelleyecek şekilde şarj istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Şarj istasyonlarının yerlerinin bu şekilde belirlenmesinin sebebi elektrikli araçların pil ömrünün aşırı şarj durumunda azalmasıdır. Problem MATLAB yazılımı ve Genetik Algoritma kullanılarak çözülmüştür.

Liu, Yang, Zhou ve Tian (2018) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlar için şarj istasyonu yer seçimi problemi ele alınmıştır. Şarj istasyonu yer seçimi probleminin karmaşık ve çelişkili birçok ölçüt içeriyor olması sebebiyle problemin çözümü için Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri kullanılmıştır. Gri DEMATEL ve UL-MULTIMOORA teknikleri birlikte kullanılarak yeni bir hibrit çok kriterli karar verme tekniği yaklaşımı önerilmiştir. Gri DEMATEL kriterlerin ağırlıklarını belirlemek amacıyla, UL-MULTIMOORA tekniği ise alternatifleri değerlendirmek ve optimum konumu seçmek amacıyla kullanılmıştır. Kriterler belirlenirken sürdürülebilirliğin üç boyutunu esas alınmış, alt kriterler literatür çalışmaları ve uzman görüşleri ile belirlenmiştir. Şarj istasyonu kurulması için dört alternatif yer belirlenmiştir. Önerilen uygulamanın uygulanabilirliğini ve etkinliğini göstermek için Çin'in Şangay kentinde ampirik bir örnek sunulmuştur. Sonuçlar, önerilen yaklaşımın elektrikli araçların şarj istasyonları için optimal yerini bulmak için kullanışlı, pratik ve etkili bir yol olduğunu göstermiştir.

Genevois ve Kocaman (2018) tarafından yapılan çalışmada, İstanbul'un ilçelerinde elektrikli araçlar için şarj istasyonu yer seçimi problemi ele alınmıştır. Kültür merkezleri ve alışveriş merkezleri şarj istasyonu kurulum yeri olarak planlanmıştır. 10 alternatif nokta şarj istasyonu kurulumu için seçilmiştir. AHP tekniği kullanılarak alternatiflerin sıralamaları yapılmış, alternatifler için ağırlıklar elde edilmiştir. Her bir alternatif noktasında kullanıcı faydasını maksimize edecek optimum sayıdaki istasyon sayısı matematiksel model ile belirlenmeye çalışılmıştır. Matematiksel modelde amaç fonksiyonu oluşturulurken AHP tekniğinden her bir alternatif için elde edilen ağırlıklar kullanılarak yöntemlerin birleştirilmesi sağlanmıştır.

Aydın, Çakmak ve Yıldırım (2018) tarafından yapılan çalışmada Türkiye'de şarj istasyonu kurulumu için şehirlerarası ve şehir içi otoparkların seçilmesi önerilmiş ve kurulum için gereken tasarım aşamaları ortaya konmuştur.

Liu ve Wang (2017) tarafından yapılan çalışmada, devlet yöneticilerinin karar verebilmelerini sağlamak amacıyla sınırlı bütçeleri dâhilinde kamunun sosyal maliyetini minimize etmek amacıyla farklı bataryalı elektrikli araçların şarj ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla farklı şarj seçeneklerini içeren şarj istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Modelde bireylerin farklı bataryalı elektrikli araçlara sahip olabilecekleri ve sürücülerin farklı rotaları seçebilme davranışları göz önünde bulundurulmuştur. Modelde baz alınan şarj teknolojisi son zamanlarda geliştirilen kablosuz şarj teknolojisidir. Problemin modellenmesinde üç seviyeli programlama

geliştirilmiştir. Model Kara Kutu Optimizasyonu (Black-Box Optimization) olarak modellenmiş ve çözülmüştür. Yapılan sayısal denemeler geliştirilen modelin ve algoritmanın çözüm için optimum sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Lee ve Han (2017) tarafından yapılan çalışmada, şarj istasyonlarının yerlerini belirlemek amacıyla, yer seçimi modeli, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişen seyahat aralığı (menzil) olasılıklı olarak baz alınarak geliştirilmiştir. Problemin matematiksel modellemesi için karma tamsayılı nonlinear programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen modelin çözümü için Benders Ayırıştırma (Benders Decomposition) ve Sütun Üretimini (Column Generation) birleştiren Benders ve Fiyat Algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma iki taşıma ağında kapsamlı hesaplama deneyleri kullanılarak doğrulanmıştır.

Zhu, Gao, Zheng ve Du (2016) tarafından yapılan çalışmada, şarj istasyonlarının konumlarının ve şarj istasyonlarında kaç adet şarj cihazının olması gerektiği belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada şarj istasyonu kuruluş maliyetlerinin yanı sıra sürücünün bulunduğu konumda şarj istasyonu olmaması halinde en yakın şarj istasyonuna ulaşım maliyeti de dikkate alınmıştır. Minimizasyonun amaçlandığı model, Genetik Algoritma kullanılarak çözülmüştür.

Zhao ve Lin (2016) tarafından elektrikli araç şarj istasyonlarının optimum şekilde yerleştirilmesinin elektrikli araç sistemlerinin sürdürülebilir gelişimi için çok önemli olduğu belirtilmiş, elektrikli araçlar için şarj istasyonu yerleşim problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri kullanılmıştır. Başlangıç kriterleri genişletilmiş sürdürülebilirlik teorisinden seçilmiş ve alt kriterler, dört sütundan oluşan Bulanık Delphi Yöntemi (Fuzzy Delphi Method) kullanılarak belirlenmiştir. Öznel görüşlerin yanı sıra objektif bilgiyi de bütünleştirmek için, kombinasyon ağırlıklarını belirlemek için uzmanların notları ve Shannon Entropi Yöntemi kullanılmıştır. Yer seçimi için Bulanık Gri İlişki Analizi (Fuzzy Grey Relation Analysis-VIKOR) yöntemi kullanılmıştır. Önerilen çerçevenin uygulanabilirliği Tianjin'deki beş elektrikli araç şarj istasyonu sahası alternatifi üzerine ampirik bir çalışmayla gösterilmiştir. Sonuç çevreye bağlı alt kriterlerin diğer alt kriterlerden çok daha fazla dikkat çektiğini göstermiştir. Çalışma kapsamında yapılan duyarlılık analizi, alt kriterlerdeki ağırlıklar nasıl değiştirilirse değiştirilsin, önerilen modelin ve değerlendirme sonuçlarının sağlamlığını ve etkinliğini doğrulayan seçim sonuçlarının sabit kaldığını göstermiştir. Bu çalışma, elektrikli araç şarj istasyonlarının optimum

şekilde konumlandırılması için kapsamlı ve etkili bir yöntem sunmuş ve geleneksel Bulanık VIKOR için ağırlık tayini ve mesafe hesaplamasını da yenilik getirmiştir.

Lam, Leung ve Chu (2014) elektrikli araçlar için şarj istasyonu yeri seçimi problemini ele almış, problemin NP-hard olması sebebiyle problemin çözümü için dört farklı yöntem önermişlerdir. Model kurulumunda teknolojik şartlardan çok insanların ihtiyaçları baz alınarak şarj istasyonunun kapsama alanına ve sürücülerin rahatlığına bağlı olarak bir optimizasyon modeli formüle edilmiştir. İteratif karma tamsayılı liner programlama, Açgözlü Algoritması (Greedy Algorithm) ,efektif karma tamsayılı liner programlama ve yeni metasezgisel yöntemlerden biri olan Kimyasal Reaksiyon Optimizasyon Algoritması (Chemical Reaction Optimization Algorithm) yöntemleri kullanılarak problem çözülmeye çalışılmıştır.

Wang, Xu, Wen ve Wong (2013) tarafından yapılan çalışmada, şarj istasyonu yer seçimi ve şarj istasyonu büyüklüğü konuları ele alınmıştır. Elektrik dağıtım sistemindeki voltaj saptmalarını, güç kayıplarını ve seyahat süresini minimize edecek çok amaçlı bir elektrikli araç şarj istasyonu planlama yöntemi önerilmiştir. Problemin çözümü için Veri Zarflama Yöntemi (Data-Envelopment Analysis) ve Çapraz Entropi Yöntemi (Cross-Entropy Method) kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, 33 düğümlü dağıtım sistemi ve 25 düğümlü trafik ağı sisteminden oluşan bir vaka çalışmasına dayanarak önerilen yöntemin etkin olduğunu göstermiştir.

Meng ve Kai (2011) tarafından yapılan çalışmada şarj istasyonu yer seçimi problemi oyun teorisi kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar şarj istasyonu konumlarının oyun teorisi kullanılarak bulunmasının daha rasyonel ve bilimsel olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Frade, Ribeiro, Gonçalves ve Antunes (2011) tarafından yapılan çalışmada nüfus ve istihdam yüksekliği sebebiyle Lizbon'da elektrikli araçların şarj istasyonlarının yer ve kapasite problemi ele alınmıştır. Yavaş şarj istasyonları için yapılan çalışmada maksimum kapsama problemi baz alınarak modelleme yapılmış, karma tamsayılı modelleme kullanılmıştır.

3.6.3. Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi İle İlgili Çalışmalar

Schiffer, Klein, Laporte ve Walther (2021) tarafından yapılan çalışmada, E-YS-ARP problemi karma tamsayılı matematiksel programlama modeli olarak tanımlanmış, problemde batarya aşınması durumu da ele alınmıştır. Problemin çözümü için bir mat-sezgisel geliştirilmiştir. Belirli durumlarda mid-haul lojistik filolarının elektrikli

araçlardan oluşturulmasının operasyonel olarak uygulanabilir, ekonomik olarak uygun olduğunu ve çevresel avantajlar sağladığı ortaya çıkarılmıştır.

Mao, Shi, Zhou ve Zhang (2020) tarafından yapılan çalışmada E-YS-ARP problemi hızlı şarj ve batarya değiştirme istasyonlarının yerlerinin ve araç rotalarının belirlenmesi amacıyla ele alınmıştır. Problem karma tamsayılı nonlinear programlama modeli olarak modellenmiştir. Problemin çözümü için Ekleme Sezgiseli (Insertion Heuristic) ve Yerel Arama (Local Search) stratejileri ile birleştirilerek gelişmiş bir Karınca Koloni Optimizasyon Algoritması (Ant Colony Optimization Algorithm) tasarlanmıştır.

Hulagu ve Celikoglu (2020) tarafından yapılan çalışmada, adalarda ulaşımın elektrikli araçlarla sağlanması durumunda enerji tüketiminin minimizasyonunu ele alan E-YS-ARP ele alınmıştır. Enerji tüketiminin sadece mesafeyle doğru orantılı olmadığı, hız, araç teknik özellikleri, ağırlık vb. koşullardan da etkilendiği, elektrikli araçların özelliklerinden biri de olan rejeneratif frenleme sırasındaki enerji kazanımı da dikkate alınmıştır. Problem karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak kurulmuş, İstanbul Büyükşehir için gerçek veriler üzerinden CPLEX 12.9.0 kullanılarak çözülmüştür.

Affi, Derbel, Jarboui ve Siarry (2020) tarafından yapılan çalışmada, Yang ve Sun (2015) tarafından batarya değiştirme istasyonları için modellenen E-YS-ARP problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için Değişken Komşu Arama Algoritmasından (Variable Neighborhood Search Algorithm) türetilen Esnek Değişken Komşu Arama Algoritması (Skewed Variable Neighborhood Search Algorithm) kullanılmıştır. Konum ve rotalama kararları arasında Yerel Arama Algoritmasında (Local Search Algorithm) bir dizi komşuluk kullanılmıştır.

Zhang, Chen ve Zhang (2019) tarafından ele alınan çalışmada, müşteri taleplerinin kesin olarak bilinmediği durumlar (stokastik müşteri talepleri) için elektrikli araçlar için rotalama ve batarya değiştirme istasyonları yer seçimi problemi eş zamanlı olarak ele alınmıştır. Problemden stokastik müşteri taleplerine dayanan optimum rota planının, batarya değiştirme istasyonlarının yerlerinin ve sayısının minimum maliyetle belirlenmesi amaçlanmıştır. Problemin çözümü için, İkili Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Binary Particle Swarm Optimization) ve Değişken Komşuluk Araması Sezgisellerini (Variable Neighborhood Search) birleştiren Hibrit Değişken Komşuluk Araması Algoritması (Hybrid Variable Neighborhood Search Algorithm) önerilmiştir. Önerilen algoritmanın modelin çözümü için verimli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Liu, Gao ve Liu (2019) tarafından yapılan çalışmada E-YS-ARP problem batarya değiştirme istasyonları için ele alınmıştır. Model karma tamsayılı matematiksel model olarak modellenmiştir. Modelde bu alanda yapılan çalışmalardan farklı olarak kukla düğümler kullanılmadan model oluşturulmuştur. Problemde seyahat maliyeti, araç sayısı, istasyon sayısı, şarj edilen batarya sayısının ve maliyet toplamının minimizasyonu amaçlanmıştır. Problemin çözümünde CPLEX 12.8 kullanılmıştır.

Schiffer, Schneider, Walther ve Laporte (2019) tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlar için araç rotalama ve yer seçimi-rotalama problemi ara duraklar için ele alınmıştır. Literatür taraması şeklinde ele alınan çalışmada belirtilen problem türleri üzerine yapılan çalışmalar sınıflandırılmış gelecek çalışmalara önerilerde bulunulmuştur.

Koç, Jabali, Mendoza ve Laporte (2019) tarafından yapılan çalışmada EARP literatürde ilk defa paylaşılan şarj istasyonlarının kuruluş yerinin belirlenmesi ile birlikte ele alınmıştır. Problemde araçların şarj işleminin doğrusal olmadığı durum ele alınmış, şarj istasyonlarına ortak yatırım yapan birkaç şirketin olduğu durum incelenmiştir. Çalışmada şarj istasyonu kuruluş maliyeti ve sürücü maliyetlerinin (sürüş süresi, şarj süresi, servis süresi) toplamının minimizasyonu amaçlanmıştır. Model karma tamsayılı liner programlama modeli olarak kurulmuş ve mat-sezgisel kullanılarak çözülmüştür.

Schiffer, Stütz ve Walther (2018) tarafından yapılan çalışmada Topla-Dağıt E-YS-ARP mid-haul lojistik faaliyetleri için Alman bir parekendeci firmanın dağıtım ağına ait veriler kullanılarak ele alınmıştır. Problemde toplam sahip olma maliyeti ele alınmış, içten yanmalı motorlu araçlarla elektrikli araçların ekonomik ekolojik açıdan kıyaslamaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elektrikli araçlarda bataryada aşınma konusu da ele alınmıştır.

Schiffer, Schneider ve Laporte (2018) tarafından yapılan çalışmada E-YS-ARP problemi ele alınmıştır. Ancak problemde müşterilere hizmet verecek depoların yer seçimi yerine intra-route facilities adı verilen araçların rotaları üzerinde yeniden yük/yakıt (veya her ikisi) alabilecekleri tesislerin yerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Model karma tamsayılı matematiksel model olarak modellenmiş, problemin çözümü için Büyük Komşuluk Araması Algoritması (Large Neighborhood Search Algorithm) , Yerel Arama Algoritması (Local Search), Alt Sınırlama Prosedürü (Lower Bounding Procedure) ile zenginleştirilerek kullanılmıştır. Yapılan uygulamalar ile kombine tesislerin hem işletilen lojistik ağının toplam maliyetlerini hem de filo büyüklüğünü azaltmaya yardımcı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Cui, Zhao ve Zhang (2018) tarafından yapılan çalışmada, E-YS-ARP modeli mobil şarj araçları için ele alınmıştır. Elektrikli araçların sahip olduğu düşük menzil ve şarj istasyonlarının yeterli sayıda olmaması sebebiyle yeni bir şarj hizmeti şekli ortaya atılmıştır. Huang, He, Gu, Wood ve Benjaafar (2014) tarafından sunulan bu sistemde elektrikli araç sahibi tarafından şarj hizmeti talebi telefon uygulaması aracılığıyla mobil şarj hizmeti veren işletmeye gönderilmekte ve müşterinin bulunduğu konuma mobil şarj aracı gönderilerek elektrikli aracın şarj edilmesi sağlanmaktadır. Çalışmada çok sayıda şarj hizmeti talebinin olması durumunda mobil şarj hizmetinin verilebilmesi için hangi tipte ve hangi konumda şarj istasyonlarının açılması gerektiği ve mobil şarj araçlarının hangi rotaları izlemeleri gerektiği (daha çok kar elde etmek için hangi rota izlenecek, hangi şarj istasyonu kullanılacak, araç şarj istasyonunda ne kadar şarj edilecek) sorularına cevap aranmıştır. Model karma tamsayılı programlama modeli olarak modellenmiş, çözüm CPLEX kullanılarak elde edilmiştir.

Schiffer ve Walther (2018) tarafından yapılan çalışmada, literatürde ilk defa Robast E-YS-ARP modeli sunulmuştur. Robast optimizasyon ve stokastik optimizasyon, elektrikli araç filosu için şarj istasyonu yeri seçimi ve araç rotalama problemi için birlikte kullanılmıştır. Problem karma tamsayılı model olarak kurulmuş, küçük boyutlu örneklerin çözümü için GUROBI, büyük örneklerin çözümü için Dinamik Programlama ile birlikte paralelleştirilmiş Uyarlanabilir Değişken Komşuluk Arama (Adaptive Variable Neighborhood Search) kullanılmıştır.

Paz, Granada-Echeverri ve Escobar (2018) tarafından yapılan çalışmada, Çoklu Depolu E-YS-ARP ele alınmıştır. Zaman pencereli ve kısmi şarjlı olarak tanımlanan problemde dağıtımın tek depodan yapılması yerine çoklu depolardan yapıldığı durum ele alınmıştır. Problemde araçların şarj kısıtı için şarj istasyonunda klasik şarj ve batarya değiştirme istasyonlarının olduğu kabul edilmiştir. Şarj süresi enerji şarj miktarıyla doğru orantılı olacak şekilde sabit bir zaman fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Çalışmada üç model önerilmiştir. Önerilen modellerden ilkinde sadece batarya değiştirme istasyonları, ikincisinde klasik şarj istasyonlarında kısmi şarj durumu, üçüncü modelde her iki durumu birlikte ele alan model sunulmuştur. Modeller küçük boyutlu örnekler için CPLEX 12.5 kullanılarak çözülmüştür. Sonuçlar, modellerin lojistik ve enerji destek yapılarını tasarlamak için kullanılabileceğini ve farklı enerji arzı seçeneklerinin performansını karşılaştırmanın yanı sıra, bu kararların seyahat edilen toplam mesafe veya olabilecek diğer optimizasyon hedefleri üzerindeki etkisini ölçmenin de mümkün olduğunu göstermektedir.

Calik, Oulamara, Prodhon ve Salhi (2018) tarafından yapılan çalışmada E-YS-ARP ele alınmıştır. Problemde elektrikli heterojen araç filosu için şarj istasyonu yer seçimi ve rotalama yapılmıştır. Zaman penceresi dikkate alınmamıştır. Amaç fonksiyonu olarak seyahat maliyeti, şarj etme maliyeti, araç satın alma maliyeti ve şarj istasyonu açma maliyetinin toplamının minimizasyonu amaçlanmıştır. Problem CPLEX 12.8.1'te Benders Ayırıştırma Algoritması (Benders Decomposition Algorithm) kullanılarak çözülmüştür.

Hof, Schneider ve Goeke (2017) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araç rotalama ve batarya şarj istasyonları için yer seçimi problemi birlikte ele alınmıştır. Problemde maliyet minimizasyonu amaçlanarak batarya değiştirme istasyonlarının konumlarının ve optimum rotaların eş zamanlı olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Uyarlanabilir Değişken Komşuluk Arama (Adaptive Variable Neighborhood Search) sezgiseli kullanılarak problem çözülmüştür.

Schiffer ve Walther (2017b) tarafından yapılan çalışmada, E-YS-ARP ele alınmıştır. Çalışmada depo konumlarının belirlenmesi yerine elektrikli araçlar için şarj istasyonlarının ve yük alma tesislerinin (intra-route facilities) konumlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Şarj istasyonları ve yük alma tesisleri intra-route tesisler olarak adlandırılmıştır. Problem karma tamsayı programlama modeli olarak ifade edilmiştir. Problemin çözümü için Yerel Arama (Local Search) ve Dinamik Programlama ile zenginleştirilmiş Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama (Adaptive Large Neighborhood Search) metasezgiseli kullanılmıştır.

Schiffer ve Walther (2017a) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli ticari araçlar için E-YS-ARP ele alınmıştır. Şarj istasyonu yeri alternatifleri olarak müşterilerin tesisleri de düşünülmüştür. Problemde farklı amaç fonksiyonları ele alınmıştır. Kullanılan araç sayısının, kurulacak şarj istasyonu sayısının, toplam mesafenin minimizasyonu, maliyetlerin toplamı incelenmiştir. Farklı amaç fonksiyonlarının tek tek ele alındığı model Gurobi 6.0.5 Python kullanılarak çözülmüştür. Çalışmada eş zamanlı yerleştirmenin yanı sıra genişletilmiş şarj seçeneklerine izin verilmesi durumunda daha kısa toplam mesafeler elde edilebileceği ortaya çıkmıştır.

Schiffer, Stütz ve Walther (2016) tarafından yapılan çalışmada, mid-haul lojistik faaliyetleri için Alman bir perakendeci firmanın dağıtım ağı baz alınarak elektrikli ticari araçların konvansiyonel araçlarla rekabet edebilirliği analiz edilmeye çalışılmış, bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Vaka çalışması için E-YS-ARP zaman pencereli ve kısmi şarj seçeneği olarak ele alınmıştır. Çalışmada şarj istasyonlarının konumlarının

belirlenmesi ve araç rotalarının belirlenmesi eş zamanlı alınırken toplam maliyetin de minimizasyonu amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada elektrikli ticari araçların toplam maliyet ve emisyon açısından içten yanmalı motorlu araçlara nazaran mid-haul lojistikte avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır.

Li-ying ve Yuan-bin (2015) tarafından yapılan çalışmada, E-YS-ARP ele alınmıştır. Problemde araçların kapasite kısıtının olduğu, müşteri zaman penceresinin olduğu durum ele alınmıştır. Problemde maliyet minimizasyonu amaçlanmış, şarj istasyonu tipinin seçimi de ele alınmıştır. Problem karma tamsayılı programlama modeli olarak modellenmiş, küçük boyutlu örnekler için CPLEX kullanılarak çözülmüştür. Küçük boyutlu örnekler için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen çözümler, CPLEX çözümünün aksine geliştirilen algoritmanın küçük boyutlu örnekler üzerinde optimum çözüme yakın çözümler bulunduğunu göstermiştir. Büyük boyutlu örnekler için hibrit sezgiseller (Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Sezgiseli-Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic, Tabu Arama Algoritması-Tabu Search Algorithm) kullanılarak problem çözülmüştür. Büyük boyutlu örneklerin çözümünden elde edilen sonuçlar büyük boyutlu örnekler geliştirilen algoritmanın etkin olduğunu göstermiştir.

Yang ve Sun (2015) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araç rotalama ve batarya değiştirme istasyonu için yer seçimi problemi eş zamanlı olarak ele alınmıştır. YS-ARP ilk defa batarya değiştirme istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Problemde, batarya değiştirme istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi, müşterilerin elektrikli araçlara atanması, elektrikli araçların batarya değiştirme istasyonlarına atanması ve müşteri taleplerinin karşılanması için elektrikli araçların menzil ve kapasite kısıtlarını dikkate alacak şekilde rotaların belirlenmesi amaçlanmıştır. Problem temel ve genişletilmiş senaryolar şeklinde tamsayılı programlama modeli olarak modellenmiştir. Problemin küçük boyutlu örneklerinin çözümü için CPLEX kullanılmış, büyük boyutlu örneklerin çözümü için dört aşamalı (Modifiye Süpürme Algoritması-modified Sweep Algorithm, İteratif Açgözlü Sezgiseli-Iterative Greedy Heuristic, Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Sezgiseli-Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic, Split Prosedürü -Split Procedure) ve iki aşamalı (Tabu Arama-Modifiye Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması-Two Phase Tabu Search-modified Clarke and Wright Savings Heuristic) sezgiselleri kullanılmıştır.

Worley, Klabjan ve Sweda (2012) tarafından yapılan çalışmada eş zamanlı olarak elektrikli hafif ticari araçlar için E-YS-ARP ele alınmıştır. Problem tamsayılı matematiksel model olarak kurulmuş, toplam seyahat maliyetini, şarj maliyetini ve şarj istasyonu kurma maliyetini minimize etmek amaçlanmıştır. Şarj etme unsurları dışında,

diğer kısıtlar geleneksel araç rotalama probleminin varsayımlarıyla aynı alınmıştır. Klasik ARP veya Gezgin Satıcı Problemi'nde olduğu gibi optimal rotaların her zaman çokgen olmadığı, şarj etmenin rotaların sıkışmasına veya rotaların ikiye katlanmasına neden olabileceği ortaya çıkarılmıştır.



BÖLÜM IV

ELEKTRİKLİ ARAÇ YER SEÇİMİ-ROTALAMA PROBLEMİ

4.1. Enerji Tüketimi Modeli

E-YS-ARP ile ilgili çalışmaların birçoğunda enerji tüketiminin seyahat mesafesiyle doğru orantılı olarak değiştiği kabul edilmiştir (Li-ying ve Yuan-bin, 2015; Yang ve Sun, 2015; Schiffer, Stütz ve Walther, 2016; Schiffer ve Walther, 2017a; Schiffer ve Walther, 2017b; Paz vd., 2018; Schiffer, Schneider ve Laporte, 2018; Schiffer ve Walther, 2018; Schiffer, Stütz ve Walther, 2018). Ancak gerçek hayatta aracın enerji tüketimini etkileyen başka faktörlerde mevcuttur.

Aracın enerji tüketimi taşınan yük miktarı, araç boş ağırlığı, araç hızı, araç teknik özellikleri, yol eğimi, hava yoğunluğu, seyahat mesafesi, trafik yoğunluğu, araç kullanım şekli (Schneider vd., 2014; De Cauwer vd., 2015; Shao vd., 2017; Zhang vd., 2018; Macrina vd., 2019), ortam sıcaklığı (De Cauwer vd., 2015; Rastani vd., 2019) gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu çalışma kapsamında enerji tüketiminin, taşınan yük miktarı, araç boş ağırlığı, araç hızı, araç teknik özellikleri, yol eğimi, hava yoğunluğu, seyahat mesafesi faktörlerinden etkilendiği durum dikkate alınmıştır. Bu sebeple öncelikle elektrikli aracın enerji tüketiminin nasıl hesaplanacağına ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

Elektrikli aracın enerji tüketimi üç aşamada hesaplanabilmektedir. İlk olarak mekanik güç hesaplanmakta, ikinci adımda mekanik güç elektrik gücüne dönüştürülmekte, üçüncü adımda gerekli olan elektrik gücü, bataryadan alınması gereken güç miktarına dönüştürülmektedir (Goeke ve Schneider, 2015). Aşağıda bu adımlar sırasıyla açıklanmaktadır.

1. Adım: Mekanik gücün hesaplanması (Bektaş ve Laporte, 2011; Goeke ve Schneider, 2015):

Bir aracın hareket edebilmesi için mekanik gücün yuvarlanma direnci, aerodinamik direnç ve yerçekiminin toplamından üstün gelmesi gerekmektedir. h yükünü taşıyan aracın ihtiyaç duyacağı mekanik güç aşağıdaki formül (1) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$P_M(h) = [(a + g \sin \theta + g C_r \cos \theta) * (h + f) + 0,5 C_d A \rho * v^2] * v \quad (1)$$

Formülde yer alan a ivme (m/s^2), g yer çekimi sabiti (m/s^2), θ yolun eğim açısı, C_r yuvarlanma direnci katsayısı, h araçta bulunan yük miktarı (kg), f aracın boş ağırlığı (kg), C_d aerodinamik direnç katsayısı, A aracın ön yüz alanı (m^2), ρ hava yoğunluğu (kg/m^3), v aracın hızı (m/s) olarak tanımlanmaktadır.

Formülde yer alan, $(a + g \sin \theta + g C_r \cos \theta)$ bölümü yola özgün bilgilerden oluştuğundan ark spesifik sabiti olarak, $(0,5 C_d A \rho)$ bölümü araç özelliklerine ilişkin bilgilerden oluştuğundan araç spesifik sabiti olarak tanımlanmaktadır (Bektaş ve Laporte, 2011).

2. Adım: Mekanik gücün elektrik gücüne çevrilmesi (Goeke ve Schneider, 2015):

Elektrik motorunun ihtiyaç duyulan mekanik gücü sağlaması için mekanik güç elektrik gücüne çevrilmektedir. İhtiyaç duyulan bu miktar elektrik motorunun verimliliği (ϕ) ile belirlenmektedir. Elektrikli araçlarda sürüş sırasında enerji kaybedilirken frenleme sırasında rejeneratif frenleme sayesinde batarya şarj edilebilmekte ve enerji kazanımı gerçekleşmektedir. Bu yüzden mekanik güç ile $P_E^d(h)$ (sürüş sırasında boşalan elektrik enerjisi) ve $P_E^r(h)$ (frenleme sırasında geri kazanılan enerji) arasındaki ilişki aşağıdaki şekildedir.

$$P_E^d(h) = \phi^d * P_M(h) \quad 0 \text{ kW} \leq P_M(h) \leq 100 \text{ kW}$$

$$P_E^r(h) = \phi^r * P_M(h) \quad -100 \text{ kW} \leq P_M(h) \leq 0 \text{ kW}$$

Belirlenen ilişki, 100 kW'a kadar mekanik güç talebi için yeterlidir.

3. Adım: Elektrik gücünün batarya gücüne çevrilmesi (Goeke ve Schneider, 2015):

Son adımda elektrik enerjisini elde etmek için gerekli olan batarya gücü P_B hesaplanmaktadır. Batarya gücü batarya verimliliğine (φ) bağlı olarak değişmektedir. Batarya gücü, sürüş sırasında boşalan elektrik enerjisi ve frenleme sırasında geri kazanılan enerji için aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (aracın soğutma, ısıtma vb. yardımcı bileşenlerinden kaynaklı enerji tüketimi dâhil edilmemiştir):

$$P_B^d(h) = \varphi^d * P_E(h) \quad P_E(h) \geq 0 \text{ kW}$$

$$P_B^r(h) = \varphi^r * P_E(h) \quad P_E(h) < 0 \text{ kW}$$

Batarya gücü, birim mesafenin seyahat süresi t ile çarpıldığında h yükünü taşıyan elektrikli aracın birim mesafe için enerji tüketimi aşağıdaki şekilde (2) bulunmuş olacaktır.

$$E(h) = \begin{cases} \varphi^d * \phi^d * P_M(h) * t & P_M(h) \geq 0 \\ \varphi^r * \phi^r * P_M(h) * t & P_M(h) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Çalışmada ivme, rejeneratif frenlemeden kaynaklı kazanılan enerji miktarı ve aracın soğutma, ısıtma vb. yardımcı bileşenlerinden kaynaklı enerji tüketimi dâhil edilmemiştir. Bu sebeple (2)'de verilen formülü bir Graf için tanımlayacak olursak, i düğümünden j düğümüne d_{ij} mesafesi için h_j yük miktarını taşıyan aracın v_{ij} hızında tüketileceği enerji miktarı (kWh) cinsinden aşağıdaki formül (3) kullanılarak bulunabilecektir (Goeke ve Schneider, 2015):

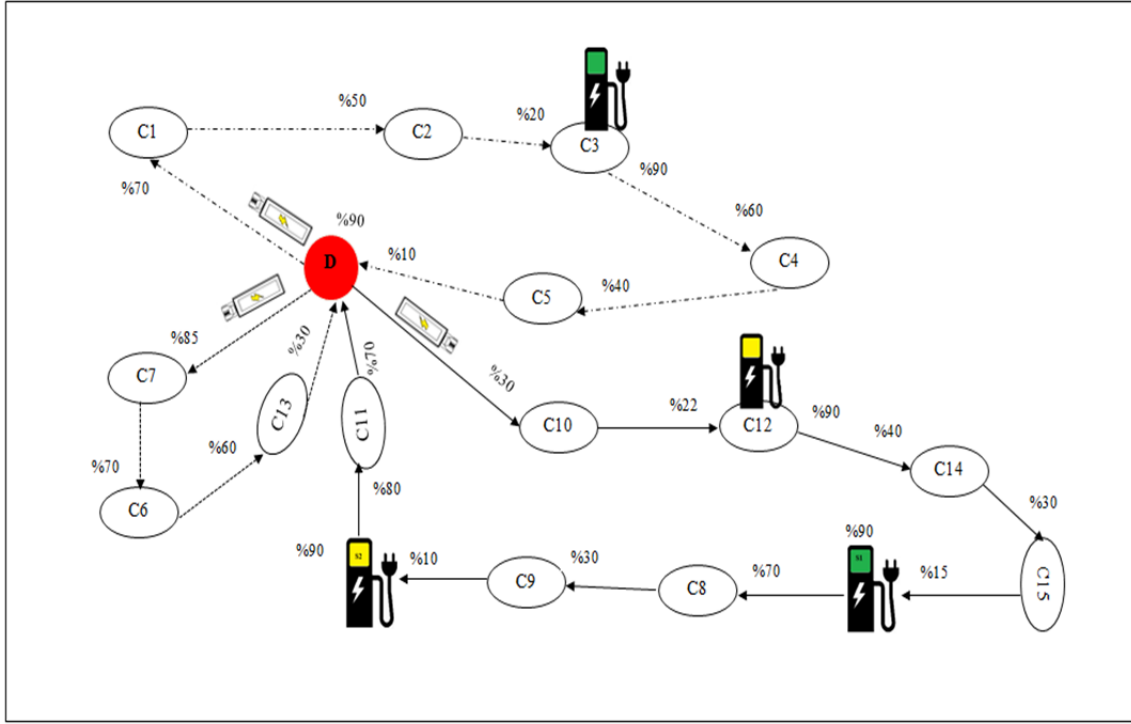
$$E_{ij}(h_j) = \frac{1}{36 \cdot 10^5} * \varphi * \phi * \{ [(a + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij}) * (h_j + f) * d_{ij}] + 0,5 C_d A \rho * v_{ij}^2 * d_{ij} \} \quad \forall i, j \in V_{0,n+1} \mid i \neq j \quad (3)$$

4.2. Problemin Açıklaması

Çalışma kapsamında problem, Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi Modeli (E-YS-ARP) olarak ele alınacaktır. Başlangıçta temel alınacak model Schiffer ve Walter (2017a) tarafından geliştirilen modeldir. Schiffer ve Walter'in (2017a) modelinden farklı olarak matematiksel modele modeli gerçek hayattaki durumlara yaklaştıran

- Sürücü sürüş süresi kısıtı,
- Enerji tüketimi kısıtı,
- Şarj istasyonu türlerinin belirlenmesine ilişkin kısıtlar,
- Bataryanın aşınmasını engellemek için batarya enerji kapasitesinin tur boyunca %10-%90 arasında kalmasına ilişkin kısıtlar eklenmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan enerji tüketimi formülü Goeke ve Schneider (2015) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. Problem Karma Tamsayı Nonlineer Kısıtlı Optimizasyon Modeli (Mixed Integer Nonlinearly Constrained Optimization Model) olarak modellenmiştir.



Şekil 6. Problemin örnek gösterimi

Şekil 6’da problemin örnek bir gösterimi bulunmaktadır. Örnek problem, gece araçları şarj etmek amacıyla yavaş şarj istasyonunun bulunduğu bir depo (D), 15 müşteri (C1-C15), iki müşteri düğümüne kurulan şarj istasyonu (C3, C12) ve iki aday şarj istasyonu noktalarına kurulan şarj istasyonlarından (S1, S2) oluşmaktadır. % ile belirtilen oranlar aracın bir düğümüne veya şarj istasyonuna vardığında bataryada kalan şarj miktarını göstermektedir. Problemden araçlar müşteri düğümünde şarj istasyonu kurulması durumunda müşteri düğümünde de şarj edilebilmektedir. Araçların tümü depodan bataryalarının %90’ı dolu olarak rotalarına başlamaktadırlar ve şarj miktarlarının %10’unun altına düşmesine izin verilmemektedir. Örnekte araçlardan biri rotasını şarj istasyonuna uğramadan tamamlayabilmiş, diğer iki araç rotalarını tamamlayabilmek için şarj istasyonlarına uğramak durumunda kalmışlardır. Şarj istasyonlarının müşteri konumlarında kurulabilmesi sebebiyle C3 müşterisinde hızlı şarj tipinde şarj istasyonu, C12 müşterisinde normal tipte şarj istasyonu kurulmuştur. S1

istasyonunda hızlı şarj istasyonu S2 istasyonunda normal tipte şarj istasyonu kurulmuştur.

4.3. Problemin Matematiksel Modeli

Şebeke problemleri düğümlerden ve arklardan oluşan Graf (G) olarak tanımlanmaktadır. Bu problem komple yönlendirilmiş bir Graf $= (V_{0,n+1}, A)$ olarak tanımlanmıştır, graf düğümler seti ve arklar setinden oluşmaktadır. Düğümler seti $V_{0,n+1}$ müşterilerden, depodan, aday şarj istasyonları noktalarından ve şarj istasyonları için oluşturulan kukla düğümlerden oluşmaktadır, arklar seti $A = \{(i, j) | i, j \in V_{0,n+1}, i \neq j\}$ ise düğümler arasında bağlantıyı sağlayan bağlantı noktaları (i düğümünden j düğüme gidilmesini sağlayan yol olarak tanımlanır) olarak tanımlanmıştır.

- Düğümler seti olan $V_{0,n+1}$, ziyaret edilecek müşteri düğümleri seti olan C, şarj istasyonu yerleştirilebilecek düğümler seti olan R, araçların gönderildiği, kalkış, depo düğümü olan 0, araçların varış depo düğümü olan $n + 1$ 'den oluşan depo düğümlerinden ve $i \in (C \cup R)$ düğümleri ile ilişkili olarak oluşturulan kukla düğümler setinin birleşimi olan S'ten oluşmaktadır.
- Problemden S kukla düğümleri seti, elektrikli araçların şarj istasyonlarına birden fazla kez gidebilmesi ve aynı anda birden fazla aracın şarj edilebilmesi amacıyla oluşturulmuştur. S kukla düğümler seti, kukla düğümleri alt setleri olan S_i 'lerin birleşiminden oluşmaktadır. S_i i düğümü ile ilişkili kukla düğümleri setidir. Her istasyon ile ilişkili kukla düğüm sayısı, ilgili istasyonun ziyaret edilebileceği sayıya ayarlanmaktadır (Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012). Her bir düğüm için oluşturulan kukla düğümleri sayısı, ağ boyutunu küçültmek için mümkün olduğu kadar küçük ancak birden fazla sayıda yararlı ziyaretleri engellemeyecek kadar da büyük olmalıdır (Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012).
- Depo aynı koordinatlara sahip iki düğüm ile ifade edilmektedir. Düğümlerden biri araçların müşterilere gönderilmesi için diğeri de depoya varışların yapılması için tanımlanmaktadır. Depodaki kalkış ve varış zamanlarını ayırt etmek için deponun kopyası oluşturulmaktadır. Bu kopyalar her düğümün ziyaretinin zamanın izlenmesi, her bir rotanın başlangıç ve bitiş zamanının belirlenmesi ve alt tur oluşmasını engellemek için gereklidir (Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012). Tanımlanan setlerin depoların birer örneğini içermesi gerekmektedir. Bir setin

deponun ilgili örneğini içerdiğini belirtmek için set 0 ve (n+1) alt indisleriyle gösterilmektedir.

- Gerçek hayat uygulamalarına uygun olması açısından her müşterinin tek bir araçla ziyaret edildiği ve her bir aracın bir şarj istasyonuna en fazla bir kez uğradığı ve aracın rotaya depoda başlayıp depoda bitirdiği kabul edilmektedir (Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012). Bu durum birden fazla müşteriye hizmet veren ve birden fazla kez şarj istasyonuna ziyareti içeren bir turun seçimini engellemektedir (Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012).
- Her bir ark (i, j) için i ve j düğümleri arasındaki d_{ij} mesafesinden oluşmaktadır.
- Her bir ark (i, j) için i ve j düğümleri arasındaki seyahat süresi t_{ij} , d_{ij} mesafesine ait hıza v_{ij} , bölünmesiyle elde edilmektedir.
- Her müşteri düğümü $i \in C$ için, müşteri talebi olan p_i servisi süresi olarak tanımlanan s_i süresi içinde karşılanmalıdır, müşteri ziyareti t_i i. düğüme vardığı zamandan itibaren yapılmalı ve bu süre düğümün zaman penceresi olarak tanımlanan en erken zaman e_i ve en geç zaman l_i arasında kalmalıdır. s_i ve p_i $i \notin C$ için 0'a eşittir.
- Her düğüme giren araç sayısı çıkan araç sayısına eşit olmalıdır.
- Araç filosu homojen elektrikli filodur.
- Aracın kat edebileceği mesafe, batarya kapasitesinin %90'ı ile sınırlıdır.
- Aracın enerji tüketimi aracın hızı, aracın boş ağırlığı, taşıdığı yükün ağırlığı, aracın teknik özellikleri ve alınan mesafe ile azalacak şekilde tanımlanmıştır.
- Yer seçimi yapılacak olan şarj istasyonları kondüktif şarj sistemi şarj istasyonlarıdır. Her bir düğümden genel kabul gören üç şarj türünden biri bulunacaktır. Şarj türü $b=1$ yavaş (Level 1), $b=2$ normal (Level 2), $b=3$ (Level 3) hızlı olarak tanımlanmıştır. Bataryaların şarj edilme oranı (r^b) şarj türüne göre değişmektedir.
- Tüm araçlar depolarına bataryaları tam şarj dolu olarak başlamaktadırlar. Bu yüzden gece boyunca şarj için depoda yavaş şarj üniteleri mevcuttur.
- Maksimum sayıda şarj istasyonu yerleşimine izin verilmektedir.
- Bataryalar tüm düğümlerde şarj edilebilmektedir. Şarj işlemi batarya kapasitesinin maksimum %90 kadarı doldurulacak şekilde yapılmaktadır. Bataryanın zarar görmemesi için bataryadaki enerji miktarı %10 ile %90 arasında tutulmuştur (Pelletier vd., 2017; Keskin vd., 2019; Macrina vd., 2019).

- Elektrikli araç şarj istasyonu bulunan müşteri noktasında, eğer o müşteriye hizmet vermeyecek olsa bile, şarj edilebilecektir. Yapılan çalışmada bu durumun rotalama stratejilerini önemli ölçüde etkilediği ortaya çıkarılmıştır (Lin vd., 2016).
- Eğer araç müşteri düğümünde $i \in C$ şarj edilirse, şarj işlemi optimizasyonun daha iyi sağlanması için s_i servis zamanına paralel olarak gerçekleşmektedir. Müşteriye hizmet verilirken şarj işlemi devam etmektedir.
- Şarj süresinin zamanla doğrusal (lineer) bağlantılı olduğu kabul edilmiştir.
- Aynı anda bir düğümde şarj edilebilecek araç sayısı sınırlı değildir.

SETLER

$0, (n + 1)$: Depo düğümleri

C : Müşteri düğümleri seti

R : Aday şarj istasyonu düğümleri seti

S_i : Her bir $i \in (C \cup R)$ düğümü için oluşturulan tüm kukla düğümlerin kümesi

S : S_i kukla düğümler setlerinin birleşimi

B : Şarj türleri kümesi ($b=1$ yavaş, $b=2$ normal, $b=3$ hızlı)

V : Müşteri düğümleri seti C , şarj istasyonu düğümleri seti R , kukla düğümleri seti S birleşimi (depo düğümleri hariç olan küme)

C_0 : Kalkış deposu düğümü 0 ile müşteri düğümlerinin C birleşimi

V_0 : Kalkış deposu düğümü 0 ile $i \in V$ düğümlerinin birleşimi

V_{n+1} : Varış deposu düğümü $(n + 1)$ ile $i \in V$ düğümlerinin birleşimi

$V_{0,n+1}$: $i \in V$ düğümleri, $i \in 0$ ve $i \in (n + 1)$ düğümü birleşimi

PARAMETRELER

d_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki minimum mesafe (km)

v_{ij} : Elektrikli aracın hızı (km/s)

t_{ij} : Aracın i ve j düğümleri arasında seyahat süresi. $t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_{ij}}$ (dk)

s_i : $i \in C$ için gerekli olan servis süresi

e_i : $i \in V_{0,n+1}$ düğümünün zaman penceresinin en erken zamanı

l_i : $i \in V_{0,n+1}$ düğümünün zaman penceresinin en geç zamanı

p_i : $i \in C$ düğümünün talebi (kg)

H : Elektrikli aracın yük kapasitesi (kg)

Q : Elektrikli aracın batarya kapasitesi (kWh)

r^b : b türü şarjın şarj etme oranı (şarj hızının tersi-s/kwh)

T_{max} : Sürücünün günlük maksimum seyahat süresi

f : Aracının boş ağırlığı (kg)

g : Yer çekimi sabiti (m/s^2)

C_r : Yuvarlanma direnci katsayısı

θ : Yolun eğim açısı

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

C_d : Aerodinamik direnç katsayısı

A : Aracın ön yüz alanı (m^2)

a : İvme (m/s^2)

φ : Deşarj durumu verimlilik parametresi

ϕ : Motor modu verimlilik parametresi

c^a : Elektrikli aracı satın alma maliyeti (€/gün)

c^m : Birim seyahat maliyeti(€/km)

c^b : b şarj türünün birim şarj maliyeti(€/kWh)

KARAR DEĞİŞKENLERİ

$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i \in V_0 \text{ düğümünden } j \in V_{n+1} \mid i \neq j \text{ düğümüne seyahat edilirse} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases}$

$y_i^b = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i \in V \text{ düğümüne } b \text{ türünde şarj istasyonu yerleştirilirse} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases}$

w_i : $i \in V$ düğümünde elektrikli araca şarj edilen enerji miktarı(kWh)

t_i : Elektrikli aracın $i \in V_{0,n+1}$ düğümüne vardığı an

h_i : Elektrikli aracın $i \in V_{0,n+1}$ düğümüne vardığında kalan yük miktarı (kg)

q_i : Elektrikli aracın $i \in V_{0,n+1}$ düğümüne vardığında kalan enerji miktarı (kWh)

$E_{ij}(h_j)$: Elektrikli araçla i düğümünden j düğümüne hareket gerçekleştirilirken h_j

yükünü taşımak için gerekli olan enerji miktarı (kWh)

AMAÇ FONKSİYONU

$$\text{Min } Z = (c^m * \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_{n+1}} d_{ij} * x_{ij}) + (c^a * \sum_{j \in V_{n+1}} x_{0j}) + (c^b * \sum_{i \in V} \sum_{b \in B} y_i^b * w_i) \quad (4)$$

KISITLAR

$$\sum_{j \in V_{n+1} \mid i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in C \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V_{n+1} \mid i \neq j} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in \{V \setminus C\} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V_{n+1} \mid i \neq j} x_{ji} - \sum_{i \in V_0 \mid i \neq j} x_{ij} = 0 \quad \forall j \in V \quad (7)$$

$$\sum_{b \in B} y_i^b \leq 1 \quad \forall i \in \{V \setminus S\} \quad (8)$$

$$y_i^b \leq w_i \quad \forall i \in S, \forall b \in B \quad (9)$$

$$w_i \leq 0,9Q * \sum_{b \in B} y_i^b \quad \forall i \in \{V \setminus C\}, \forall b \in B \quad (10)$$

$$w_i \leq (s_i / r^b) * \sum_{b \in B} y_i^b \quad \forall i \in C \quad (11)$$

$$y_i^b \geq y_j^b \quad \forall b \in B, \forall i \in \{V \setminus S\}, j \in S_i \quad (12)$$

$$t_j \geq t_i + (t_{ij} + s_i) * x_{ij} - l_0 * (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in C_0, j \in V_{n+1} \mid i \neq j \quad (13)$$

$$t_j \geq t_i + t_{ij} * x_{ij} + \sum_{b \in B} w_i * r^b * y_i^b - (l_0 + r^3 * 0,9Q) * (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in V, j \in V_{n+1} \mid i \neq j \quad (14)$$

$$e_i \leq t_i \leq l_i \quad \forall i \in V_{0,n+1} \quad (15)$$

$$\sum_{i \in C_0} \sum_{j \in V_{n+1} \mid i \neq j} (t_{ij} + s_i) * x_{ij} + \sum_{i \in V} \sum_{b \in B} r^b * w_i * y_i^b \leq T_{max} \quad (16)$$

$$q_j \leq q_0 - E_{0j}(h_j) * x_{0j} + 0,9Q * (1 - x_{0j}) \quad j \in V_{n+1} \quad (17)$$

$$0,1Q \leq q_j \leq q_i + w_i - E_{ij}(h_j) * x_{ij} + 0,9Q * (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in V, j \in V_{n+1} \mid i \neq j \quad (18)$$

$$0,1Q \leq q_i + w_i = 0,9Q \quad i \in \{V \setminus C\} \quad (19)$$

$$0,1Q \leq q_i + w_i \leq 0,9Q \quad \forall i \in C \quad (20)$$

$$0 \leq q_0 \leq 0,9Q \quad (21)$$

$$0 \leq h_j \leq h_i - p_i * x_{ij} + H(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in V_0, j \in V_{n+1} \mid i \neq j \quad (22)$$

$$0 \leq h_0 \leq H \quad (23)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_0, j \in V_{n+1} \quad (24)$$

$$y_i^b \in \{0,1\} \quad \forall i \in V \quad (25)$$

$$t_i, h_i, q_i, E_{ij}, w_i \in R^+ \quad \forall i \in V_{0,n+1} \quad (26)$$

Amaç fonksiyonuna ve kısıtlara ilişkin açıklamalar şu şekildedir:

Problemin amaç fonksiyonu (4) maliyet minimizasyonu üzerine kurulmuştur. Amaç fonksiyonu üç maliyetin toplamından oluşmaktadır. İlk terim seyahat maliyetini, ikinci taşıma faaliyetini gerçekleştirecek elektrikli araç sayısına bağlı oluşan satın alma maliyetini, üçüncü terim aracın rotada b tipi şarj istasyonunda şarj edilmesinin maliyetini ifade etmektedir. Kısıt (5), tüm müşteri düğümlerinin yalnızca bir kez ziyaret

edilmesini sağlamaktadır. (6) numaralı kısıt araçların her bir şarj istasyonuna ve kukla şarj düğümlerine en fazla bir kez ziyaret yapabileceğini göstermektedir. Kısıt (7) akışın korunmasını sağlamak için oluşturulmuştur, her bir düğüme giren ve düğümden çıkan araç sayısının birbirine eşit olmasını sağlamaktadır. (8)-(12) numaralı kısıtlar şarj istasyonunun türü ve yer seçimi ile ilgili kısıtlardır. Her bir şarj istasyonunda üç şarj teknolojisi türünden yalnızca bir tanesi bulunacaktır, (8) numaralı kısıt bu durumu ifade etmektedir. Düğüme hiçbir araç şarj edilmiyorsa şarj istasyonu kurulmamalıdır durumu (9) numaralı kısıtla ifade edilmektedir. Bir şarj istasyonu müşteri düğümünde inşa edilebilir, ancak müşteriye hizmet veren araç tarafından kullanılmaması durumu da mümkün olduğundan, (9) numaralı kısıt kukla düğümlerle sınırlandırılmıştır. Kısıt (10), düğüme şarj işlemi gerçekleşiyorsa düğüme şarj istasyonu kurulması gerektiğini ifade etmektedir. Aracı şarj etmek için hizmet verilen müşteri düğümü hariç diğer düğümler tercih edildiğinde şarj miktarı batarya kapasitesinin maksimum %90'nına eşit olacak şekilde gerçekleştirilmektedir. Şarj istasyonu olarak hizmet verilen müşteri tercih edilirse, şarj miktarı maksimum servis süresi kadar olacaktır (11). Şarj istasyonlarına birden fazla kez ziyarete izin vermek amacıyla kukla düğümler kullanılmaktadır. (12) numaralı kısıt, kukla düğümlerde şarj istasyonu açılması durumunda ilgili gerçek düğüme şarj istasyonu açılmasını sağlamaktadır. (13), (14) ve (15) kısıtları aracın rotadaki zamanının kontrol edilmesine izin vermekte, zaman pencerelerinin sağlanmasını garanti etmekte ve alt turların oluşmasına engel olmaktadır. (13) numaralı kısıt, eğer i düğümünden j düğüme hareket gerçekleşirse –hareket depodan veya müşteriden başlayabilir- j düğüme varış zamanı t_j , aracın i düğüme vardığı zaman t_i , aracın i düğümünden j düğüme geldiği süre t_{ij} ve i düğümünün servis süresinin s_i toplamından oluştuğunu ifade eder, depoların servis zamanı 0'dır. (14) numaralı kısıt bataryayı şarj etmek için kullanılan süre üzerinde kontrol sağlar. (15) numaralı kısıt zaman pencerelerinin karşılanmasını sağlar. (16) kısıtı maksimum tur süresini tanımlamaktadır. Problemin gerçek hayata uygunluğunu arttırmak amacıyla maksimum tur süresi, sürücünün günlük çalışma süresini aşmayacak şekilde tanımlanmıştır. (17)-(20) numaralı kısıtlar, aracın bataryasında kalan enerji miktarını kontrol etmek amacıyla oluşturulmuştur. (17) numaralı kısıt depodan çıkan aracın kalan şarj miktarını hesaplamaktadır. Kısıt (18) aracın şarj edilebileceği düğümlerde bulunması durumundaki enerji miktarının hesaplanması amacıyla oluşturulmuştur. Kısıt, j düğümündeki enerji ile i düğümündeki enerji arasında bağlantı sağlamaktadır. j

düğümüne gelindiğinde kalan enerji eğer i düğümünde araç şarj edilmişse, aracın şarj miktarının w_i kadar artmasını sağlayabilir ve i düğümünden j düğümüne gelene kadar taşınan yük için harcanan enerji miktarı $E_{ij}(h_j)$ kadar azaltılabilir. Enerji tüketimine ilişkin hesaplamalar $E_{ij}(h_j)$ (3) numaralı denklem aracılığıyla hesaplanmaktadır. Kısıt (19) müşteri düğümleri haricinde bataryanın şarj edilebileceği miktarı kısıtlamak amacıyla yazılmıştır, hizmet verilen müşteri düğümü hariç diğer düğümlerde yapılan şarj işleminde batarya kapasitesinin %90'ına kadar şarj edilmektedir. Kısıt (20) i düğümünde kalan şarj miktarının ve hizmet verilen müşteride şarj edilen şarj miktarının toplamının aracın enerji kapasitesinin %90'ını aşmasına izin verilmemesini ifade etmektedir. (21) numaralı kısıt aracın depodan ayrılabilceği maksimum enerji miktarını göstermektedir. Araçlar depodan maksimum düzeyde şarj edilmiş olarak rotaya başlayacaklardır. Aracın bataryasının zarar görmemesi amacıyla şarj oranı %10 ile %90 arasında tutulmaktadır (Pelletier vd., 2017). Bu sebeple araç maksimum batarya kapasitesinin %90'ı kadar şarj edilebilmektedir. (22)-(23) numaralı kısıtlar aracın yük durumunun takibini sağlamaktadır. (22) numaralı kısıt araç rotaya devam ederken her müşterinin ihtiyacını karşıladığında yük miktarının azalmasını sağlar. (23) numaralı kısıt elektrikli aracın rotaya başlayabileceği maksimum yük miktarını gösterir. Kısıtların sayısını olabildiğince düşük tutmak amacıyla, alt turları ortadan kaldırmak için Miller Tucker Zemlin kısıtlamaları (22) ve (23) numaralı kısıtlar kullanılarak elde edilir. (24)-(26) arasındaki kısıtlar değişkenlerin negatif değer alamayacağını gösterir ve sağlar.

Problemin çözüm aşamasına geçmeden önce modelde yer alan mümkün olmayan (uygulanabilir olmayan, infeasible) arkların kaldırılması gerekmektedir.

$$x_{ij} = 0 \quad \forall i \in \{C \cup R\}, j \in S_i \mid i \neq j \quad (27)$$

$$x_{ji} = 0 \quad \forall j \in \{C \cup R\}, i \in S_i \mid i \neq j \quad (28)$$

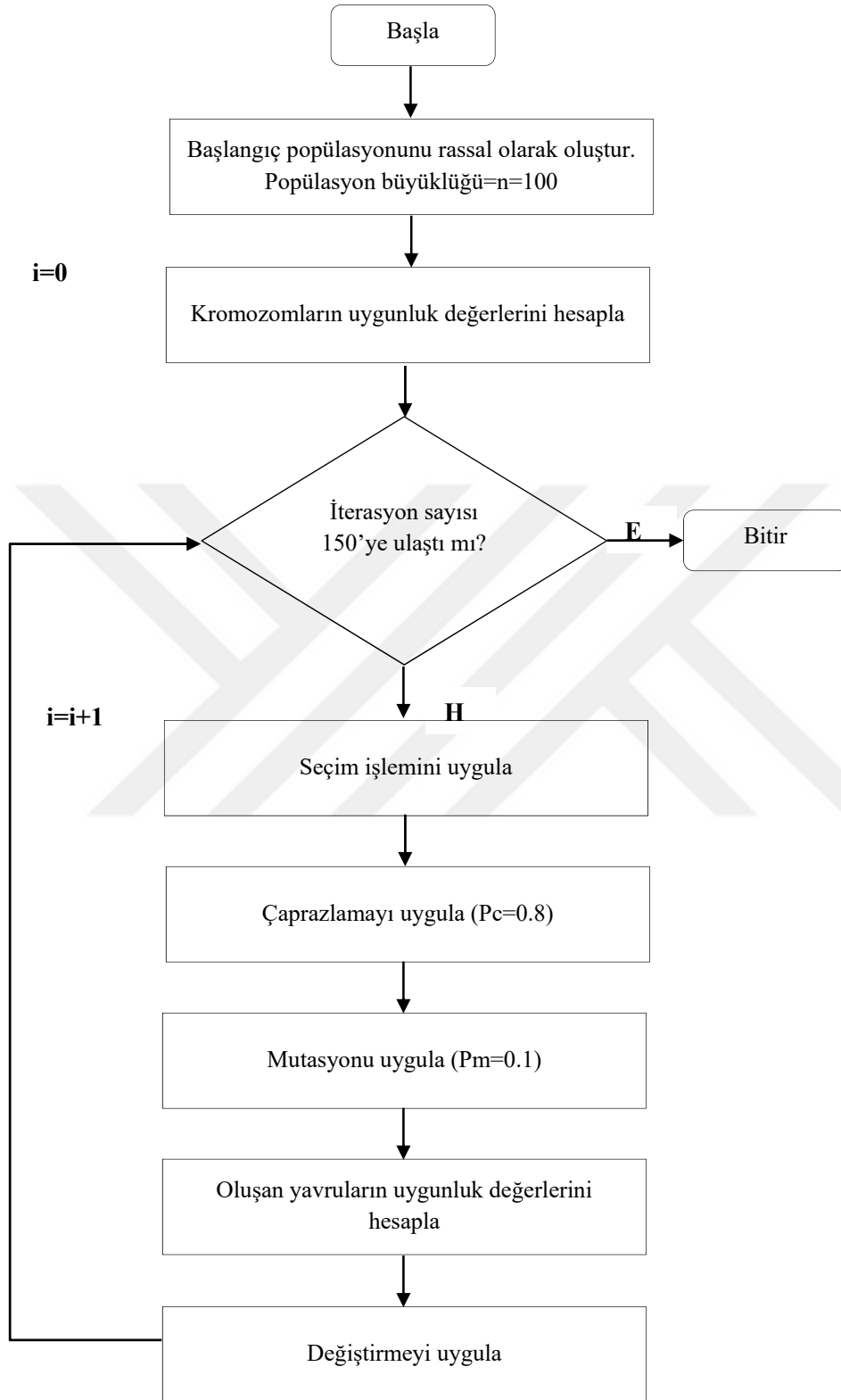
(27) ve (28) numaralı kısıtlar ile kurulan kukla düğümler ile gerçek düğümler arasındaki arklar kaldırılmıştır.

BÖLÜM V

ELEKTRİKLİ ARAÇ YER SEÇİMİ-ROTALAMA PROBLEMİ (E-YS- ARP) İÇİN GENETİK ALGORİTMA UYGULAMASI

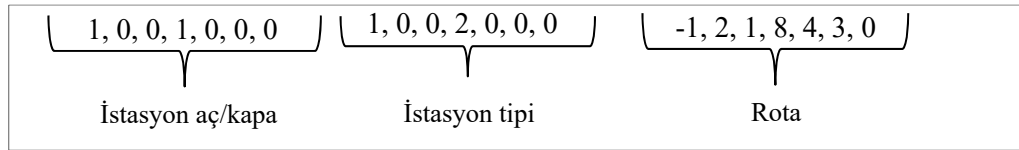
5.1. Genetik Algoritma Adımları

Probleme ilişkin önerilen matematiksel modelin kesin çözüm yöntemleri kullanılarak çözümünün bulunamaması, sezgisel yöntemlerin kullanılmasını gerektirmiştir. Literatürde yer seçimi-araç rotalama problemleri için birçok sezgiselin kullanıldığı görülmektedir. Tezin yazıldığı zaman ve bilgimiz dahilinde, elektrikli araç yer seçimi rotalama probleminde daha önce kullanılmaması sebebi ile çözüm yöntemi olarak metasezgisel yöntem olan Genetik Algoritma'nın kullanımına karar verilmiştir. Algoritma Python 3.6 dilinde kodlanmış ve i7 işlemci teknolojisine, 3.70 GHz Turbo işlemci hızına ve 64 GB RAM kapasitesine sahip bir bilgisayarda çalıştırılmıştır. GA'nın Şekil 7'de verilen akış diyagramı doğrultusunda çözüm adımları aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 7. Önerilen GA'nın akış diyagramı

- **Kodlama:** Kodlama türü, sıralama problemleri açısından kullanışlı olması sebebiyle permütasyon kodlama olarak seçilmiş ve çözümler (kromozomlar) bu şekilde oluşturulmuştur. Bir kromozom üç bölümden oluşacak şekilde oluşturulmuştur. İstasyon açma kararı 1-0 olarak kodlanmıştır, “1” ilgili düğümde istasyon açılacağı, “0” ilgili düğümde istasyon açılmayacağı anlamına gelmektedir. Açılacak olan istasyon tipleri matematiksel modelde ifade edildiği gibi (b1=1 yavaş, b2=2=normal, b3=3= hızlı) kodlanmıştır. İlgili düğümde istasyon açılması durumunda hangi tür istasyon açılacağına da karar verilmektedir. Kodlamada müşteriler ziyaret sıralarına göre sıralanmaktadır. Müşteriler 0, 1, 2 gibi müşteri numaralarıyla ifade edilmiştir. Araç rotalama problemlerinde problemin büyüklüğü sebebiyle müşterilerin tamamına hizmet vermek için tek bir araç yetmeyebileceğinden, birden fazla sayıda araç depodan çıkarılabilmektedir. Bu yüzden GA’da bir probleme ait tüm rotaları tek bir kromozom üzerinde tanımlamak için “-1” araç olarak kullanılmıştır. Araç rotaları depoda başlayıp depoda bittiğinden rota mesafesinin hesaplanabilmesi için depo düğümü her rotanın başına ve sonuna (-1’den önce -1’den sonra) yerleştirilerek hesaplanmaktadır. Kromozomun uzunluğu veri setinde yer alan örneklerdeki müşteri sayısı ve istasyon sayısına göre değişmektedir. Şekil 8’de 5 müşteriden oluşan örnek bir problemin çözümü için oluşan kromozom yapısı bulunmaktadır.



Şekil 8. Örnek kromozom yapısı

Kromozom yapısı incelendiğinde problemde 1 araç ile rotanın tamamlandığı depoda yavaş tipte ve 8 olarak belirtilen düğümde normal tipte şarj istasyonu kurulduğu görülmektedir.

- **Başlangıç popülasyonunun oluşturulması:** Başlangıç popülasyonu sezgisel yöntemler kullanılarak veya rassal (random) olarak da oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada başlangıç popülasyonu rassal olarak oluşturulmuştur. Müşteriler kromozom üzerinde sıralanırken müşterilerin zaman pencereleri, müşteri

talepleri, aracın yük kapasitesi gibi matematiksel modelde yer alan kısıtlar dikkate alınmış, sıralama bu şekilde oluşturulmuştur. Denemeler sonucunda başlangıç popülasyonu büyüklüğü $n=100$ olarak belirlenmiştir.

- **Ebeveyn seçimi:** Yeni neslin üretimi için ebeveyn seçiminde bireylerin uygunluk değerleri dikkate alınmıştır. Turnuva yöntemiyle ebeveyn seçimi gerçekleştirilmiştir. Turnuva büyüklüğü 3 olarak belirlenmiştir.
- **Çaprazlama:** Çaprazlama türü olarak iki noktalı çaprazlama yöntemi seçilmiştir. Denemeler sonucunda ve literatürdeki değer aralığına uygun olarak çaprazlama oranı 0,8 olarak alınmıştır.
- **Mutasyon:** Erken yakınsamanın önlenmesi (de Araujo Lima ve de Araújo, 2020), yerel minimuma takılmanın engellenmesi ve popülasyondaki çeşitliliğin sağlanması (Sivanandam ve Deepa, 2008) amacıyla mutasyon işlemi yapılmaktadır. Çalışmada mutasyon oranı denemeler sonucunda ve literatürdeki değer aralığına uygun olarak 0,1 olarak alınmış ve mutasyon yöntemi olarak takas mutasyonu yöntemi kullanılmıştır. Rasgele iki nokta seçilmiş ve yerleri değiştirilmiştir.
- **Değiştirme:** Değiştirme işleminde elitizm işlemi uygulanmamıştır. Yeni nesil, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin ardından meydana gelen yeni kromozomlardan (yavrulardan) oluşmaktadır.
- **Durdurma (Sonlandırma):** Durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı alınmıştır. GA, 150 iterasyon sayısına ulaştığında çalışmayı durduracaktır. İlerleyen başlıklarda verilen yakınsama grafikleri incelendiğinde 150 iterasyondan daha önce amaç fonksiyonunun sabit bir değer aldığı görülmektedir, dolayısıyla belirlenen değer yeterlidir.

Özet olarak GA parametreleri Tablo 7'deki gibidir.

Tablo 7
GA Parametre Değerleri

Parametre	Parametre Değeri
Popülasyon büyüklüğü	100
İterasyon sayısı	150
Çaprazlama oranı	0,8
Mutasyon oranı	0,1

5.2. Problem Çözümünde Kullanılan Verilere İlişkin Bilgiler

Çalışmada kullanılan müşteri konumları, zaman pencereleri, talepleri, servis süreleri, aracın batarya ve yük kapasitesine ilişkin bilgiler Schneider, Stenger ve Goeke (2014) tarafından Solomon (1987)'un Zaman Pencereli ARP için oluşturduğu veri seti kullanılarak geliştirilmiştir. Veriler <https://data.mendeley.com/datasets/h3mrm5dhxw/1> (Erişim tarihi: 04.09.2020) adresinde yer almaktadır.

Geliştirilen veri setinde yer alan örnek problemler (toplam 92 adet), büyük örnek problemler ve küçük örnek problemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. 56 adet büyük örnek problemin her biri 100 müşteri ve 21 şarj istasyonundan; 36 adet küçük örnek problem ise 5, 10 ve 15 müşteriden oluşmaktadır (Schneider vd., 2014). Bu örnek problemler müşteri konumlarının coğrafi dağılımlarına bağlı olarak üç sınıfa ayrılmaktadır: rastgele müşteri dağılımı (R), depo etrafında kümelenmiş müşteri dağılımı (C) ve her ikisinin karışımı (RC) (Schneider vd., 2014). Aynı zamanda bir grup içindeki örnek problemler, zaman penceresi yoğunluğu ve zaman penceresi genişliği açısından farklılık göstermektedir (Schneider vd., 2014). Zaman penceresi aralıkları rastgele oluşturulmuştur (Schneider vd., 2014).

Veri setinde müşteri, depo ve şarj istasyonu konumları koordinat (x, y) olarak verilmiştir. Düşümler arasındaki mesafeler öklidyen formülü $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ kullanılarak hesaplanmıştır.

Araç satın alma maliyeti ve seyahat maliyeti Schiffer ve Walter'in (2017a) çalışmasından alınmıştır. Araç satın alma maliyeti c^a : 53.32 €/gün, seyahat maliyeti c^m : 0.0508 €/km olarak kabul edilmiştir. Literatür incelendiğinde araç hızlarının farklı değerlerde alındığı görülmektedir. Ele alınan problemde de gerçekçi bir değer olması sebebiyle aracın seyahat hızı değeri ortalama v_{ij} : 70 km/s olarak kabul edilmiştir. Çalışmada sürücünün çalışma süresi veri setinin her biri için deponun zaman penceresinin en geç zamanına eşitlenmiştir.

Enerji tüketimine ilişkin formülün hesaplanabilmesi için gerekli teknik bilgiler Goeke ve Schneider (2015) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır ve Tablo 8'de açıklanmıştır.

Tablo 8
Enerji Tüketimine İlişkin Bilgiler

Notasyon	Açıklama	Değer
f	Aracın boş ağırlığı	6350 kg
g	Yer çekimi sabiti	9,81 m/s ²
C_r	Yuvarlanma direnci katsayısı (birimsiz)	0,01
θ	Yolun eğim açısı	0
ρ	Hava yoğunluğu	1,2041kg/m ³
C_d	Aerodinamik direnç katsayısı (birimsiz)	0,7000
A	Aracın ön yüz alanı	3,912 m ²
a	İvme	0 m/s ²
φ	Deşarj durumu verimlilik parametresi (birimsiz)	1,112434
ϕ	Motor modu verimlilik parametresi (birimsiz)	1,184692

Kaynak: Goeke ve Schneider, 2015

Şarj istasyonlarına ilişkin şarj oranları ve birim şarj maliyetleri Felipe vd. (2014) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır ve Tablo 9’da yer verilmiştir.

Tablo 9
Şarj Türlerine İlişkin Bilgiler

Notasyon	Şarj tipi	Şarj hızı (kWh/s)	Şarj maliyeti(€/kWh)
b1	Yavaş	3.600	0,16
b2	Normal	20.000	0,176
b3	Hızlı	45.000	0,192

Kaynak: Felipe vd., 2014

5.3. Bulgular ve Yorum

Veri setinde yer alan 92 örnek problemin tamamı GA ile çözülmüştür. GA rassallık açısından 5 kere çalıştırılmış ve her çalıştırma için örnek problemlerin amaç fonksiyonu değerleri Tablo 10’da belirtildiği şekilde elde edilmiştir. Her örnek için yapılan çalıştırmanın en iyi amaç fonksiyonu değeri koyu olarak işaretlenmiştir.

Tablo 10

5 Çalıştırma Sonucu Elde Edilen Amaç Fonksiyonu Değerleri

Sıra	Müşteri sayısı	Örnek	GA ₁	GA ₂	GA ₃	GA ₄	GA ₅
1	5	c101C5	119,86	119,86	119,86	119,86	120,75
2	5	c103C5	66,53	66,53	66,17	66,17	66,17
3	5	c206C5	76,82	83,15	76,82	118,60	81,26
4	5	c208C5	65,58	65,58	65,71	65,58	65,58
5	5	r104C5	113,57	62,95	62,95	113,57	113,57
6	5	r105C5	114,32	114,32	114,32	114,32	114,32
7	5	r202C5	66,53	66,11	66,13	66,78	68,27
8	5	r203C5	69,97	70,11	70,60	70,60	68,21
9	5	rc105C5	118,18	118,18	118,18	118,18	118,18
10	5	rc108C5	120,57	120,57	120,57	120,57	120,57
11	5	rc204C5	66,04	65,49	65,53	65,32	66,07
12	5	rc208C5	68,45	65,70	65,71	67,61	68,16
13	10	c101C10	184,46	182,91	185,50	184,46	187,28
14	10	c104C10	76,15	82,13	78,50	81,15	95,12
15	10	c202C10	125,89	124,20	86,94	119,70	130,83
16	10	c205C10	122,02	97,58	80,18	81,76	118,60
17	10	r102C10	173,06	172,60	173,06	173,10	173,01
18	10	r103C10	119,05	117,93	118,06	119,19	118,99
19	10	r201C10	127,54	125,19	120,52	129,48	130,58
20	10	r203C10	131,06	98,82	89,46	128,05	130,04
21	10	rc102C10	234,04	234,34	182,98	234,04	234,76
22	10	rc108C10	179,32	180,33	181,82	182,44	181,34
23	10	rc201C10	131,62	128,89	135,87	135,21	130,92
24	10	rc205C10	181,78	139,14	176,99	149,36	140,48
25	15	c103C15	184,17	187,26	184,89	185,13	155,74
26	15	c106C15	127,50	174,77	143,76	177,12	129,65
27	15	c202C15	155,89	158,81	162,94	155,98	152,99
28	15	c208C15	136,34	134,35	148,91	141,51	132,44
29	15	r102C15	286,42	287,13	287,40	286,44	288,30
30	15	r105C15	229,75	230,42	230,28	229,89	178,71
31	15	r202C15	173,58	154,26	149,70	210,17	193,77
32	15	r209C15	142,65	192,97	135,01	146,73	139,56
33	15	rc103C15	233,58	233,69	233,76	235,83	234,79
34	15	rc108C15	179,79	181,45	180,28	180,39	179,46
35	15	rc202C15	151,05	195,66	201,55	202,18	193,20
36	15	rc204C15	132,05	154,30	153,10	143,53	136,07
37	100	c101C100	964,40	901,23	807,57	831,91	823,65
38	100	c102C100	863,42	792,96	743,76	821,57	821,16
39	100	c103C100	863,48	759,60	801,39	812,05	795,35
40	100	c104C100	790,95	1002,53	953,39	830,73	913,63
41	100	c105C100	841,74	779,56	809,55	831,20	806,61
42	100	c106C100	817,08	784,32	746,88	1165,84	708,06
43	100	c107C100	803,55	757,04	745,83	682,95	825,60
44	100	c108C100	777,30	904,75	723,74	777,15	783,40
45	100	c109C100	750,87	871,77	719,76	816,61	780,57

46	100	c201C100	389,53	329,39	387,02	391,55	408,46
47	100	c202C100	559,52	455,35	521,26	469,86	529,14
48	100	c203C100	432,79	510,64	665,15	519,42	455,26
49	100	c204C100	442,89	427,44	608,88	650,50	463,44
50	100	c205C100	426,73	411,95	484,40	393,90	469,46
51	100	c206C100	430,40	480,55	500,50	449,92	524,60
52	100	c207C100	428,89	447,51	453,86	439,83	460,64
53	100	c208C100	433,12	481,68	477,10	577,99	501,50
54	100	r101C100	1219,89	1170,38	1685,15	1111,11	1166,63
55	100	r102C100	1051,33	994,73	1046,86	1113,00	1108,54
56	100	r103C100	945,63	887,32	933,92	995,94	937,39
57	100	r104C100	772,18	770,11	827,00	769,61	763,69
58	100	r105C100	1002,79	941,68	991,34	1054,48	993,26
59	100	r106C100	997,25	939,49	939,20	993,51	997,07
60	100	r107C100	768,25	762,80	712,18	768,02	822,10
61	100	r108C100	766,81	764,78	774,04	712,77	777,03
62	100	r109C100	886,79	821,80	883,79	879,12	824,56
63	100	r110C100	829,07	835,94	823,95	773,05	706,46
64	100	r111C100	768,81	826,14	771,23	772,82	765,84
65	100	r112C100	767,05	709,08	765,71	767,08	764,79
66	100	r201C100	401,03	400,84	411,87	411,83	765,84
67	100	r202C100	347,73	348,98	349,30	346,17	358,56
68	100	r203C100	349,33	402,68	339,41	370,36	385,37
69	100	r204C100	279,81	285,64	286,27	281,01	288,45
70	100	r205C100	344,23	347,08	351,37	350,85	413,55
71	100	r206C100	369,22	371,59	353,70	345,49	346,30
72	100	r207C100	289,74	292,67	292,74	292,53	286,43
73	100	r208C100	285,61	295,21	289,10	296,49	299,01
74	100	r209C100	345,40	321,47	320,41	340,39	354,32
75	100	r210C100	338,97	344,50	348,67	397,09	323,15
76	100	r211C100	288,79	282,53	291,27	287,29	287,25
77	100	rc101C100	899,98	952,45	1021,57	955,30	1012,84
78	100	rc102C100	834,53	896,55	892,94	841,03	897,64
79	100	rc103C100	830,58	833,25	780,88	776,27	781,68
80	100	rc104C100	717,67	720,03	724,28	656,64	723,01
81	100	rc105C100	897,15	896,05	957,06	837,85	953,07
82	100	rc106C100	836,82	833,06	835,44	892,64	832,08
83	100	rc107C100	771,91	720,61	719,47	719,59	774,36
84	100	rc108C100	711,26	720,23	718,48	712,79	716,91
85	100	rc201C100	481,96	419,58	418,29	413,75	484,95
86	100	rc202C100	364,96	372,25	374,18	372,42	367,19
87	100	rc203C100	358,33	354,06	412,87	377,90	423,31
88	100	rc204C100	413,44	449,24	387,63	401,83	478,37
89	100	rc205C100	417,99	403,35	407,54	439,49	416,84
90	100	rc206C100	379,88	407,41	360,50	419,86	350,21
91	100	rc207C100	348,18	353,31	412,94	366,77	350,14
92	100	rc208C100	342,40	372,66	367,25	389,97	338,62

Tablo 10 incelendiğinde küçük boyutlu problemler olan r105C5, rc105C5, rc108C5 örnek problemlerinde 5 çalıştırmanın da amaç fonksiyonu değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. Problem boyutunun küçük olması sebebiyle sonucun bu şekilde elde edildiği düşünülmektedir.

Tablo 11’de her örnek problem için her bir çalıştırmanın çözümü bulma süresi (CPU time) ve ortalama çözüm süresi (sn.) belirtilmiştir. En iyi çözüm süresi olarak adlandırılan en kısa çözüm süresi koyu renkle işaretlenmiştir. Veri setinin en kısa çözüm süresi 9,71 sn iken en uzun çözüm süresinin 11535 sn (yaklaşık 192 dk) olduğu görülmektedir. En uzun çözüm süresine sahip olan örnek problem verisi 100 müşteriden oluşmakla birlikte, Tablo 11 genel olarak da incelendiğinde uzun çözüm sürelerine sahip problemlerin 100 müşteriden oluşan problemler olduğu görülmektedir. Problemin NP-hard olması, problem verisinin büyük olması, eklenen kısıtlar ve kromozom yapısının uzun olması sebebiyle bu sürenin normal olduğu düşünülmektedir.

Tablo 11

5 Çalıştırmaya İlişkin Çözüm Süreleri (CPU Times)

Sıra	Müşteri sayısı	Örnek	GA ₁	GA ₂	GA ₃	GA ₄	GA ₅	Ortalama çözüm süresi(sn)
1	5	c101C5	10,48	10,48	10,51	10,69	11,71	10,77
2	5	c103C5	9,74	10,26	9,71	9,83	11,33	10,18
3	5	c206C5	10,48	10,21	9,99	10,39	11,85	10,58
4	5	c208C5	9,94	10,28	9,74	9,87	11,26	10,22
5	5	r104C5	10,11	10,66	10,31	10,15	11,66	10,58
6	5	r105C5	10,00	9,98	10,14	10,30	11,48	10,38
7	5	r202C5	10,14	10,35	10,14	10,24	11,66	10,51
8	5	r203C5	10,60	10,28	10,59	10,69	11,77	10,79
9	5	rc105C5	10,44	10,47	10,37	10,31	11,88	10,69
10	5	rc108C5	10,66	10,81	10,24	11,01	12,26	11,00
11	5	rc204C5	10,23	10,33	10,36	10,63	11,67	10,64
12	5	rc208C5	10,92	10,80	10,00	10,28	11,38	10,68
13	10	c101C10	14,86	15,31	15,15	15,66	17,93	15,78
14	10	c104C10	13,75	15,01	14,73	13,81	18,05	15,07
15	10	c202C10	15,13	15,29	14,18	14,94	17,51	15,41
16	10	c205C10	14,66	14,77	14,09	14,14	16,17	14,77
17	10	r102C10	14,27	14,98	14,34	18,27	16,71	15,71
18	10	r103C10	15,02	14,50	15,11	14,51	16,76	15,18
19	10	r201C10	14,75	14,99	15,10	14,55	17,29	15,34
20	10	r203C10	17,79	17,97	15,88	20,51	20,32	18,49
21	10	rc102C10	17,57	15,19	14,59	17,81	19,52	16,93
22	10	rc108C10	15,29	15,76	15,47	16,08	17,41	16,00
23	10	rc201C10	14,87	15,78	15,49	15,35	17,08	15,71
24	10	rc205C10	16,10	23,53	16,10	17,16	18,28	18,23
25	15	c103C15	21,97	19,07	21,33	24,82	23,93	22,22
26	15	c106C15	19,24	22,08	19,90	18,67	23,25	20,63
27	15	c202C15	21,49	21,81	21,12	22,31	24,74	22,29
28	15	c208C15	21,18	29,41	22,04	22,17	24,89	23,94
29	15	r102C15	29,50	30,18	28,71	30,25	31,71	30,07
30	15	r105C15	29,70	25,21	26,19	29,90	23,42	26,88
31	15	r202C15	25,32	24,15	25,43	24,24	28,20	25,47
32	15	r209C15	24,25	18,14	29,79	25,62	27,13	24,98
33	15	rc103C15	29,95	32,23	32,10	30,23	32,70	31,44
34	15	rc108C15	20,52	22,38	21,98	21,30	22,21	21,68
35	15	rc202C15	23,12	22,15	23,26	22,79	26,07	23,48
36	15	rc204C15	25,35	28,77	25,32	37,18	27,85	28,89
37	100	c101C100	3267	3676	3475	3462	3454	3466,83
38	100	c102C100	5371	6046	5140	6651	5375	5716,58
39	100	c103C100	7655	7398	7768	8187	7513	7704,45
40	100	c104C100	10172	12014	12271	11383	11253	11418,44
41	100	c105C100	4091	3584	3634	3941	4095	3869,08
42	100	c106C100	4361	5988	3989	5271	4180	4757,72
43	100	c107C100	4650	4350	4428	4161	4428	4403,23
44	100	c108C100	4572	6244	5432	5483	5438	5433,87

45	100	c109C100	7802	6362	7080	7294	6812	7070,29
46	100	c201C100	2731	2459	3277	2560	2858	2776,95
47	100	c202C100	3431	4907	3630	4103	3802	3974,63
48	100	c203C100	5111	5118	6076	4703	6143	5430,12
49	100	c204C100	5465	7382	6470	6835	6544	6539,32
50	100	c205C100	3563	3119	4448	2706	3052	3377,81
51	100	c206C100	3174	3908	4015	3852	3137	3617,05
52	100	c207C100	3457	3446	5074	4991	4638	4321,29
53	100	c208C100	5341	4573	4358	3682	2966	4184,15
54	100	r101C100	2918	2966	3133	3055	3010	3016,15
55	100	r102C100	4339	4384	3976	4129	4044	4174,43
56	100	r103C100	6052	6886	6558	6283	5914	6338,68
57	100	r104C100	9412	9659	10400	10668	9599	9947,45
58	100	r105C100	3367	3324	3189	3195	3579	3330,85
59	100	r106C100	4819	4604	4126	4683	4897	4626,08
60	100	r107C100	6798	6815	7078	7032	6664	6877,61
61	100	r108C100	9270	11150	11218	10493	11983	10822,93
62	100	r109C100	4663	4298	4196	4101	4075	4266,52
63	100	r110C100	7245	6861	7021	6635	6439	6840,37
64	100	r111C100	7746	7072	6594	7096	7023	7106,15
65	100	r112C100	11295	12711	12272	11311	10365	11590,82
66	100	r201C100	3289	2909	2805	3807	3317	3225,20
67	100	r202C100	3231	4926	5853	4313	3520	4368,68
68	100	r203C100	7230	6492	7266	5472	6345	6561,02
69	100	r204C100	10487	7597	6983	9756	10284	9021,17
70	100	r205C100	4384	4483	4662	4041	4166	4347,30
71	100	r206C100	6618	6524	6323	5868	5909	6248,62
72	100	r207C100	4461	8003	5280	6103	7302	6229,69
73	100	r208C100	9417	11971	10544	8873	12855	10731,96
74	100	r209C100	6178	4940	6985	5445	5618	5833,09
75	100	r210C100	6147	6699	6520	6383	7384	6626,39
76	100	r211C100	10372	6730	6374	7432	6572	7496,00
77	100	rc101C100	2747	2723	2980	2861	2874	2836,87
78	100	rc102C100	3685	3579	3732	3730	3789	3702,79
79	100	rc103C100	5186	5280	5524	4844	5276	5221,93
80	100	rc104C100	8393	7414	7944	8422	9119	8258,47
81	100	rc105C100	3278	3143	3116	3092	3214	3168,83
82	100	rc106C100	3208	3079	3250	3266	3075	3175,38
83	100	rc107C100	4616	4548	4520	4906	4799	4677,89
84	100	rc108C100	5927	6862	5693	5764	6124	6073,82
85	100	rc201C100	3390	2937	3532	3313	3679	3370,14
86	100	rc202C100	3723	4142	4017	3615	4029	3905,10
87	100	rc203C100	8192	5594	6112	8852	6438	7037,72
88	100	rc204C100	9991	7692	11746	9458	7543	9286,05
89	100	rc205C100	4866	4536	4349	4252	4747	4549,96
90	100	rc206C100	3928	4551	4362	3500	4451	4158,21
91	100	rc207C100	7278	5483	6440	6109	5582	6178,76
92	100	rc208C100	12513	11536	12821	15990	11666	12905,19

Tablo 10 ve Tablo 11 karşılaştırıldığında en iyi çözümün bulunduğu çalıştırmanın en kısa sürede çözüm bulan çalıştırmaya denk gelmediği örnek problemlerin olduğu görülmektedir.

Tablo 12’de her örnek problem için GA çalıştırmaları sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değerlerine ilişkin istatistiksel bilgilere yer verilmiştir. Sırasıyla amaç fonksiyonunun aldığı minimum ve maksimum değerler, amaç fonksiyonunun ortalama değeri ve standart sapma değeri ile değişim aralığı değeri verilmiştir. Değişim aralığı değeri amaç fonksiyonunun en iyi ve en kötü çözüm değerleri arasındaki fark olarak hesaplanmıştır (Özsoydan, 2011).



Tablo 12

Amaç Fonksiyonu Değerlerine İlişkin İstatistiksel Bilgiler

Sıra	Müşteri sayısı	Örnek	Zmin	Zmak	Zortalama	Değişim aralığı	Standart sapma
1	5	c101C5	119,86	120,75	120,04	0,89	0,36
2	5	c103C5	66,17	66,53	66,32	0,36	0,18
3	5	c206C5	76,82	118,60	87,33	41,77	15,83
4	5	c208C5	65,58	65,71	65,61	0,13	0,05
5	5	r104C5	62,95	113,57	93,32	50,63	24,80
6	5	r105C5	114,32	114,32	114,32	0,00	0,00
7	5	r202C5	66,11	68,27	66,76	2,16	0,79
8	5	r203C5	68,21	70,60	69,90	2,39	0,88
9	5	rc105C5	118,18	118,18	118,18	0,00	0,00
10	5	rc108C5	120,57	120,57	120,57	0,00	0,00
11	5	rc204C5	65,32	66,07	65,69	0,75	0,31
12	5	rc208C5	65,70	68,45	67,12	2,75	1,19
13	10	c101C10	182,91	187,28	184,92	4,36	1,44
14	10	c104C10	76,15	95,12	82,61	18,97	6,60
15	10	c202C10	86,94	130,83	117,51	43,89	15,69
16	10	c205C10	80,18	122,02	100,02	41,84	17,68
17	10	r102C10	172,60	173,10	172,96	0,50	0,19
18	10	r103C10	117,93	119,19	118,64	1,26	0,53
19	10	r201C10	120,52	130,58	126,66	10,06	3,58
20	10	r203C10	89,46	131,06	115,48	41,59	17,70
21	10	rc102C10	182,98	234,76	224,03	51,77	20,53
22	10	rc108C10	179,32	182,44	181,05	3,11	1,10
23	10	rc201C10	128,89	135,87	132,50	6,98	2,64
24	10	rc205C10	139,14	181,78	157,55	42,64	18,24
25	15	c103C15	155,74	187,26	179,44	31,52	11,90
26	15	c106C15	127,50	177,12	150,56	49,63	21,48
27	15	c202C15	152,99	162,94	157,32	9,94	3,36
28	15	c208C15	132,44	148,91	138,71	16,47	5,93
29	15	r102C15	286,42	288,30	287,14	1,88	0,70
30	15	r105C15	178,71	230,42	219,81	51,71	20,55
31	15	r202C15	149,70	210,17	176,29	60,47	23,03
32	15	r209C15	135,01	192,97	151,38	57,96	21,14
33	15	rc103C15	233,58	235,83	234,33	2,25	0,87
34	15	rc108C15	179,46	181,45	180,27	1,98	0,67
35	15	rc202C15	151,05	202,18	188,73	51,14	19,15
36	15	rc204C15	132,05	154,30	143,81	22,25	8,89
37	100	c101C100	807,57	964,40	865,75	156,84	58,81
38	100	c102C100	743,76	863,42	808,57	119,67	39,45
39	100	c103C100	759,60	863,48	806,38	103,88	33,55
40	100	c104C100	790,95	1002,53	898,25	211,58	77,75
41	100	c105C100	779,56	841,74	813,74	62,18	21,57
42	100	c106C100	708,06	1165,84	844,44	457,78	164,79
43	100	c107C100	682,95	825,60	762,99	142,64	49,60
44	100	c108C100	723,74	904,75	793,27	181,02	59,79
45	100	c109C100	719,76	871,77	787,92	152,01	52,78

46	100	c201C100	329,39	408,46	381,19	79,07	26,97
47	100	c202C100	455,35	559,52	507,02	104,17	38,73
48	100	c203C100	432,79	665,15	516,65	232,36	81,11
49	100	c204C100	427,44	650,50	518,63	223,06	92,34
50	100	c205C100	393,90	484,40	437,29	90,51	34,33
51	100	c206C100	430,40	524,60	477,19	94,20	33,87
52	100	c207C100	428,89	460,64	446,15	31,74	11,03
53	100	c208C100	433,12	577,99	494,28	144,88	47,44
54	100	r101C100	1111,11	1685,15	1270,63	574,04	210,10
55	100	r102C100	994,73	1113,00	1062,89	118,28	43,89
56	100	r103C100	887,32	995,94	940,04	108,63	34,59
57	100	r104C100	763,69	827,00	780,52	63,31	23,41
58	100	r105C100	941,68	1054,48	996,71	112,80	35,90
59	100	r106C100	939,20	997,25	973,30	58,05	27,76
60	100	r107C100	712,18	822,10	766,67	109,92	34,82
61	100	r108C100	712,77	777,03	759,09	64,26	23,59
62	100	r109C100	821,80	886,79	859,21	64,99	29,53
63	100	r110C100	706,46	835,94	793,69	129,49	48,97
64	100	r111C100	765,84	826,14	780,97	60,29	22,71
65	100	r112C100	709,08	767,08	754,74	58,00	22,85
66	100	r201C100	400,84	765,84	478,28	365,01	143,86
67	100	r202C100	346,17	358,56	350,15	12,39	4,35
68	100	r203C100	339,41	402,68	369,43	63,27	23,09
69	100	r204C100	279,81	288,45	284,23	8,64	3,28
70	100	r205C100	344,23	413,55	361,42	69,32	26,20
71	100	r206C100	345,49	371,59	357,26	26,10	11,13
72	100	r207C100	286,43	292,74	290,82	6,32	2,47
73	100	r208C100	285,61	299,01	293,08	13,40	4,96
74	100	r209C100	320,41	354,32	336,40	33,91	13,39
75	100	r210C100	323,15	397,09	350,48	73,94	24,86
76	100	r211C100	282,53	291,27	287,43	8,75	2,85
77	100	rc101C100	899,98	1021,57	968,43	121,59	44,52
78	100	rc102C100	834,53	897,64	872,54	63,12	28,50
79	100	rc103C100	776,27	833,25	800,53	56,98	25,70
80	100	rc104C100	656,64	724,28	708,32	67,64	25,95
81	100	rc105C100	837,85	957,06	908,24	119,21	43,86
82	100	rc106C100	832,08	892,64	846,01	60,55	23,37
83	100	rc107C100	719,47	774,36	741,19	54,89	26,10
84	100	rc108C100	711,26	720,23	715,93	8,97	3,39
85	100	rc201C100	413,75	484,95	443,70	71,20	32,53
86	100	rc202C100	364,96	374,18	370,20	9,22	3,51
87	100	rc203C100	354,06	423,31	385,29	69,25	28,15
88	100	rc204C100	387,63	478,37	426,10	90,74	33,16
89	100	rc205C100	403,35	439,49	417,04	36,14	12,51
90	100	rc206C100	350,21	419,86	383,57	69,66	26,63
91	100	rc207C100	348,18	412,94	366,26	64,76	24,22
92	100	rc208C100	338,62	389,97	362,18	51,34	19,26

Değişim aralığı ve standart sapma değerleri incelendiğinde 100 müşteriden oluşan örnek problemlerde değerlerin küçük boyutlu örnek problemlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Çalıştırma sayısının az olması sebebiyle büyük boyutlu problemlerde standart sapma değerleri yüksek çıkmıştır. Standart sapma değerlerinin c106C100, r101C100, r201C100 örnek problemlerinde diğer örnek problemlere kıyasla daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Diğer örnek problemler incelendiğinde önerilen algoritmanın sonuçların tekrar edilebilirliği açısından başarılı bir yöntem olduğu söylenebilir.

Tablo 13'te amaç fonksiyonunun en iyi değeri aldığı çalıştırmaya ilişkin sonuç bilgilerine yer verilmiştir. Çözümler incelendiğinde 92 örnek problemin tamamında şarj istasyonu kurulduğu görülmüştür. Şarj istasyonu konumu olarak çoğunlukla müşteri konumları tercih edilirken, aday istasyon noktalarının da şarj istasyonu konumu olarak tercih edildiği görülmüştür. Müşteriye hizmet verme sırasında aracın şarj edilebiliyor olması ve zaman penceresinin karşılanabilmesi amacıyla müşteri konumların çözümlerde yer aldığı düşünülmektedir.

Şarj istasyonları incelendiğinde 92 örnek problemin çözümünde toplam 357 adet şarj istasyonu kurulduğu görülmektedir. Türlerine göre inceleme yapıldığında 104 adet yavaş şarj istasyonu, 28 adet normal ve 225 adet hızlı şarj istasyonu kurulduğu görülmüştür. Yavaş tipte şarj istasyonlarının 92 tanesi örnek problemlerin depolarında kuruludur. Zaman penceresinin izin verdiği durumlarda şarj etme maliyetinin daha uygun olması sebebiyle 12 adet diğer konumlarda kurulduğu düşünülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde şarj istasyonu türü olarak en çok hızlı şarj istasyonunun kurulduğu görülmektedir. Zaman pencerelerinin karşılanabilmesi amacıyla sonucun bu şekilde ortaya çıktığı düşünülmektedir. Nitekim literatürde yer alan çalışmaların birçoğunda zaman pencerelerinin karşılanabilmesi ve gerçek hayata uygunluğu arttırmak amacıyla problemlerde sadece hızlı şarj istasyonu türünün kullanıldığı kabul edilmektedir.

Tablo 13

Amaç Fonksiyonun En İyi Değeri Aldığı Çözüme İlişkin Bilgiler

Sıra	Müşteri sayısı	Örnek problem	Çalıştırma sayısı	Toplam istasyon sayısı	İstasyon türü/sayısı			Araç sayısı	Araç satın maliyeti (€)	Toplam mesafe(km)	Toplam mesafe maliyeti(€)	Şarj etme maliyeti(€)	Toplam maliyet (€)	Çözüm süresi (sn)
					Yavaş	Normal	Hızlı							
1	5	c101C5	*1,2,3,4	2	2	0	0	2	106,64	243,23	12,36	0,86	119,86	10,48
2	5	c103C5	*3,4,5	2	1	1	0	1	53,32	175,09	8,89	3,96	66,17	9,71
3	5	c206C5	*1,3	2	1	0	1	1	53,32	236,51	12,01	11,49	76,82	9,99
4	5	c208C5	*1,2,4,5	2	1	1	0	1	53,32	159,20	8,09	4,17	65,58	9,87
5	5	r104C5	*2,3	3	1	0	2	1	53,32	132,81	6,75	2,88	62,95	10,31
6	5	r105C5	*1,2,3,4,5	1	1	0	0	2	106,64	151,15	7,68	0,00	114,32	10,31
7	5	r202C5	2	2	1	1	0	1	53,32	161,17	8,19	4,60	66,11	10,35
8	5	r203C5	5	2	1	1	0	1	53,32	178,05	9,05	5,85	68,21	11,77
9	5	rc105C5	*1,2,3,4,5	1	1	0	0	2	106,64	227,19	11,54	0,00	118,18	10,31
10	5	rc108C5	*1,2,3,4,5	2	1	0	1	2	106,64	245,87	12,49	1,44	120,57	10,24
11	5	rc204C5	4	2	2	0	0	1	53,32	175,69	8,92	3,07	65,32	10,63
12	5	rc208C5	2	2	1	0	1	1	53,32	167,84	8,53	3,85	65,70	10,80
13	10	c101C10	2	2	1	0	1	3	159,96	368,02	18,70	4,26	182,91	15,31
14	10	c104C10	1	2	1	0	1	1	53,32	249,09	12,65	10,18	76,15	13,75
15	10	c202C10	3	3	1	2	0	1	53,32	316,43	16,07	17,55	86,94	14,18
16	10	c205C10	3	3	1	1	1	1	53,32	282,24	14,34	12,52	80,18	14,09
17	10	r102C10	2	1	1	0	0	3	159,96	248,72	12,64	0,00	172,60	14,98
18	10	r103C10	2	2	1	1	0	2	106,64	210,71	10,70	0,59	117,93	14,50
19	10	r201C10	3	3	1	0	2	2	106,64	216,48	11,00	2,88	120,52	15,10
20	10	r203C10	3	3	1	2	0	1	53,32	338,81	17,21	18,93	89,46	15,88
21	10	rc102C10	3	2	1	0	1	3	159,96	376,10	19,11	3,92	182,98	14,59
22	10	rc108C10	1	2	1	1	0	3	159,96	369,60	18,78	0,59	179,32	15,29
23	10	rc201C10	2	3	1	2	0	2	106,64	314,13	15,96	6,29	128,89	15,78

Sıra	Müşteri sayısı	Örnek problem	Çalıştırma sayısı	Toplam istasyon sayısı	İstasyon türü/sayısı			Araç sayısı	Araç satın maliyeti (€)	Toplam mesafe(km)	Toplam mesafe maliyeti(€)	Şarj etme maliyeti(€)	Toplam maliyet (€)	Çözüm süresi (sn)
					Yavaş	Normal	Hızlı							
24	10	rc205C10	2	2	1	1	0	2	106,64	408,11	20,73	11,76	139,14	23,53
25	15	c103C15	5	4	1	0	3	2	106,64	501,37	25,47	23,63	155,74	23,93
26	15	c106C15	1	2	1	0	1	2	106,64	306,60	15,58	5,28	127,50	19,24
27	15	c202C15	5	3	1	1	1	2	106,64	500,96	25,45	20,90	152,99	24,74
28	15	c208C15	5	3	2	1	0	2	106,64	359,65	18,27	7,53	132,44	24,89
29	15	r102C15	1	1	1	0	0	5	266,60	390,12	19,82	0,00	286,42	29,50
30	15	r105C15	5	3	1	0	2	3	159,96	312,41	15,87	2,88	178,71	23,42
31	15	r202C15	3	4	1	0	3	2	106,64	430,89	21,89	21,17	149,70	24,15
32	15	r209C15	3	3	1	2	0	2	106,64	336,77	17,11	11,27	135,01	18,14
33	15	rc103C15	1	1	1	0	0	4	213,28	399,55	20,30	0,00	233,58	29,95
34	15	rc108C15	5	1	1	0	0	3	159,96	383,93	19,50	0,00	179,46	22,21
35	15	rc202C15	1	3	1	1	1	2	106,64	475,78	24,17	20,24	151,05	23,12
36	15	rc204C15	1	5	2	2	1	2	106,64	344,32	17,49	7,92	132,05	25,35
37	100	c101C100	3	5	1	0	4	13	693,16	1703,29	86,53	27,88	807,57	3475
38	100	c102C100	3	5	1	3	1	12	639,84	1649,66	83,80	20,11	743,76	5140
39	100	c103C100	2	14	1	1	12	11	586,52	1850,65	94,01	79,07	759,60	7398
40	100	c104C100	1	15	2	2	11	11	586,52	2208,30	112,18	92,25	790,95	10172
41	100	c105C100	2	7	1	0	6	12	639,84	1787,32	90,80	48,93	779,56	3584
42	100	c106C100	5	5	1	0	4	11	586,52	1663,61	84,51	37,03	708,06	4180
43	100	c107C100	4	6	3	0	3	11	586,52	1518,50	77,14	19,29	682,95	4161
44	100	c108C100	3	2	1	0	1	11	586,52	1627,58	82,68	54,54	723,74	5432
45	100	c109C100	3	6	1	0	5	11	586,52	1828,98	92,91	40,33	719,76	7080
46	100	c201C100	2	2	1	0	1	5	266,60	980,95	49,83	12,96	329,39	2459
47	100	c202C100	2	15	2	0	13	5	266,60	1875,37	95,27	93,48	455,35	4907
48	100	c203C100	1	22	2	0	20	4	213,28	1760,63	89,44	130,07	432,79	5111

Sıra	Müşteri sayısı	Örnek problem	Çalıştırma sayısı	Toplam istasyon sayısı	İstasyon türü/sayısı			Araç sayısı	Araç satın maliyeti (€)	Toplam mesafe(km)	Toplam mesafe maliyeti(€)	Şarj etme maliyeti(€)	Toplam maliyet (€)	Çözüm süresi (sn)
					Yavaş	Normal	Hızlı							
49	100	c204C100	2	15	2	0	13	5	266,60	1875,37	95,27	93,48	427,44	7382
50	100	c205C100	4	3	2	0	1	6	319,92	1131,88	57,50	16,48	393,90	2706
51	100	c206C100	1	12	2	0	10	5	266,60	1702,43	86,48	77,32	430,40	3174
52	100	c207C100	1	13	1	0	12	5	266,60	1613,43	81,96	80,33	428,89	3457
53	100	c208C100	1	8	1	0	7	5	266,60	1542,16	78,34	88,17	433,12	5341
54	100	r101C100	4	2	1	0	1	19	1013,08	1901,38	96,59	1,44	1111,11	3055
55	100	r102C100	2	3	1	0	2	17	906,44	1681,21	85,41	2,88	994,73	4384
56	100	r103C100	2	5	1	0	4	15	799,80	1609,36	81,76	5,76	887,32	6886
57	100	r104C100	5	2	1	0	1	13	693,16	1360,04	69,09	1,44	763,69	9599
58	100	r105C100	2	3	1	0	2	16	853,12	1686,63	85,68	2,88	941,68	3324
59	100	r106C100	3	3	1	0	2	16	853,12	1637,74	83,20	2,88	939,20	4126
60	100	r107C100	3	3	1	0	2	12	639,84	1367,41	69,46	2,88	712,18	7078
61	100	r108C100	4	6	1	0	5	12	639,84	1293,98	65,73	7,20	712,77	10493
62	100	r109C100	2	2	1	0	1	14	746,48	1454,40	73,88	1,44	821,80	4298
63	100	r110C100	5	1	1	0	0	12	639,84	1311,35	66,62	0,00	706,46	6439
64	100	r111C100	5	1	1	0	0	13	693,16	1430,78	72,68	0,00	765,84	7023
65	100	r112C100	2	3	1	0	2	12	639,84	1306,31	66,36	2,88	709,08	12711
66	100	r201C100	2	1	1	0	0	6	319,92	1592,85	80,92	0,00	400,84	2909
67	100	r202C100	4	1	1	0	0	5	266,60	1566,33	79,57	0,00	346,17	4313
68	100	r203C100	3	2	1	0	1	5	266,60	1404,94	71,37	1,44	339,41	7266
69	100	r204C100	1	2	1	0	1	4	213,28	1281,32	65,09	1,44	279,81	10487
70	100	r205C100	1	3	1	1	1	5	266,60	1488,23	75,60	2,03	344,23	4384
71	100	r206C100	4	2	1	0	1	5	266,60	1524,58	77,45	1,44	345,49	5868
72	100	r207C100	5	1	1	0	0	4	213,28	1439,93	73,15	0,00	286,43	7302
73	100	r208C100	1	5	1	0	4	4	213,28	1310,39	66,57	5,76	285,61	9417

Sıra	Müşteri sayısı	Örnek problem	Çalıştırma sayısı	Toplam istasyon sayısı	İstasyon türü/sayısı			Araç sayısı	Araç satın maliyeti (€)	Toplam mesafe(km)	Toplam mesafe maliyeti(€)	Şarj etme maliyeti(€)	Toplam maliyet (€)	Çözüm süresi (sn)
					Yavaş	Normal	Hızlı							
74	100	r209C100	3	7	1	0	6	4	213,28	1483,86	75,38	31,75	320,41	6985
75	100	r210C100	5	13	1	0	12	4	213,28	1475,56	74,96	34,91	323,15	7384
76	100	r211C100	2	1	1	0	0	4	213,28	1363,16	69,25	0,00	282,53	6730
77	100	rc101C100	1	1	1	0	0	15	799,80	1972,01	100,18	0,00	899,98	2474
78	100	rc102C100	1	1	1	0	0	14	746,48	1733,19	88,05	0,00	834,53	3685
79	100	rc103C100	4	4	1	0	3	13	693,16	1550,96	78,79	4,32	776,27	4844
80	100	rc104C100	4	1	1	0	0	11	586,52	1380,23	70,12	0,00	656,64	8422
81	100	rc105C100	4	1	1	0	0	14	746,48	1798,58	91,37	0,00	837,85	3092
82	100	rc106C100	5	1	1	0	0	14	746,48	1685,13	85,60	0,00	832,08	3075
83	100	rc107C100	3	1	1	0	0	12	639,84	1567,48	79,63	0,00	719,47	4520
84	100	rc108C100	1	1	1	0	0	12	639,84	1405,86	71,42	0,00	711,26	5927
85	100	rc201C100	4	1	1	0	0	6	319,92	1846,97	93,83	0,00	413,75	3313
86	100	rc202C100	1	1	1	0	0	5	266,60	1936,30	98,36	0,00	364,96	3723
87	100	rc203C100	2	2	1	0	1	5	266,60	1693,23	86,02	1,44	354,06	5594
88	100	rc204C100	3	16	1	0	15	4	213,28	1777,49	90,30	84,05	387,63	11746
89	100	rc205C100	2	1	1	0	0	6	319,92	1642,24	83,43	0,00	403,35	4536
90	100	rc206C100	5	1	1	0	0	5	266,60	1645,78	83,61	0,00	350,21	4451
91	100	rc207C100	1	2	1	0	1	5	266,60	1577,47	80,14	1,44	348,18	7278
92	100	rc208C100	5	11	1	0	10	4	213,28	1451,13	73,72	51,62	338,62	11666

*Çalıştırma sayılarının birden fazla olduğu durumlarda daha kısa sürede çözüm veren çalıştırmanın sonuçlarına yer verilmiştir.

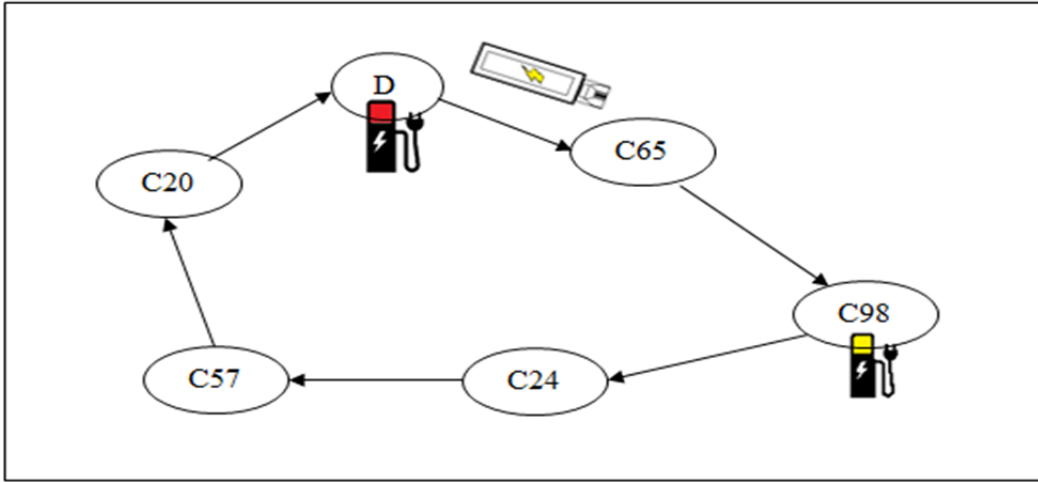
Ele alınan problemin matematiksel formülasyonunun literatürde yer alan diğer çalışmalarla birebir aynı olmaması sebebiyle sonuçların bir başka çalışmayla karşılaştırılması mümkün olamamıştır. Ancak Tablo 14 incelendiğinde büyük boyutlu örnek problemler için 1 grubunda yer alan örnek problemlerin çözümünde daha fazla araca ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Bu, aslında beklenen bir durumdur. Çünkü grup R1, C1 ve RC1 dar bir zaman penceresine sahip olduğundan, müşterilerin tüm siparişlerinin yetişmesi için rotada daha fazla araç kullanılması gerekmektedir (Schneider vd., 2014). Dolayısıyla bu problem kümeleri, daha geniş zaman penceresine sahip olan R2, C2 ve RC2'den daha fazla araç kullanmaktadırlar (Schneider vd., 2014). Elde edilen sonuç durumu doğrulamaktadır. Ayrıca Schiffer ve Walter'in (2017a) küçük boyutlu örnek problemleri için elde edilen çözümle kıyaslandığında bazı örnek problemlerde daha düşük sayıda araç çıkarıldığı da gözlemlenmiştir.

Tablo 14

Büyük Boyutlu Örnek Problemler (100 müşteri) İçin Ortalama Araç Sayıları

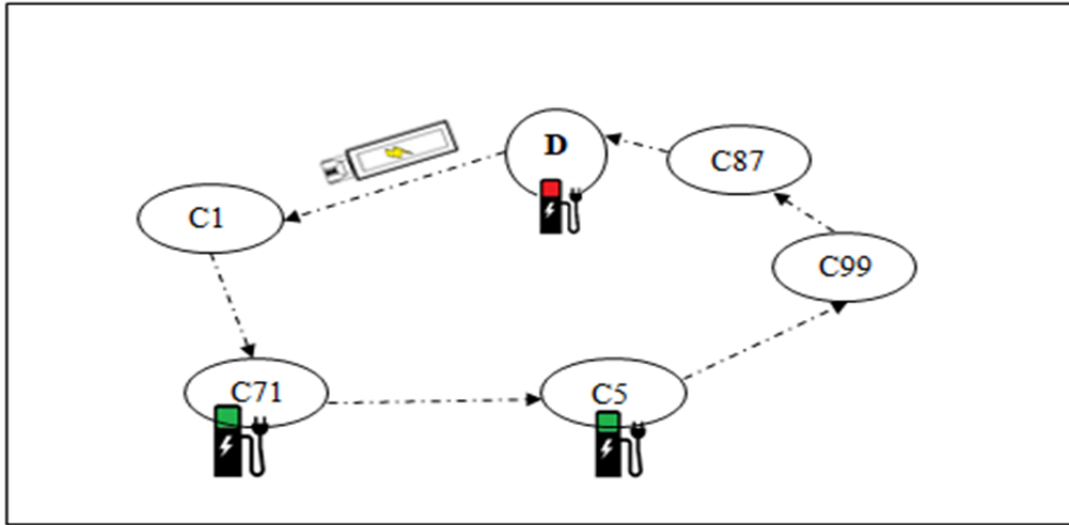
Örnek problem grubu	Ortalama araç sayısı
R1	14,25
R2	4,54
C1	11,44
C2	5
RC1	13,12
RC2	5

Aşağıda şarj istasyonlarının kurulduğu dört örnek problemin çözümüne yer verilmiştir. Şekillerde (Şekil 9 – Şekil 12) hızlı şarj yeşil, normal şarj sarı ve yavaş şarj kırmızı ile gösterilmektedir. 5 müşteriden oluşan c103C5 örnek problemi incelendiğinde (Şekil 9) müşterilere hizmet vermek için 1 aracın yeterli olduğu ortaya çıkmıştır. Depo düğümü hariç C98 düğümünde normal tipte şarj istasyonu kurulmuş, araç müşteriye hizmet verirken aracı servis süresi kadar şarj ederek rotasına devam etmiştir.



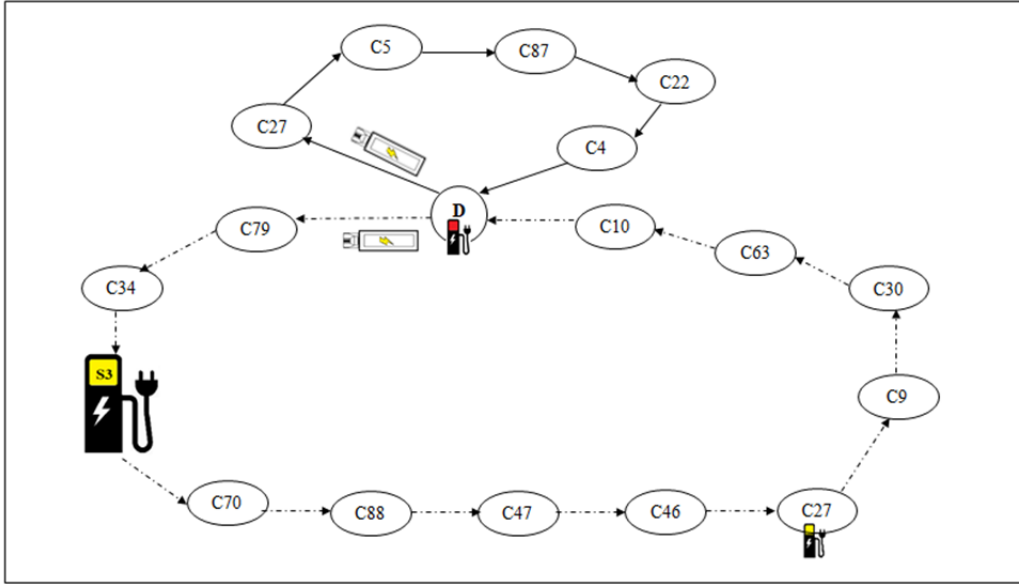
Şekil 9. c103C5 örnek problemi çözümü

Şekil 10'da gösterilen r104C5 örnek probleminin çözümü için depodan 1 araç çıkarılmıştır. Depo düğümü hariç c71 ve c5 müşterilerinde hızlı şarj istasyonu kurulmuş, aynı anda müşteriye hizmet verirken araçlar servis süresi kadar şarj edilmiştir.



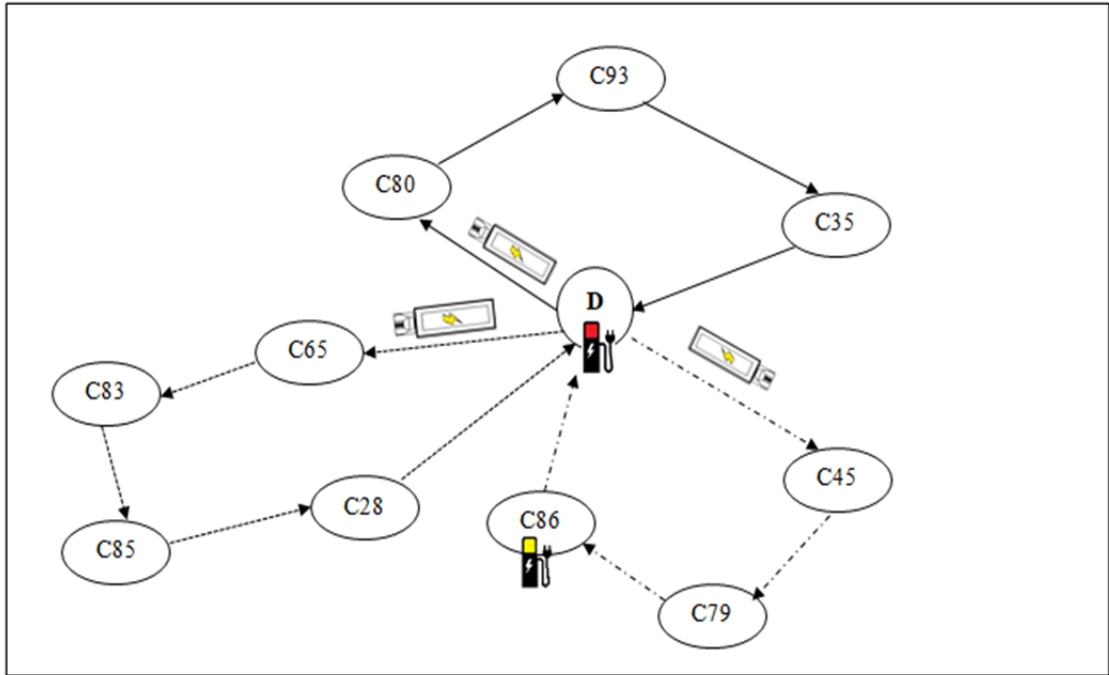
Şekil 10. r104C5 örnek problemi çözümü

rc108C10 örnek probleminin çözümü için depodan 3 araç çıkarılmıştır (Şekil 11). Araçlardan ikisi rotasını şarj ihtiyacı duymadan tamamlarken, araçlardan biri C86 düğümünde kurulan normal tipte şarj istasyonunda servis süresi kadar aracı şarj ederek rotasını tamamlamıştır.



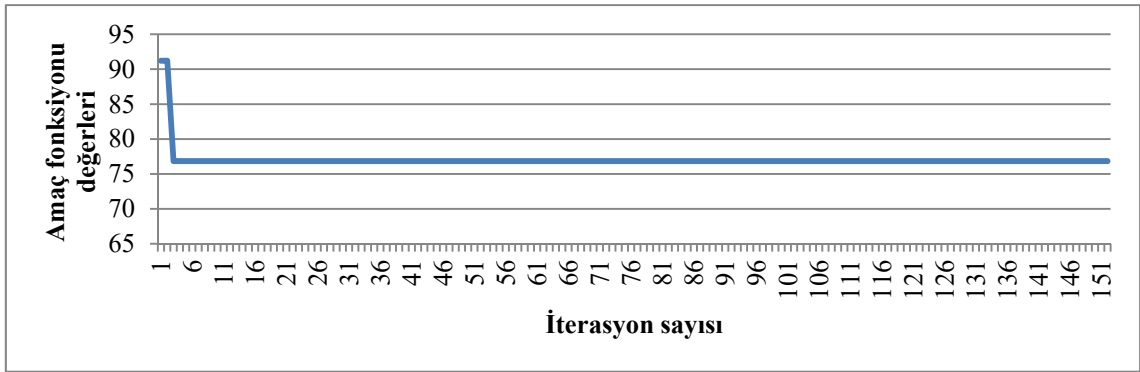
Şekil 11. rc108C10 örnek problemi çözümü

r209C15 örnek problemi için (Şekil 12) depodan 2 araç çıkarılmıştır. Araçlardan biri rotasını şarj istasyonuna uğramadan tamamlamıştır. Diğer araç ise S3 düğümünde kurulan normal tipte şarj istasyonuna ve C27 müşteri düğümünde kurulan normal tipte şarj istasyonuna uğrayarak aracı kapasitesinin %90'ına kadar şarj ederek rotasını tamamlamıştır.

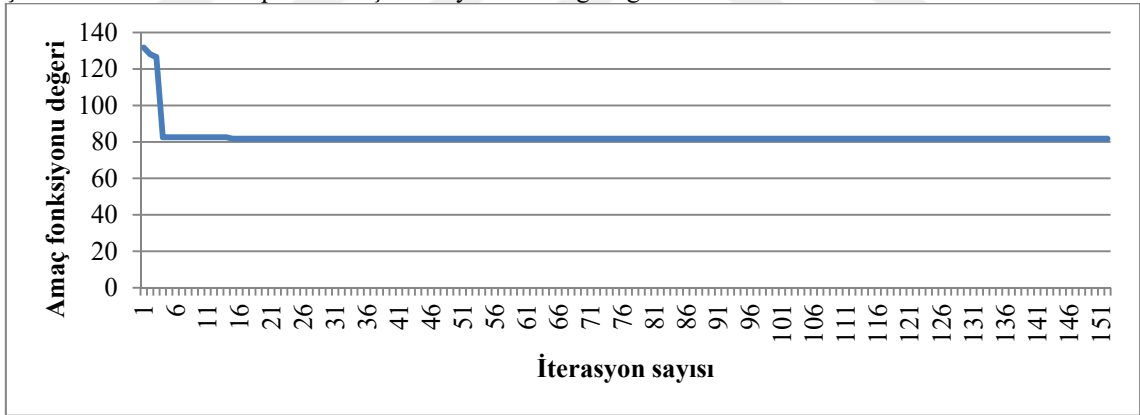


Şekil 12. r209C15 örnek problemi çözümü

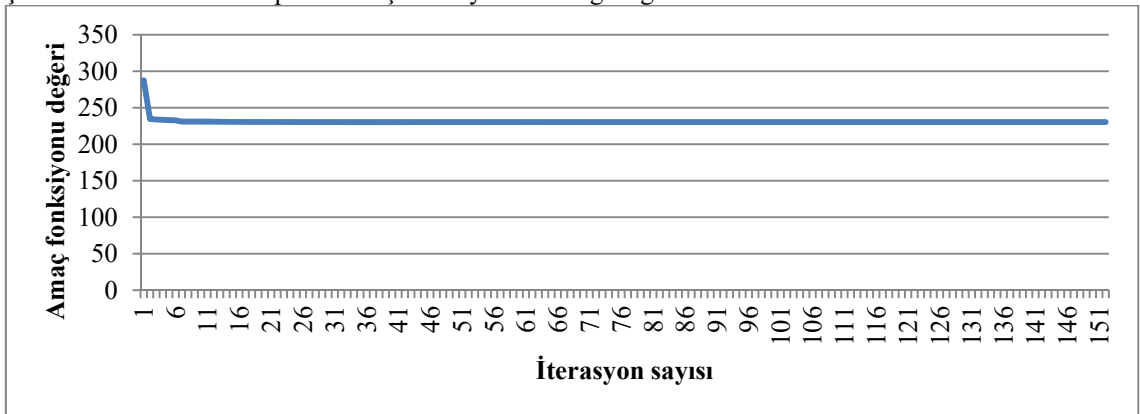
Önerilen GA için yakınsama grafikleri hazırlanmıştır. 5, 10, 15 ve 100 müşteriden oluşan örnek problemler için hazırlanan yakınsama grafikleri (Şekil 13-16) incelendiğinde, 5 müşteriden oluşan c206C5 örnek problemi için amaç fonksiyonu değerinin 3. iterasyondan sonra, 10 müşteriden oluşan c205C10 örnek problemi için 14. iterasyondan sonra, 15 müşteriden oluşan r105C15 örnek problemi için 13. iterasyondan sonra, 100 müşteriden oluşan rc206C100 örnek problemi için 102. iterasyondan sonra sabit bir şekilde azaldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar önerilen GA'nın yakınsamayı hızlı bir şekilde garanti edebileceğini göstermektedir.



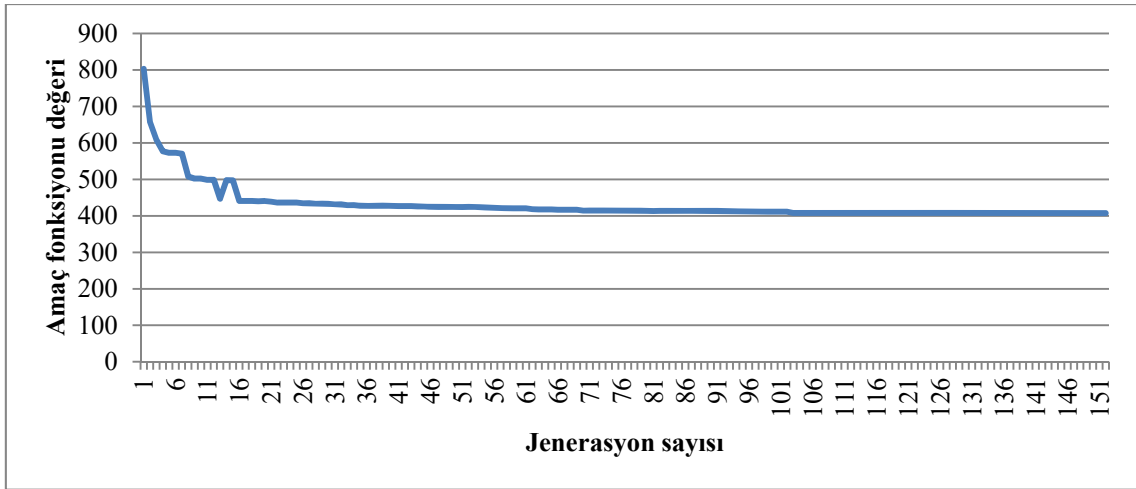
Şekil 13. c206C5 örnek problemi için GA yakınsama grafiği



Şekil 14. c205C10 örnek problemi için GA yakınsama grafiği



Şekil 15. r105C15 örnek problemi için GA yakınsama grafiği



Şekil 16. rc206C100 örnek problemi için GA yakınsama grafiği

SONUÇ

Sürdürülebilirlik kavramının hemen her ortamda sıkça dillendirildiği bugünlerde işletmelerin sosyal sorumlulukları, çevreye verdikleri zararların pişmanlığı, pazarlama stratejileri, tüketicinin bilinçlenmesi ve çevreye daha az zarar vereni tercih etmesi lojistik sektörünü çevre lehine faaliyetlerde bulunmaya yöneltmektedir. Bu sebeple modern lojistik endüstrisinin günümüzde en önemli konularından biri çevreye verilen zararı azaltmak adına yeni teknolojilerin ve süreçlerin lojistik faaliyetlere nasıl uyarlanacağı konusudur (Shao vd., 2017).

Yeni teknolojilerin lojistik faaliyetlerde kullanılmasına yönelik gelişmelerden biri de alternatif yakıtlı araçlardır. Günümüzde alternatif yakıtlı araçlar sıralamasında elektriğin depolanabilmesi, elde edilmesinin diğer alternatif yakıt türlerine kıyasla daha kolay olması, tamamen elektrikli versiyonlarının sıfır emisyonu sahip olması, enerji maliyetlerini %90'a kadar düşürebilmesi (Bruglieri vd., 2015) gibi özelliklerinden dolayı elektrikli araçlar ilk sıralarda yer almaktadır. Teknolojideki gelişmeler sayesinde elektrikli araçlar performans gibi birçok açıdan içten yanmalı motorlu araçları geçmiş durumdadır. İçten yanmalı motorlu araçların kullanımının yasaklanmaya başladığı yerlerde kullanılabilen elektrikli araçların verimliliği, içten yanmalı motorlu araçlarla kıyaslandığında %90'dır (Bruglieri vd., 2015). Elektrikli araçların sunduğu bu avantajlar elektrikli araç pazarının büyümesini ve elektrikli araçların yaygınlaşmasını sağlamaktadır. 2020 yılının başlarında Çin, İtalya, Fransa ve İspanya'da pandemiden kaynaklı olarak araç üretiminde düşüşler, İngiltere, Almanya, ABD'de araba pazarında küçülmeler meydana gelirken bile Avrupa'da elektrikli araç pazarı büyümeye devam etmiştir (International Transport Forum, 2020).

Lojistik sektörünün sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından önemli bir fırsat olarak görülen elektrikli araçların gelecekte kullanımı artacak, sürücüsüz araçlar da trafikte kullanılmaya başlanacaktır. Sürücüsüz araçların devreye girmesiyle birlikte sürücünün dinlenme zamanlarında taşıma faaliyeti devam edebilecek, böylece daha kısa sürelerde güvenli bir şekilde taşımacılık gerçekleştirilebilecektir. Bazı binek araç modelleri için yapılan batarya değişimi elektrikli ticari araçlar için de mümkün olacak,

şarj için kaybedilen sürelerden tasarruf sağlanacaktır. Ayrıca elektrikli araçların çevresel faydalarına ek olarak, işletmelerin taşımacılık faaliyetlerinde kullandıkları araçlardan kaynaklı sabit ve değişken maliyetlerin azaltılması da sağlanabilecektir. Her ne kadar ülkemizde henüz emisyon için ücret ödenmese de gelişmiş ülkelerde uygulanan emisyon vergisi alımı uygulandığında lojistik işletmeleri için elektrikli araçlar avantajlı hale gelecektir.

Elektrikli araçların olumlu yönlerinin yanında içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla yüksek satın alma maliyetleri, menzillerinin düşük olması, şarj istasyonlarının yetersizliği, araçların şarj sürelerinin uzun olması, ülkelerin enerji altyapılarının bu sisteme uygun olmaması gibi uygulama zorlukları da mevcuttur.

Bahsedilen olumsuz yönlerden dolayı özellikle lojistik faaliyetlerde elektrikli ticari araçların kullanımının yaygınlaştırılabilmesi için araç rotalama, şarj istasyonu konumlarının belirlenmesi, hangi tip şarj istasyonunda ne kadar süre şarj edileceğine ilişkin planlarının iyi yapılması gerekmektedir. Her ne kadar rotalama ve şarj istasyonu konum kararları bağımsız olarak görülse de aslında birbirine bağlı konulardır. İhtiyaç duyulan elektrikli araçların sayısı şarj istasyonlarının sayısından ve konumundan etkilendiği ve bu durumun tersi de geçerli olduğundan her iki kararın eş zamanlı olarak ele alınması gerekmektedir (Schiffer ve Walther, 2017a). Özellikle elektrikli araçlar için şarj istasyonu yer seçimi ve kullanılacak şarj istasyonu teknolojisinin seçiminde elektrikli araçların rotaları oldukça önemli bir konumdadır (Paz vd., 2018; Macrina vd., 2019).

Dikkate alınması gereken bir diğer konu elektrikli ticari araçların enerji tüketimleridir. Elektrikli ticari araçlar için enerji tüketimi, aracın şarj istasyonunda geçireceği süreyi ve aracın gidebileceği maksimum mesafeyi belirlediği için oldukça önemli bir kavramdır (Goeke ve Schneider, 2015). Ancak literatürde yer alan birçok çalışmada enerji tüketiminin yalnızca mesafeyle doğru orantılı olarak azaldığı durum ele alınmıştır.

Yukarıda bahsedilen sebeplerle tez çalışmasında gerçekçi enerji tüketimi dikkate alınarak elektrikli ticari araçlar için araç rotalarının, şarj istasyonu konumlarının ve şarj istasyonu türlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Literatürde Elektrikli Araç Yer Seçimi ve Rotalama Problemi olarak adlandırılan problemin, gerçek hayata yakınlığını arttırmak amacıyla enerji tüketiminin araç boş ağırlığı, taşınan yük miktarı, araç hızı, araç teknik özellikleri, seyahat mesafesi faktörlerinden etkilendiği durum dikkate alınmıştır. Ayrıca bataryanın aşınmasını engellemek amacıyla batarya kapasitesinin

%10-%90 arasında kalmasına ilişkin kısıt eklenmiştir. Yine gerçek hayata uygunluğunu arttırmak amacıyla sürücü sürüş süresi de probleme dâhil edilmiştir. Problemin çözümünde temeli evrim ve genetiğe dayalı, verimli, uyarlanabilir ve robast (Kumar, 2013) bir yöntem olan ve daha önce literatürde benzer problemlerin çözümünde kullanılmamış olan Genetik Algoritma yöntemi kullanılmıştır.

Problemin çözümü incelendiğinde enerji tüketiminin daha gerçekçi bir bakış açısı sunması sebebiyle küçük boyutlu örnek problemlerde şarj istasyonuna uğramadan rotanın tamamlanabilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca şarj istasyonu konumu olarak yoğunlukla müşteri konumlarının tercih edildiği görülmüştür. Şarj istasyonu olarak müşteri konumlarının tercih edilmesindeki sebebin aracın müşteriye hizmet verirken paralel olarak şarj işlemini yapabilmesinin olduğu düşünülmektedir. Gelecekte birçok işletmenin biraraya gelerek ortak müşteri konumlarında şarj istasyonlarını kurma şeklinde planları da olacağı aşikârdır (Koç, Jabali, Mendoza ve Laporte, 2019). Problem çözüm süreleri açısından incelendiğinde küçük boyutlu problemlerin saniyeler içinde çözülürken büyük boyutlu problemlerin daha uzun sürelerde çözüldüğü görülmüştür. Problemin iki NP-hard problemi birleştirmesi, zaman pencereleri ve problem boyutu sebebiyle sonucun bu şekilde elde edildiği düşünülmektedir.

Problem literatürde yer alan farklı problemlere ilişkin kısıtları bir araya getirerek kapsamlı bir bakış açısı sunmaktadır. Elektrikli Araç Rotalama Problemi ve Şarj İstasyonu Yer Seçimi Problemi literatürde son yıllarda çok çalışılan konular olmakla birlikte Elektrikli Araç Yer Seçimi-Rotalama Problemi'ne ilişkin literatürde az sayıda çalışma yer almaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar incelendiğinde (Bölüm II) E-YS-ARP'nin yoğunlukla yabancı literatürde ağırlıklı olduğu görülmektedir. Çalışmanın bu açıdan da Türkçe literatüre katkı sağladığı düşünülmektedir.

Gelecek çalışmalarda, önerilen problem gerçek işletme, trafik ve yol verileri kullanılarak ele alınabilir, şarj istasyonlarında şarj edilebilecek araç sayısının sınırlı olduğu durumlar, çoklu depo durumu, sürücülerin uluslararası karayollarındaki taşımacılık süreleri de ele alınarak çözülebilir. Bu şekilde önerilen matematiksel modelin gerçek hayat sorunlarını çözmeye katkısı artacaktır.

KAYNAKÇA

- Abbasi, M., Rafiee, M., Khosravi, M. R., Jolfaei, A., Menon, V. G., & Koushyar, J. M. (2020). An efficient parallel genetic algorithm solution for vehicle routing problem in cloud implementation of the intelligent transportation systems. *Journal of Cloud Computing*, 9(1), 6. Doi: 10.1186/s13677-020-0157-4
- Abdallahman, A., & Zhuang, W. (2017). A survey on PEV charging infrastructure: impact assessment and planning. *Energies*, 10(10), 1650. 1-25. Doi: 10.3390/en10101650
- Abramson, D.A., Abela, J.: A Parallel Genetic Algorithm for Solving the School Timetabling Problem. In: IJCAI workshop on Parallel Processing in AI, Sydney (August 1991); Also appearing in 15 Australian Computer Science Conference, 1 – 11, Hobart (February 1992).
- Adler, J. D., & Mirchandani, P. B. (2014). Online routing and battery reservations for electric vehicles with swappable batteries. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 285-302. Doi: 10.1016/j.trb.2014.09.005
- Affi, M., Derbel, H., Jarboui, B., & Siarry, P. (2020). A skewed general variable neighborhood search approach for solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. In H. Derbel, B. Jarboui, P. Siarry (Eds), *Green Transportation and New Advances in Vehicle Routing Problems* (pp. 75-89). Switzerland: Springer, Cham. Doi: 10.1007/978-3-030-45312-1_3
- Afroditi, A., Boile, M., Theofanis, S., Sdoukopoulos, E., & Margaritis, D. (2014). Electric vehicle routing problem with industry constraints: trends and insights for future research. *Transportation Research Procedia*, 3, 452-459. Doi: 10.1016/j.trpro.2014.10.026
- Ahmad, A., Alam, M. S., & Chabaan, R. (2017). A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 38-63. Doi: 10.1109/tte.2017.2771619
- Alternative Fuels Data Center (2019). https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_infrastructure.html. Erişim tarihi:09.06.2019

- Amjad, S., Neelakrishnan, S., & Rudramoorthy, R. (2010). Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1104-1110. Doi: 10.1016/j.rser.2009.11.001
- Anderson, C. D., & Anderson, J. (2010). *Electric and hybrid cars: A history*. North Carolina: McFarland.
- Arabas, J., Michalewicz, Z., & Mulawka, J. (1994, June). GAVaPS-a genetic algorithm with varying population size. In *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence* (pp. 73-78). IEEE. USA: Orlando. Doi: 10.1109/ICEC.1994.350039
- Arayıcı, K. C., & Poyrazoglu, G. (2019, August). The optimal placement model for electric vehicle charging stations. In *2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)* (pp. 1-4). IEEE. Türkiye: İstanbul. Doi: 10.1109/PGSRET.2019.8882651
- Aydın, M. M., Çakmak, R., & Yıldırım, M. S. (2018, Kasım). Şehiriçi otoparklarda elektrikli araç (EA) şarj istasyonlarının kurulumu için gerekli tasarım aşamalarının belirlenmesi. In *International Congress on Engineering and Architecture* (s. 900-915). Türkiye: Alanya.
- Aksoy, A., Yalçın, S. E., Küçükoğlu, İ., & Öztürk, N. (2018). Elektrikli kamyonlar için açık uçlu rotalama optimizasyonu. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(4), 1-10. Doi: 10.17482/uumfd.454071
- Baker, B. M., & Ayechew, M. A. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 30(5), 787-800. Doi: 10.1016/S0305-0548(02)00051-5
- Barazesh, M., Saebi, J., & Javidi, D. H. (2015, May). Optimal distribution of electric vehicle types for minimizing total CO₂ emissions. In *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering* (pp. 1585-1590). IEEE. Iran: Tehran. Doi: 10.1109/IranianCEE.2015.7146472
- Basso, R., Kulcsár, B., Egardt, B., Lindroth, P., & Sanchez-Diaz, I. (2019). Energy consumption estimation integrated into the electric vehicle routing problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 141-167. Doi: 10.1016/j.trd.2019.01.006

- BDOTO (2013). Müşteri Görüşleri. <http://www.bdoto.com/documents/BD%20Customer%20Testimonials%2022.05.2013-TR.pdf>. Erişim Tarihi: 9.01.19.
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232-1250. Doi: 10.1016/j.trb.2011.02.004
- Bloomberg NEF (2018). Electric Vehicle Outlook <https://bnef.turtl.co/story/evo2018?teaser=true>. Erişim tarihi: 25.03.2019
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys (CSUR)*, 35(3), 268-308. Doi: 10.1145/937503.937505
- Boujelben, M. K., & Gicquel, C. (2019). Efficient solution approaches for locating electric vehicle fast charging stations under driving range uncertainty. *Computers & Operations Research*, 109, 288-299. Doi: 10.1016/j.cor.2019.05.012
- Boulanger, A. G., Chu, A. C., Maxx, S., & Waltz, D. L. (2011). Vehicle electrification: Status and issues. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 1116-1138. Doi: 10.1109/JPROC.2011.2112750
- Bozkurt, E. (2011). Elektrikli araçlarda şarj durumuna bağlı optimum rota seçimi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms. *Transportation science*, 39(1), 104-118. Doi:10.1287/trsc.1030.0056
- Bruglieri, M., Mancini, S., Pezzella, F., Pisacane, O., & Suraci, S. (2017). A three-phase matheuristic for the time-effective electric vehicle routing problem with partial recharges. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 58, 95-102. Doi: 10.1016/j.endm.2017.03.013
- Bruglieri, M., Pezzella, F., Pisacane, O., & Suraci, S. (2015). A variable neighborhood search branching for the electric vehicle routing problem with time windows. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 47, 221-228. Doi: 10.1016/j.endm.2014.11.029
- Cacchiani, V., Hemmelmayr, V. C., & Tricoire, F. (2014). A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 163, 53-64. Doi: 10.1016/j.dam.2012.08.032

- Calik, H., Oulamara, A., Prodhon, C., & Salhi, S. (2018). The electric location-routing problem: Formulation and Benders decomposition approach. 1-28.
- Calvete, H. I., Galé, C., Oliveros, M. J., & Sánchez-Valverde, B. (2007). A goal programming approach to vehicle routing problems with soft time windows. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1720-1733. Doi: 10.1016/j.ejor.2005.10.010
- Carter, J. N. (2003). Introduction to using genetic algorithms. In M. Nikraves, F. Aminzadeh & L.A. Zadeh (Eds.) *Developments in Petroleum Science* (pp. 51-76). Elsevier.
- Cash Crop Today (2020). <https://cashcroptoday.com/bmw-i3s-electric-car-is-made-from-hemp-composites/>, Erişim tarihi: 21.02.2020.
- CBC.CA(2010). <https://www.cbc.ca/news/technology/cannabis-electric-car-to-be-made-in-canada-1.903115> Erişim tarihi: 08.06.2020.
- Chan, C. C. (2002). The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 90(2), 247-275. Doi: 10.1109/5.989873
- Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704-718. Doi: 10.1109/JPROC.2007.892489.
- Chen, F., Taylor, N., & Kringos, N. (2015). Electrification of roads: Opportunities and challenges. *Applied Energy*, 150, 109-119. Doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.067
- Chen, J., Qi, M., & Miao, L. (2016, December). The electric vehicle routing problem with time windows and battery swapping stations. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 712-716). Indonesia: Bali. Doi: 10.1109/IEEM.2016.7797968
- Chen, R., Qian, X., Miao, L., & Ukkusuri, S. V. (2020). Optimal charging facility location and capacity for electric vehicles considering route choice and charging time equilibrium. *Computers & Operations Research*, 113, 104776. Doi: 10.1016/j.cor.2019.104776
- Chen, T., Zhang, B., Pourbabak, H., Kavousi-Fard, A., & Su, W. (2018). Optimal routing and charging of an electric vehicle fleet for high-efficiency dynamic transit systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), 3563-3572. Doi: 10.1109/TSG.2016.2635025
- Coene, S., Arnout, A., & Spieksma, F. C. (2010). On a periodic vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 61(12), 1719-1728. Doi: 10.1057/jors.2009.154

- Conrad, R. G., & Figliozzi, M. A. (2011, May). The recharging vehicle routing problem. In T. Doolen & E. Van Aken (Eds) *Proceedings of the 2011 industrial engineering research conference* (p. 8). USA: IISE Norcross, GA.
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., & Sormany, J. S. (2005). New heuristics for the vehicle routing problem. In A. Langevin & D. Riopel (Eds) *Logistics systems: design and optimization* (pp. 279-297). Boston: Springer. Doi: 10.1007/0-387-24977-X_9
- Cornuejols, G., Nemhauser, G.L., and Wolsey, L.A. (1990). The uncapacitated facility ' location problem. In P. Mirchandani & R. Francis, (Eds.), *Discrete Location Theory* (pp. 119–171). New York: Wiley.
- Correa, E.S., Steiner, M.T.A., Freitas, A. A., & Carnieri, C. (2004). A genetic algorithm for solving a capacitated p-median problem. *Numerical Algorithms*, 35(2-4), 373-388. Doi: 10.1023/B:NUMA.0000021767.42899.31
- Cortés-Murcia, D. L., Prodhon, C., & Afsar, H. M. (2019). The electric vehicle routing problem with time windows, partial recharges and satellite customers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 130, 184-206. Doi: 10.1016/j.tre.2019.08.015
- Csiszár, C., Csonka, B., Földes, D., Wirth, E., & Lovas, T. (2019). Urban public charging station locating method for electric vehicles based on land use approach. *Journal of Transport Geography*, 74, 173-180. Doi: 10.1016/j.jtrangeo.2018.11.016
- Cui, S., Zhao, H., & Zhang, C. (2018). Multiple types of plug-in charging facilities'location-routing problem with time windows for mobile charging vehicles. *Sustainability*, 10(8), 2855. Doi: 10.3390/su10082855
- Cura, T. (2008). *Modern sezgisel teknikler ve uygulamaları*. İstanbul:Papatya Yayıncılık Eğitim
- Current, J., Daskin, M., & Schilling, D. (2002). Discrete network location models. In Z. Drezner & H. Hamacher (Eds), *Facility location: applications and methods* (pp. 81–118). Berlin: Springer-Verlag.
- Çatay, B., & Keskin, M. (2017, July). The impact of quick charging stations on the route planning of electric vehicles. In *Computers and Communications (ISCC), 2017 IEEE Symposium on* (pp. 152-157). IEEE. Greece: Heraklion. Doi: 10.1109/ISCC.2017.8024521

- Dalaman, Cem (2018, 27 Eylül). Almanya'da Dizel Motorlu Araçlara Yasak Kararı. <https://www.amerikaninsesi.com/a/almanyada-dizel-motorlu-araclara-yasak-karari/4272468.html>. Erişim tarihi: 05.01.2019.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- Daskin, Mark S. (2011). *Network and discrete location: models, algorithms, and applications*. Canada: John Wiley & Sons.
- Davis, B. A., & Figliozzi, M. A. (2013). A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 8-23. Doi: 10.1016/j.tre.2012.07.003
- Davis, S. C., Diegel, S. W., & Boundy, R. G. (2010). Transportation Energy Data Book. Oak Ridge National Laboratory, ORNL-6985 (Edition 29 of ORNL-5198). *Center for Transportation Analysis, Energy and Transportation Science Division*.
- de Araujo Lima, S. J., & De Araújo, S. A. (2020). Genetic Algorithm applied to the Capacitated Vehicle Routing Problem: An analysis of the influence of different encoding schemes on the population behavior. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 73(1), 96-110.
- De Cauwer, C., Van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2015). Energy consumption prediction for electric vehicles based on real-world data. *Energies*, 8(8), 8573-8593. Doi: 10.3390/en8088573
- Delucchi, M. A., & Lipman, T. E. (2010). Lifetime cost of battery, fuel-cell and plug-in hybrid electric vehicles. In G. Pistoia (Ed.), *Electric and hybrid vehicles: Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market* (pp 20-60). Netherlands: Elsevier.
- Desaulniers, G., Errico, F., Irnich, S., & Schneider, M. (2016). Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Operations Research*, 64(6), 1388-1405. Doi: 10.1287/opre.2016.1535
- Dericioglu, C., Yirik, E., Unal, E., Cuma, M.U., Onur, B. & Tumay, M. (2018). A review of charging technologies for commercial electric vehicles. *International Journal of Advances on Automotive and Technology*, 2(1), 61-70. Doi: 10.15659/ijaat.18.01.892

- Donati, A. V., Montemanni, R., Casagrande, N., Rizzoli, A. E., & Gambardella, L. M. (2008). Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system. *European journal of operational research*, 185(3), 1174-1191. Doi: 10.1016/j.ejor.2006.06.047
- Dong, G., Ma, J., Wei, R., & Haycox, J. (2019). Electric vehicle charging point placement optimisation by exploiting spatial statistics and maximal coverage location models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 77-88. Doi: 10.1016/j.trd.2018.11.005
- Dosdoğru, A. T., Göçken, M., & Geyik, F. (2015). Integration of genetic algorithm and Monte Carlo to analyze the effect of routing flexibility. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(5), 1379-1389. Doi: 10.1007/s00170-015-7247-3
- Drexler, M., & Schneider, M. (2015). A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 241(2), 283-30. Doi: 10.1016/j.ejor.2014.08.030
- Dror, M., & Trudeau, P. (1990). Split delivery routing. *Naval Research Logistics (NRL)*, 37(3), 383-402. Doi: 10.1002/nav.3800370304
- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi (2018), <https://www.dunyaenerji.org.tr/elektrikli-araclar/> Erişim tarihi: 31.03.2019.
- Eberhart, R.C. & Shi, Y. (2007). *Computational intelligence: concepts to implementations*. USA: Morgan Kaufmann
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. USA: CRC press.
- Egbue, O., & Long, S. (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy policy*, 48, 717-729. Doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.009
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483. Doi: 10.1016/j.cie.2009.05.009
- Electrification Coalition (2013). *State of the Plug-in Electric Vehicle Market* <https://www.electrificationcoalition.org/state-of-the-plug-in-electric-vehicle-market/>. Erişim tarihi: 10.01.19.
- Energy. Gov (2014). <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, Erişim tarihi: 08.06.2019.

- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100-114. Doi: 10.1016/j.tre.2011.08.001
- Felipe, Á., Ortuño, M. T., Righini, G., & Tirado, G. (2014). A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 71, 111-128. Doi: 10.1016/j.tre.2014.09.003
- Frade, I., Ribeiro, A., Gonçalves, G., & Antunes, A. P. (2011). Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, 2252(1), 91-98. Doi: 10.3141/2252-12
- Froger, A., Mendoza, J. E., Jabali, O., & Laporte, G. (2019). Improved formulations and algorithmic components for the electric vehicle routing problem with nonlinear charging functions. *Computers & Operations Research*, 104, 256-294. Doi: 10.3141/2252-12
- Ganesh, K., & Narendran, T. T. (2007). CLOVES: A cluster-and-search heuristic to solve the vehicle routing problem with delivery and pick-up. *European Journal of Operational Research*, 178(3), 699-717.
- Gagarin, A., & Corcoran, P. (2018). Multiple domination models for placement of electric vehicle charging stations in road networks. *Computers & Operations Research*, 96, 69-79. Doi: 10.1016/j.cor.2018.03.014
- Gendreau, M., Hertz, A., & Laporte, G. (1994). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management science*, 40(10), 1276-1290. Doi: 10.1287/mnsc.40.10.1276
- Gendreau, M., Laporte, G., & Séguin, R. (1996). Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 88(1), 3-12. Doi: 10.1016/0377-2217(95)00050-X
- Genevois, M. E., & Kocaman, H. (2018). Locating electric vehicle charging stations in Istanbul with AHP based mathematical modelling. *International Journal of Transportation Systems*, 3.
- Goeke, D. (2019). Granular tabu search for the pickup and delivery problem with time windows and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 821-836. Doi: 10.1016/j.ejor.2019.05.010

- Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 81-99. Doi: 10.1016/j.ejor.2015.01.049
- Göçken, T., Yaktubay, M., & Kılıç, F. Zaman pencereli araç rotalama problemi çözümü için çok amaçlı genetik algoritma yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(4), 774-786. Doi: 10.29109/gujsc.397543
- Granovskii, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2006). Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 159(2), 1186-1193. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.11.086
- Hanshar, F. T., & Ombuki-Berman, B. M. (2007). Dynamic vehicle routing using genetic algorithms. *Applied Intelligence*, 27(1), 89-99. Doi: 10.1007/s10489-006-0033-z
- Hassanzadeh, A., Mohseninezhad, L., Tirdad, A., Dadgostari, F., & Zolfagharinia, H. (2009). Location-routing problem. In R. Z. Farahani & M. Hekmatfar (Eds.), *Facility location concepts, models, algorithms and case studies* (pp. 395-417). Berlin: Physica, Heidelberg. Doi: 10.1007/978-3-7908-2151-2
- Haupt, R. L., & Haupt, S. E., (2004). *Practical genetic algorithms*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Hemp Foundation (2020). <https://hempfoundation.net/how-hemp-will-revolutionize-the-auto-industry/>, Erişim tarihi: 21.02.2020.
- Herrero, R., Rodríguez Villalobos, A., Cáceres-Cruz, J., & Juan, A. A. (2014). Solving vehicle routing problems with asymmetric costs and heterogeneous fleets. *International Journal of Advanced Operations Management*, 6(1), 58-80. Doi: 10.1504/IJAOM.2014.059620
- Hiermann, G., Hartl, R. F., Puchinger, J., & Vidal, T. (2019). Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 272(1), 235-248. Doi: 10.1016/j.ejor.2018.06.025
- Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S., & Hartl, R. F. (2016). The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *European Journal of Operational Research*, 252(3), 995-1018. Doi: 10.1016/j.ejor.2016.01.038

- Ho, W., Ho, G. T., Ji, P., & Lau, H. C. (2008). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(4), 548-557. Doi: 10.1016/j.engappai.2007.06.001
- Hof, J., Schneider, M., & Goeke, D. (2017). Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops. *Transportation Research Part B: Methodological*, 97, 102-112. Doi: 10.1016/j.trb.2016.11.009
- Hosseini, S., & Sarder, M. D. (2019). Development of a Bayesian network model for optimal site selection of electric vehicle charging station. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, 110-122. Doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.011
- Høyer, K. G. (2008). The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, 16(2), 63-71. Doi: 10.1016/j.jup.2007.11.001
- Huang, S., He, L., Gu, Y., Wood, K., & Benjaafar, S. (2014). Design of a mobile charging service for electric vehicles in an urban environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 787-798. Doi: 10.1109/TITS.2014.2341695
- Hulagu, S., & Celikoglu, H. B. (2020, November). Electrified Location Routing Problem with Energy Consumption for Resources Restricted Archipelagos: Case of Buyukada. In *2020 Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS)* (pp. 323-327). IEEE. Netherlands: Delft, South Holland Province. Doi: 10.1109/FISTS46898.2020.9264865
- International Energy Agency (2013). Global EV outlook: Understanding the electric vehicle landscape to 2020. <https://www.ourenergypolicy.org/resources/global-ev-outlook-understanding-the-electric-vehicle-landscape-to-2020/> Erişim Tarihi:30.04.2019
- International Transport Forum (2020). Electric mobility: taking the pulse in times of coronavirus <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/electric-vehicles-covid-19.pdf> Erişim tarihi: 21.07.2020
- IRENA, Electrification with renewables: Driving the transformation of energy services reports. <https://www.irena.org/publications/2019/Jan/Electrification-with-Renewables> Erişim tarihi:25.03.2019

- İşçi, Ö., & Korukoğlu, S. (2003). Genetik algoritma yaklaşımı ve yöneylem araştırmasında bir uygulama. *Yönetim ve Ekonomi: Celal Bayar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(2), 191-208.
- Jang, J. S. R., Sun, C. T., & Mizutani, E. (1997). *Neuro-fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence*. USA: Prentice-Hall
- Jang, Y. J. (2018). Survey of the operation and system study on wireless charging electric vehicle systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 844-866. Doi: 10.1016/j.trc.2018.04.006
- Jaramillo, J. H., Bhadury, J. & Batta, R. (2002). On the use of genetic algorithms to solve location problems. *Computers & Operations Research*, 29, 761-779. Doi: 10.1016/S0305-0548(01)00021-1
- Jia, H., Ordóñez, F., & Dessouky, M.M. (2007). Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. *Computers & Industrial Engineering*, 52(2), 257-276. Doi: 10.1016/j.cie.2006.12.007
- Jie, W., Yang, J., Zhang, M., & Huang, Y. (2019). The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 879-904. Doi: 10.1016/j.ejor.2018.07.002
- Juan, A. A., Mendez, C. A., Faulin, J., de Armas, J., & Grasman, S. E. (2016). Electric vehicles in logistics and transportation: A survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges. *Energies*, 9(2), 86. Doi: 10.3390/en9020086
- Kalkancı, Ç. (2014). Doğal afet yönetiminde kış koşulları ile mücadelede acil müdahale ekiplerinin organizasyonu. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Kaptan, D., & Cansever, G. (2018, October). Battery chargers in electric vehicles. In *2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)* (pp. 1-3). IEEE. Türkiye: İstanbul. Doi: 10.1109/ceit.2018.8751837
- Karr, L. C., & Freeman L. M. (1999). *Industrial applications of genetic algorithms*. USA: CRC Press.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle Swarm Optimization. In *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks* (pp. 1942-1948). IEEE. Australia: Perth, WA. Doi: 10.1109/ICNN.1995.488968

- Keskin, M. (2014). An adaptive large neighborhood search approach for solving the electric vehicle routing problem with time Windows. Master's Thesis, Sabancı University, Istanbul.
- Keskin Özel, M. (2018). Recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows in deterministic and stochastic environments. Doctoral Dissertation, Sabancı University, Istanbul.
- Keskin, M., & Çatay, B. (2018). A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers. *Computers & Operations Research*, 100, 172-188. Doi: 10.1016/j.cor.2018.06.019
- Keskin, M., & Çatay, B. (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 65, 111-127. Doi: 10.1016/j.trc.2016.01.013
- Keskin, M., Laporte, G., & Çatay, B. (2019). Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 107, 77-94. Doi: 10.1016/j.cor.2019.02.014
- Keskintürk, T., Topuk, N., & Özyeşil, O. (2015). Araç rotalama problemleri ve çözüm yöntemleri. *İşletme Bilimi Dergisi*, 3(2), 77-107.
- Klose, A., & Drexl, A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European journal of operational research*, 162(1), 4-29. Doi: 10.1016/j.ejor.2003.10.031
- Koç, Ç. (2012). Zaman bağımlı araç rotalama problemi. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 1-21. Doi: 10.1016/j.ejor.2015.07.020
- Koç, Ç., Jabali, O., Mendoza, J. E., & Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with shared charging stations. *International Transactions in Operational Research*, 26(4), 1211-1243. Doi: 10.1111/itor.12620
- Koç, Ç., & Özceylan, E. (2018). Yeşil ve elektrikli araç rotalama problemleri üzerine bir literatür taraması ve araştırma öngörülleri. *Gaziantep University Journal of Social Sciences*, 17(3), 1041-1053.
- Kratka, J., Tošić, D., Filipović, V., & Ljubić, I. (2001). Solving the simple plant location problem by genetic algorithm. *RAIRO-Operations Research*, 35(1), 127-142.

- Kulluk, S., & Türkbey, O. (2004, Haziran). Tesis yerleşimi problemi için bir genetik algoritma. *Yöneylem Araştırması/ Endüstri Mühendisliği-XXIV Ulusal Kongresi* 'nde sunulan bildiri (s. 503-505). Adana: Çukurova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü.
- Kumar, A. (2013). Encoding schemes in genetic algorithm. *International Journal of Advanced Research in IT and Engineering*, 2(3), 1-7.
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. (2012). A survey on the vehicle routing problem and its variants. *Intelligent Information Management*, 4(3), 66-74. Doi: 10.4236/iim.2012.43010
- Küçüköğlu, İ., & Öztürk, N. (2016). Heterojen filooya sahip elektrikli araçların rota optimizasyonu. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 525-533. Doi: 10.18466/cbayarfbe.280724
- Lam, A. Y., Leung, Y. W., & Chu, X. (2014). Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6), 2846-2856. Doi: 10.1109/TSG.2014.2344684
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European journal of operational research*, 59(3), 345-358. Doi: 10.1016/0377-2217(92)90192-C
- Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation science*, 43(4), 408-416. Doi: 10.1287/trsc.1090.0301
- Laporte, G., Desrochers, M., & Nobert, Y. (1984). Two exact algorithms for the distance-constrained vehicle routing problem. *Networks*, 14(1), 161-172. Doi: 10.1002/net.3230140113
- Laporte, G., Nobert, Y., & Taillefer, S. (1988). Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems. *Transportation science*, 22(3), 161-172.
- Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Larranaga, P., Kuijpers, C. M. H., Murga, R. H., Inza, I., & Dizdarevic, S. (1999). Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators. *Artificial Intelligence Review*, 13(2), 129-170.
- Lee, C., & Han, J. (2017). Benders-and-Price approach for electric vehicle charging station location problem under probabilistic travel range. *Transportation Research Part B: Methodological*, 106, 130-152. Doi: 10.1016/j.trb.2017.10.011

- Li, J., & Zhang, J. (2014, August). A heuristic algorithm to VRP with the consideration of customers service preference. In *2014 11th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)* (pp. 141-146). IEEE. China: Xiamen. Doi: 10.1109/FSKD.2014.6980822
- Li Y., Li L., Yong J., Yao Y., Li Z. (2011) Layout planning of electrical vehicle charging stations based on genetic algorithm. In X. Wan (Ed), *Electrical power systems and computers. lecture notes in electrical engineering* (pp. 661-668). Berlin: Springer Heidelberg. Doi: 10.1007/978-3-642-21747-0_84
- Lin, J., Zhou, W., & Wolfson, O. (2016). Electric vehicle routing problem. *Transportation Research Procedia*, 12, 508-521. Doi: 10.1016/j.trpro.2016.02.007
- Lin, Y., Zhang, K., Shen, Z. J. M., Ye, B., & Miao, L. (2019). Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107, 423-443. Doi: 10.1016/j.trc.2019.08.009
- Liong, C. Y., Wan Rosmanira, I., Khairuddin, O., & Zirour, M. (2008). Vehicle routing problem: models and solutions. *Journal of Quality Measurement and Analysis JQMA*, 4(1), 205-218.
- Liu, H., Gao, B., & Liu, Y. (2019, April). Battery swap station location routing problem with capacitated electric vehicles and time windows. In *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)* (pp. 832-836). IEEE. Japan: Tokyo. Doi: 10.1109/IEA.2019.8715000
- Liu, H., & Wang, D. Z. (2017). Locating multiple types of charging facilities for battery electric vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 103, 30-55. Doi: 10.1016/j.trb.2017.01.005
- Liu, H. C., Yang, M., Zhou, M., & Tian, G. (2018). An integrated multi-criteria decision making approach to location planning of electric vehicle charging stations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 99, 1-12. Doi: 10.1109/TITS.2018.2815680
- Li-ying, W., & Yuan-bin, S. (2015). Multiple charging station location-routing problem with time window of electric vehicle. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 8(5), 190-201.
- Lopes, R. B., Ferreira, C., Santos, B. S., & Barreto, S. (2013). A taxonomical analysis, current methods and objectives on location-routing problems. *International Transactions in Operational Research*, 20(6), 795-822. Doi: 10.1111/itor.12032

- Ma, Y., Tao, L., Zhou, X., & Gao, Z. (2018, July). Influences of electric vehicles on power system. In *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 8688-8692). IEEE. Chine: Wuhan. Doi: 10.23919/ChiCC.2018.8483431
- Macrina, G., Laporte, G., Guerriero, F., & Pugliese, L. D. P. (2019). An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows. *European Journal of Operational Research*, 276(3), 971-982. Doi: 10.1016/j.ejor.2019.01.067
- Malandraki, C., & Daskin, M. S. (1992). Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms. *Transportation science*, 26(3), 185-200. Doi: 10.1287/trsc.26.3.185
- Mao, H., Shi, J., Zhou, Y., & Zhang, G. (2020). The electric vehicle routing problem with time windows and multiple recharging options. *IEEE Access*, 8, 114864-114875. Doi: 10.1109/ACCESS.2020.3003000
- Maric, M. (2010). An efficient genetic algorithm for solving the multi-level uncapacitated facility location problem. *Computing and Informatics*, 29(2), 183.
- Markel, T., & Simpson, A. (2007). Cost-benefit analysis of plug-in hybrid electric vehicle technology. *World Electric Vehicle Journal*, 1(1), 294-301. Doi: 10.3390/wevj1010294
- Mavrovouniotis, M., Ellinas, G., & Polycarpou, M. (2018, November). Ant Colony optimization for the electric vehicle routing problem. In *2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)* (pp. 1234-1241). IEEE. India: Bangalore. Doi: 10.1109/SSCI.2018.8628831
- Mazzeo, S., & Loiseau, I. (2004). An ant colony algorithm for the capacitated vehicle routing. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 18, 181-186. Doi: 10.1016/j.endm.2004.06.029
- Meng, W., & Kai, L. (2011, December). Optimization of electric vehicle charging station location based on game theory. In *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)* (pp. 809-812). IEEE. China : Changchun. Doi: 10.1109/TMEE.2011.6199325
- Meyer-Baese, A. & Schmid, V. (2014). *Pattern recognition and signal analysis in medical imaging*. USA: Elsevier Academic Press.
- Miller, B. L., & Goldberg, D. E. (1995). Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise. *Complex systems*, 9(3), 193-212.
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge: MIT Press.

- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. G. (2017). The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B: Methodological*, 103, 87-110. Doi: 10.1016/j.trb.2017.02.004
- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. G. (2016). A hybrid metaheuristic for the electric vehicle routing problem with partial charging and nonlinear charging function. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01331293v2/document>.
- Montoya, J. A. (2016). Electric Vehicle Routing Problems: models and solution approaches. Doctoral dissertation, Université Nantes Angers Le Mans, France.
- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. (2015). The electric vehicle routing problem with partial charging and nonlinear charging function. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01245232v2>
- Morita, K. (2003). Automotive power source in 21st century. *JSAE Review*, 24(1), 3-7.
- Mosheiov, G. (1998). Vehicle routing with pick-up and delivery: tour-partitioning heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 34(3), 669-684. Doi: 10.1016/S0360-8352(97)00275-1
- Mpousdra, A., Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K., Vlahogianni, E., & Tyrinopoulos, Y. (2018). Rapid transit network design for on-line electric vehicles. *Advances in Transportation Studies*, 46, 19-30. Doi: 10.4399/9788255186412
- Nagy, G., & Salhi, S. (1996). Nested heuristic methods for the location-routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 47(9), 1166-1174. Doi: 10.1057/jors.1996.144
- Nagy, G., & Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods. *European journal of operational research*, 177(2), 649-672. Doi: 10.1016/j.ejor.2006.04.004
- Nepori, A. (2021). Here's Why Tesla Semi Truck Hasn't Entered Production Yet. <https://www.domusweb.it/en/news/gallery/2021/02/03/heres-why-teslas-semi-truck-hasnt-entered-production-yet0.html>. Erişim tarihi: 25.02.2021
- O'Connell, L. G. (1995). *Developing the EV Charging Infrastructure* (No. 952769). SAE Technical Paper. Doi: 10.4271/952769
- OECD (May, 2010). *Reducing Transport Greenhouse Gas Emissions: Trends & Data*. <https://www.itf-oecd.org/reducing-transport-greenhouse-gas-emissions-trends-and-data-2010>. Erişim tarihi: 30.03.2019
- Özsoydan, F.B. (2011). Birikimli açık araç rotalama problemi için sezgisel çözüm yaklaşımları. Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

- Öztürk, M. (2008). Çok aşamalı tedarik zinciri optimizasyonu probleminin yayılan ağaç tabanlı genetik algoritma ile çözümü. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Paz, J., Granada-Echeverri, M., & Escobar, J. (2018). The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(1), 123-136. Doi: 10.5267/j.ijiec.2017.4.001
- PBS (2010). <https://www.pbs.org/shows/223/electric-car-timeline.html>. Erişim tarihi: 08.06.2019.
- Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 225-255. Doi: 10.1016/j.trb.2019.06.006
- Pelletier, S., Jabali, O., Laporte, G., & Veneroni, M. (2017). Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 103, 158-187. Doi: 10.1016/j.trb.2017.01.020
- Pelletier, S., Laporte, G., Jabali, O., & Veneroni, M. (2015). *Goods distribution with electric vehicles: Battery degradation and behaviour modeling* (No. CIRRELT-2015-43). CIRRELT, Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation.
- Pollet, B. G., Staffell, I., & Shang, J. L. (2012). Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. *Electrochimica Acta*, 84, 235-249. Doi: 10.1016/j.electacta.2012.03.172
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1-17. Doi: 10.1016/j.ejor.2014.01.005
- Rajashekara, K. (1994). History of electric vehicles in General Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(4), 897-904. Doi: 10.1109/28.297905
- Rastani, S., Yüksel, T., & Çatay, B. (2019). Effects of ambient temperature on the route planning of electric freight vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 74, 124-141. Doi: 10.1016/j.trd.2019.07.025
- Rathnayake, R. M. D. I. M., Jayawickrama, T. S., & Melagoda, D. G. (2019, July). The feasibility of establishing electric vehicle charging stations at public hotspots in Sri Lanka. In *2019 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)* (pp. 510-514). IEEE. Sri Lanka: Moratuwa. Doi: 10.1109/MERCon.2019.8818775

- Reeves, C. (2010). Genetic algorithms. In: M. Gendreau & J.Y. Potvin (Eds), *Handbook of Metaheuristics* (pp.109-139). Boston: Springer. Doi: 10.1007/978-1-4419-1665-5_5
- Regulation (Eu) No 510/2011 of the European Parliament and of the Council (2011). <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:145:0001:0018:EN:PDF> Erişim tarihi: 13.12.2020.
- ReVelle, C. S., Eiselt, H. A., & Daskin, M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European journal of operational research*, 184(3), 817-848. Doi: 10.1016/j.ejor.2006.12.044
- ReVelle, C. S., & Swain, R. W. (1970). Central facilities location. *Geographical analysis*, 2(1), 30-42. Doi: 10.1111/j.1538-4632.1970.tb00142.x
- Rezgui, D., Siala, J. C., Aggoune-Mtalaa, W., & Bouziri, H. (2019). Application of a variable neighborhood search algorithm to a fleet size and mix vehicle routing problem with electric modular vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 537-550. Doi: 10.1016/j.cie.2019.03.001
- Rylander, S. G. B., & Gotshall, B. (2002). Optimal population size and the genetic algorithm. *Population*, 100(400), 900.
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*, 39(2), 150-156. Doi: 10.1016/0377-2217(89)90188-4
- Sardohan, A. (2017). Türk firması, Tesla için elektrikli şarj istasyonu üretecek. <https://tr.motor1.com/news/223694/gersan-elektrik-tesla-anlasma/> Erişim tarihi: 21.08.2019
- Sarker, M. R., Pandžić, H., & Ortega-Vazquez, M. A. (2014). Optimal operation and services scheduling for an electric vehicle battery swapping station. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(2), 901-910. Doi: 10.1109/TPWRS.2014.2331560
- Sassi, O., Cherif, W. R., & Oulamara, A. (2014). Vehicle routing problem with mixed fleet of conventional and heterogenous electric vehicles and time dependent charging costs. *Int. J. Math. Comput. Phys. Electr. Comput. Eng.* 9, 167–177.
- Scheiper, B., Schiffer, M., & Walther, G. (2019). The flow refueling location problem with load flow control. *Omega*, 83, 50-69. Doi: 10.1016/j.omega.2018.02.003

- Schiffer, M., Laporte, G., Schneider, M., & Walther, G. (2017). *The Impact of Synchronizing Drivers Breaks and Recharging Operations for Electric Vehicles*. GERAD, École des hautes études commerciales. <https://www.gerad.ca/en/papers/G-2017-46/view>
- Schiffer, M., Klein, P. S., Laporte, G., & Walther, G. (2021). Integrated planning for electric commercial vehicle fleets: A case study for retail mid-haul logistics networks. *European Journal of Operational Research*, 291(3), 944-960. Doi: 10.1016/j.ejor.2020.09.054
- Schiffer, M., Schneider, M., & Laporte, G. (2018). Designing sustainable mid-haul logistics networks with intra-route multi-resource facilities. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 517-532. Doi: 10.1016/j.ejor.2017.07.067
- Schiffer, M., Schneider, M., Walther, G. & Laporte, G. (2019). Vehicle routing and location routing with intermediate stops: A review. *Transportation Science*, 3(2), 319-343. Doi: 10.1287/trsc.2018.0836
- Schiffer, M., Stütz, S., & Walther, G. (2018). Electric commercial vehicles in mid-haul logistics networks. In G. Pistoia & B. Liaw (Eds), *Behaviour of lithium-ion batteries in electric vehicles* (pp. 153-173). Switzerland: Springer, Cham. Doi: 10.1007/978-3-319-69950-9_7
- Schiffer M, Stütz S. & Walther G. (2016). Are ECVs breaking even? Competitiveness of electric vehicles in retail logistics. Les Cahiers du GERAD G-2017-47, Group for Research in Decision Analysis, HEC Montreal, Montreal.
- Schiffer, M., & Walther, G. (2017a). The electric location routing problem with time windows and partial recharging. *European Journal of Operational Research*, 260(3), 995-1013. Doi: 10.1016/j.ejor.2017.01.011
- Schiffer, M., & Walther, G. (2017b). An adaptive large neighborhood search for the location-routing problem with intra-route facilities. *Transportation Science*, 52(2), 331-352. Doi: 10.1287/trsc.2017.0746
- Schiffer, M., & Walther, G. (2018). Strategic planning of electric logistics fleet networks: A robust location-routing approach. *Omega*, 80, 31-42. Doi: 10.1016/j.omega.2017.09.003
- Schmidt, M., Staudt, P., & Weinhardt, C. (2020). Evaluating the importance and impact of user behavior on public destination charging of electric vehicles. *Applied Energy*, 258, 114061. Doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114061

- Schneider, M., & Drexler, M. (2017). A survey of the standard location-routing problem. *Annals of Operations Research*, 259(1-2), 389-414. Doi: 10.1007/s10479-017-2509-0
- Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, 48(4), 500-520. Doi: 10.1287/trsc.2013.0490
- Shao, S., Guan, W., & Bi, J. (2017). Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(3), 202-212. Doi: 10.1049/iet-its.2017.0008
- Shibusawa, H., & Miyata, Y. (2017). Evaluating the economic impacts of hybrid and electric vehicles on Japan's regional economy: Input-output model approach. In H. Shibusawa, K. Sakurai, T. Mizunoya & S. Uchida (Eds), *Socioeconomic environmental policies and evaluations in regional science* (pp. 631-649). Singapore: Springer. Doi:10.1007/978-981-10-0099-7_33
- Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). *Introduction to genetic algorithms*. Berlin, Heidelberg: Springer. Doi: 10.1007/978-3-540-73190-0
- Sovacool, B. K., & Hirsh, R. F. (2009). Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. *Energy Policy*, 37(3), 1095-1103. Doi: 10.1016/j.enpol.2008.10.005
- Stewart Jr, W. R., & Golden, B. L. (1983). Stochastic vehicle routing: A comprehensive approach. *European Journal of Operational Research*, 14(4), 371-385. Doi: 10.1016/0377-2217(83)90237-0
- Sutopo, W., Nizam, M., Rahmawatie, B., & Fahma, F. (2018, October). A review of electric vehicles charging standard development: Study case in Indonesia. In *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)* (pp. 152-157). IEEE. Indonesia: Surakarta. Doi:10.1109/ICEVT.2018.8628367
- Sweda, T. M., Dolinskaya, I. S., & Klabjan, D. (2016). Optimal recharging policies for electric vehicles. *Transportation Science*, 51(2), 457-479. Doi: 10.1287/trsc.2015.0638
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. USA: John Wiley & Sons.

- Tao, Y., Huang, M., & Yang, L. (2018). Data-driven optimized layout of battery electric vehicle charging infrastructure. *Energy*, 150, 735-744. Doi: 10.1016/j.energy.2018.03.018
- Taşkın, Ç., & Emel, G. G. (2009). *Sayısal yöntemlerde genetik algoritmalar*. Bursa: Alfa Aktüel.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Meskini, M., Nasser, H., & Tavakkoli-Moghaddam, H. (2019, September). A multi-depot close and open vehicle routing problem with heterogeneous vehicles. In *2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)* (pp. 1-6). IEEE. China: Shanghai. Doi: 10.1109/IESM45758.2019.8948137
- Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102. Doi: 10.1016/j.rser.2012.11.077
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). An overview of vehicle routing problems. *The Vehicle Routing Problem*, 1-26. Doi: 10.1137/1.9780898718515.ch
- Touati-Moungla, N., & Jost, V. (2012). Combinatorial optimization for electric vehicles management. *Journal of Energy and Power Engineering*, 6(5), 738-743. Doi: 10.24084/repqj09.504
- TÜİK (Nisan, 2018). *Seragazi emisyon istatistikleri 2016*, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=27675>. Erişim tarihi: 02.01.2019.
- TÜBİTAK (2003). *Elektrikli araçlar*, http://www.normenerji.com.tr/menus/elektrikli-aracarlar_190220120138391025288910.pdf. Erişim tarihi: 31.03.2019.
- Varol, S., Öztürk, Z. & Öztürk O. (2018). İstanbul'da karayolu yolcu taşımacılığında elektrikli araç kullanımının incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(2), 367-386.
- Verma, A. (2018). Electric vehicle routing problem with time windows, recharging stations and battery swapping stations. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 7(4), 415-451. Doi: 10.1007/s13676-018-0136-9
- Vincent, F. Y., Lin, S. W., Lee, W., & Ting, C. J. (2010). A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 288-299. Doi: 10.1016/j.cie.2009.10.007

- Wang, J. F., Liu, J. H., & Zhong, Y. F. (2005). A novel ant colony algorithm for assembly sequence planning. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 25(11-12), 1137-1143. Doi: 10.1007/s00170-003-1952-z
- Wang, G., Xu, Z., Wen, F., & Wong, K. P. (2013). Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(4), 2363-2372. Doi: 10.1109/TPWRD.2013.2269142
- Westbrook, M. H. (2001). *The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars*. London: The Institution of Electrical Engineers.
- Worley, O., Klabjan, D., & Sweda, T. M. (2012, April). Simultaneous vehicle routing and charging station siting for commercial electric vehicles. In *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International* (pp. 1-3). USA: Greenville, SC. Doi: 10.1109/IEVC.2012.6183279
- Wu, T. H., Low, C., & Bai, J. W. (2002). Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. *Computers & Operations Research*, 29(10), 1393-1415. Doi: 10.1016/S0305-0548(01)00038-7
- Xiao, Y., Zuo, X., Kaku, I., Zhou, S., & Pan, X. (2019). Development of energy consumption optimization model for the electric vehicle routing problem with time windows. *Journal of Cleaner Production*, 225, 647-663. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.323
- Yağcıtekin, B., Uzunoğlu, M., & Karakaş, A. (2011, Ekim). Elektrikli araçların şarjı ve dağıtım sistemi üzerine etkileri. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu* içinde (s. 316-320). Elazığ: Fırat Üniversitesi.
- Yaktubay, M. (2018). A Genetic Algorithm based solution approach for vehicle routing problem. Master of Science Thesis, Adana Science and Technology University, Adana.
- Yang, H., Yang, S., Xu, Y., Cao, E., Lai, M., & Dong, Z. (2015). Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable parthenogenetical gorithm. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 657-666. Doi: 10.1109/TSG.2014.2382684
- Yang, J., & Sun, H. (2015). Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. *Computers & Operations Research*, 55, 217-232. Doi: 10.1016/j.cor.2014.07.003

- Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2012). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151-2169. Doi: 10.1109/TPEL.2012.2212917
- Zhang, S., Chen, M., & Zhang, W. (2019). A novel location-routing problem in electric vehicle transportation with stochastic demands. *Journal of Cleaner Production*, 221, 567-581. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.167
- Zhang, H., Tang, L., Yang, C., & Lan, S. (2019). Locating electric vehicle charging stations with service capacity using the improved whale optimization algorithm. *Advanced Engineering Informatics*, 41, 100901. Doi: 10.1016/j.aei.2019.02.006
- Zhang, S., Gajpal, Y., Appadoo, S. S., & Abdulkader, M. M. S. (2018). Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption. *International Journal of Production Economics*, 203, 404-413. Doi: 10.1016/j.ijpe.2018.07.016
- Zhao, H., & Li, N. (2016). Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy Delphi and hybrid multi-criteria decision making approaches from an extended sustainability perspective. *Energies*, 9(4), 270, 1-22. Doi: 10.3390/en9040270
- Zhenfeng, G., Yang, L., Xiaodan, J., & Sheng, G. (2017, March). The electric vehicle routing problem with time windows using genetic algorithm. In *2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)* (pp. 635-639). China: Chongqing. Doi: 10.1109/IAEAC.2017.8054093
- Zhu, Z. H., Gao, Z. Y., Zheng, J. F., & Du, H. M. (2016). Charging station location problem of plug-in electric vehicles. *Journal of Transport Geography*, 52, 11-22. Doi: 10.1016/j.jtrangeo.2016.02.002
- Zuo, X., Xiao, Y., You, M., Kaku, I., & Xu, Y. (2019). A new formulation of the electric vehicle routing problem with time windows considering concave nonlinear charging function. *Journal of Cleaner Production*, 236, 1-18. Doi:10.1016/j.jclepro.2019.117687
- Zuo, X., Xiao, Y., Zhu, C., & You, M. (2018, January). A Linear MIP Model for the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows Considering Linear Charging. In *2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (pp. 1-5). USA: Reno, NV. Doi:10.1109/RAM.2018.8463021

Zuo, X., Zhu, C., Huang, C., & Xiao, Y. (2017, May). Using AMPL/CPLEX to model and solve the electric vehicle routing problem (EVRP) with heterogeneous mixed fleet. In *29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* (pp. 4666-4670).China: Chongqing. Doi:10.1109/CCDC.2017.7979321

İNTERNET KAYNAKLARI

<https://www.plugshare.com/> Erişim tarihi: 22.07.2021

<https://data.mendeley.com/datasets/h3mrm5dhxw/1> Erişim tarihi: 04.09.2020

