



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

ARAÇ PAYLAŞIM SİSTEMİNDE OTONOM
ELEKTRİKLİ ARAÇ KULLANIMI

Merve KÖSE KÜÇÜK

Doktora Tezi

**ARAÇ PAYLAŞIM SİSTEMİNDE OTONOM
ELEKTRİKLİ ARAÇ KULLANIMI**

Merve KÖSE KÜÇÜK



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARAÇ PAYLAŞIM SİSTEMİNDE OTONOM ELEKTRİKLİ ARAÇ
KULLANIMI**

Merve KÖSE KÜÇÜK
0000-0001-6877-2937

Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR
(Danışman)

DOKTORA TEZİ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2023
Her Hakkı Saklıdır.

TEZ ONAYI

Merve KÖSE KÜÇÜK tarafından hazırlanan “Araç Paylaşım Sisteminde Otonom Elektrikli Araç Kullanımı” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR

- | | | | |
|---------------|---|--|------|
| Başkan | : | Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR
0000-0001-8054-5606
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Prof. Dr. Erdal EMEL
0000-0002-9220-7353
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Prof. Dr. Turan ARSLAN
0000-0003-1313-3091
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Ulaştırma Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Dr. Öğr. Üyesi Koray ALTUN
0000-0003-0357-9495
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Dr. Öğr. Üyesi Yunus DEMİR
0000-0003-3868-1860
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı | İmza |

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü

.././.....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

19/06/2023

İmza

Merve KÖSE KÜÇÜK

**TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI**

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR

19.06.2023

Merve KÖSE KÜÇÜK

19.06.2023

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım
yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

ARAÇ PAYLAŞIM SİSTEMİNDE OTONOM ELEKTRİKLİ ARAÇ KULLANIMI

Merve KÖSE KÜÇÜK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR

Bu tez çalışması kapsamında, otonom elektrikli araç tabanlı araç paylaşım sisteminin şehir içi hareketlilik, güvenli seyahat, çevre dostu düşük emisyonu sahip ulaşım gibi konularda önemli potansiyel etkileri araştırılmıştır. Son yıllarda araç üreticileri araç verimliliğini arttırmak ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için farklı teknolojiler aramakta, aynı zamanda müşterilerin hareketlilik ve esneklik bakımından çeşitli beklentilerini karşılamayı amaçlamaktadır. Araç paylaşım sistemleri, sosyal ve çevresel faktörlerin olumsuz etkisini azaltacak ve müşteri ihtiyaçlarını en iyi derecede karşılayacak bir taşıma sistemi alternatifi olarak karşımıza çıkmaktadır. Araç paylaşım sistemleri ile arasında doğal bir sinerji bulunan elektrikli araç teknolojisi, çevre dostu taşımacılığın ilk uygulamalarından biri olarak değerlendirilmektedir. Ancak elektrikli araç kullanımında, yüksek maliyetli araç yer-değiştirme, sınırlı araç menzili, şarj istasyonlarına erişim ve uzun şarj süreleri gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu tür zorlukların dikkate alındığı, sistem kullanıcılarına ait seyahat taleplerinin olduğu bir araç paylaşım sisteminin yönetimi, çözülmesi gereken çeşitli zor problemleri karşımıza çıkarmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında otonom elektrikli araçların kullanıldığı bir araç paylaşım sistemi kurgulanarak, otonom elektrikli araç rotalama probleminin çözümü için kısıt programlama tabanlı bir sezgisel yaklaşım uygulanmıştır. “Yık-yeniden oluştur” prensibine dayanan sezgisel yaklaşımın yeniden çözüm oluşturma aşamasında geliştirilen kısıt programlama modelinden yararlanılmıştır. Geliştirilen kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşımın, otonom elektrikli araç rotalama problemi üzerinde çözüm performansı ve süre açısından iyi sonuçlar ürettiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Araç paylaşım sistemi, otonom elektrikli araç, elektrikli araç rotalama, sürüş paylaşımı, kısıt programlama

2023, vii + 94 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

USE OF AUTONOMOUS ELECTRIC VEHICLES IN CAR SHARING SYSTEM

Merve KÖSE KÜÇÜK

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR

This thesis explores the potential impact of an autonomous electric vehicle-based car sharing system on urban mobility, safe travel, and environmentally friendly low-emission transportation. Vehicle manufacturers have been researching different technologies to increase vehicle efficiency and reduce greenhouse gas emissions while meeting customers' mobility and flexibility needs. Car-sharing systems provide a transportation alternative that reduces negative social and environmental effects and meets customer demands. Electric vehicle technology is a natural fit for vehicle sharing systems and is one of the first applications of environmentally friendly transportation. However, using electric vehicles presents challenges such as costly vehicle relocation, limited range, access to charging stations, and long charging times. Managing a car-sharing system that considers these challenges and user travel demands is a complex task that requires solutions.

For this thesis, a car sharing system that utilizes autonomous electric vehicles was created. To solve the issue of routing these autonomous electric vehicles, a heuristic approach utilizing constraint programming was implemented. The approach utilized a "destroy-repair" principle to develop a constraint programming model. Through observation, it was found that this approach produced accurate solutions and was efficient in terms of time.

Keywords: Vehicle sharing system, autonomous electric vehicle, electric vehicle routing, ride sharing, constraint programming

2023, vii + 94 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim ve tez çalışmam süresince bilimsel katkıları ve deneyimi ile bana yol gösteren danışman hocam sayın Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Tez izleme komitesinde yer alan ve deneyimleri ile bana yol gösteren, değerli zamanlarını ayıran sayın hocam Prof. Dr. Erdal EMEL ve sayın hocam Prof. Dr. Turan ARSLAN'a katkılarından dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Eğitim hayatım boyunca bana hep destek olan ve her zaman yanımda olduklarını hissettiren babam Ahmet KÖSE ve annem Merziye KÖSE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Benden sevgi ve desteklerini esirgemeyen ablam Medine TÜRKİLERİ ve ağabeyim Selçuk KÖSE'ye teşekkür ediyorum.

Mesleğime duyduğu saygısıyla her zaman en büyük yardımcım ve yol arkadaşım sevgili eşim Mustafa Fevzi KÜÇÜK'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Hayata gelişi ile dünyamı güzelleştiren ve bu süreçte en büyük motivasyon kaynağım olan sevgili oğlum Mehmet Akif KÜÇÜK'e teşekkür ediyorum.

Her zaman yanımda olduklarını bildiğim sevgili dostlarım Tuğçe TOKAT, Gökçe GÖKÖZ SARITAŐ ve Burçin ÖZKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Merve KÖSE KÜÇÜK
19/06/2023

İçindekiler

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Araç Paylaşım Sistemleri.....	1
1.2.Araç Paylaşım Sisteminde Karşılaşılan Bazı Problemler.....	6
1.2.1.Yer Değiştirme (re-location) Problemi.....	6
1.2.2.Elektrikli Araçlarda Şarj Stratejisinin Belirlenmesi (Charging Strategy).....	7
1.2.3.Sürüş Paylaşımı Problemi (Ride-Sharing Problem).....	8
1.3.Çalışma Kapsamı.....	9
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	12
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
3.1.MATERYAL.....	30
3.1.1.Tamsayılı Programlama.....	30
3.1.2.Kısıt programlama.....	37
3.2.Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Arama Algoritması (UGKA).....	43
3.2.YÖNTEM.....	47
3.2.1.Klasik DARP Problemi.....	47
3.2.2.Otonom Elektrikli Araç Rotalama Problemi.....	51
3.2.3.Otonom Elektrikli Araç Rotalama Problemi-Kısıt Programlama Modeli.....	57
3.2.4.Kısıt Programlama Tabanlı-Sezgisel Yaklaşım.....	61
4.BULGULAR.....	67
5.TARTIŞMA VE SONUÇ.....	75
6.KAYNAKLAR.....	78
EKLER.....	86
EK 1 Yıkma Katsayısı $ddestruction$ 0,01 olan çözümler.....	87
EK 2 Yıkma Katsayısı $ddestruction$ 0,1 olan çözümler.....	88
EK 3 Yıkma Katsayısı $ddestruction$ 0,4 olan çözümler.....	89
EK 4 Yıkma Katsayısı $ddestruction$ 0,5 olan çözümler.....	90
ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
<i>r.id</i>	<i>r.</i> müşterinin etiketi
<i>r.o</i>	depo lokasyonu
<i>r.s</i>	şarj istasyonu
<i>r.p</i>	<i>r.</i> müşterinin alma lokasyonu
<i>r.d</i>	<i>r.</i> müşterinin bırakma lokasyonu
<i>r.e</i>	<i>r.</i> müşteri için en erken alma süresi
<i>r.l</i>	<i>r.</i> müşteri için en geç bırakma süresi
<i>r.x</i>	<i>r.</i> müşterinin x-koordinatı lokasyonu
<i>r.y</i>	<i>r.</i> müşterinin y-koordinatı lokasyonu
<i>v.id</i>	<i>v.</i> aracın etiketi
<i>v.c</i>	<i>v.</i> aracın yolcu kapasitesi
<i>v.Q</i>	<i>v.</i> araç batarya kapasitesi
<i>v.h</i>	<i>v.</i> aracın şarj tüketim hızı
<i>v.g</i>	<i>v.</i> aracın şarj dolun hızı
Kısaltmalar	Açıklama
OEA	Otonom Elektrikli Araç
ARP	Araç Rotalama Problemi
DARP	Dial a Ride Problem
ZP-EARP	Zaman pencereli - Elektrikli Araç Rotalama Problemi
OEARP	Otonom Elektrikli Araç Rotalama Problemi
MIP	Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama
CP	Kısıt Programlama
ALNS	Adaptive Large Neighbourhood Search
UGKA	Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Arama

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Araç Paylaşım Sistemi Brezilya Örneği.....	4
Şekil 1.2. İsveç'te üretilen "Uniti One" isimli Otonom Elektrikli Araç.....	5
Şekil 3.1. DARP örneği.....	48
Şekil 3.2. Uygun çözüm.....	48
Şekil 3.3. Örnek problem.....	53
Şekil 3.4. UGKA yaklaşımının genel işleyişi.....	61
Şekil 3.5. Algoritmanın Genel Adımları.....	62
Şekil 3.6. Müşteri düğümü ekleme örneği.....	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Çalışmaların Sınıflandırılması.....	25
Çizelge 2.1. Çalışmaların Sınıflandırılması (devamı).....	26
Çizelge 2.1. Çalışmaların Sınıflandırılması (devamı).....	27
Çizelge 3.1. Kabul Yöntemleri.....	46
Çizelge 3.1. Parametre Tanımlamaları.....	64
Çizelge 4.1. Klasik DARP sonuçları.....	68
Çizelge 4.2. Test verisi özellikleri.....	69
Çizelge 4.3. Karşılaştırmalı Sonuçlar.....	71
Çizelge 4.4. Parametre değerleri.....	72
Çizelge 4.5. Düğüm kaldırma operatörleri karşılaştırması.....	73
Çizelge 4.6. Klasik DARP ile OEARP sonuçlarının karşılaştırılması.....	74

1. GİRİŞ

Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) verilerine göre son yıllarda kentsel nüfus kritik bir seviyeye ulaşmıştır. 2010 yılından itibaren dünya nüfusunun çoğu şehirlerde yaşamaktadır. Dünya Sağlık Örgütü tarafından 2009 yılında 3,4 milyar olan dünya nüfusunun, 2050 yılı itibariyle neredeyse iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir (WHO, 2013). Dünya nüfusundaki artış, mobilite ihtiyaçlarında küresel boyutta artışa neden olarak özel motorlu taşıtların yoğun kullanımından kaynaklanan hava kirliliği, trafik sıkışıklığı ve kazalar gibi çevresel etkilere yol açmaktadır. Hızla artan nüfus, yetersiz toprak alanı ve artan çevresel kaygılar, kentsel ulaşım sistemlerinde benzeri görülmemiş zorluklar doğurmaktadır. Artan mobilite talebini karşılamak ve olumsuz çevresel etkileri azaltmak amacıyla daha esnek ve müşteri ihtiyaçlarına göre tasarlanmış taşıma sistemlerinin oluşturulması gerekmektedir (S. Shaheen 1999). Araç paylaşım sistemlerinin de bu amaçla alternatif bir taşıma sistemi olabileceği düşünülmektedir. Mobil bilgi işlem ile gelişen araç paylaşım sistemi, toplu taşımadan daha esnek, geleneksel özel araç sahipliğinden daha ucuz bir taşıma sistemi olarak değerlendirilmektedir. Araç paylaşım sistemi araç kiralama kurgusu olarak düşünülebilir fakat araç paylaşım sisteminde araçlar kısa süreliğine kiralanmaktadır. Bu sistem, daha çok yönlü bir taşıma formu ortaya koyarak, özel araç kullanımına yönelik bir alternatif olarak değerlendirilebilir (Litman 2015).

1.1. Araç Paylaşım Sistemleri

Araç paylaşım sistemleri, genellikle bir kuruluş tarafından yönetilen ve sigortalanan bir araç filosunu paylaşan bir grup müşteri arasında kısa süreli araç kullanımı olarak tanımlanmaktadır. Araç paylaşım sistemlerinde kullanıcılar yüksek maliyet, sigorta gereklilikleri, yakıt ikmali, servis ve onarım talepleri veya park problemleri olmadan özel otomobillerin rahatlık ve konforundan yararlanabilmektedir (Mitchell 2008). Araç paylaşımı ile insanlar kişisel araç fikrinden uzaklaşmaya başlamakta ve böylece park alanı ihtiyacı ve trafik yoğunluğunun azalması beklenmektedir (Katzev 2003). Araç paylaşım sistemleri, araç mülkiyeti ile ilgili sermaye ve bakım masrafları olmadan araçlara erişim sağlamaktadır. Araçların katettiği kilometreyi ve özel araç sahipliğini

azaltacak bu tür alternatif sistemlerin kullanımı, daha çok genç yetişkinler arasında artan bir eğilime sahiptir (Botsman ve Rogers 2010; Brown 2009).

Geliştirilen akıllı telefon teknolojisi sayesinde kullanıcıların konum bilgilerine rahatlıkla erişildiği araç paylaşım sistemleri, mobilite ve çevresel faydaları göz önüne alındığında son yıllarda artan bir ilgiye sahiptir. Bu kapsamda Uber (www.uber.com), Lyft (www.lyft.com), Via (www.via.com) gibi öncü şirketler tarafından yönetilen araç paylaşım sistemleri, kullanıcılarına kişisel araç kullanımında oluşan risklere göre daha güvenli, bekleme sürelerinin ve seyahatten kaynaklı stresin azaldığı bir taşıma sistemi olarak değerlendirilmektedir. Bahsi geçen yeni kullanıcı merkezli sistemler, her yere, zamanında ve rahat ulaşım sağlayarak kentsel hareketliliği farklı bir boyuta dönüştürmektedir. Bu tür hizmetlerin kişisel hareketlilik, çevre kirliliği, trafik, enerji tüketimi ve hayat kalitesi üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır.

2010 yılı Ekim ayı itibariyle dünya genelinde 26 ülke taşıma maliyetlerini azaltmak, fazla araç kullanımının önüne geçmek ve olumsuz çevresel etkileri (trafik, enerji tüketimi, araç emisyonları, verimsiz arazi kullanımı, vb.) en aza indirmek için ulaşım stratejisi olarak araç paylaşım sistemlerini uygulamaktadır. Son yirmi yılda araç paylaşım sistemleri, dünya çapında bir milyondan fazla kullanıcı için ana ulaşım seçeneği haline gelmiş ve ulaşım alternatiflerine kolayca erişilebilen kentsel alanlarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, Ekim 2010 itibariyle dünya genelinde beş kıtada (Asya, Avrupa, Kuzey Amerika ve Güney Amerika) 1.100'den fazla şehirde kullanılmaktadır (Shaheen ve ark. 1999; Shaheen 1999; Martin ve Shaheen 2011).

Araç paylaşım sistemi, taşıma ağına ait istasyonlarda bulunan bir dizi araç filosunu içermektedir. Bu araçlar düşük emisyonlu araçlar veya elektrikli araçlar sınıfından oluşmaktadır. İstasyonlar genellikle araçlar için park yerleri, elektrikli araçlar için ise şarj istasyonları olarak belirlenmektedir. Araçlar genellikle park yerlerinden veya mahallelerde, üniversitelerde, büyük iş merkezlerinde ve toplu taşıma istasyonlarında bulunan kalkış noktalarından dağıtılmaktadır (Shaheen ve ark. 1997; Shaheen 1999). Araç paylaşım sistemi operatörlerinin büyük çoğunluğu hizmetlerini ileri teknolojilerle yönetmektedir. Bu teknolojiler; otomatik rezervasyonlar, araç sınıfı ve araç alım yeri

rezervasyonu, akıllı kart ile araca erişim, gerçek zamanlı araç takibi ve tek yönlü seyahatleri kolaylaştıran teknolojiler olarak sıralanabilir (Shaheen ve ark. 2006).

Mevcut araç paylaşım sistemleri tek yönlü ve iki-yönlü olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. İki yönlü araç paylaşım sistemlerinde, kullanıcıların aracı aldıkları istasyona iade etmeleri gerekmektedir. Örneğin, Zipcar (www.zipcar.com) ve Hertz (www.hertz.com) gibi araç kiralama şirketleri hali hazırda bu şekilde çalışmaktadır. Tek yönlü araç paylaşım sisteminde, kullanıcı aracı bulunduğu en yakın istasyondan alıp varış yerine yakın bir istasyona (park yerine) bırakabildiğinden dolayı iki yönlü sistemle karşılaştırıldığında, tek yönlü araç paylaşım sisteminin daha esnek olduğu söylenebilir. Kuzey Amerika'da bulunan Car2go (www.car2go.com) şirketi tek yönlü araç paylaşım sistemlerine örnek olarak gösterilebilir. Tek yönlü araç paylaşım sistemleri de kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. İstasyon tabanlı sistemlerde kullanıcılar aracı, şirkete ait bir park alanına bırakmak zorundayken; serbest akan sistemde (free-floating) kullanıcı aracı, hizmet bölgesinde bulunan herhangi bir yere bırakmakta özgürdür. Bütün bu esneklik ve verimliliğe rağmen tek yönlü paylaşım sisteminin operasyonel yönetimi iki yönlü paylaşım sistemine göre daha zordur. Buna ek olarak, talep tahminin zor olduğu, hızlı ve dinamik karar vermeyi gerektiren durumlarda kentsel trafik akışının dengesizliği sebebiyle araç yerleşiminin oldukça zorlaşacağı durumlar meydana gelebilmektedir. Örneğin, daha yüksek talebe sahip bölgelerde çok sayıda konumlandırılan boş araçların (over-stocked) ihtiyaç duyulan yerlere erişiminin trafik yoğunluğu nedeniyle uzun süreceği durumlarda ilave araç gereksinimi ortaya çıkacaktır (unbalanced-relocation).

Son 15 yılda araç paylaşım sistemlerine olan ilgi artmış ve buna bağlı olarak Avrupa ve Amerika'da birçok şehirde bu sistemlerin uygulamalarına rastlanmaktadır. Ayrıca kullanıcıların kiraladıkları aracı istedikleri yere bırakabilecekleri tek yönlü serbest akış sistemleri, gidiş-dönüş sistemlerinin yerini almaktadır. Akıllı telefon uygulamaları, anahtarsız araç kullanımı, araç içi ve mobil küresel konumlandırma sistemi (GPS), hibrit ve elektrikli araçlar dahil olmak üzere son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, tek yönlü araç paylaşımının büyümesinde önemli rol oynamıştır. Araç paylaşım sistemlerine genel bir bakış açısı kazanmak için geçmiş çalışmalar incelenebilir (Shaheen ve ark. 1999; Millard-Ball ve ark. 2006; Jorge ve Correia 2013).

Araç paylaşım sistemlerinde çevre dostu elektrikli araçların kullanımı giderek artmaktadır. Elektrikli araçlar için araç paylaşımı sisteminin tasarım ve yönetimi mevcut batarya teknolojisinin izin verdiği ölçüde içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla ek zorluklar ortaya koymaktadır. Örneğin, mevcut teknolojide üretilen elektrikli araçların konumları önceden belirlenen şarj istasyonlarında mutlaka şarj edilmesi gerekmektedir. Çok sayıda şarj istasyonu kurulumu maliyetli iken hızlı şarj istasyonları yerine şarj süresinin daha uzun olduğu ve daha az maliyetli istasyon kurulumu yapılmaktadır. Şarj istasyonu kurulumu (lokasyonun ve kapasitesinin belirlenmesi) problemi operasyonel bir karar olarak genellikle stratejik planlama aşamasında çözülmektedir.



Şekil 1.1. Araç Paylaşım Sistemi Brezilya Örneği

Araç paylaşım sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı uygulamalarda birçok engelle karşılaşılmaktadır. Kullanıcıların uzun gecikmeler sebebiyle bekleme sürelerinin artması veya araçlara uzun yürüme süreleri sonucunda ulaşmaları bu sistemin uygulamasındaki engellere örnek olarak gösterilebilir. Bir diğer engel ise, kullanıcının ulaşmak istediği yere vardığında aracı bırakacağı park yeri eksikliğidir. Bu durum aynı zamanda

işletmenin karşılaştığı problemlerden biri olan araç dağılımlı dengesizliğine de sebep olmaktadır. Bu nedenle araç paylaşımında karşılaşılan bu engeller ve zorluklar dikkate alındığında, yeni teknolojiler ve operasyonel planlamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda ortaya çıkan otonom ve bağlı (connected) araç teknolojileri, elektrikli araçların araç paylaşım sistemlerinde yaygınlaştırılmasının önündeki engelleri ortadan kaldırmak için önemli bir fırsat olarak görülmektedir. Otonom araç teknolojisi sayesinde kullanıcıların kiralayacakları araçları kişisel olarak aramaları veya araçların buldukları bölgelere yürüyerek ulaşmaları gerekliliği ortadan kalkmıştır. Yani, kullanıcı bir araç servisi istediğinde, yakındaki bir araç kullanıcının bulunduğu konuma otomatik olarak gidebilecektir (Liang ve ark. 2018). Otonom araç özelliği sayesinde araçlar yer değiştirmelerini otomatik olarak yapabilmektedir. Örneğin bir araç kullanımda olmadığı zaman uygun park yeri veya seyahat taleplerinin yoğun olduğu bölgelere otomatik olarak yönlendirilebilmektedir. Ayrıca otonom araç teknolojisi verimli sürüş sayesinde daha düşük enerji tüketime sağlamaktadır.



şekil 1.2. İsveç'te üretilen "Uniti One" isimli Otonom Elektrikli Araç

Otonom araç teknolojisinin yanı sıra bağlı araç teknolojisi ile sistem, kullanıcılar için uygun araçları ve uygun park yerlerini dinamik olarak ayarlayabilmektedir (Correia ve ark. 2014). Ayrıca bağlı araç teknolojisi araçlara görüş alanının ötesinde daha geniş algılama alanı sunduğundan, işletme tarafından araçların etkin ve dinamik bir şekilde yönlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece otonom ve bağlı araç teknolojilerinin kullanılması, araç paylaşım sistemleri uygulamalarında ortaya çıkan ve elektrikli araç kullanımından kaynaklanan bazı kısıtlamaların giderilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, otonom elektrikli araç (OEA) tabanlı araç paylaşım sistemleri, şehir içi ulaşımının hareketlilik, güvenlik ve çevre dostu özelliklerini daha da iyileştirmek için büyük bir potansiyele sahiptir.

1.2. Araç Paylaşım Sisteminde Karşılaşılan Bazı Problemler

1.2.1. Yer Değiştirme (re-location) Problemi

Araç paylaşım sistemleri, iki-yönlü istasyon tabanlı, tek-yönlü istasyon tabanlı ve tek-yönlü serbest akan sistemler olmak üzere üç grupta incelenebilir (Correia ve Antunes 2012). Bunlardan ilki ve en eski yöntem olan iki-yönlü istasyon tabanlı araç paylaşım sistemleri, gidiş-dönüş araç paylaşımı olarak da adlandırılmaktadır. Adından anlaşılacağı üzere, bu sistemlerde kullanıcılar araçlarını kiraladıkları istasyona geri getirmek zorundadır. İkinci yöntem olan tek-yönlü istasyon bazlı araç paylaşım sistemlerinde ise kullanıcılar araçları birden fazla istasyondan alabilir ve kiraladıkları araçları herhangi bir istasyona bırakabilmektedir. Son olarak geliştirilen tek-yönlü serbest-akan sistem son yıllarda ortaya çıkmış ve hızlı bir şekilde gelişme göstermiştir. Bu sistemlerde kullanıcılar, belirli istasyonlar olmaksızın araçları herhangi bir yerden alıp, ulaşmak istedikleri lokasyona ulaştıktan sonra herhangi uygun bir park yerine bırakabilmektedir (He ve ark. 2016).

Araç paylaşımında tek yönlü taşıma yöntemi son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Bununla birlikte ortaya çıkan en önemli problem araçların istasyonlara dağılımında dengesizliklerin yaşanmasıdır. Bu dengesizlik durumunda yetersiz araca sahip istasyonlarda oluşacak talebin kaybedilmemesi amacıyla uygun araçların bu istasyonlara yönlendirilmesi amacıyla kullanıcı odaklı ve operatör odaklı olmak üzere iki tip strateji belirlenmiştir. Kullanıcı odaklı stratejide sürüş paylaşımı ve sürüş bölünmesi gibi

yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlarda genellikle aynı yöne gidecek olan müşterilerin gruplanarak aynı araçla varış yerlerine ulaştırılması sağlanarak müşterilerin sistem sağlayıcısına ödediği fiyat azaltılmaktadır. Genelde bu tür problemlerin modellenmesi amacıyla etmen-tabanlı simülasyon (agent-based simulation) yaklaşımı kullanılmaktadır. Operatör odaklı araç yerleşim stratejisinde ise bir kamyonla elektrikli araçların taşınması, servis aracıyla elektrikli aracın çekilmesi, operatörlerin servis aracı kullanılarak yer değiştirme konumlarına taşınması gibi teknikler kullanılmaktadır.

1.2.2. Elektrikli Araçlarda Şarj Stratejisinin Belirlenmesi (Charging Strategy)

Elektrikli araçların geniş çapta yayılmasının önündeki en büyük zorluk, geleneksel araçların aksine sınırlı menzilleri ve şarj sürelerinin önemli oranda zaman alması gerçeğidir (Tesla-Supercharges ve Chademo gibi hızlı şarj istasyonları seçenekleri oldukça maliyetlidir). Özellikle uzun mesafeli seyahatlerde aracın gece boyu şarj edilmesi yeterli olmamaktadır. Bu durumda batarya değişimi gibi bir yöntem ortaya çıkmaktadır. Şarjı biten batarya kullanıcı tarafından batarya değişiminin yapıldığı istasyonlarda yerine dolu batarya takılarak değiştirilmektedir. Bu yöntemin kullanıcı açısından en büyük avantajı çok kısa süre içerisinde dolu bataryaya sahip olunmasıdır. Bu yöntemin dezavantajı ise bu tür teknolojilerin uygulanmasında bataryalarda standardizasyon sağlanmasının gerekli olması ve böyle bir sistemin kurulumu için büyük yatırımlara ihtiyaç duyulmasıdır.

Elektrikli araçların şarj problemi için geliştirilen bir diğer çözüm yaklaşımı ise şarj istasyonları kurulumu ve kapasitesinin belirlenmesidir. Şarj istasyon kurulumu problemi, araç paylaşım sistemi yöneticisi tarafından operasyonel bir karar olarak stratejik planlama aşamasında tüm maliyet unsurlarını içeren bir problem olarak dikkate alınmaktadır. Araç paylaşım sistemi yöneticisinin amacı şarj istasyonu maliyetinin minimize edilmesinin yanı sıra kullanıcı isteklerinin karşılanmasından kaynaklı karın maksimize edilmesidir. Filo yöneticisi açısından, bir yandan kullanıcı istekleri karşılanırken öte yandan şarj istasyonu maliyetine katlanması iki çelişkili durum oluşturmaktadır. Bu durum, başlangıçta (uzun dönemli yatırım maliyeti) istasyon kurulumu maliyetin artmasına neden olurken, daha sonra operasyonel aşamada müşteriden gelen kar ile sistemi dengeye getirmektedir.

1.2.3. Sürüş Paylaşımı Problemi (Ride-Sharing Problem)

Sürüş paylaşımı (ride sharing), aynı yöne gidecek olan kullanıcıların aynı araç ile taşınmasına imkan sağlamaktadır. Sürüş paylaşımı, UberPOOL (www.uber.com/tr/ride/uberpool/) ve Lyft Line (www.lyft.com/rider) gibi şirketler tarafından halihazırda kullanılmakta olup taşıma hizmetlerinde ulaşılabilirlik ve sürdürülebilirliği sağlamak için potansiyel bir hizmet olarak görülmektedir (Farhan ve Chen 2018). Her kullanıcının yalnızca bir araçla taşındığı taşıma sistemlerine kıyasla, sürüş paylaşımının kullanıldığı sistemlerde araç kullanım oranının arttığı, müşteri taleplerini karşılayacak toplam araç sayısının ise azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca sürüş paylaşımının şehir içi trafik yoğunluğunu da azaltıcı yönde bir etkisi bulunmaktadır.

Sürüş paylaşımının, araç rotalama problemi formülasyonunun karmaşıklığını ve zorluğunu arttırıcı yönde bir etkisi bulunmaktadır. Her kullanıcının tek bir araçla taşındığı sistemlerin araç rotalama formülasyonunda her araç için tek bir rota tanımlanırken; sürüş paylaşımının dikkate alındığı sistemlerin formülasyonunda taşınan her araç için birden fazla rotanın tanımlanması gerekmektedir. Sürüş paylaşımının dikkate alındığı sistemlerin araç rotalama formülasyonlarında, bir kullanıcı aynı araç ile bulunduğu lokasyondan alınıp hedef lokasyona ulaştırılmalı, bu sürüş kullanıcının zaman penceresi içinde kalmalı ve sürüş süresi önceden belirlenen maksimum sürüş süresini aşmamalıdır. Araç seyir halindeyken farklı bir kullanıcı tarafından seyahat talebi oluştuğunda bu talep, halihazırda taşınan kullanıcının zaman penceresini aşmıyorsa karşılanmalı, aksi halde seyahat talebi ilgili araç tarafından reddedilmelidir. Bu haliyle problem, araç rotalama problemi genel kısıtlarının yanı sıra bu tür farklı kısıtlara sahip olmakta ve çözümü zor, karmaşık bir probleme dönüşmektedir. Bu tür problemlerin çözümünün sağlanması amacıyla, buldukları lokasyonlar veya varış lokasyonları birbirine yakın olan kullanıcıların gruplanarak, bir merkezi konumdaki lokasyondan araçlar ile alınmaları veya bir merkezi konumdaki lokasyona araçlar tarafından bırakılmaları gibi yaklaşımlar geliştirilmektedir.

1.3. Çalışma Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında Otonom Elektrikli Araç (OEA) kullanımının araç paylaşım sisteminde etkinliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında önerilen araç paylaşım sisteminde ilk olarak sistem kullanıcılarına ait seyahat talepleri oluşturulmuştur. Birden fazla kullanıcı talebinin olduğu, otonom elektrikli araçların kullanıldığı ve sürüş paylaşımının dikkate alındığı durumlar için geçerli olan taşıma problemi, Otonom Elektrikli Araç Rotalama Problemi (OEARP) kurgusuna dönüştürülerek kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşım ile çözümü sağlanmıştır. Bu sayede, kullanıcıların en az maliyetle (uzaklık, süre, vb.) ulaşmak istedikleri noktalara ulaştırılmasını sağlayacak çözümler hedeflenmektedir.

Çalışmanın ilk kısmında dikkate alınan OEARP için karışık tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Klasik DARP'ne ilaveten şarj istasyonuna erişim ve şarj süresi kısıtlarının problemin karmaşıklığını arttırdığı söylenebilir. Bu sebeple özellikle büyük ölçekli problemlerin çözümü için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.

OEARP'ne yönelik geliştirilen çözüm yaklaşımlarının ilki, problemin karışık tamsayılı programlama formülasyonunda dikkate alınan tüm kısıtları içeren kısıt programlama yaklaşımıdır. Geliştirilen kısıt programlama modeli ile OEARP, çizelgeleme problemine dönüştürülerek daha kısa sürede iyi çözümlere ulaşmak mümkün hale getirilmiştir.

Çalışma kapsamında, araç paylaşım sisteminde ortaya çıkan OEARP çözümü için bir kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşım önerilmektedir. Önerilen sezgisel yaklaşım, “yık-yeniden oluştur” prensibine dayanmaktadır. Sezgisel yaklaşımın ilk aşamasında, çeşitli düğüm kaldırma yöntemleri kullanılarak çözümün yeniden düzenlenmek üzere bozulması sağlanmıştır. İkinci aşamada ise geliştirilen kısıt programlama modeli kullanılarak mevcut rotalara yeni bir müşteri düğümü eklemenin uygulanabilir olup olmadığı belirlenmiş ve yeni bir çözüm elde edilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan OEARP birçok farklı kısıtlamaları içerdiğinden dolayı, uygun olmayan müşteri ekleme durumları ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, kısıt programlamanın kullanılması ile uygun olmayan çözümlerin engellenmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen sezgisel algoritmanın çözüm uzayını detaylı arama özelliği ve kısıtlama programlama yaklaşımının kısıt yayma

yetenekleri birleştirilerek, mevcut çözümde önerilen herhangi bir değişikliğin fizibilitesi araştırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında genel olarak üç katkıdan bahsedilebilir. Bunlardan ilki, OEARP için geçmiş çalışmalarda kullanılan karışık tamsayı programlama modeline benzer fakat birtakım şarj kısıtlarının farklı şekilde tanımlandığı bir karışık tamsayı programlama modeli oluşturulmuştur. İkinci katkı olarak, OEARP için karışık tamsayı programlamaya alternatif, aynı rotalama problemi dikkate alınarak bir kısıt programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan rotalama problemi, bir çizelgeleme problemine benzer şekilde kurgulanmış ve tamsayı programlama modeline kıyasla daha kısa sürede uygun çözümler üreten kısıt programlama modeli geliştirilmiştir. Son olarak, geliştirilen kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşım ile büyük boyutlu problemlerin kısa sürede iyi çözümlerine ulaşmak mümkün hale gelmiştir.

Çalışma kapsamında geliştirilen kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşım temel olarak “yık-yeniden oluştur” prensibine dayanmaktadır. Daha iyi çözümlere ulaşmak amacıyla mevcut çözüm birtakım düğüm kaldırma operatörleri ile bozulup, kısıt programlama modeli için bir alt sınır oluşturmakta ve geliştirilen kısıt programlama modeli ile çözümler yeniden oluşturulmaktadır. Burada amaç, mevcut çözümden daha iyi bir çözüm elde etmektir. Geliştirilen algoritmada kısıt programlamanın kullanılması ile uygun (feasible) çözüm üretme durumu garanti altındadır. Bu sayede çözümlerin kısıtlar açısından uygunluğunu kontrol etmek için farklı bir mekanizmaya gerek kalmamakta, böylece algoritma daha avantajlı hale gelmektedir. Önerilen sezgisel algoritmanın geçmiş çalışmalarda uygulanan Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Algoritmasından en önemli farkı, yeniden oluştur (repair) mekanizması yerine, çalışma kapsamında geliştirilen kısıt programlama modelinin uygulanmasıdır.

Çalışma kapsamında otonom araçların dikkate alınmasının nedeni, diğer araçlara kıyasla otonom araçlara ait operasyonların daha rahat yönlendirilebilir olması ve kesintisiz olarak çalıştırılabilmeleridir. Araçların elektrikli olma özelliği göz önüne alındığında, planlama sürecinde araç batarya seviyeleri, şarj istasyonuna uğramak için alınan rota kararları, şarj süreleri gibi faktörler Klasik DARP kısıtları ile birlikte değerlendirilip, problemin optimizasyonunun sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan araçların otonom

elektrikli araç olma özelliği sayesinde, araçların kesintisiz gün boyu çalıştığı varsayımı rahatlıkla uygulanmıştır. Ayrıca, otonom araç özelliği sayesinde araçların merkezi şekilde kontrolünün daha kolay yapılacağı öngörülmektedir. Araçların otonom olma özelliği sayesinde, Klasik DARP'ne kıyasla sürücüye ait sürüş süresi, vardiya değişimi ile ilgili kısıtlar ortadan kaldırılmış, bu kısıtlar, çalışma kapsamında ele alınan OEARP formülasyonunda yer almamıştır. Böylece dikkate alınan problem boyutunda sürücü kısıtlarından kaynaklanan büyüme ve karmaşıklık azaltılmıştır.

Bu kapsamda çalışmanın en önemli katkılarından bir diğeri ise kısıt programlama modelinin ana aşamasını oluşturduğu sezgisel yaklaşımdır. Literatürde kullanılan yöntemlerden farklı olarak bu çalışmada rotaların yeniden oluşturulduğu aşamada geliştirilen kısıt programla formülasyonu kullanılmıştır. Bu sayede, probleme ait kısıtların hızlı ve etkin bir şekilde kontrolü sağlanarak, sezgisel yaklaşımın her aşamasında uygun çözümler (rotalar) üretilmesi sağlanmıştır.

Algoritmanın diğeri aşaması olan ve çözümlerin yeniden düzenlenmek üzere bozulduğu aşamada literatürde sıklıkla kullanılan çeşitli düğüm kaldırma operatörleri kullanılmıştır. Bu operatörlerin DARP problemi özelinde uygulamasında dikkate alınması gereken probleme özgü birliktelik, öncelik, zaman sürekliliği gibi kısıtlar göz önünde bulundurulmuştur. Bu sayede, kısıt programlamaya girdi oluşturacak uygun başlangıç çözümlerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Her aşamasında, tüm önemli kısıtların esnetilmeden uygulandığı sezgisel yaklaşım ile büyük boyutlu problemlerin çözümleri sağlanmış, kısa sürede iyi çözümler üretildiği gözlenmiştir.

Bir sonraki bölümde tez çalışması kapsamında ele alınan araç paylaşım sistemleri, araç rotalama problemleri ve topla-dağıt araç rotalama problemleri ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. Bunu takip eden bölümde materyal ve yöntem başlığında uygulanan yaklaşımlar ve geliştirilen matematiksel formülasyonlar detaylı olarak açıklanmıştır. Bulgular bölümünde model sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve geliştirilen kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşımın sonuçları yorumlanmıştır. Son olarak Tartışma bölümünde yapılan çalışma özetlenmiş ve gelecek çalışmalar hakkında fikirler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Son yıllarda taşıma sistemleri alanında yapılan çalışmalarda araç paylaşım sistemi konusuna eğilimin arttığı görülmüştür. Araç paylaşım sistemini konu alan çalışmalarda genellikle, sistemin kendine özgü dinamik ve stokastik yapısı sebebiyle ayrık-zamanlı ve/veya etmen-tabanlı simülasyon yaklaşımlarının kullanıldığı görülmektedir. Simülasyon yaklaşımının yanı sıra bazı çalışmalarda araç rotalama problemi ve araç yer-değiştirme problemi ele alınarak matematiksel programlama modeli tabanlı çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Birtakım çalışmalarda ise araç paylaşım sisteminde ortaya çıkan problemlerin çözümü için bu iki yaklaşım (simülasyon ve optimizasyon tabanlı yaklaşımlar) birbirine entegre edilerek kullanılmış, daha bütünsel bir çözüm yaklaşımı geliştirilmeye çalışılmıştır.

Shaheen ve ark. (1997) tarafından yapılan çalışmanın, araç paylaşım sistemini konu edinen ilk çalışmalardan biri olduğu söylenebilir. Çalışmada araç paylaşım sistemi konusundaki uygulamalara ve sistemin işleyişine odaklanılarak, bu sistemin ekonomik ve sosyal olumlu etkilerinden bahsedilmiştir. Daha yakın tarihli bir çalışmada ise (Shaheen ve Cohen, 2012) araç paylaşım sistemindeki büyüme ve gelecekteki gelişmelere bağlı olarak küresel bir bakış açısı sunulmuştur. Çalışmada yazarlar tarafından, 26 ülkeden 25'ini temsil eden araç paylaşım sistemi yöneticisinin görüşme ve mülakat verileri toplanarak, özellikle Avrupa'da ve tüm dünyada araç paylaşım sistemi kullanıcılarına ait istatistiksel veriler elde edilmiştir. Benzer şekilde, Chen ve Kockelman (2016) çalışmalarında araç paylaşım sistemlerinde otonom elektrikli araç filosunun pazar potansiyelini araştırmıştır. Çalışmada araç paylaşım sistemi uygulayan bir işletmenin filusunda otonom elektrikli araç payının ne kadar olması gerektiğinin yanı sıra sistemin daha verimli hale gelebilmesi için gerekli olan fiyatlandırma stratejileri bir seçim modeli kullanılarak belirlenmiştir. Lenz ve Fraedrich (2016) tarafından, araç paylaşım sistemlerinin mevcut kullanım durumu, otonom araçların araç paylaşım işletmelerinin filolarına dahil edilmesiyle oluşan fırsatlar ve karşılaşılan zorluklar açıklanmıştır. Vasconcelos ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise farklı paydaşlara sahip (müşteriler, filo yöneticileri, şirketler, vb.) araç paylaşım sistemlerinde geleneksel veya alternatif araç teknolojilerinin kullanılmasının finansal maliyet ve çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla fayda-maliyet analizi yapılmıştır.

Literatürde araç paylaşım sistemlerinin simülasyonuna yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Fagnant ve Kockelman (2014) tarafından yapılan çalışmada, otonom araçların kullanıldığı bir araç paylaşım sisteminin etkinliği araştırılmıştır. Etmen-tabanlı simülasyon modeli kullanılarak gerçek hayat problemindeki tüm dinamik durumların (seyahatin başlangıç noktası, varış yeri, kalkış yeri, seyahat süresi, vb.) modele yansıtılması amaçlanmıştır. Çalışmada önerilen simülasyon modeli oluşturulmadan önce araç filosunun büyüklüğüne ve araç yer-değiştirme stratejisine karar verilmektedir. Geliştirilen simülasyon modeli, belirlenen periyot süresi boyunca çalıştırılarak müşteri bekleme sürelerinin minimize edilmesini amaçlayan bir taşıma süreci oluşturulmaya çalışılmıştır.

Chen ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada, bölgesel, ayırık-zamanlı ve etmen-tabanlı bir simülasyon modeli ile otonom elektrikli araç filosunun yönetimi ele alınmıştır. Önerilen simülasyon modelinde çeşitli şarj altyapı senaryoları incelenmiş ve senaryolar sonucu elde edilen performans sonuçları (bekleme süresi, toplam mesafe, araç sayısı, bir otonom elektrikli aracın kaç adet özel araca karşılık geldiği, vb.) gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca, filo kapasitesinin araç tipine, batarya şarj süresine ve araç menzil uzaklığına oldukça duyarlı olduğu vurgulanmıştır.

Scheldes ve Correia (2017) tarafından yapılan çalışmada ise otonom araçların toplu taşımada etkinliği araştırılmıştır. Çalışmada etmen-tabanlı simülasyon modeli kullanılarak, kullanıcı taleplerinin araçlara atanması için çeşitli kontrol koşulları ve FIFO temelli kurallar uygulanmıştır.

Levin ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel taşıma sistemleri ile karşılaştırması yapılan araç paylaşım sistemlerinin, trafik yoğunluğunun da dikkate alındığı gerçekçi bir ortamda test edilmesi sağlanarak daha gerçekçi sistem çıktıları elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, mevcut trafik simülasyon modellerinde otonom araçların davranışları incelenmiş olup hücre iletim modeli tabanlı dinamik ağ simülatörü kullanılarak sürüş paylaşımı için sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir.

Farhan ve Chen (2018) tarafından yapılan çalışmada otonom elektrikli araçların kullanıldığı araç paylaşım sistemlerinde sürüş paylaşımının etkisi incelenmiştir. Çalışmada etmen-tabanlı simülasyon modeli önerilerek, elektrikli araçlar için kullanılan araç rotalama modelinde araçların şarj seviyeleri de dikkate alınmıştır. Çalışmada ayrıca, sürüş paylaşımının araçların katettiği ortalama mesafeyi arttırmasına karşın, toplam araç sayısını ve müşteri bekleme süresini önemli oranda azalttığı belirtilmiştir.

Shen ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada otonom araçlar ile toplu taşıma sisteminin entegrasyonundan oluşan bir araç paylaşım sistemi ele alınmıştır. Çalışmada çözüm yaklaşımı olarak etmen-tabanlı simülasyon modeli önerilerek, önerilen sistemin performansı, farklı filo büyüklükleri ve sürüş paylaşımı da dikkate alınarak üretilen 52 adet senaryo ile test edilmiştir. Elde edilen performans sonuçları değerlendirildiğinde, otonom araçların toplu taşımada kullanılmasının şehir içi trafiğin azaltılması, finansal olarak sürdürülebilir bir taşıma hizmetinin sağlanması ve toplu taşıma hizmetinin kalitesinin arttırılması gibi olumlu etkileri olduğu belirtilmiştir.

Literatürdeki araç paylaşımıyla ilgili bazı çalışmalarda ise çeşitli formülasyonların dikkate alındığı ve bunların bazılarının ise bir simülasyon kurgusu ile birlikte çalışacak şekilde tasarlandığı görülmektedir. Örneğin, Liang ve ark. (2018) çalışmasında yazarlar tarafından, otonom taksilerin rotalarının belirlenmesi ve şehir içi trafik yoğunluğunun dikkate alınarak dinamik sistem cevap hızının (talep karşılama oranı) hesaplanması amaçlanmıştır. Çalışmada dinamik seyahat süreleri ve değişen araç akışı dikkate alınarak toplam kârın maksimize edildiği ve araç rotalarının belirlendiği bir tamsayı programlama modeli önerilmiştir. Önerilen modelde sistemin dinamik yapısı göz önüne alındığından dolayı, yalnızca önceden bilinen müşteri talepleri değil, anlık oluşan gerçek müşteri talepleri de dikkate alınmış ve tüm talebi karşılayacak araç filo büyüklüğü belirlenmeye çalışılmıştır.

Geliştirilen bir optimizasyon modelinin bir simülasyon kurgusu ile birlikte çalıştırıldığı çalışmalara örnek olarak (Deng ve Cardin 2018) tarafından yapılan çalışma verilebilir. Çalışmada talep belirsizliği altında tek-yönlü araç paylaşım sistemi planlaması ele alınarak, belirli bir servis düzeyine minimum maliyet ile ulaşılması için en iyi araç yer-

değiştirme stratejisinin belirlenmesini amaçlayan bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Ayrıca çalışmada geliştirilen matematiksel modelin çözümü için ayrık-olay simülatörü, parçacık sürü algoritması ve optimal bütçe hesaplama yöntemlerinden oluşan bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

Geçmiş çalışmalarda genellikle dikkate alınan ve araç paylaşım sistemlerinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri araç yer-değiştirme (relocation) problemidir. Özellikle tek-yönlü araç paylaşım sistemleri kullanıcı dostu olarak görülmekle birlikte bu sistemlerde dengesiz ve dağınık araç dağılımı oluşmaktadır (Brandstatter ve ark. 2016). Araç yer-değiştirme problemi, genel olarak stratejik ve operasyonel planlama olmak üzere iki boyutta incelenmiştir (Boyaci ve ark. 2015;Shaheen ve ark. 2015; Correia ve ark. 2014; Correia ve Antunes 2012;Brandstatter ve ark. 2016).

He ve ark. (2016) tarafından stratejik planlamada araç dengesizliğinin kontrol edilmesi için servis bölgesinin belirlenmesi amaçlanırken; Weikl ve Bogenberger (2013) tarafından operasyonel planlamada araçların park stratejilerine odaklanılmıştır. Genellikle stratejik planlama aşamasında dikkate alınan servis bölgesi belirleme problemini konu alan çalışmalar oldukça az sayıdadır (Miao ve ark. 2019).

Araç yer-değiştirme problemlerinin çözümüne yönelik geliştirilen yaklaşımlardan bir diğeri ise şarj istasyonlarının konumlandırılması problemi için geliştirilen çözüm yaklaşımlarıdır. Geçmiş çalışmalarda şarj istasyonu konumlandırma problemi genellikle, çoklu servis sağlayıcısı bulunan ve akış problemi temelli yakıt istasyonu problemi olarak dikkate alınmaktadır (Chung ve Kwon 2015; Berman ve ark. 2008; Li ve ark. 2016). Araç yer değiştirme problemini dikkate alan bazı çalışmalara aşağıdaki paragraflarda yer verilmiştir.

Pavone ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada araç paylaşım sisteminde ortaya çıkan araç yer-değiştirme problemi için çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışmada, araçların bulunduğu bazı istasyonlarda daha çok müşteri talebinin gerçekleşmesine bağlı olarak ortaya çıkan araç dengesizliği dikkate alınmış olup bu durumun çözümü için istasyonlar arası boş araçları taşıyacak ve istasyonlarda dengeyi yeniden sağlayacak araç kullanımı

önerilmiştir. Çalışmada ayrıca, en iyi araç yer-değiştirme stratejisi doğrusal programlama yaklaşımı ile belirlenmiştir.

Jorge ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada tek yönlü araç paylaşım sistemi dikkate alınarak bu sistem sonucunda ortaya çıkan araç yer-değiştirme problemine yönelik bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım, araç paylaşım sistemindeki verimliliği arttırarak karı maksimize etmeyi amaçlayan bir matematiksel model ve birbirinden farklı gerçek zamanlı araç yer-değiştirme stratejilerinin uygulandığı simülasyon modelinden oluşmaktadır. Çalışmada önerilen bu iki yöntemde uygulama alanı olarak Lisbon, Portekiz seçilmiş ve önerilen yaklaşımın sistemin karında önemli artışlar sağladığı vurgulanmıştır.

Shaheen ve ark. (2015) çalışmasında araç yer-değiştirme stratejileri araştırılmıştır. Yazarlar tarafından 2013 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD, Kanada, Meksika ve Brezilya) 26 gidiş-dönüş ve 5 tek yönlü araç paylaşım sistemi kullanan işletmecilerin araç paylaşım sistemleri ve geleceği konusundaki bakış açılarını anlamak amacıyla anket düzenlenmiştir. İşletmecilerin yaklaşık %70'i tek yönlü sistemi, gidiş-dönüş sistemine tamamlayıcı olarak görürken, %19'u rakip olarak algıladıklarını belirtmiştir. Ayrıca anket katılımcılarının toplu taşıma, akıllı kart ile erişim ve elektrikli araç entegrasyonu gibi teknolojileri araç paylaşım sistemlerinin gelişiminin anahtarı olarak gördükleri belirtilmiştir.

Zhang ve Pavone (2016) tarafından yapılan çalışmada kuyruk modeli teorisi, otonom araçların kullanıldığı talep üzerine taşıma yapan bir araç paylaşım sistemine uyarlanmıştır. Çalışmada araç yer-değiştirme problemine yönelik bir matematiksel formülasyon önerilmiş ve robotik araçlar kullanılarak sistemin verimliliği test edilmiştir.

Wen ve ark. (2017) çalışmalarında, araç yer-değiştirme problemi ele alınarak, problemin çözümü için sistemi yeniden dengeye ulaştırmayı hedefleyen öğrenme tabanlı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışmada etmen-tabanlı simülatör kullanılmış olup önerilen yaklaşımın uygulamasında Londra seyahat verilerinden yararlanılmıştır.

Literatürde sürüş paylaşımının dikkate alındığı çalışmaların genellikle taksi servisleri alanında yapılan çalışmalar olduğu gözlenmiştir. Örneğin, Ma ve ark. (2017) tarafından gerçek zamanlı taksi paylaşım modeli önerilerek, otonom olmayan taksi paylaşım hizmetinin şehir içi taşımacılıkta kullanımı araştırılmıştır. Önerilen doğrusal programlama modelinde amaç, tüm kullanıcı talebini karşılayacak taksiler için katedilen mesafenin minimizasyonundan oluşmaktadır. Çalışmada sürüş paylaşımının toplam hizmet edilen kullanıcı sayısını arttırdığı belirtilmiştir.

Liang ve ark. (2016) çalışmasında yazarlar tarafından, tren seyahatlerinde kullanılan otonom taksi paylaşım sisteminin optimizasyonu için iki adet tamsayı programlama modeli önerilmiştir. Önerilen ilk modelde kâr maksimizasyonunu hedeflenerek rezervasyonların kabul edilip edilmeyeceğine karar verilirken; ikinci modelde ise ilk model ile belirlenen bir servis bölgesi için kabul edilen tüm taleplerin karşılanması hedeflenmiştir. Geliştirilen modeller örnek bir uygulamada test edilmiş, sonuçlar filo kapasitesinin sistemin karlılığına önemli oranda etki ettiğini göstermiştir.

Lokhandwala ve Cai (2018) çalışmasında yazarlar tarafından taksi paylaşım sisteminin potansiyel olumlu ve olumsuz etkileri analiz edilmiştir. New York seyahat verileri kullanılarak ve sürüş paylaşımı dikkate alınarak yapılan çalışmada, geleneksel ticari taksilerin ve otonom araçların performansları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre geleneksel taksiler yerine otonom taksiler kullanıldığında, sistem servis düzeyi ve müşteri bekleme sürelerinde önemli bir artış olmamasına karşın, filo büyüklüğünün %59 oranında azalabileceği belirtilmiştir. Sürüş paylaşımının ise araç doluluk oranını arttırmasına karşın, toplam mesafeyi ve karbon emisyonunu önemli derecede azalttığı vurgulanmıştır.

Alonso-mora ve ark. (2018) çalışmalarında New York'da bulunan taksi filosunu simüle ederek, taksi taleplerini %98 oranında karşılayacak toplam araç sayısını belirlemiştir. Santi ve ark. (2013) ise çalışmalarında New York seyahat taleplerini dikkate alarak taksi-paylaşım servisinin etkinliğini analiz etmiştir.

Agatz ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada Atlanta bölgesel seyahat verileri dikkate alınarak, kullanıcıları ve araçları eşleştirmek amacıyla bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Çalışmada İtalya seyahat verileri kullanılarak, kullanıcı ve araçları eşleştirmeyi amaçlayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bir başka çalışmada ise Cici ve Markopoulou (2014) tarafından akıllı telefon ve sosyal medya verileri dikkate alınarak, sürüş paylaşımının taşıma sistemlerinde etkisi incelenmiştir.

Stiglic ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada sürüş paylaşımı dikkate alınmış, kullanıcı buluşma noktalarının belirlenmesi ve kullanıcıların bu noktalarda araçları beklemesi varsayımında bulunularak, bu varsayımın taşıma sistemi performansına olumlu yönde etki ettiği belirtilmiştir.

Alexander ve Gonzalez (2015) tarafından yapılan çalışmada ise sürüş paylaşımının trafik yoğunluğu üzerindeki etkisi incelenmiş olup seyahat taleplerinin oluşturulmasında Boston şehri için akıllı telefon verilerinden yararlanılmıştır.

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde, araç paylaşım sistemlerini inceleyen bazı çalışmalarda otonom araç özelliği ve sürüş paylaşımı seçeneğinin birlikte ele alındığı gözlenmiştir. Örneğin, Fagnant ve Kockelman (2018) tarafından yapılan çalışmada otonom araçların kullanıldığı ve sürüş paylaşımının dikkate alındığı bir araç paylaşım sistemi için ayrık-zamanlı ve etmen-tabanlı simülasyon modeli önerilmiştir. Çalışmada uygulama alanı olarak seçilen Texas-Austin bölgesine ait seyahat talep verileri kullanılmış ve sürüş paylaşımının araç bekleme süresini %50 oranında azalttığı belirtilmiştir.

Zhang ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada ise araç paylaşım sistemi simülasyon modeli geliştirilerek, çalışmada sürüş paylaşımının dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar arasındaki sistem performansının karşılaştırılması yapılmıştır.

Martinez ve Viegas (2017) tarafından yapılan çalışmada sürüş paylaşımı dikkate alınarak araç paylaşım sistemi için etmen-tabanlı simülasyon modeli geliştirilmiş olup çalışmada uygulama alanı olarak seçilen Lisbon şehrine ait seyahat verilerinden yararlanılmıştır. Çalışmada ayrıca, çeşitli simülasyon senaryoları altında otonom araçlar yerine özel

araçlar, taksiler ya da otobüsler kullanılarak sistem çıktıları üzerinden karşılaştırma yapılmıştır.

Ma ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise araç paylaşım sistemi Zaman-pencereli Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi kurgusunda ele alınmış ve problemin çözümüne yönelik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Çalışmada önerilen araç paylaşım sistemi ile araç kullanım oranının arttığı ve buna bağlı olarak kullanılan her bir otonom aracın 13 adet özel araca karşılık geldiği belirtilmiştir.

Geçmişte yapılan ve otonom araç tabanlı araç paylaşım sistemleri ve araçların yakıt özelliklerini birlikte dikkate alan çalışmaların daha az sayıda olduğu görülmektedir. Örneğin, otonom elektrikli araçların kullanıldığı bir araç paylaşım sisteminin modellenmesinde, şarj istasyonu konumları, kapasiteleri, şarj süresi ve miktarı gibi durumların dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda örneğin, Scheltes ve ark. (2017) tarafından otonom elektrikli araçların kullanıldığı bir paylaşım sisteminin simülasyonu modeli oluşturulmuştur. Fakat bu çalışmada sürüş paylaşımı durumu dikkate alınmamış olup problem, küçük bir alanda uygulanarak çözülmeye çalışılmıştır. Ayrıca çalışmada, şarj istasyonu kurulumu ve araç kapasitesi gibi kısıtlar da dikkate alınmamıştır.

Loeb ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada araç paylaşım sistemi için simülasyon modeli önerilmiş ve şarj istasyonu ve şarj süresi gibi gereklilikler dikkate alınmıştır. Çalışmada, şarj sürelerinin azalması ve araç sayısının artması ile birlikte kullanıcı talep karşılama oranının arttığı belirtilmiştir. Çalışmada sürüş paylaşımı dikkate alınmamıştır.

Miao ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada ise otonom elektrikli araçların kullanıldığı araç paylaşım sistemi ele alınarak çok amaçlı, iki-aşamalı bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın ilk aşamasında servis bölgesi sınırlarının belirlenmesi hedeflenirken, ikinci aşamada, belirlenen servis bölgesi için şarj altyapısı kurulumu problemine yönelik bir matematiksel formülasyon geliştirilmiştir. Her iki aşamada da çok amaçlı optimizasyon modeli ile sistem kullanıcıları ve servis sağlayıcılarının amaçları dikkate alınmış olup çalışmada, araç yer-değiştirme probleminin

çözümü için hibrit park mekanizmaları önerilmiştir. Ancak bu çalışmada da sürüş paylaşımı dikkate alınmamıştır.

Araç paylaşım sistemleri ile ilgili çalışmalarda genellikle kullanılan simülasyon yaklaşımının rotalama modülü olarak tanımlanan kısımda literatürde bilinen araç rotalama problemleri ile ilişkili formülasyonlar kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında ele alınan rotalama problemi, genel bir bakış açısıyla bir simülasyon modelinin rotalama modülü olarak çalışabilecek bir yapı oluşturmaktadır. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında araç paylaşım sistemi kurgusunda önemli bir problemin çözümüne yönelik çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Araç paylaşım sistemlerinin de içinde bulunduğu talep odaklı taşıma süreçlerinde ortaya çıkan problemler, literatürde bulunan Araç Rotalama Problemi (ARP) ile yakından ilişkilidir. ARP'nin amacı bir dizi müşteri lokasyonuna uğrayacak araç kümesi için rotaların tanımlanmasıdır (Dantzig ve Ramser 1959). Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KK-ARP) araç kapasite kısıtının da dikkate alındığı ARP modelinin bir varyasyonu olarak tanımlanabilir. Zaman-pencereli Araç Rotalama Problemi (ZP-ARP) ise araçlar tarafından yapılacak servisin müşteriler için tanımlanan zaman aralığı içerisinde gerçekleştirilmesini gerekli kılan ve zaman penceresi kısıtlarının ARP modeline entegre edilmesiyle oluşan bir genelleştirilmiş ARP modelidir. Örneğin, Jung ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada, ZP-ARP dikkate alınarak, problemin çözümü için kısıt programlama bazlı bir çözüm yaklaşımı geliştirmiştir. Bu çalışmada dikkate alınacak olan problem ise, ARP varyasyonlarından biri olan Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (TD-ARP) olarak da kurgulanabilen ve her müşterinin iki düğüm (orijin ve hedef lokasyon) ile temsil edildiği araç rotalama problemi (dial-a-ride problem (DARP)) olarak tanımlanabilir. Literatürde, Jaw ve ark. (1986) tarafından yapılan çalışmada, çok-araçlı DARP için müşterileri alma ve bırakma zaman penceresi kısıtlarını içeren bir formülasyon geliştirilmiştir. Fu (2002) tarafından yapılan çalışmada, zaman kısıtları altında DARP'i ele alınmıştır. Cordeau ve Jean-Francois (2006) çalışmasında ise yazarlar tarafından, DARP modelinin çözümü için dal ve kesme algoritması uygulanmıştır.

Araç paylaşım sistemlerini konu edinen birtakım çalışmalarda, otonom elektrikli araçlar için rotalama problemi, elektrikli araç teknolojisinden kaynaklanan kısıtlamalar ve

zorluklar göz önünde bulundurularak, literatürde bulunan Elektrikli Araç Rotalama (EARP) problemi olarak kurgulanıp, problemin çözümü için çeşitli çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Geçmiş yıllarda EARP konusunda nispeten az sayıda çalışma yapılmıştır. Örneğin, Artmeier ve Haselmayr (2010) tarafından yapılan çalışmada, kullanılan araçlar için alternatif yakıt seçeneğinin de dikkate alındığı ARP, network teorisi kapsamında incelenerek, problemin çözümü için enerji tüketimi optimizasyonunu hedefleyen en kısa yol algoritmaları önerilmiştir. Çalışmada, genel en kısa yol algoritmalarına enerji yönünden verim sağlayacak şarj kısıtları eklenerek EARP formüle edilmiştir.

Haixing Wang ve Shen (2007) tarafından geliştirilen model ile toplam tur sayısı ve seyahat süresi minimizasyonu amaçlanmış ve problemin çözümü için karınca kolonisi algoritması önerilmiştir. Çalışmada önerilen modelde sürüş menzilleri sınırlandırılırken; şarj süresi, zaman penceresi ve araç kapasitesi gibi kısıtlar dikkate alınmamıştır.

Conrad ve Figliozzi (2011) tarafından yapılan çalışmada, ARP'nin yeni bir varyasyonu olan Elektrikli Araç Rotalama Problemi (EARP) dikkate alınmış olup çalışmada, elektrikli araçların seçilen bazı müşteri lokasyonlarında araçlarını şarj ettiği varsayımında bulunulmuştur. Geliştirilen model ikili amaç fonksiyonuna sahip olup, birincil amaç fonksiyonu toplam rota ve araç sayısını minimize ederken; ikincil amaç fonksiyonu seyahat uzaklığı, servis süresi ve şarj sıklığını minimize etmektedir. Çalışmada tam ve kısmi şarj gibi seçenekler de dikkate alınmış ve kısmi şarj durumunda araçların batarya kapasitesinin %80'i düzeyinde şarj edildiği varsayılmıştır.

Wang ve Cheu (2014) çalışmasında yazarlar tarafından, elektrikli araçlardan oluşan taksi filosunun operasyonları incelenmiştir. Çalışmada geliştirilen model ile şarj kısıtları ve maksimum rota süresi altında toplam seyahat uzaklığının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada, şarj sürelerinin sabit olduğu ve şarj edildikten sonra araçların bataryalarının tam dolu olduğu varsayımında bulunulmuştur.

Omidvar ve Tavakkoli-Moghaddam (2012) çalışmasında ele alınan rotalama probleminde, zaman pencereleri de dikkate alınmış, önerilen matematiksel model ile araçların seyahat süreleri, seyahat uzaklıkları, gaz emisyonlarından oluşan toplam

maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, geliştirilen matematiksel modelin çözümü için Tavlama Benzetimi ve Genetik Algoritma gibi yaklaşımlar kullanılmış ve bu yaklaşımların performansları karşılaştırılmıştır.

Worley ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada ise EARP ve şarj istasyon yerleşim problemi birlikte ele alınmış ve çalışma kapsamında önerilen modelin amaç fonksiyonu, toplam seyahat maliyeti, şarj maliyeti ve şarj istasyon kurulum maliyetlerinin minimizasyonundan oluşmaktadır.

Erdoğan ve Miller-Hooks (2012) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlar için rotalama problemi, Yeşil Araç Rotalama (YARP) olarak kurgulanmış ve bu kapsamda formüle edilen matematiksel modelde rotaların uzunluğu sınırlandırılarak toplam mesafenin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında önerilen modelde, yakıt tüketimi ile katedilen mesafenin doğru orantılı olduğu, araçların yakıt ikmalinden sonra tam dolu olarak yola çıktıkları ve yakıt ikmal süresinin sabit olduğu varsayımında bulunulmuştur. Ayrıca çalışmada ele alınan formülasyonda zaman pencereleri ve araç kapasite kısıtları dikkate alınmamıştır.

Bu konuda yapılan bir çalışmada ise Felipe ve ark. (2014) tarafından, kısmi şarj için çoklu teknolojilerin kullanıldığı ve farklı güç seçeneklerinin bulunduğu elektrikli araçlar için YARP'nin uzantısı bir formülasyon geliştirilmiştir. YARP'de olduğu gibi bu çalışmada da, araç kapasitesi ve toplam rota süresi gibi kısıtlar dikkate alınırken; zaman penceresi kısıtlarının dikkate alınmadığı görülmektedir.

Zaman-pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi (ZP-EARP), klasik ZP-ARP'nin bir varyasyonu olan ve elektrikli araç filosunu içerdiğinden dolayı bu problemde, rota boyunca şarj istasyonuna uğrama ve belirli süre boyunca aracın bataryasını şarj etme gibi durumlar dikkate alınmaktadır (Keskin ve Çatay 2016). Bu tür araçların bataryalarının şarj edilme süresi ile diğer sıvı yakıt kullanan araçların yakıt ikmal süreleri karşılaştırıldığında, şarj işlemi için daha uzun süre gerektiği bilinmektedir. Araçlar, bataryaları belirli şarj düzeyinde iken şarj istasyonlarına uğramakta ve bu düzeylere göre şarj edilme süreleri değişkenlik göstermektedir. Bu problemi dikkate alan çoğu

çalışmada, şarj istasyonuna uğrayan araçların, bataryalarının tamamının şarj edildiği varsayımında bulunulmuştur. Şarj istasyonu sayısının az olduğu ve istasyonların daha seyrek ve birbirlerinden uzak konumlandırıldıkları düşünüldüğünde, problemin zorluğu artmaktadır. ZP-EARP diğer ARP'ler gibi NP-zor problemler sınıfındadır ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için genellikle sezgisel veya meta-sezgisel yaklaşımlar kullanılmaktadır.

Schneider ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP'nin çözümü için, Değişken Komşuluk Arama ve Yasaklı Arama algoritmalarının kombinasyonundan oluşan hibrit meta-sezgisel bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Desaulniers ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada ise aynı problem ele alınarak, tekli-tam şarj, tekli-kısmi şarj, çoklu-tam şarj ve çoklu-kısmi şarj olmak üzere 4 adet şarj stratejisi dikkate alınmıştır.

Goeke ve Schneider (2015) tarafından yapılan çalışmada, ZP-EARP'nin bir uzantısı olarak elektrikli araçlar ve içten yanmalı motorlu araçların birlikte bulunduğu heterojen filo rotalama problemi ele alınmıştır. Hiermann ve ark. (2016) çalışmasında ise yazarlar tarafından, elektrikli araçların bulunduğu filo rotalama problemi ele alınmış, problemin çözümü için yerel arama ve etiketleme prosedürünü içeren uyarlanabilir komşuluk arama algoritması kullanılmıştır.

Bongiovanni ve ark. (2019) tarafından bu çalışma kapsamında ele alınan OEARP için dal-kesme yaklaşımı önerilmiş olup çalışmada, Uber verileri kullanılmış ve önerilen kesin çözüm algoritması test edilmiştir.

Araç Rotalama Problemleri kısıt programlama yaklaşımı için modellemeye uygun yapıda problemlerdendir. Özellikle çizelgeleme problemlerinin kısıt programlama ile modellenmesinde kullanılan dil, araç rotalama probleminin kolaylıkla çizelgeleme problemine dönüştürülerek çözülmesine olanak sağlamaktadır. Genel araç rotalama problemlerinin modellenmesi ve çözümünde Kısıt Programlama yaklaşımı, geçmiş yıllarda matematiksel programlama yaklaşımlarına alternatif olarak gösterilmiştir (Shaw 1998; Beck ve ark. 2003). Son yıllarda yapılan çalışmalarda ele alınan problemler arasında, çoklu gezgin satıcı problemi Vali ve Salimifard (2017), ekip oryantasyonu problemi Gedik ve ark. (2017), dinamik DARP Berbeglia ve ark. (2012), ortak araç ve

ekip rotalama Lam ve ark. (2015) ve hasta rotalama Liu ve ark. (2018) olarak sıralanabilir. Ancak bu çalışmalarda genellikle araç yakıt durumları dikkate alınmamıştır. Kısıt programlama yaklaşımı, Yeşil Araç Rotalama veya Elektrikli Araç Rotalama problemleri için henüz önerilmemiş olsa da, kar küreme araçlarının rotalama Kinable ve ark. (2011) ve robot görev atama ve rotalama Booth ve ark. (2016), Booth ve ark. (2019) problemlerini ele alan geçmiş çalışmalarda, bataryaya ait enerji tüketimi ve şarj durumları için kısıt programlama modelleri önerilmiştir.

Çalışma kapsamında dikkate alınan unsurlar açısından geçmiş çalışmaların sınıflandırma tablosu Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Çalışmaların Sınıflandırılması

Yazar	Problem tipi	Metodoloji	Sürüş paylaşımı	Araç yakıt özelliği	Park stratejisi
Agatz ve ark. 2011	Dinamik sürüş paylaşımı problemi	Simülasyon optimizasyonu	✓	Belirtilmemiş	✗
Pavone ve ark. 2012	Araç yer-değiştirme problemi	Doğrusal programlama temelli yaklaşım	✗	Belirtilmemiş	✓
Correia ve Antunes 2012	Araç-yer değiştirme problemi	Karışık-tamsayılı programlama modeli	✗	Belirtilmemiş	✓
Santi ve ark. 2013	Taksi-paylaşım problemi	Network teorisi	✓	Belirtilmemiş	✗
Weikl ve Bogenberger 2013	Araç-yer değiştirme problemi	Yer-değiştirme algoritmaları	✗	Belirtilmemiş	✓
Cici ve ark. 2014	Sürüş paylaşımı problemi	Veri madenciliği algoritmaları	✓	Belirtilmemiş	✗
Wang ve Cheu 2014	Taksi filo yönetimi	İki-aşamalı sezgisel yaklaşım	✗	Elektrikli araçlar	✗
Jorge ve ark. 2014	Araç-yer değiştirme problemi	Matematiksel programlama modeli ve simülasyon modeli	✗	Belirtilmemiş	✓
Fagnant ve Kockelmann 2014	Araç paylaşım operasyonları yönetimi	Etmten-tabanlı simülasyon modeli	✗	Otonom araç	✓
Stiglic ve ark. 2015	Sürüş paylaşımı problemi	Tamsayılı programlama ve simülasyon	✓	Belirtilmemiş	✗

Çizelge 2.1. Çalışmaların Sınıflandırılması (devamı)

Yazar	Problem tipi	Metodoloji	Sürüş paylaşımı	Araç yakıt özelliği	Park stratejisi
Boyacı ve ark. 2015	Elektrikli-araç paylaşım sistemi	Çok-amaçlı karışık tamsayılı doğrusal programlama	×	Elektrikli araçlar	✓
Zhang ve ark. 2015	Dinamik sürüş paylaşımı problemi	Etmem-tabanlı simülasyon modeli	✓	Belirtilmemiş	×
Tu ve ark. 2016	Şarj istasyonu kurulumu problemi	Küme kapsama matematiksel modeli	×	Elektrikli araçlar	×
Liang ve ark. 2016	Servis bölgesi ve seyahat seçimi problemi	Tamsayılı programlama modeli	×	Otonom Elektrikli	✓
Chen ve ark. 2016	Araç paylaşım sisteminde filo operasyonları yönetimi	Ayrık-zamanlı ve etmem-tabanlı simülasyon modeli	×	Otonom Elektrikli	✓
Chen ve Kockelman 2016	Araç paylaşım sisteminde filo operasyonları yönetimi	Etmem tabanlı simülasyon	×	Otonom Elektrikli	✓
Zhang ve Pavone 2016	Araç paylaşım sistemi operasyonları yönetimi	Kuyruk teorisi metodları	×	Otonom araçlar	✓
Li ve ark. 2016	Araç-yer değiştirme problemi	Matematiksel programlama modeli	×	Elektrikli araçlar	×
Boyacı ve ark. 2017	Araç-yer değiştirme problemi	Çok-amaçlı karışık tamsayılı doğrusal programlama	×	Elektrikli araçlar	✓
Dia ve Javonshour 2017	Araç paylaşım sistemi tasarımı	Simülasyon modeli	×	Otonom araçlar	×

Çizelge 2.1. Çalışmaların Sınıflandırılması (devamı)

Yazar	Problem tipi	Metodoloji	Sürüş paylaşımı	Araç yakıt özelliği	Park stratejisi
Martinez ve Viegas 2017	Sürüş paylaşımı problemi	Etmten-tabanlı simülasyon	✓	Otonom araçlar	✗
Loeb ve ark. 2018	Araç paylaşım sistemi tasarımı	Simülasyon modeli	✗	Otonom elektrikli	✗
Shen ve ark. 2018	Araç paylaşımı ile toplu taşıma sistemi	Etmten-tabanlı simülasyon modeli	✓	Otonom araçlar	✓
Gurumurthy ve Kockelman 2018	Dinamik sürüş paylaşımı problemi	Seyahat-eşleştirme algoritması	✓	Otonom araçlar	✗
Hyland ve Mahmassani 2018	Araç atama problemi	Optimizasyon-tabanlı araç atama stratejileri	✗	Otonom araçlar	✗
Farhan ve Chen 2018	Sürüş paylaşımı problemi	Ayrık-zamanlı, kural-tabanlı simülasyon modeli	✓	Otonom elektrikli	✓
Deng ve Cardin 2018	Tek-yönlü araç paylaşım sistemi tasarımı	Simülasyon ve optimizasyon modeli	✗	Belirtilmemiş	✓
Miao ve ark. 2019	Araç paylaşım sistemi optimal planlaması	İki-aşamalı çok-amaçlı optimizasyon	✗	Otonom elektrikli	✓
Iacobucci ve ark. 2019	Araç paylaşım sisteminde şarj çizelgeleme problemi	Karışık-tamsayılı doğrusal programlama	✗	Otonom elektrikli	✓

Tüm bu çalışmalar dikkate alındığında, mevcut literatürdeki çalışmaların, sürüş paylaşımı operasyonlarını içeren araç paylaşım sistemlerini ele alarak, bu sistemlerin şehir içi ulaşımında etkinliği ve verimliliği konusunda yoğunlaştığı görülmektedir. Ancak genellikle, geçmiş çalışmalarda, araçların yakıt veya şarj ile ilgili özellikleri dikkate alınmamış olmakla birlikte bu çalışmalarda, şarj teknolojileri ve şarj istasyonları gibi gereklilikleri içeren çözüm yaklaşımları geliştirilmemiştir.

Bu çalışmada sürüş paylaşımının dikkate alındığı ve elektrikli araçlar için şarj yönetimi ile ilgili kısıtları da içeren bir araç rotalama modeli geliştirilmiştir. Klasik topla-dağıt araç rotalama probleminde bulunmayan şarj kısıtlarının da eklenmesi ile şarj yönetimi ve bunun talep karşılama durumuna etkileri incelenmiştir. Klasik topla-dağıt araç rotalama probleminin NP-zor yapısı düşünüldüğünde, bu probleme eklenmiş şarj yönetimi ile ilgili kısıtlar da dikkate alındığında ele alınan OEARP modelinin de NP-zor yapıda olduğu söylenebilir. Bu sebeple, özellikle büyük boyutlu problemlerin çözümüne yönelik kısıt programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Ayrıca geliştirilen kısıt programlamanın “yeniden oluştur” mekanizmasını oluşturduğu Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Arama Algoritması literatürde bilinen adıyla “Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)” algoritması ile kısa sürede iyi çözümlere ulaşmak mümkün hale getirilmiştir.

Çalışmanın ana katkılarından ilki, ele alınan OEARP'nin bir çizelgeleme problemine dönüştürülerek, problemin çözümü için kısıt programlama yaklaşımının uygulanmasıdır. Bu yaklaşım ile kısıt ve değişken sayısının oldukça azaldığı, bu sayede, özellikle büyük boyutlu problemlerin çözümü için önemli bir alternatif çözüm yaklaşımının geliştirildiği rahatlıkla söylenebilir.

Kısıt programlamanın hızlı ve iyi çözüm üretme gücü, çalışmanın diğer katkısını oluşturan sezgisel yaklaşımda da kullanılmaya devam edilmiştir. Böylece, literatürde UGKA algoritmasının yeniden oluştur mekanizmasında kullanılan bilindik yöntemlerin yerine, yeniden çözüm oluşturma süreci daha güçlü bir yapı ile desteklenmiştir. Geliştirilen kısıt programlama modeli sayesinde, üretilen çözümlerin kısıtlar açısından uygunluğunun kontrol edilme süreci ve buna bağlı zorluklar tamamen ortadan kaldırılmıştır.

Çalışmanın ana katkılarından bir diğeri ise kısıt programlamanın yeniden oluştur mekanizmasını oluşturduğu sezgisel yaklaşımdır. Sezgisel yaklaşımın özellikle işlev kazandığı husus, mevcut çözümlerin bir kısmının yıkıldığı (destroy) aşamadır. Bu aşamada kullanılan operatörler ile komşu çözümler araştırılarak, bu sayede daha iyi çözümlere ulaşılması sağlanmıştır. Rassal düğüm kaldırma operatörü ile yerel aramaya takılmanın önüne geçilip, farklı çözümlerin keşfedilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Geliştirilen algoritmada kullanılan düğüm kaldırma operatörleri çalışma kapsamında dikkate alınan OEAP'nin kendine özgü durumları dikkate alınarak uygulanmıştır. Her ne kadar literatürde sıklıkla kullanılan operatörler seçilmiş olsa da bu operatörler problem özelinde geliştirilmiş ve sezgisel yaklaşımın ilk aşamasında kullanılmıştır. Bu durum geliştirilen yaklaşımın hem “yıkma” hem “yeniden oluşturma” aşamalarının özgünlüğünü kanıtlar niteliktedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında araç paylaşım sistemlerinde ortaya çıkan OEARP için ilk olarak karışık tamsayılı programlama modeli, ikinci olarak kısıt programlama modeli ve son olarak kısıt programlama tabanlı bir sezgisel yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yaklaşımlarda yararlanılan kuramsal temeller ve materyaller takip eden “Materyal” başlıklı bölümde sunulmuştur. Tez çalışması kapsamında geliştirilen matematiksel formülasyonlar ise detaylarıyla birlikte “Yöntem” bölümünde açıklanmıştır.

3.1. MATERYAL

3.1.1. Tamsayılı Programlama

Doğrusal programlama problemlerinin bazılarında karar değişkenlerinin pozitif tamsayı olması gerekmektedir. Bu tip problemlere Tamsayılı Doğrusal Program (TDP; Integer Linear Programming – ILP) denilir ve söz konusu programların çözümü konusu Tamsayılı Doğrusal Programlama (TDP) olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında sadece TDP problemleri dikkate alındığından, çalışmanın ilerleyen kısımlarında sadece Tamsayılı Programlama (TP; Integer Programming – IP) olarak ifade edilmektedir.

Tamsayılı programlama problemleri, değişkenlerinin tamsayılı olma koşulu ile sınırlandırıldığı doğrusal programlama problemidir. Genel problem formu aşağıdaki gibidir (Schrijver 1998):

$$\max\{cx \mid Ax \leq b; x \in \mathbb{Z}\} \quad (3.1)$$

Burada A matris, b ve c vektör olarak tanımlanır. Tamsayılı programlama probleminin diğer bir formu ise aşağıdaki gibidir (Schrijver 1998):

$$\max\{cx \mid Ax = b; x \geq 0; x \in \mathbb{Z}\} \quad (3.2)$$

Her iki bağıntı da problemin polinom eşitliği olarak tanımlanmaktadır. Problemin dual ve primal formu arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıda gösterilmiştir:

$$\max\{cx \mid Ax \leq b; x \in \mathbb{Z}\} \leq \min\{yb \mid yA = c; y \geq 0; y \in \mathbb{Z}\} \quad (3.3)$$

Tamsayılı programlama problemleri, NP-tam (NP-complete) problemleri grubunda bulunmaktadır ve bu yüzden genel olarak polinomial bir çözümünün olmadığı düşünülmektedir. Tamsayılı programlama modelinin çözümü diğer negatif olmayan tamsayılı doğrusal eşitliklerin bulunduğu problemlerin çözüm yöntemleri ile sağlanabilir. LP-gevşetmesi (LP-relaxation) kavramı, tamsayılı programlamanın çözümünde önemli rol oynamaktadır. Tamsayı kısıtlarının dahil edilmediği tamsayılı programlama modelinden LP-gevşetme yöntemi ile doğrusal programlama modeli elde edilmektedir. Herhangi bir tamsayılı programlama, LP-gevşetme ile oluşturulan doğrusal programlamaya tamsayı kısıtları eklenerek oluşturulabilir. Bu nedenle LP-gevşetmesi ile oluşturulan doğrusal programlama modeli tamsayılı programlama modeline kıyasla daha az kısıt içeren, daha esnek bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla LP-gevşetmesi ile oluşturulan doğrusal programlamanın çözüm alanı, buna karşılık gelen tamsayılı programlama çözüm alanını da kapsamaktadır. Örneğin, maksimizasyon problemlerinde LP-gevşetmesi optimal amaç fonksiyonu değeri tamsayılı programlama optimal amaç fonksiyonu değerinden her zaman daha büyüktür (Winston 2003). LP-gevşetme yöntemiyle elde edilen lineer programlama modeli (LP-problem) aşağıdaki gibidir (Schrijver 1998):

$$\max\{cx \mid Ax \leq b\} \quad (3.4)$$

Lineer programlama modeli, böyle bir maksimizasyon probleminde her zaman tamsayılı programlama modelinin üst sınırındır. Depo yerleşim problemi, sırt çantası problemi, yatırım bütçeleme problemi, çizelgeleme problemi tamsayılı programlama problemlerine örnek olarak gösterilebilir (Schrijver 1998).

Tamsayılı programlama modelleri saf, karışık ve ikili tamsayılı programlama modelleri gibi çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bütün değişkenlerin tam sayı olduğu tanımlanan modeller saf tam sayılı programlama olarak tanımlanmaktadır. Saf tamsayılı programlama problemi kapalı formu aşağıdaki gibidir (Bradley ve ark. 1977):

$$\max z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3.6)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.7)$$

$$x_j \in \mathbb{Z} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3.8)$$

Bazı değişkenlerin tam sayı olarak tanımlandığı modellere karışık tam sayılı modeller denir. Karışık tamsayılı programlama problemi, lineer ve tamsayılı programlama problemlerinin kombinasyonu olduğundan çözümü zor problemdir. Karışık tamsayılı programlama modeli formu aşağıdaki gibidir (Schrijver 1998):

$$\max\{cx + dy \mid Ax + By \leq b; x \in \mathbb{Z}\} \quad (3.9)$$

A ve B matrisler, b , c , d ise vektörler olarak tanımlanır. Karışık tamsayılı programlama probleminin kapalı formu aşağıdaki gibidir (Bradley ve ark. 1977):

$$\max z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.10)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3.11)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.12)$$

$$x_j \in \mathbb{Z} \quad (\exists j = 1, 2, \dots, m) \quad (3.13)$$

Bütün değişkenlerin 1 veya 0'a eşit olduğu modeller ise ikili (1-0) tam sayılı modeller olarak adlandırılır. İkili tamsayılı programlama problemleri, olayın yapılacağı ya da yapılmayacağı dışında farklı bir seçeneğin olmadığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Örneğin; yeni bir fabrika açma kararı, reklam kampanyası alma kararı veya yeni bir ürün geliştirme kararı gibi. İkili tamsayı probleminin kapalı formu aşağıdaki gibidir (Bradley ve ark. 1977):

$$\max z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.14)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3.15)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad (j = 1,2, \dots, m) \quad (3.16)$$

Tamsayılı programlama problemleri formülasyonlarında, karar değişkenleri üzerinde çoğunlukla mantıksal kısıtlar (logical constraints) kullanılmaktadır. Bu kısıtları sınıflandırmak gerekirse (Bradley ve ark. 1977);

Kısıt Uygunluğu: Basit bir mantıksal sorunun oluşturulan matematiksel modelde cevabını sağlayan kısıtlardır. Genel kısıt aşağıdaki gibidir:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b \quad (3.17)$$

Kısıta yeni bir y değişkeni eklenerek mantıksal bir kısıt oluşturulmaktadır:

$$y = \begin{cases} 0, & \text{eğer kısıtın sağlandığı biliniyorsa} \\ 1, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) - By \leq b \quad (3.18)$$

B yeterince büyük bir sayı olarak tanımlanır ve eğer $y = 1$ olduğunda kısıt aşağıdaki hale dönüşmektedir:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b + B \quad (3.19)$$

Alternatif Kısıtlar: Problemin matematiksel modelinde belirtilen alternatif kısıtların en azından birinin sağlanması gerekmektedir. Her iki kısıtın da birlikte sağlanması zorunlu değildir. Eklenen kısıtlar ile birlikte alternatif kısıtların en az birinin geçerli olması sağlanmaktadır. Tamsayılı programlama probleminde, birbirinin alternatifi olan kısıtların gösterimi aşağıda verilmiştir:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \quad (3.20)$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_2 \quad (3.21)$$

İlgili kısıtlara mantıksal karar değişkenleri (y_1, y_2) eklendiğinde kısıtların son hali aşağıdaki gibidir:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) - B_1y_1 \leq b_1 \quad (3.22)$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) - B_2y_2 \leq b_2 \quad (3.23)$$

$$y_1 + y_2 \leq 1 \quad (3.24)$$

Bir diğerk durum, birbirleriyle çelişen durumların tamsayıli programlama modeline yansıtılmasını sağlayan kısıtların oluşturulduğu durumdur. Bu durumda önceki formüllerde eklenen son kısıt yerine $y_1 + y_2 = 1$ veya $y_2 = 1 - y_1$ kısıtları eklenir. Bir kısıt sağlandığında diğerk kısıtın sağlanmaması (çelişen kısıtlar) gerektiği durumlarda eklenecek kısıtlar aşağıdaki gibidir:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) - B_1 y_1 \leq b_1 \quad (3.25)$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) - B_2(1 - y_1) \leq b_2 \quad (3.26)$$

$$y_1 \in \{0,1\}$$

Koşullu Kısıtlar: Her iki kısıtın aynı anda sağlanması ya da yalnızca birinin sağlanması gibi durumlar olmamakla birlikte belirtilen ilk kısıt sağlandığından diğerk kısıtın da sağlanması gerektiği durumlarda tamsayıli programlama probleminin formülasyonunda kullanılmaktadır. Bu kısıtlar aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) > b_1 \Rightarrow f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_2 \quad (3.27)$$

Koşullu kısıtlar çeşitli düzenlemeler ile alternatif iki kısıta dönüştürülür ve mantıksal ifadeler ile tekrar yazılırsa aşağıdaki kısıtlar elde edilmektedir:

$$f(x_1, \dots, x_n) - B_1 y_1 \leq b_1 \quad (3.28)$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) - B_2 y_2 \leq b_2 \quad (3.29)$$

$$y_1 + y_2 \leq 1 \quad (3.30)$$

Simpleks yöntemi doğrusal programlama problemlerinde etkili bir yöntem olmasına karşın, tamsayıli programlama problemlerinde tek bir çözüm yaklaşımı bulunmamaktadır. Tamsayıli programlama problemi için geliştirilen çözüm yaklaşımlarından biri dal-sınır yaklaşımıdır. Dal-sınır yaklaşımı (branch-and-bound approach) değişkenlerinin tamsayı olma koşulu ile sınırlandırıldığı bazı tamsayıli programlama problemlerinin çözümünde kullanılan bir yaklaşımdır. Dal-sınır yaklaşımının temelinde “böl” ve “yönet” stratejileri bulunmaktadır. Uygun çözüm alanında problem bölünerek yönetilebilir alt bölümler oluşturulur ve gerekli olursa bölme işlemine devam edilir. Genellikle, çözüm alanında problemi bölmenin birçok yolu

bulunmaktadır, sonuç olarak birçok dal-sınır algoritması problem çözümü için kullanılabilir. Tamsayılı programlama, integrallik (değişkenlerin tamsayı olma durumu) kısıtlarıyla sınırlandırılan bir doğrusal programlamadır. Örneğin, maksimum tamsayılı programlama modeli için en iyi üst sınır değeri bulunarak çözüme başlanır ve her alt problem (dal) için uygun çözümler elde edilerek optimum değere ulaşılır. Dal-sınır yaklaşımı optimal değere çok uzak olmayan, hassas, hesaplanması kolay bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Dal-sınır yaklaşımında, tamsayılı programlama modelinin optimum çözümü (z^*) üzerinde geliştirilen sınırlar aşağıdaki gibidir (Bradley ve ark. 1998):

$$\underline{z} < z^* < \bar{z} \quad (3.31)$$

Maksimizasyon probleminde her zaman optimal doğrusal programlama amaç fonksiyonu (\underline{z}), optimal tamsayılı programlama amaç fonksiyonunun üst sınırı olarak belirlenir. Ayrıca hiçbir tamsayılı uygun çözüm doğrusal programlamanın optimal amaç fonksiyonu değerinin alt sınırı olamaz. Doğrusal programlama amaç fonksiyonunun optimal değeri ile çözüme başlanır ve dallanma stratejisi belirlenerek alt bölümler oluşturulur. Her alt bölüm çözümü analiz edildikten sonra bir diğer dala geçilir ve analiz edilir. Analiz edilirken değerlendirilen durumlar aşağıdaki gibidir:

- i) L_j her dal için bulunan çözüm eğer optimum doğrusal programlama çözümünden büyük ise, uygun olmayan (infeasible) çözüm olarak değerlendirilir.
- ii) optimum doğrusal programlama çözümü, L_j çözümünden büyük ise L_j tamsayı çözümüdür.
- iii) doğrusal programlama çözüm değeri z_j , L_j değerinden büyük ise $z_j \leq \underline{z}$ (maksimizasyon problemi) L_j çözümünün dallandırılmasına gerek yoktur.

Bu durumlarda her bölüm için bulunan çözüm değeri, tamsayılı programlama terminolojisinde budanmış çözüm olarak tanımlanır. Durum (i) uygun olmama sonucu budama, durum (ii) integrallik sonucu budama, durum (iii) sınırlar sonucu budama olarak belirlenmektedir.

Bir diğerk tamsayılı programlama çözüml yaklaşımı kesme düzlemi (cutting plane) algoritmasıdır. Kesme düzlemi algoritması, tamsayılı çözüml sağlanıncaya kadar doğrusal programlama çözümlerini düzenleyerek (kesme düzlemi oluşturarak) tamsayılı programlama problemlerine çözüml sağlamaktadır. Kesme düzlemi algoritması, doğrusal programlama çözümlerine yeni kısıtlar ekleyerek optimal tamsayılı çözümlü bulmayı amaçlamaktadır. Uygulamada dal-sınır algoritması her zaman kesme düzlemi algoritmasına göre daha üstün performansa sahip olsa da yine de, tamsayılı programlamanın gelişimi açısından kesme düzlemi algoritması önem taşımaktadır (Bradley ve ark. 1998).

Kesme düzlemi algoritmasının adımları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır Winston (2003):

Adım 1: LP-gevşetme yöntemi ile elde edilen doğrusal programlama modelinin optimal tablosu bulunur. Optimal tabloda tüm karar değişkenleri tamsayı ise, tamsayılı programlama modelinin optimal çözümlü bulunmuştur. Aksi halde Adım-2'ye gidilir.

Adım 2: Tüm sabit terimler eşitliğin sol tarafına, kalan pozitif kesirli kısım ise eşitliğin sağ tarafına yazılır. Sağ taraftaki kısıtlar bir önceki optimal tabloya yeni kısıt olarak eklenir. Yeni eklenen kısıtlar kesme kısıtları (cut constraints) olarak tanımlanır.

Adım 2a: Adım-2'de tanımlanan kesme kısıtlarında karar değişkenlerinin katsayıları formu $[x] + f, 0 \leq f < 1$ olarak tanımlanır.

Adım 2b: Belirlenen kesme kısıtları tekrar aşağıdaki kurallara uygun şekilde yazılır:

Tüm tamsayılı katsayılar = tüm kesirli katsayılar

Kesme kısıtı tüm kesirli katsayılar ≤ 0 olarak belirlenir.

Adım 3: Dual simpleks yöntemi kullanılarak yeni eklenen kesme kısıtları ile doğrusal programlama modelinin optimal çözümlü bulunur. Optimal çözümlde, tüm karar değişkenleri tamsayı ise tamsayılı programlama optimal çözümlü bulunmuş olur, aksi halde kesirli kısımlar dikkate alınarak yeni bir kesme kısıtı oluşturulur ve optimal tabloya eklenir. Bu süreç, optimal çözümlde karar değişkenlerinin tümü tamsayı değerini alana kadar devam eder.

Kesme düzlemi algoritmasının temel stratejisi uygun bölgede yeni kesme kısıtı eklenerek doğrusal programlama modelinin yeniden çözülmesine dayanmaktadır. Bulunan çözümde karar değişkenlerinin optimal değerlerinin tümü tamsayı ise optimal çözüme ulaşıldığı; diğer taraftan karar değişkenlerinin tümü tamsayı değil ise, mevcut optimal doğrusal programlama tablosuna yeni kesme kısıtı eklenerek işleme devam edilmektedir (Bradley ve ark. 1998).

3.1.2. Kısıt programlama

Tez çalışmasında ele alınan OEARP için farklı bir bakış açısı kazandıracak olan kısıt programlama, arama alanını azaltmak amacıyla sistematik olarak tümdengelimli akıl yürütmeyi kullanan ve çok çeşitli kısıtlamalara izin veren ayrık değişken kısıtlama tatmini veya kısıtlı optimizasyon problemlerini formüle etmek ve çözmek amacıyla kullanılan bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır (Kanet ve ark. 2004). Kısıt programlama, bilgisayar programlamanın esnekliğini ve matematiksel programlamanın çözüme ulaşma becerisini bir araya getiren bir programlama yaklaşımıdır. Bu yaklaşım ile matematiksel programlamada tanımlanması zor olan sayısal veya sayısal olmayan eşitlik/eşitsizlikler daha kolay bir şekilde programlanabilmektedir. Buna karşılık bilgisayar programlamada bulunmayan matematiksel programlamanın en önemli özelliklerinden biri olan belirli bir amaca göre problemin çözülmesi ile optimum çözümlere ulaşılmaktadır (Apt, 2003).

Kısıt programlamada problemler değişkenler, bu değişkenler için tanımlanan alanlar ve değişkenler arasındaki kısıtlamalar cinsinden ifade edilmektedir. Problemler genellikle derinlik öncelikli arama (depth-first search) ve dal-sınır (branch and bound) gibi arama teknikleri kullanılarak çözülmektedir. Bir değişken üzerindeki sınırlar veya kısıtlamalar belirlenerek, bu değişiklikler kısıtlı değişkenlerin etki alanlarını azaltmak için tüm kısıtlamalar aracılığıyla yayılım göstermektedir. Arama ağacındaki her düğümde, yayılma mekanizması, diğer değişkenlerle tutarsız olan kısıtlı değişkenlerin etki alanlarından (domain) kaldırılır. Yayılma mekanizması tarafından herhangi bir değişkenden tüm değerler kaldırıldığında, elde edilen bu çözüm alt ağaçta uygun bir çözüm olamaz ve arama yöntemi ile geri izleme noktasında farklı bir karar verilir. Burada geri izleme kronolojik olarak gerçekleşmekte olup, kararlar ancak verildiklerinin tersi sırada geri alınabilir. Ayrıca, kısıtlı değişkenlerin etki alanları, yalnızca arama ağaçtan

aşağı doğru ilerledikçe azaltılabilir. Tüm kısıtlı değişkenlerin etki alanları, önceki düğüme geri dönülerek geri yüklenebilmektedir, ancak etki alanlarının genel olarak genişletilmesi (veya gevşetilmesi) desteklenmemektedir (Brailsford ve ark. 1999).

Kısıt programlamanın ana bileşeni kısıt sağlama problemi olarak tanımlanır. Kısıt sağlama problemi, sonlu alanlarla birlikte bir dizi ayrık değişken ve bu değişkenleri içeren bir dizi kısıtlama verildiğinde, tüm kısıtlamaları karşılayan bir çözümün elde edildiği problem olarak tanımlanmaktadır. Kısıt sağlama problemlerinde değişkenler, ikili, tamsayı, sembolik, küme elemanları ve kümelerin alt kümeleri olarak tanımlanabilir. Benzer şekilde, aşağıdakiler gibi çeşitli kısıtlamaların tanımlanması da mümkündür (Brailsford ve ark. 1999):

- matematiksel: $C = s + p$ (tamamlama zamanı= başlangıç zamanı+işleme zamanı)
- ayrık: j ve k görevleri farklı zamanlarda yapılmalıdır
- ilişkisel: A makinesinde yapılacak en fazla beş iş
- açık: Y makinesinde yalnızca A, B ve E işleri işlenebilir.

Ayrıca kısıt sağlama problemi birden çok kısıtlama operatörünü içerebilir. Bunlar ($=, <, >, \leq, \geq, \neq$, “union”, “subset”, “AND”, “OR”, “iff”) olarak sıralanabilir. Bu kısıtlamalara ek olarak, temel kısıtların kombinasyonlarının verimli bir şekilde uygulandığı özel amaçlı kısıt tanımlamaları da geliştirilmiştir. Örneğin, bir dizi değişken için tanımlanan “*alldifferent*” kısıtı, ikili eşitsizlikleri anlamlı bir şekilde ifade etmektedir. Bir kısıt sağlama probleminin (uygun) bir çözümü, problemin her kısıtlaması karşılanacak şekilde kendi etki alanından her değişkene bir değer atanması ile elde edilmektedir. Bu durumda yalnızca bir veya birden fazla çözüm belirlenmesi de mümkün hale gelmektedir.

Kısıt sağlama probleminin çözümünde, bağımsız değişkenlerin alanları (domains), değişkenlerin alanlarını sistematik olarak azaltan her kısıtlama için mantık-tabanlı-filtreleme algoritmaları kullanılarak azaltılmaktadır. Bir değişkenin etki alanı küçüldükçe, değişkeni kullanan her kısıtlama, ilişkili filtreleme algoritmasının uygulanması için etkinleştirilmektedir. Bu sistematik süreç, kısıtlama yayılımı (constraint

propagation) ve etki alanı azaltma (domain reduction) olarak adlandırılmaktadır (Kanet ve ark. 2004).

Kısıt yayılımı ve alan indirgemelerinden ardından herhangi bir çözümün bulunup bulunmamasından oluşan iki durum ortaya çıkmaktadır. Eğer uygun bir çözüm bulunursa algoritma sonlandırılmakta, aksi halde eğer herhangi bir uygun çözüm bulunamazsa, mevcut aşamada problem tutarsızlığı (en az bir değişkenin etki alanının boş olduğu durum) incelenmektedir. Eğer tutarsızlık durumu oluşmamış ise, dallanma için bazı arama stratejileri kullanılarak bir arama yapılır. Dallanma ile, geçici olarak yeni bir kısıt eklenerek ana problem çözümü dışarıda tutularak alt problemlere ayrıştırılmaktadır. Dallanma ile dallardan biri seçilir ve filtreleme algoritmaları kullanılarak tüm kısıtlamalar yeniden yayılır. Eğer tutarsızlık kanıtlanırsa, tüm alt problemlerin araştırılıp keşfedilmediği kontrol edilir. Tüm dallar incelenmişse, problem tutarsızlığı kanıtlanmıştır. Aksi halde, algoritma önceki aşamaya geri dönerek ve farklı bir alt problem incelenir.

Kısıt yayılımı tekniğinde değişkenler arasında mantıksal bağlantı tutarlılığı kullanılarak alan sınırlamalarının azaltılması sağlanmaktadır. Değişkenleri arasında tutarlı bir mantıksal bağlantı kurularak her iki değişken için alan sınırlamalarının azaltılması sağlanmıştır. Bu çift yönlü bağlantı tutarlılığı kontrolü sayesinde kısıtlamada yer alan iki değişkenin etki alanlarının tam olarak azaltılması sağlanmıştır. Kısıt yayılımı ayrıca, etki alanlarını azaltmak amacıyla ortak değişkenleri içeren kısıtlamalar arasında bilgi iletişimini de sağlamaktadır.

Kısıt programlamada genellikle derinlik öncelikli arama stratejisi uygulanmaktadır. İlk olarak, dallandırma yapılmak üzere etki alanı henüz sınırlandırılmamış (tek bir değere indirgenmemiş) bir değişken seçilir. Sezgisel olarak etki alanı en küçük olan değişken üzerinden dallandırma yapılır. Bir değişken seçildiğinde dal, değişkenin mevcut etki alanındaki değerlerden birine eşitlenmesi ile oluşturulur. Burada yine sezgisel olarak etki alanı içerisindeki en küçük değer seçilir. Dallandırma yöntemi ile birden çok değişken üzerinde aynı anda geçici kısıtlar eklenerek birden fazla dal oluşturulabilir. Kısıt programlamada, arama stratejisinin bu birkaç daldan biri kullanılarak arama ağacı

boyunca ilerleme kaydettiği noktalar seçim noktaları olarak belirlenir (Bapsiste ve ark. 2006).

Kısıt Sağlama Problemleri kolaylıkla Kısıtlı Optimizasyon Problemlerine uyarlanabilir. Kısıtlı Optimizasyon Probleminin minimize edilecek bir Z hedefi olduğunu varsayalım. Orijinal Kısıt Sağlama Problemi için bir ilk çözüm bulunduğunda, amaç değeri hesaplanır (Z'), yeni bir Kısıt Sağlama Problemi'ne $Z < Z'$ kısıtı eklenir ve yeni oluşturulan problem için Kısıt Sağlama Problemi algoritması uygulanır. Bu işlem tutarsızlık bulunana ve tüm dallar budama yapılarına kadar tekrarlanır. En son bulunan çözüm optimum çözüm olarak elde edilir.

Kısıt Programlama ile Dal-Sınır Algoritması arasındaki benzerlikler:

Kısıt programlamada kısıtların orijinal probleme uygun sıralanma süreci tamsayı programlamada kullanılan dal-sınır algoritmalarına benzer yapıdadır.

Problemin D_1, \dots, D_n tanım bölgeleri ile $x = [x_1, \dots, x_n]$ değişkenlerini içerdiğini varsayalım. Eğer D_j tanım bölgesi teke $\{v_j\}$ indirgenirse ve $v = [v_1, \dots, v_n]$ uygunsam, o halde $x = v$ problemi çözülmektedir. $x = v$ düzenlemesi aslında kısıtları çözümlenmekte ve kısıtları orijinal problemde uygun hale getirmektedir. Burada uygulanan yöntem, tamsayı programlama probleminin (kısıt hafızası) sürekli gevşemesinin çözümlenmesine ve tamsayı bir sonuç elde edilmesinde uygulanan yöntem ile benzerlik göstermektedir. Matematiksel problemlerin çözümünde kullanılan iki yaklaşım arasında üç temel farklılık bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Dal-sınır algoritmasında, uygun bir çözümden ziyade optimal bir çözüm aranmaktadır. Bu ikincil bir farklılıktır çünkü, kısıt programlamanın uygulandığı problemi optimizasyon problemine dönüştürmek mümkündür. Böyle bir durumda, amaç fonksiyonunun değeri üzerinde bir üst sınır oluşturmak ve uygun bir çözüm bulunduğunda bu sınırı daraltmak yeterli olacaktır.
- Dal-sınır algoritması, küçük veya hiç kısıt yayılımı olmaksızın her ağıdaki gevşemeyi çözmekte iken, kısıt programlama daha çok yayılım üzerine odaklanmakta fakat bir gevşemeyi çözümlenmemektedir. Dal-sınır algoritmasında

gevşemenin çözülmesi, çoğunlukla arama ağacının budanmasını sağlayan optimal değer üzerinde bir sınır sağlamaktadır.

Kısıt Programlama Yaklaşımının Avantajları:

Bir problem çözme yaklaşımı, çözüm hızı olduğu kadar güç ve gelişme zamanını modelleme açısından da değerlendirilmelidir. Kısıt programlama, matematiksel programlama modellerinden daha kolay olan kısa ve öz modeller oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Kısıt programlamada alternatif formülasyonlardan birini seçmek yerine modelleyici, her ikisini de kolayca kullanabilmekte ve bu sayede, çözümü kayda değer bir şekilde hızlandırabilmektedir. Modelleme yapılırken, matematiksel programlamada olduğu gibi yapılandırılmış bir modele yan kısıtlar kolaylıkla eklenebilmektedir. Burada eklenen yan kısıtlar, kısıt yayılımı geliştirerek çözüme yön verme eğilimindedir. Kısıt programlamanın tamsayı programlamaya kıyasla sayısal performansını özetlemek zordur. Kısıt programlama daha etkin kısıt yayılımı gösterdiğinden dolayı sadece iki veya üç değişken içerdiğinde daha hızlı olabilmektedir. Bununla birlikte kısıt programlama, çizelgeleme problemleri kapsamında özellikle kaynak kısıtlı çizelgeleme problemleri gibi karmaşık problemler üzerinde daha etkili olabilmektedir (Fromherz, 2001).

Tamsayı programlama, gezgin satıcı problemi gibi iyi çalışılmış, birçok düzlemi tanımlayan ve yapılandırılmış problemlerde üstün olabilmektedir. Kısıt programlama, gezgin satıcı problemi zaman penceresi gibi yan kısıtlarla karmaşık bir probleme dönüştüğünde veya daha büyük bir modelin parçası olduklarında rekabetçi hale gelebilmektedir. Kısıt programlamanın kısıt yayılımı daha güçlü olduğundan yüksek oranda kısıtlanmış problemler için genellikle daha etkili olduğu söylenmektedir (Fromherz, 2001).

Kısıt programlama ve tamsayı programlamanın birleştirilmesi durumunda bu iki yöntemin birbirini nasıl tamamlanacağı sorusu oluşmaktadır. Bu problemlerin çözümü amacıyla önerilen hibrit yaklaşımların karmaşık tamsayı programlama (CPLEX) veya kısıt programlamadan (ILOG) daha hızlı çözüme ulaştırdığı belirtilmektedir (Garey 1979; Fromherz 2001).

Kısıt programlama yaklaşımı özellikle çizelgeleme problemlerinin modellenmesi ve çözülmesinde önemli üstünlüklere sahiptir. Bu üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Değişkenlerin indisler ile tanımlanabilmesi
- Çizelgelemede sıklıkla kullanılan kısıtların (mantıksal kısıtlar, genel kısıtlar, katı eşitsizlikler, öncelik kısıtları) kolaylıkla tanımlanabilmesi
- Kısıt programlama en çok tamsayı veya ikili karar değişkenlerini içeren problemler için uygundur; kısıt programlama yöntemleri tamsayı olmayan (floating variable) karar değişkenleri için etkili değildir.
- Kısıt programlama, çok sayıda mantıksal, global ve ayrık kısıtlar içeren kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümü için uygun bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda değişken ilişkileri kolaylıkla formüle edilmektedir.
- Kısıt programlama, az sayıda değişken ile çok sayıda birbiriyle ilişkili kısıtlardan oluşan problemlerin çözümünde daha verimli çalışır. Bu özellik, daha iyi kısıtlama yayılımı ve etki alanı azaltma gibi yöntemlerin performansından kaynaklanır.

Daha genel anlamda, kısıt programlama, sıralı bir kümenin başka bir sıralı kümeye optimal eşlemesi olarak görülebilen, her kümedeki değişkenler arasındaki ilişkinin matematiksel terimlerle ifade edilebildiği problemlerin çözümünde oldukça avantajlıdır. Çizelgeleme problemleri bu tanımlamaya uyan ve çözümünde kısıt programlamanın birçok üstünlüğe sahip olduğu problem çeşitlerinden biridir. Bu çalışmada ele alınan Otonom Elektrikli Araç Rotalama problemi, çizelgeleme problemi olarak modellenmiş ve çözümü için Kısıt Programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Problemin kısıt programlama modeli olarak modellenmesinde dikkate alınan tanımlamalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- *Opsiyonel Aralık Değişkeni (Optional Interval Variable)*: Bu değişken başlama ve bitiş zamanları belirli olan bir dışbükey aralığı tanımlar. Değişkene ait çözüm olup olmadığını gösterilmesi, başlama, bitiş zamanının belirlenmesi, aralığın uzunluğunun tanımlanmasını sağlayan komutlar kullanılmaktadır.

- *Dizilim değişkeni (Sequence Variable)*: Bu değişken türü, mevcut aralık değişkenlerinin bir permütasyonu olarak kısıtların modellenmesi sağlanır. Bir dizilim değişkeninin tanımı verildiğinde, aralık değişkenlerinin dizilimdeki sırası, bir işin öncülü ve ardılı olan iş ve zamansal kısıtlamalar da dahil olmak üzere çeşitli kısıtlamalar ifade edilebilir.
- *Kümülatif Fonksiyon Tanımlamaları (Cumulative function expressions)*: Yenilenebilir bir kaynağın kullanımını, aralık değişkenlerinin zaman içindeki bağımsız katkılarının toplamı olarak gösterilmesidir. Kümülatif fonksiyonları hem araç yükünü hem de enerji kısıtlamalarını temsil etmede kullanışlı hale gelmektedir.

3.2. Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Arama Algoritması (UGKA)

Tez çalışması kapsamında OEARP çözümü için önerilen sezgisel yaklaşımda temel fikir, mevcut çözümün bir kısmını yok ederek ve farklı bir şekilde yeniden kurarak her döngüde daha iyi bir çözüm elde etmektir. Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Arama Algoritması (Adaptive Large Neighbourhood Search- ALNS) Geniş Komşuluk Arama Algoritması (Large Neighborhood Search-LNS)'nın bir uzantısı olarak Ropke ve Pisinger (2006) tarafından önerilmiştir. Bu algoritma ile farklı problem örnekleri veya aynı probleme ait farklı çözümler birbirinden farklı “yık-yeniden oluştur” yöntemleri kullanılarak iyi çözümler bulmayı amaçlamaktadır. Hangi yöntemin en avantajlı olacağını tahmin etmek ilk etapta zor olabilir. UGKA yaklaşımında temel fikir, başlangıçta her yöntemin seçim olasılığının eşit olduğu, sonraki iterasyonlarda ise başarılı çözümler üreten yöntemlerin seçilme olasılığının artırılması yaklaşımına dayanmaktadır.

Örneğin, ARP'ler bu yaklaşım kullanılarak çözüldüğünde, ilk aşamada birkaç düğüm kaldırılmakta, daha sonra bu düğümler çözüme yeniden eklenerek yeni bir çözüm elde edilmektedir. Hangi düğümün rota üzerinde kaldırılacağı ve daha sonra eklenecek düğümün belirlenmesi amacıyla bir dizi düğüm kaldırma operatörleri kullanılmaktadır. Bir operatörün seçim olasılığı, operatörün önceki çözümleri üretmedeki başarılarına ve başarısızlıklarına bağlı olarak arama sırasında ayarlanan ilişki ağırlığından

hesaplanmaktadır. Her birinin ağırlığı $w_j, j = 1, \dots, h$ olan h adet operatör olduğunu varsayalım. Kaldırma operatörü i aşağıdaki olasılık değeri dikkate alınarak seçilir:

$$p_j = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^h w_j}, \quad i = 1, \dots, h \quad (3.32)$$

Yukarıdaki formül dikkate alındığında, belirli bir operatörü seçme olasılığının, ağırlığı ile birlikte arttığı söylenebilir. Belirli bir problem örneği için başarılı operatörün daha az başarılı operatörlere göre daha sık kullanılma olasılığını artırmak için ağırlıklarının ayarlanması gereklidir. Operatörün başarısı, aynı problemin örnekleri arasında ve hatta benzer örnekler arasında değişebilir. Rassal düğüm kaldırma operatörü, söz konusu oluşumun en kolay örneğidir: Aynı problem örneğinde ve ilk çözümde aynı gelişigüzel onarım yöntemiyle eşleştirilen iki rassal kaldırma operatörü tamamen farklı sonuçlar üretebilir. Bu nedenle, bu operatörlerin kalıcı olarak yeniden değerlendirilmesini sağlamanın tek yolu dinamik ayarlamalardır. Geçmiş çalışmalarda genel olarak iki yaklaşım vardır. İlk olarak, ağırlıklar her iterasyonda ayarlanabilir. Bu yöntemin avantajı, tüm ağırlıkların her zaman güncel olmasıdır. Öte yandan, bu yaklaşım daha fazla zaman almaktadır. Bunun nedeni, yalnızca ağırlıkları ayarlamakla kalmayıp, aynı zamanda bir sonraki iterasyon için operatör olasılıklarının da hesaplanması gerekmektedir. Diğer yaklaşım, algoritmanın iterasyonlarını yürütmek ve ardından ağırlıkları ayarlamaktır. Bu iterasyonlar sırasındaki başarı, mevcut ağırlıklardan ayrı olarak kaydedilmektedir. Bu yaklaşımda hesaplama süresinden tasarruf sağlanabilir.

Her operatör için bir birim ağırlıkla başlayarak, ağırlıklar, segment adı verilen bir dizi ardışık döngüden sonra güncellenmektedir. Belirli bir sg segmentinin başlangıcında i operatörünün ağırlığı, önceki segment $sg-1$ ' e bağlıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$w_i^{sg} = \gamma \cdot w_i^{sg-1} + (1 - \gamma) \cdot \frac{\pi_i^{sg-1}}{n_i^{sg-1}} \quad (3.33)$$

Burada, n_i^{sg-1} i . operatörün kullanılma sıklığı olarak tanımlanır. π_i^{sg-1} ise segment sonunda i . operatörün skoru olarak tanımlanır. γ parametresi 0-1 aralığında değişen değerlere sahip olup geçmişe bağlılığı temsil etmektedir. Bu değer 1'e yaklaştıkça daha önceki segment değerlerine yakınlık artacak ve ağırlıklar çok fazla değişmeyecektir. Tam tersine, bu değer 0'a yakın olduğunda güncel değer son değere oldukça yakın olacaktır. Her segment başında sıfırlanan puan, belirli bir t döngüsünde i . operatör kullanıldığında artırılmaktadır. Bu durumda $t+1$. döngüde oluşan puan aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\pi_i^{t+1} = \pi_i^t + \left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 \quad \text{yeni en iyi çözüm üretildiğinde,} \\ \sigma_2 \quad \text{mevcut çözümden daha iyi bir çözüm üretildiğinde,} \end{array} \right\}$$

Geçmiş çalışmalarda kullanılan birçok düğüm kaldırma operatörleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında OEARP'nin yapısına uygun olduğu düşünülen üç adet düğüm kaldırma operatörü kullanılmıştır.

Rassal Düğüm Kaldırma Operatörü (Random Removal Operator):

Rassal düğüm kaldırma operatörü, rota üzerinde bulunan düğümleri rasgele bir şekilde kaldırır. Bu operatör, çözümde uygun konumda bulunan düğümlerin kaldırılmasına sebep olacağı için elverişsiz gibi görünebilir fakat, özellikle Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Algoritması'nda birden fazla düğüm kaldırma operatörü ile kullanılması çeşitlilik ve iyi çözüm bulma olasılığını arttırmaktadır.

Rota kaldırma operatörü (Route removal operator):

Bu operatör uygulandığında, ilk olarak aynı rota üzerinde bulunan düğümler kaldırılmaktadır. Rastgele bir rota seçilir ve bu rota üzerinde bulunan tüm düğümler kaldırılır. Eğer kaldırılan düğüm sayısı hedef değerine ulaşmamış ise kalan tüm düğümler, daha önce kaldırılmış olanlar arasından ve rastgele seçilen bir düğüme olan uzaklıklarına göre sıralanır. Ardından, bir rassallaştırma katsayısı r^D kullanılarak en yakın düğümlerden biri seçilir. Seçilen düğüm ve aynı rotadaki diğer düğümler kaldırılır. Bu prosedür, kaldırılan düğüm sayısı hedef değerine ulaşınca kadar tekrarlanır.

En kötü düğümü kaldırma operatörü (worst-removal operator):

Bu düğüm kaldırma operatörü ile çözüme katkısı amaç fonksiyonu yönünden en kötü olan yani en büyük maliyete sebep olan düğümlerin rota üzerinden kaldırılması sağlanmaktadır. En kötü katkıyı sağlayan düğümü bulmak için bireysel olarak, mevcut çözüm ile o düğümün çözümden çıkarılması sonucu ortaya çıkan amaç fonksiyonu değerindeki değişim dikkate alınmaktadır.

Çözümlerin Kabul Edilmesi:

UGKA algoritmasında algoritma boyunca önceki döngüde elde edilen çözümlerle mi yoksa yeni oluşturulan çözümle mi devam edileceğine karar veren çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Temel olarak, tüm kabul yöntemlerinin ortak noktası, iyileşen çözümlerin kabul edilmesidir. Bu yöntemler yalnızca iyileştirmeyen çözümlerin kabulünde birbirinden farklılık göstermektedir. Bu yöntemlerden literatürde sıklıkla kullanılanları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Kabul Yöntemleri

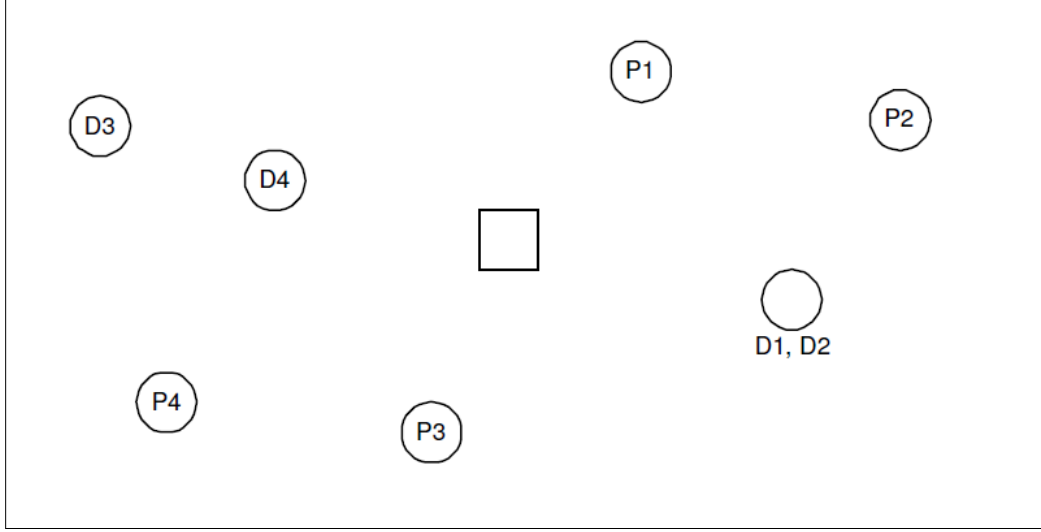
Kabul Yöntemi	Açıklaması
Random Walk (RW)	Her döngüde oluşan yeni çözüm kabul edilir.
Greedy Acceptance (GRE)	Yeni çözüm mevcut çözümle karşılaştırıldığında, maliyetleri düşürüyorsa kabul edilir.
Simulated Annealing (SA)	Yeni çözüm her döngüde güncellenen sıcaklık değeri (T_0)’ne bağlı bir olasılık fonksiyonuna göre kabul edilir.
Threshold Accepting (TA)	Yeni çözüm her döngüde güncellenen eşik değeri (T_0)’ne bağlı olarak kabul edilir.

3.2. YÖNTEM

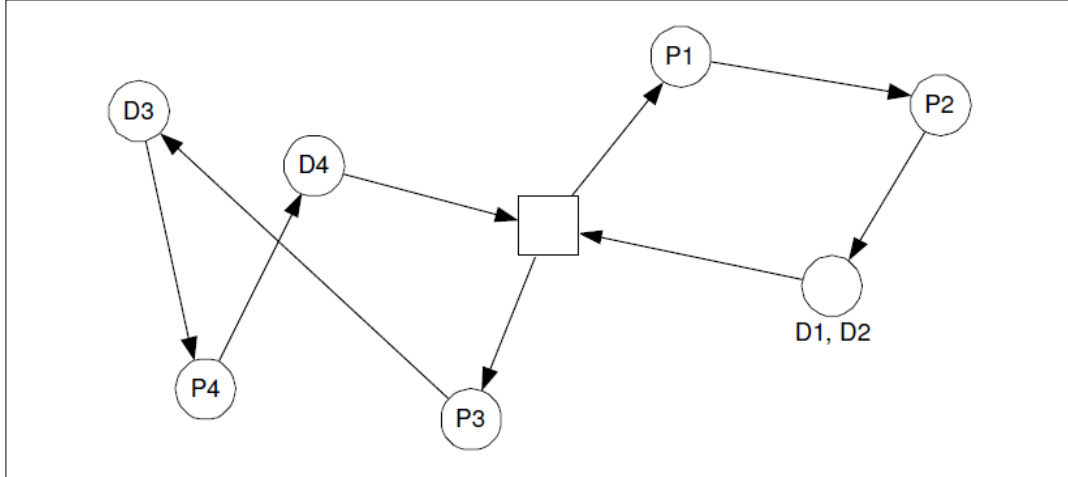
Bu bölümde, çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel modeller ve sezgisel yaklaşımın detayları sunulmuştur. İlk olarak, klasik DARP problemi ve genel kısıtları açıklanmıştır. Ardından OEARP karışık tamsayılı programlama modeli ve kısıtları açıklanmıştır. Daha sonra, OEARP için geliştirilen kısıt programlama modeli ve kısıtları detaylı olarak açıklanmıştır. Son olarak, özellikle büyük boyutlu problemlerin çözümü için geliştirilen kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşım ve sistematigi detaylı olarak açıklanmıştır.

3.2.1. Klasik DARP Problemi

Çalışma kapsamında yararlanılacak olan formülasyonlardan ilki klasik topla-dağıt araç rotalama problemidir (dial-a-ride problem). Bu problemde, müşteriler için belirli bir orijin düğümü (buldukları konum) ve ulaşmak istedikleri hedef düğüm olmak üzere iki tip düğüm tanımlanmaktadır. Ulaşım, ortak servis sağlayan araçlar tarafından gerçekleştirilmekte olup bir araç tarafından aynı anda birden fazla müşteri taşınabilmektedir. Problemin yaygın uygulaması olarak yaşlı ve engelliler için kapıdan kapıya yapılan taşıma hizmetleri gösterilebilir. Ayrıca bu problemde, her kullanıcının servis süresi için belirli bir zaman penceresine sahip olduğu varsayılmaktadır. Problem formülasyonunda, toplam araç maliyetinin minimize edilmesinin yanı sıra araç kapasitesi, servis süresi, zaman penceresi, birliktelik, öncelik ve sürüş süresi gibi kısıtlar da dikkate alınmaktadır. Problem, yapısı itibariyle Np-zor problemler sınıfında yer almakta olup büyük boyutlu problemlerin çözümünde sezgisel veya meta-sezgisel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Şekil 3.1’de bir DARP örneği, Şekil 3.2’de ise bu problem için uygun çözümlerden biri gösterilmiştir. Şekillerde, araçların başlangıçta konumlandıkları depolar (kare şeklinde), kullanıcılar için orijin noktaları (P1, P2, P3, P4) ve hedef noktaları (D1, D2) gösterilmiştir. Her araç için, depo düğümünden başlayıp, kullanıcıları orijin düğümlerinden hedef düğümlerine en kısa mesafeden ulaştırmayı amaçlayan DARP formülasyonu aşağıda sunulmuştur.



Şekil 3.1. DARP örneği



Şekil 3.2. Uygun çözüm

Klasik DARP formülasyonu ve notasyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

n : taşıma servisi verilen müşteri sayısı

$G = (N, A)$: yönlü network (graph)

$N = P \cup D \cup \{0, 2n + 1\}$: müşteri lokasyonları kümesi

$P = \{1, \dots, n\}$: müşteri alma lokasyonları kümesi

$D = \{n + 1, \dots, 2n\}$: müşteri bırakma lokasyonları kümesi

$\{0, 2n + 1\}$: başlangıç ve bitiş depo lokasyonları

K : araç kümesi

Q_k : k . aracın kapasitesi

T_k : k . araç için toplam servis süresi

q_i : i . lokasyonda bulunan müşteri sayısı $q_0 = q_{2n+1} = 0, q_i = -q_{n+i} (i = 1, \dots, n)$

d_i : i . lokasyonda servis süresi $d_0 = d_{2n+1} = 0$

$[e_i, l_i]$: i . lokasyonda bulunan müşteri zaman penceresi

t_{ij} : i ve j lokasyonları arasındaki seyahat süresi

L : müşteriler için maksimum seyahat süresi

Karar değişkenleri:

$x_{ij}^k: \begin{cases} 1, & \text{eğer } k. \text{ araç } (i, j) \text{ yolunu kullanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

B_i^k : k . aracın i . lokasyonda servise başladığı süre

Q_i^k : k . aracın i . lokasyona ulaştıktan sonra yük durumu

L_i^k : k . aracın i . lokasyonda bulunan müşteriyi taşıma süresi

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij}^k x_{ij}^k \quad (3.34)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (3.35)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}^k - \sum_{j \in N} x_{n+i,j}^k \leq 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (3.36)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.37)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^k - \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 0 \quad \forall i \in P \cup D, k \in K \quad (3.38)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,2n+1}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.39)$$

$$B_j^k \geq (B_i^k + d_i + t_{ij})x_{ij}^k \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (3.40)$$

$$Q_j^k \geq (Q_i^k + q_j)x_{ij}^k \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (3.41)$$

$$L_i^k = B_{n+i}^k - (B_i^k + d_i) \quad \forall i \in P, k \in K \quad (3.42)$$

$$B_{2n+1}^k - B_0^k \leq T_k \quad \forall k \in K \quad (3.43)$$

$$e_i \leq B_i^k \leq l_i \quad \forall i \in N, k \in K \quad (3.44)$$

$$t_{i,n+i} \leq L_i^k \leq L \quad \forall i \in P, k \in K \quad (3.45)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i^k \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\} \quad \forall i \in N, k \in K \quad (3.46)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (3.47)$$

(3.34) numaralı amaç fonksiyonunda araçlar tarafından toplam seyahat süresi minimize edilmektedir. (3.35) numaralı kısıt her müşterinin yalnızca bir kez ziyaret edilmesini sağlarken, (3.36) numaralı kısıt müşteri alma lokasyonu ile bırakma lokasyonunun aynı araç tarafından ziyaret edilmesini sağlamaktadır. (3.37)-(3.39) numaralı kısıtlar, her aracın bulunduğu depodan rotasına başlamasını, rotasını tamamladığında ise yine depoya geri dönmesini garanti etmektedir. (3.40) ve (3.41) numaralı kısıtlar süre ve araç yükü ile ilgili süreklilik kısıtları olarak belirlenmiştir. (3.42) numaralı kısıt ile her müşteri için taşıma süresi hesaplanırken, (3.43) numaralı kısıt ile bu süre, maksimum seyahat süresi ile sınırlandırılmıştır. (3.44) numaralı kısıt ile her rota için süre sınırlandırılması sağlanırken, (3.45) ve (3.46) numaralı kısıtlar sırasıyla zaman pencereleri ve araç kapasite

kısıtları olarak belirlenmiştir. Son olarak, (3.47) numaralı kısıt ile değişken tanımlaması yapılmıştır.

Yukarıda açıklanan formülasyon (3.40) ve (3.41) numaralı kısıtlar sebebiyle doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Modele eklenecek M_{ij}^k ve W_{ij}^k değişkenleri ile bu kısıtlar aşağıdaki gibi doğrusal bir yapıya dönüştürülecektir.

$$B_j^k \geq B_i^k + d_i + t_{ij} - M_{ij}^k(1 - x_{ij}^k) \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (3.48)$$

$$Q_j^k \geq (Q_i^k + q_j) - W_{ij}^k(1 - x_{ij}^k) \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (3.49)$$

Değişkenler sırasıyla $M_{ij}^k \geq \max\{0, l_i + d_i + t_{ij} - e_j\}$, $W_{ij}^k \geq \min\{Q_k, Q_k + q_i\}$ olarak tanımlanmaktadır. Bu kısıtlar aynı zamanda, Gezgin Satıcı Problemi'nde yer alan Miller-Tucker-Zemlin alt tur eleme kısıtlarına (subtour elimination constraints) benzer yapıdadır.

3.2.2. Otonom Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, çalışma kapsamında geliştirilen OEARP'nin karışık tamsayılı programlama modeli açıklanmıştır. Çalışma kapsamında otonom araçların dikkate alınmasının nedeni, diğer araçlara kıyasla otonom araçlara ait operasyonların daha rahat yönlendirilebilir olması ve kesintisiz olarak çalıştırılabilmeleridir. Araçların elektrikli olma özelliği göz önüne alındığında, planlama sürecinde araç batarya seviyeleri, şarj istasyonuna uğramak için alınan rota kararları, şarj süreleri gibi faktörler Klasik DARP kısıtları ile birlikte değerlendirilip, problemin optimizasyonunun sağlanması amaçlanmıştır.

Çalışmada kullanılan araçların otonom elektrikli araç olma özelliği sayesinde, araçların kesintisiz gün boyu çalıştığı varsayımı rahatlıkla uygulanmıştır. Ayrıca, otonom araç özelliği sayesinde araçların merkezi şekilde kontrolünün daha kolay yapılacağı öngörülmektedir. Araçların otonom olma özelliği sayesinde, Klasik DARP'ne kıyasla sürücüye ait sürüş süresi, vardiya değişimi ile ilgili kısıtlar ortadan kaldırılmış, bu kısıtlar, çalışma kapsamında ele alınan OEARP formülasyonunda yer almamıştır. Böylece ele

alınan problem boyutunda sürücü kısıtlarından kaynaklanan büyüme ve karmaşıklık azaltılmıştır.

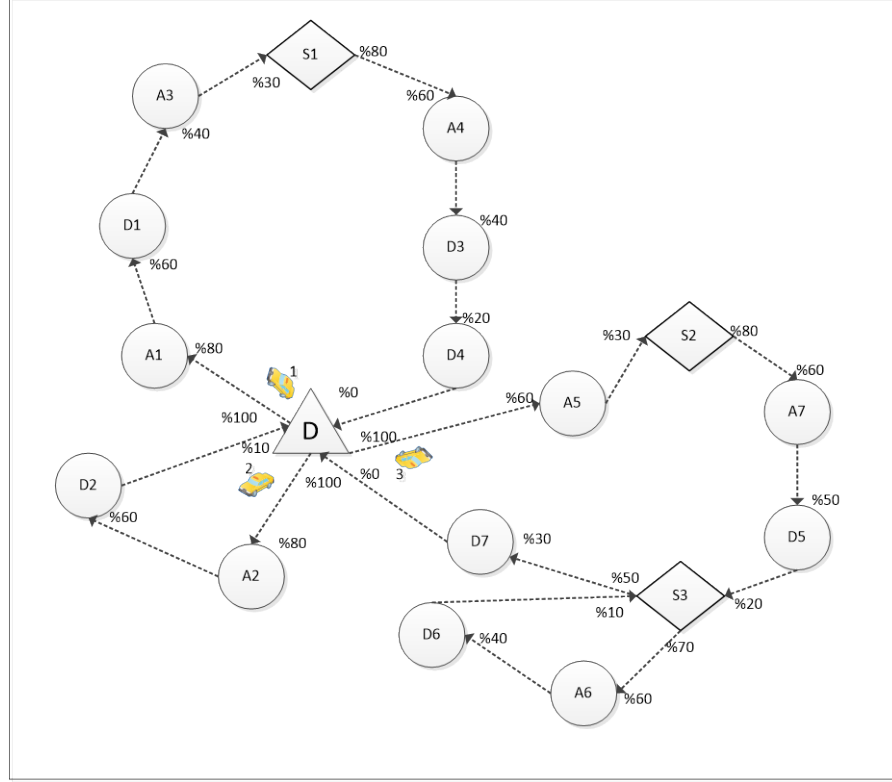
Çalışma kapsamında ele alınan OEARP için dikkate alınan kısıtlamalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Her rota bir başlangıç deposundan başlayıp, bir bitiş deposunda sonlanmalıdır.
2. Her lokasyon yalnızca bir araç tarafından ziyaret edilmelidir.
3. Tüm yolcu talebi karşılanmalı ve taşınan yolcu sayısı araç kapasitesini aşmamalıdır.
4. Müşteri alma ve bırakma lokasyonları aynı araç tarafından ziyaret edilmelidir.
5. Müşteri alma lokasyonu her zaman bırakma lokasyonundan önce ziyaret edilmelidir.
6. Aracın müşteriye uğradığı zaman müşteri zaman penceresi aralığında olmalıdır.
7. Aracın batarya şarj düzeyi negatif değer almamalıdır.
8. Şarj istasyonuna uğrayan araçlar, batarya kapasitesi kadar şarj edilmelidir.

Dikkate alınan problemin amaç fonksiyonu, en kısa sürede rotanın tamamlanması olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.3’de örneği gösterilen OEARP’yi klasik araç rotalama problemlerinden ayıran yönleri elektrikli araçların şarj edilme zorunluluğundan kaynaklı şarj istasyonuna uğrama ve şarj süreleri olarak tanımlanabilir. Her araç, müşteri talep bilgisi ulaştığında müşterinin bulunduğu lokasyona ulaşması için gereken batarya kapasitesine sahip olmalıdır. Aksi halde, ilgili talep batarya kapasitesinin yeterli olmadığı araç tarafından reddedilecek, diğer araçlar için bu talep değerlendirmeye alınacaktır. Öte yandan, müşterinin alma lokasyonuna ulaşan araç için müşteriyi bırakma lokasyonuna ulaştırırken yine batarya kapasitesi dikkate alınmalı, eğer şarj istasyonuna uğrama süresi müşterinin zaman penceresini aşmıyorsa talep, ilgili araç tarafından karşılanmalıdır. Aksi halde bu talep araç tarafından reddedilecek, diğer araçlar için bu durum kontrol edilecektir. Önerilen OEARP’nin genel kısıtları; her müşterinin yalnızca bir araç tarafından ziyaret edilmesi, müşterinin aynı araç tarafından alınıp, müşteri bırakma lokasyonuna bırakılması,

müşterinin zaman penceresi içerisinde bu seyahatin gerçekleşmesi, araçların şarj miktarının katedilen yol ile doğru orantılı olarak azalması ve şarj süresinin tanımlanması olarak sıralanabilir.



Şekil 3.3. Örnek problem

Çalışma kapsamında dikkate alınan notasyon ve formülasyon aşağıdaki gibidir:

Kümeler:

$P = \{1, \dots, n\}$: müşteri alma lokasyonları kümesi

$D = \{n + 1, \dots, 2n\}$: müşteri bırakma lokasyonları kümesi

$N = P \cup D$: müşteri alma ve bırakma lokasyonları kümesi

$K: \{1, \dots, k\}$: araç kümesi

O : başlangıç depo lokasyonları kümesi

F : bitiş depo lokasyonları kümesi

S : şarj istasyonları kümesi

$V = N \cup O \cup F \cup S$: tüm uygun lokasyonların kümesi

Parametreler:

t_{ij} : i ve j lokasyonları arasındaki seyahat süresi $i \in V, j \in V$

$[e_i, l_i]$: i . müşteriye ait zaman penceresi $i \in V$

s_i : i . lokasyonda hizmet süresi $i \in V$

q_i : i . lokasyonda bulunan müşteri sayısı $i \in N$

L : maksimum sürüş süresi

h : şarj tüketim oranı ($h * t_{ij}, i, j \in V$)

C : araç kapasitesi

Q : araç batarya kapasitesi

g : istasyon şarj oranı dak/kW

B_0 : başlangıç batarya düzeyi

T_p : planlama periyodu

Karar değişkenleri:

$x_{ij}^k: \begin{cases} 1, & \text{eğer } k. \text{ araç } (i, j) \text{ bağlantısını kullanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

T_i^k : k . aracın i . lokasyonda servise başlama zamanı $i \in V, k \in K$

U_i^k : k . aracın i . lokasyona ulaştıktan sonra yük durumu $i \in V, k \in K$

B_i^k : k . aracın i . lokasyondaki şarj seviyesi $i \in V, k \in K$

Y_s^k : k . aracın s . şarj istasyonunda kısmi şarj süresi $s \in S, k \in K$

R_i : i . Lokasyonda bulunan müşteri için fazla sürüş süresi $i \in P$

Amaç fonksiyonu:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i,j \in V} t_{ij} x_{ij}^k \quad (3.50)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in P \cup S \cup F} x_{oj}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.51)$$

$$\sum_{j \in F} \sum_{i \in D \cup S} x_{ij}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.52)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in D \cup S} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall j \in F \cup S \quad (3.53)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{ij}^k - \sum_{j \in V, j \neq i} x_{ji}^k = 0 \quad \forall k \in K, i \in N \cup S \quad (3.54)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N, j \neq i} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (3.55)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{ij}^k - \sum_{j \in V, j \neq n+i} x_{j,n+i}^k = 0 \quad \forall k \in K, i \in P \quad (3.56)$$

$$T_i^k + s_i + t_{i,n+i} \leq T_{n+i}^k \quad \forall k \in K, i \in P \quad (3.57)$$

$$e_i \leq T_i^k \leq l_i \quad \forall k \in K, i \in V \quad (3.58)$$

$$T_{n+i}^k - T_i^k - s_i \leq L \quad \forall k \in K, i \in P \quad (3.59)$$

$$T_i^k + t_{ij} + s_i - M_{ij}(1 - x_{ij}^k) \leq T_j^k \quad \forall k \in K, i \in V, j \in V, i \neq j, M_{ij} > 0 \quad (3.60)$$

$$R_i \geq T_{n+i}^k - T_i^k - s_i - t_{i,n+i} \quad \forall k \in K, i \in P \quad (3.61)$$

$$U_i^k + q_j - W_{ij}(1 - x_{ij}^k) \leq U_j^k \quad \forall k \in K, i \in V, j \in V, i \neq j \quad (3.62)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq U_i^k \leq \min\{C, C + q_i\} \quad \forall k \in K, i \in N \quad (3.63)$$

$$B_0^k = B_0 \quad \forall k \in K \quad (3.64)$$

$$B_j^k \geq B_i^k - h \cdot t_{ij} - Q(1 - x_{ij}^k) \quad \forall k \in K, i \in V/S, j \in V/O \quad i \neq j \quad (3.65)$$

$$B_j^k \geq B_s^k + gY_s^k - h \cdot t_{sj} - Q(1 - x_{sj}^k) \quad \forall k \in K, s \in S, j \in P \cup F \cup S \quad s \neq j \quad (3.66)$$

$$Q \geq B_s^k + gY_s^k \quad \forall k \in K, s \in S \quad (3.67)$$

$$Y_s^k \geq T_i^k - t_{si} - T_s^k - M_{si}(1 - x_{si}^k) \quad \forall k \in K, s \in S, i \in P \cup F \cup S \quad s \neq i \quad (3.68)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i, j \in V \quad (3.69)$$

$$B_i^k \geq 0 \quad \forall k \in K, i, j \in V \quad (3.70)$$

$$Y_s^k \geq 0 \quad \forall k \in K, s \in S \quad (3.71)$$

(3.50) numaralı ifadede gösterilen amaç fonksiyonu ile araçların toplam seyahat süresinin minimizasyonu hedeflenmiştir. (3.51) numaralı eşitsizlik ile araçların depo lokasyonlarından çıkışı sağlanırken, (3.52) numaralı eşitsizlik ile hedef depo lokasyonlarına ulaşılması sağlanmaktadır. (3.53) numaralı eşitsizlik ile araçların, hedef depoların bulunduğu lokasyonları ve şarj istasyonlarını en fazla bir kez ziyaret etmesi sağlanmaktadır. (3.54) numaralı eşitsizlik akış denge denklemi olup her lokasyon için lokasyondan çıkan ve lokasyona giren bağlantı sayılarının eşit olmasını sağlamaktadır. (3.55) ve (3.56) numaralı eşitsizlikler ile sırasıyla tüm müşterilerin taleplerini karşılamayı ve müşterilerin toplama ve dağıtım noktalarına aynı araç tarafından servis verilmesi sağlanmıştır. (3.57) numaralı eşitsizlik tanımlanan sürüş süresi değişkenine ait denklem olup, aynı zamanda araçlar tarafından önce müşteri alma lokasyonunu, sonrasında müşteri bırakma lokasyonunun ziyaret edilmesi sağlanmaktadır. (3.58) numaralı eşitsizlik, müşteriler için zaman penceresi kısıtı olarak belirlenmiştir. (3.59) numaralı eşitsizlik ile her araç için maksimum seyahat süresi tanımlanırken, (3.60) numaralı eşitsizlik ile servis

başlama süresi ve zaman uygunluğu sağlanmıştır. (3.61) numaralı eşitsizlik ile maksimum sürüş süresi tanımlanırken, (3.62) ve (3.63) numaralı eşitsizliklerde sırasıyla araçlar tarafından taşınan müşteri sayısının araç kapasitesini aşmamasını ve aracın boş olarak şarj istasyonlarına uğramasını garanti etmektedir. (3.64) numaralı eşitsizlik ile aracın başlangıç deposunda tam şarj ile rotasına başlaması sağlanırken, (3.65) ve (3.66) numaralı kısıtlar batarya düzeylerindeki değişimi ve araçların şarj istasyonlarında boş iken şarj edilmesini sağlamaktadır. (3.67) ve (3.68) numaralı kısıtlar ise batarya şarj kısıtları olarak belirlenmiş olup ayrıca şarj seviyesinin negatif değer almasını önlemektedir. (3.69)-(3.71) numaralı eşitsizliklerde değişken işaretleri tanımlanmaktadır. Ayrıca, matematiksel modelde kullanılan yardımcı değişkenler sırasıyla $M_{ij} \geq \max\{0, l_i + s_i + t_{ij} - e_j\}$, $W_{ij} \geq \min\{C, C + q_i\}$ olarak tanımlanmaktadır.

3.2.3. Otonom Elektrikli Araç Rotalama Problemi-Kısıt Programlama Modeli

Bu bölümde, problemin kısıt programlama tabanlı bir formülasyonu sunulmuştur. Bu formülasyon, çalışma kapsamında önerilen sezgisel yaklaşımının yeniden yapılandırma (repair mechanism) aşamasını oluşturmaktadır. Araçların otonom olma özelliği sayesinde, Klasik DARP'ne kıyasla sürücüyü ait sürüş süresi, vardiya değişimi ile ilgili kısıtlar ortadan kaldırılmış, bu kısıtlar, çalışma kapsamında ele alınan OEARP kısıt programlama formülasyonunda yer almamıştır. Böylece ele alınan problem boyutunda sürücü kısıtlarından kaynaklanan büyüme ve karmaşıklık azaltılmıştır.

Kısıt programlama modelinde IBM ILOG CP Optimizer kullanılarak matematiksel model oluşturulmuştur. Bu çalışmada geliştirilen OEARP kısıt programlama formülasyonu aşağıda verilmiştir.

Kümeler:

$P = \{1, \dots, n\}$: müşteri alma lokasyonları kümesi

$D = \{n + 1, \dots, 2n\}$: müşteri bırakma lokasyonları kümesi

$N = P \cup D$: müşteri alma ve bırakma lokasyonları kümesi

$K: \{1, \dots, k\}$: araç kümesi

O : başlangıç depo lokasyonları kümesi

F : bitiş depo lokasyonları kümesi

S : şarj istasyonları kümesi

$V = N \cup O \cup F \cup S$: tüm uygun lokasyonların kümesi

Parametreler:

t_{ij} : i ve j lokasyonları arasındaki seyahat süresi $i \in V, j \in V$

$[e_i, l_i]$: i . müşteriye ait zaman penceresi $i \in V$

s_i : i . lokasyonda servis süresi $i \in V$

q_i : i . lokasyonda bulunan müşteri sayısı $i \in N$

L : maksimum sürüş süresi

h : şarj tüketim oranı ($h * t_{ij}, i, j \in V$)

C : araç kapasitesi

Q : araç batarya kapasitesi

g : istasyon şarj oranı dak/kW

B_0 : başlangıç batarya düzeyi

T : planlama periyodu

Karar değişkenleri:

Y_j : j . lokasyon için tanımlı zaman aralığı değişkeni $\forall j \in V$

Z_j^k : j . lokasyon k . araç için tanımlı zaman aralığı değişkeni $\forall j \in V, \forall k \in K$

S_k : k . araç için tanımlı rota dizisi $\forall k \in K$

C_k : araç yük değişimini gösteren kümülatif fonksiyon $\forall k \in K$

B_k : aracın şarj değişimini gösteren kümülatif fonksiyon $\forall k \in K$

R_j : j . lokasyonda bulunan müşteri için tanımlı fazla sürüş süresi $j \in P$

Amaç fonksiyonu:

$$\min \left\{ \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} Z_j^k * t_{j, Next(S_k, Z_j^k)} \right\} \quad (3.72)$$

Kısıtlar:

$$alternative \left(Y_j, [Z_j^k]_{k \in K} \right) \quad \forall j \in V \quad (3.73)$$

$$e_j \leq startOf(Y_j) \leq l_j \quad \forall j \in V \quad (3.74)$$

$$endBeforeStart(Y_i, Y_j) \quad \forall (i, j) \in V: i = j - n \quad (3.75)$$

$$before(S_k, Z_i^k, Z_j^k) \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in V: i = j - n \quad (3.76)$$

$$presenceOf(Z_i^k) = presenceOf(Z_j^k) \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in V: i = j - n \quad (3.77)$$

$$noOverlap(S_k, T) \quad \forall k \in K \quad (3.78)$$

$$\sum_{j \in P} stepAtStart(Z_j^k, q_j) + \sum_{j \in D} stepAtStart(Z_j^k, q_j) \leq C \quad \forall k \in K \quad (3.79)$$

$$presenceOf(Z_j^k) = 1 \quad \forall k \in K, \forall j \in V: j = k + 2n \quad (3.80)$$

$$first(S_k, Z_j^k) \quad \forall k \in K, \forall j \in V: j = k + 2n \quad (3.81)$$

$$presenceOf(Z_j^k) = 1 \quad \forall k \in K, \forall j \in V: j = k + nv + 2n \quad (3.82)$$

$$last(S_k, Z_j^k) \quad \forall k \in K, \forall j \in V: j = k + nv + 2n \quad (3.83)$$

$$R_j \geq startOf(Z_j) - startOf(Z_i) - s_i - d_{i,j} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in V: i = j - n \quad (3.84)$$

$$startOf(Z_j) - startOf(Z_i) - s_i \leq L \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in V: i = j - n \quad (3.85)$$

$$B_k = stepAtStart(Z_0^k, Q) - \sum_{j \in V} stepAtStart(Z_j^k, h * t_{j, Next(s_k, Z_j^k)}) + \sum_{j \in S} stepAtEnd(Z_j^k, g * lengthOf(Z_j^k)) \quad \forall k \in K \quad (3.86)$$

$$B_k \leq Q \quad \forall k \in K \quad (3.87)$$

$$Prev(s_k, Z_j^k) > n \quad \forall j \in S, \forall k \in K \quad (3.88)$$

$$Z_j : optIntervalVar(s_j, [e_j, l_j]) \quad \forall j \in S \quad (3.89)$$

$$Z_j^k : optIntervalVar(s_j, [e_j, l_j]) \quad \forall j \in V, \forall k \in K \quad (3.90)$$

$$S_k : sequenceVar(\{Z_0^k, \dots, Z_{|V|}^k\}) \quad \forall k \in K \quad (3.91)$$

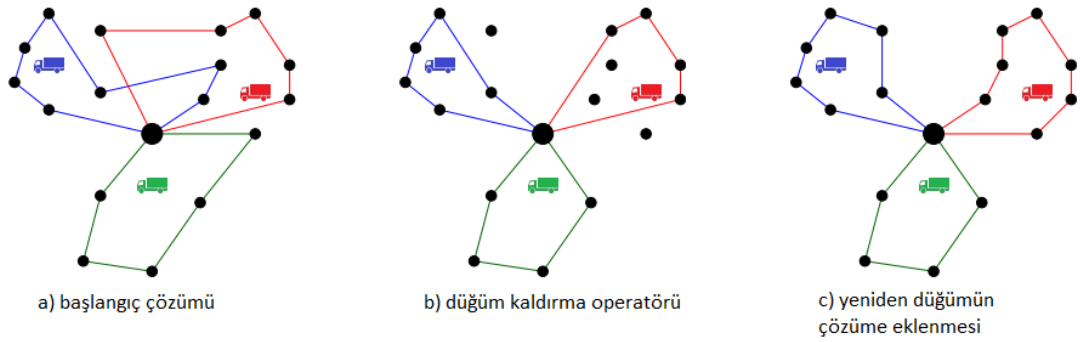
$$R_i \geq 0 \quad i \in P \quad (3.92)$$

(3.72) numaralı ifade ile modelin toplam katedilen uzaklığın minimizasyonundan oluşan amaç fonksiyonu gösterilmiştir. (3.73) numaralı kısıt ile her müşterinin yalnızca bir araca atanması sağlanmıştır. (3.74) numaralı kısıt ile aralık değişkenlerine ait başlama ve bitiş sürelerinin belirlenen zaman pencereleri aralığında kalması sağlanmıştır. (3.75), (3.76) ve (3.77) numaralı kısıtlar ile müşteri alma ve bırakma lokasyonlarının aynı araç tarafından ziyaret edilmesi, aynı zamanda müşteri alma lokasyonunun bırakma lokasyonundan daha önce rotada yer alması sağlanmıştır. (3.78) numaralı kısıt ile diziye ait aralık değişkenlerinin rota üzerinde belirli bir sıra dahilinde, ardışık olarak yer alması sağlanmıştır. (3.79) numaralı kısıt ile aracın yük durumu gösterilmiş olup bu değer aracın kapasitesini aşmaması sağlanmıştır. (3.80), (3.81), (3.82) ve (3.83) numaralı kısıtlar ile her rotanın başlangıç depo lokasyonları ile başlaması, bitiş depo lokasyonları ile sonlandırılması sağlanmıştır. (3.84) ve (3.85) numaralı kısıtlar ile sırasıyla her düğüm için fazla sürüş süresi ve maksimum sürüş süresi tanımlanmıştır. (3.86) ve (3.87) numaralı kısıtlar ile aracın batarya şarj düzeyi tanımlanmış olup bu değer batarya kapasitesinin altında olması sağlanmıştır. Ayrıca (3.88) numaralı kısıt ile her aracın şarj istasyonuna

ancak müşteri bırakma lokasyonundan sonra uğraması sağlanmıştır. Son olarak, (3.89) – (3.92) numaralı kısıtlar ile değişken tanımlamaları yapılmıştır.

3.2.4. Kısıt Programlama Tabanlı-Sezgisel Yaklaşım

Çalışmada ele alınan OEARP için özellikle büyük boyutlu problemlerin daha kısa sürede uygun çözümlerine ulaşılması amacıyla hibrit yapıda bir sezgisel yaklaşım önerilmektedir. Genel olarak problemin çözümü için önerilen yaklaşım “yık-yeniden oluştur” prensibine dayanmaktadır. Şekil 3.4’te geliştirilen sezgisel yaklaşımın genel konsepti görsel olarak sunulmuştur. Başlangıç çözümü ile elde edilen rotaların bazı bölümleri rota kaldırma operatörleri ile çözümden çıkarılarak, çözümler yeniden oluşturulmuştur. Geliştirilen sezgisel yaklaşımda, yeniden oluşturulan çözümlerin daha önceki çözümlerden iyi bir çözüm olması durumunda bu çözümü üreten rota kaldırma operatörünün seçilme olasılığı artırılarak daha iyi çözümlerin üretilmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 3.4. UGKA yaklaşımının genel işleyişi

Geliştirilen sezgisel yaklaşımın “yeniden oluştur” aşamasında önceki bölümlerde detaylarıyla açıklanan kısıt programlama modeli kullanılmıştır. Kısıt programlama modeli ile probleme ait tüm kısıtların dikkate alınması sağlanarak ve elde edilen çözüm değerlendirilerek farklı çözümler üretilmesi amacıyla rotalar üzerinde bir takım düzenlemeler yapılmıştır. Rotalara ait düğümlerin bir kısmı yok edilerek kısıt programlama modeline tekrar başvurulup farklı uygun bir rota dizilimi üretilmesi

sağlanmış ve bahsi geçen düğüm kaldırma işleminin çözüm üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşımın genel adımları Şekil 3.5'te verilmiştir.

1. Başlangıç çözümünü "Başlangıç Çözümü Prosedürü"nü kullanarak oluştur (s).
2. En iyi çözüm $s^* \leftarrow s$ olarak güncelle.
3. Durdurma kriteri henüz karşılanmamışsa (maksimum iterasyon sayısı veya süre):
 - 3.1 Uyarlanabilir değiştirme operatörünü seç (p_j) ve bu operatörü s çözümüne uygula.
 - 3.2 Kısıt programlama ile müşteri ekleme prosedürünü gerçekleştir.
 - 3.3 Kısıt programlamadan gelen çözüm $s' \neq s$ ise
 - $s \leftarrow s'$ olarak güncelle.
 - Eğer s' çözümü s^* çözümünden daha iyi bir çözüm ise $s^* \leftarrow s'$ olarak güncelle.
 - 3.4. Uyarlanabilir değiştirme operatörlerinin ağırlıklarını (w_j) güncelle.
4. En iyi çözüm olarak s^* çözümünü oluştur.

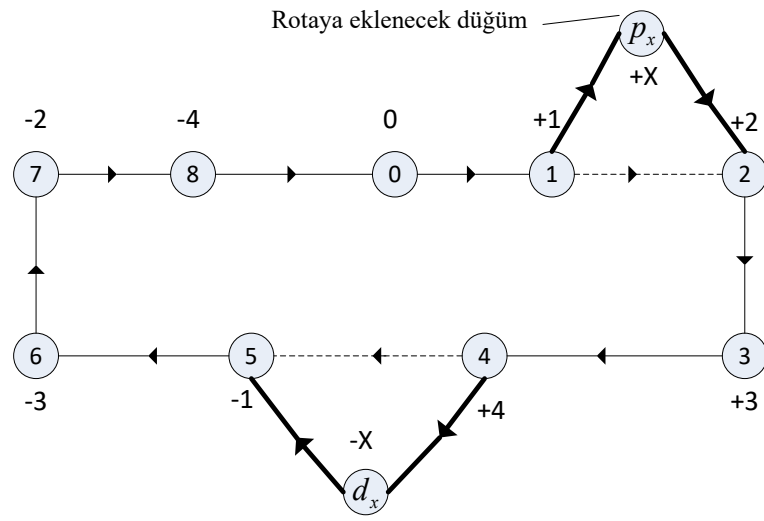
Şekil 3.5. Algoritmanın Genel Adımları

Çalışma kapsamında geliştirilen sezgisel yaklaşımın uygun çözüm üretmesi amacıyla aşağıdaki üç durumun kontrol edilmesi gerekmektedir:

1. Araç kapasitesi uygunluğu
2. Zaman penceresi geçerliliği
3. Şarj düzeyi yeterliliği

Şekil 3.6'da bir müşteri düğümü ekleme örneği sunulmuştur. Üretilen uygun rotaların her birinin bahsi geçen bu üç durum açısından geçerliliğinin sağlanmış olması gerekir. Aksi durumda, yeniden uygun bir rota oluşturulması için kısıt programlama modeline başvurulacaktır. Ayrıca dikkate alınan problem yapısı gereği bir müşteri, alma ve bırakma düğümleri olmak üzere iki adet düğüm ile temsil edilmektedir. Herhangi bir rotadan müşteri alma düğümü çıkarılacaksa aynı zamanda bu düğüme karşılık gelen bırakma

düğümünün de çıkarılması gerekir. Benzer şekilde bir rotaya alma düğümü eklenecekse, buna karşılık gelen bırakma düğümünün de öncelik koşuluna uygun olacak şekilde rotaya eklenmesi gerekmektedir. Belirtilen bu öncelik ilişkisinin yeniden oluşturulacak rotalarda geçerliliğini her zaman koruması önemlidir. Bunun yanı sıra yeniden rota oluşturma süreci sonunda, tüm düğümlerin zaman pencerelerinin aşılmaması ve şarj düzeyinin bitiş deposuna ulaşınca kadar pozitif değerde kalması sağlanmalıdır. Tüm bu koşulların kontrolü, geliştirilen sezgisel yaklaşımın “yeniden oluştur” mekanizmasını oluşturan kısıt programlama modeli ile sağlanmıştır.



Şekil 3.6. Müşteri düğümü ekleme örneği

Geliştirilen sezgisel yaklaşımda kullanılan öğelerin tanımları ve açıklamaları Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Parametre Tanımlamaları

Parametrenin Kısa Tanımı	Açıklaması
<i>r.id</i>	<i>r.</i> müşterinin etiketi
<i>r.o</i>	depo lokasyonu
<i>r.s</i>	şarj istasyonu
<i>r.p</i>	<i>r.</i> müşterinin alma noktası
<i>r.d</i>	<i>r.</i> müşterinin bırakma noktası
<i>r.e</i>	<i>r.</i> müşteri için en erken alma süresi
<i>r.l</i>	<i>r.</i> müşteri için en geç bırakma süresi
<i>r.x</i>	<i>r.</i> müşterinin x-koordinat lokasyonu
<i>r.y</i>	<i>r.</i> müşterinin y-koordinat lokasyonu
<i>v.id</i>	<i>v.</i> aracın etiketi
<i>v.c</i>	<i>v.</i> aracın yolcu kapasitesi
<i>v.Q</i>	<i>v.</i> araç batarya kapasitesi
<i>v.h</i>	<i>v.</i> aracın şarj tüketim hızı
<i>v.g</i>	<i>v.</i> aracın şarj dolum hızı

Çalışma kapsamında lokasyonlar arası uzaklık hesaplamaları Öklid uzaklıkları kullanılmıştır. Ayrıca, uzaklık matrisinin simetrik bir matris olduğu varsayılmıştır. Uzaklık hesaplamaları için aşağıdaki formül dikkate alınmıştır:

$$d(i, j) = d(j, i) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.93)$$

Başlangıç çözümünün oluşturulması için minimum uzaklık fonksiyonu kullanılmıştır. Depo düğümü ile başlayan her rotada ilgili düğüme en yakın lokasyona sahip müşteri düğümleri sırasıyla rotaya eklenmiştir. Müşteri alma noktasını takiben müşteri bırakma noktası rotaya eklenerek, araç kapasite kısıtlarının ve zaman pencerelerinin kontrolü sağlanmıştır.

$$\operatorname{argmin}_{x \in S} f(x) := \{x \in S : f(s) \geq f(x) \quad \forall s \in S\} \quad (3.94)$$

Amaç Fonksiyonunun Kısıtlandırılması:

Çalışma kapsamında geliştirilen sezgisel yaklaşımda, kısıt programlama modelinin her döngüde uygun çözüm bulması uzun çalışma sürelerine sebep olabilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için kısıt programlama modelinden amaç fonksiyonunun çıkarılıp, yalnızca kısıtlar ile çalışan bir model (*pure constraint satisfaction problem*) oluşturulmuştur. Yeni durumda kısıt programlama modeline eklenen kısıt aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$z_{new} < \alpha * z_{current} \quad (3.95)$$

Bu kısıtta z_{new} yeni oluşan çözümü, $z_{current}$ ise mevcut çözümü göstermektedir. α katsayısının 1' e yakın bir değer alması gerekir. Çok küçük bir değer seçildiğinde kısıt programlamanın çözüm bulma süresi artacaktır, buna karşın α çok büyük değerler aldığı anda, kısıt programlama mevcut çözümden küçük bir farkla daha iyi bir çözüm üretecektir.

Çözümlerin Kabul Edilmesi:

Çalışma kapsamında önerilen yaklaşımda arama sürecinin geliştirilmesi amacıyla daha kötü çözümler de kabul edilmiştir. Kısıt programlama belirli bir olasılık değeri ile daha kötü çözümler üretebilmektedir. Bu olasılık değeri kısıt programlamanın ardışık başarısızlıklarının sayısı ile birlikte artış göstermektedir.

$$Prob = \left(\frac{nbfail}{(nbfail + 1)} \right)^p \quad (3.96)$$

Kısıt programlama arama süresi:

Kısıt programlama modelinin uzun süreler boyunca çalışmasının geliştirilen yaklaşımın performansını olumsuz etkileyeceği düşünülmektedir. Bu durumun üstesinden gelmek amacıyla kısıt programlama için bir süre sınırı belirlenmiştir. Böylece daha kısa çalışma süreleri ile arama alanının daha büyük bölümünün keşfedilmesine olanak verilerek daha iyi çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Süre sınırı başlangıçta $[min, max]$ aralığında değişen bir değere sahiptir. Bu değer başlangıçta minimum süreye eşit olarak belirlenmiş olup kısıt programlama bir çözüm bulamadığında veya mevcut süre maksimum değere eşit olmadığında bu değer bir birim arttırılmıştır. Eğer kısıt programlama bir çözüm ürettiğinde geçerli süre minimum süreye eşit değilse minimum süre bir birim azaltılmıştır.

Operatör seçim yöntemi olarak Rulet Çemberi tekniği kullanılmıştır. Rulet Çemberi yönteminde, operatör ağırlıkları mevcut ağırlık ile yeni çözümden oluşan bir denklem kullanılarak güncellenmektedir. Algoritma başladığında, tüm operatörlere ağırlık atanır. Her döngüde, bir yok etme ve onarma operatörü mevcut ağırlıklara göre UGKA algoritması tarafından seçilir. Bu operatörler mevcut çözüme uygulanarak yeni bir aday çözüm elde edilir. Bu aday çözüm ile ilgili olası dört durum UGKA algoritması tarafından değerlendirilmektedir:

1. Aday çözüm, en iyi global çözümdür.
2. Aday çözüm, mevcut çözümden daha iyidir, ancak en iyi global çözüm değildir.
3. Aday çözüm kabul edilir.
4. Aday çözüm reddedilir.

Çözümlerin kabul edilmesi amacıyla “Record to Record Travel” yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, çözümde gerçekleşen iyileştirme, güncelleme eşik değerini karşıladığında çözümler kabul edilir. Özellikle, amacı olan mevcut en iyi çözüm göz önünde bulundurulur. Oluşan iyileştirme güncelleme eşiklerinden küçükse, yeni bir aday çözüm kabul edilir. Bu eşik, algoritma başladığında bir başlangıç değerinde başlatılır ve ardından bir adım değeri kullanılarak güncellenir.

4. BULGULAR

Bu bölümde ilk olarak Klasik DARP modeli sonuçları paylaşılacaktır. Veri setlerine ait özellikler ilk üç sütunda açıklanmıştır. DARP özelinde her müşteri iki farklı düğüm ile temsil edildiğinden toplam düğüm sayısının müşteri sayısının en az iki katı büyüklüğünde olduğu çizelgeden rahatlıkla görülmektedir. Ayrıca araçların rotalara başladığı depo düğümler de toplam düğüm sayısına dahil edilmiştir. Bu problemi dikkate alan çalışmalarda sıklıkla kullanılan Cordeau (2006) çalışması test verileri dikkate alınarak çözümler elde edilmiştir. Çizelge 4.1’de klasik problemin çözüm sonuçları sunulmuştur.

Tabloda toplam seyahat süresi (TT) ve fazla sürüş süresi (ERT) olmak üzere iki performans ölçütünün sonuçları paylaşılmıştır. Toplam seyahat süresi matematiksel modelin amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. Fazla sürüş süresi ise müşterinin araç içinde geçirdiği fazladan süre olarak hesaplanmış ve tabloda sonuçlar paylaşılmıştır. Fazla sürüş süresi yalnızca optimal sonuçların elde edildiği veri setleri için hesaplanmış olup, özellikle araç sayısının sabit kaldığı ve problem boyutunun büyüdüğü örneklerde artış gösterdiği gözlenmiştir.

Çözümler Intel Core i7-12700H, 2300 Mhz, 14 Çekirdek özellikli bilgisayarda IBM ILOG Cplex Optimization Studio 22.1 programında elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Klasik DARP sonuçları

Örnek veri seti	Araç sayısı	Müşteri sayısı	Toplam düğüm sayısı	Klasik DARP sonuçları (TT)	ERT	Çözüm süresi (sn.)
a2-16	2	16	36	276*	220	1.3 sn.
a2-20	2	20	44	324*	241	2.55 sn.
a2-24	2	24	52	406*	306	20.73 sn.
a3-18	3	18	42	274*	271	211 sn.
a3-24	3	24	54	313*	378	825 sn.
a3-30	3	30	66	441**	-	2 saat
a3-36	3	36	78	552**	-	2 saat
a4-16	4	16	40	260*	281	32 dk.
a4-24	4	24	56	349**	-	2 sa.
a4-32	4	32	72	491**	-	2 sa.
a4-40	4	40	88	845**	-	2 sa.

*Optimal çözümler

**2 saat sonucunda ulaşılan en iyi çözüm

Çizelge 4.2’de örnek veri setleri ve verilere ait birtakım özellikler yer almaktadır. Çizelgede görüldüğü gibi kısıt programlama modeli dikkate alınarak uygulanan formülasyon sayesinde kısıt ve değişken sayısı bir hayli azalmaktadır. Bu durumda, uygun çözüme ulaşma süresinin de tamsayı programlama modeline kıyasla oldukça azaldığı gözlenmiştir. Kısıt programlamanın çizelgeleme esaslı değişken ve kısıt tanımlamaları sayesinde problem farklı bir şekilde modellenerek problem boyutunda önemli iyileştirmeler sağlanmış, bu durumun çözüm süresine olumlu katkıları olduğu gözlenmiştir.

Çözümler Intel(R) Core(TM) i7-12700H, 2300 Mhz, özellikli bir dizüstü bilgisayarda, IBM ILOG Cplex 22.1 ve IBM ILOG CP Optimizer programları kullanılarak elde edilmiştir. Sezgisel yaklaşım ise PyCharm Community Edition programında Python dilinde kodlanmıştır.

Çizelge 4.2. Test verisi özellikleri

Örnek veri seti	Araç Sayısı	Müşteri sayısı	Toplam düğüm sayısı	MIP Kısıt sayısı	MIP Değişken sayısı	CP Kısıt sayısı	CP Değişken Sayısı
a2-16	2	16	39	14,717	3,220	1,581	369
a2-20	2	20	47	21,393	4,632	1,905	445
a2-24	2	24	55	29,333	6,300	2,229	521
a3-18	3	18	45	29,202	6,372	2,618	606
a3-24	3	24	57	47,007	10,122	3,320	768
a3-30	3	30	69	70,215	14,736	4,022	930
a3-36	3	36	81	97,005	20,214	4,724	1,092
a4-16	4	16	43	35,267	7,768	3,251	751
a4-24	4	24	59	66,807	14,432	4,475	1,031
a4-32	4	32	75	110,135	23,144	5,699	1,311
a4-40	4	40	91	162,751	33,904	6,923	1,591
a4-48	4	48	107	225,607	46,712	8,147	1,871
a5-40	5	40	93	211,584	44,229	8,718	1,998
a5-50	5	50	113	313,613	65,040	10,608	2,428

Cordeau (2006) çalışması test verilerine elektrikli araçlar ile ilgili parametrelerin eklenmesi ile elde edilen veriler kullanılmış ve Çizelge 4.3'te karşılaştırmalı çözümler sunulmuştur. Araç kapasitesi üç yolcu, maksimum sürüş süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir. Batarya doluluk oranı dakika başına 0.055 kWsa, batarya kapasitesi ise 14.85 kWsa olarak dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında önerilen araç paylaşım sisteminde, OEA'ların otonom araç olma özellikleri sayesinde kesintisiz sürüş paylaşımı hizmetleri sağlayabildikleri varsayılmıştır. Bu sayede, başlangıç ve bitiş depoları, aynı zamanda potansiyel şarj istasyonları olarak değerlendirilebilir. Depolar ayrıca, sürüş paylaşım hizmetlerinin sağlanması amacıyla geçici park yerleri olarak da hizmet vermektedir.

Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi, problem boyutu daha küçük olan veri setlerinin çoğunda optimal sonuçlar kısıt programlama ve sezgisel yaklaşımla elde edilmiştir. Veri setinde problem boyutu arttıkça optimal çözüm bulma süresi artmakta, en büyük üç veri setinde ise tamsayılı programlama modeli ile kabul edilen maksimum süre içerisinde optimal sonuca ulaşamamıştır. Bilinen en iyi çözümler ise kısa saniyeler içerisinde sezgisel yaklaşım ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.3'te de görüldüğü gibi, kısıt programlama ile sezgisel yaklaşımın tamamen birbirinden farklı olduğunu veya birbirine rakip yöntemler olduğunu düşünmek doğru değildir. Çalışma kapsamında önerilen sezgisel yaklaşımın “yeniden oluştur” mekanizmasının geliştirilen kısıt programlama modeli olduğunu bir kez daha vurgulamak gerekir. İki yaklaşım da gücünü kısıt programlama modelinden almaktadır. Dolayısıyla, bu çizelgeyi, birbirine kıyas yapılan yaklaşımlar olarak değil, çalışma kapsamında geliştirilen çözüm yaklaşımlarının aynı veri seri setleri üzerinde elde edilen sonuçları olarak yorumlamak daha doğru olacaktır. Özellikle düğüm kaldırma operatörleri için kullanılan yıkma katsayısı (destruction degree) değeri değiştikçe, çözümlere ilişkin sonuçların değişim gösterdiği gözlenmiştir. Bu parametreye ait farklı değerlerin seçildiği durumlarda oluşan çözümler Ek'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Karşılaştırmalı Sonuçlar

Veri seti	Tamsayılı prog. Çözümü	Çözüm süresi (sn)	Kısıt prog.çözümü	Çözüm süresi (sn)	Sezgisel yaklaşım	Çözüm süresi (sn)
a2-16	288*	6	288*	240	288*	180
a2-20	344*	78	350	240	351	180
a2-24	421*	900	424	240	421*	240
a3-18	301*	5400	314	240	301*	180
a3-24	343*	2160	347	240	343*	240
a3-30	542	7200	372	240	362**	270
a3-36	682	7200	456	240	426**	360
a4-16	285	7200	274	240	273**	330
a4-24	372**	7200	386	240	374	420
a4-32	570	7200	409	240	369**	390
a4-40	720	7200	465**	240	474	210
a4-48	-	7200	608	240	571**	450
a5-40	-	7200	494	240	471**	540
a5-50	-	7200	598	240	549**	600

*Optimal çözüm

**Bilinen en iyi çözüm

Sezgisel yaklaşımın çözümleri “yıkma” kısmında geçmiş çalışmalarda sıklıkla kullanılan üç adet düğüm kaldırma operatörü kullanılmıştır. Bu operatörlerin işleyişi genel olarak bilinmekle beraber uygulandıkları probleme göre farklı şekilde kurgulanabilir. Örneğin, bu çalışmada ele alınan OEARP örneğinde bir müşteri, alma ve bırakma olmak üzere iki farklı düğüm ile temsil edilmektedir. Bu nedenle düğüm kaldırma operatörleri tarafından çözümden kaldırılacak düğüm belirlenirken, alma ve bırakma düğümlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekir. Aksi halde, düğüm kaldırma operatörleri tarafından oluşturulan ve kısıt programlama modelinin başlangıç çözümü olan kısmi çözümün uygun olmayan (infeasible) bir çözüm olarak karşımıza çıkması olasıdır. Bu sebeple,

kapsamı ve çözüm üzerindeki etkisi genel olarak bilinen bu operatörlerin ele alınan problem özelinde kurgulanması ve uygulanması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında önerilen sezgisel yaklaşımda üç adet düğüm kaldırma operatörü birlikte kullanılmış ve operatör seçimi için Rulet Çemberi tekniği kullanılmıştır. Operatör seçimi ve kabul yöntemi için belirlenen parametre değerleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Parametre değerleri

Parametre	Değeri
Yıkma katsayısı (destruction degree)	0.05
Düğüm kaldırma operatörü sayısı	3
Yeniden oluşturma operatörü sayısı	1
Başlangıç skorları	[3, 2, 1, 0.5]
Başlangıç eşik değeri	255
Bitiş eşik değeri	5
Metot	Doğrusal

Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi düğüm kaldırma operatörleri her bir veri seti üzerinde tek başına uygulanmış ve en iyi çözümün elde edildiği operatörün başarı yüzdesi artırılmıştır. Burada başarı yüzdesi olarak ifade edilen ölçüt, en iyi çözümün elde edildiği veri setinin toplam veri seti sayısına oranı olarak hesaplanmıştır. En kötü başarıya sahip operatörün rota kaldırma operatörü olduğu söylenebilir. Diğer taraftan, rassal operatör çözüm uzayında farklı noktaları da keşfettiğinden iyi çözümler ürettiği gözlenmiştir. Ayrıca problem büyüklüğü arttıkça en kötü düğümü kaldırma operatörünün daha iyi çözümler ürettiği gözlenmiştir. Bazı durumlarda tek başına başarılı olmayan rota kaldırma operatörünün diğer operatörler ile birlikte çalıştığında iyi çözümler ürettiği gözlenmiştir. Bu durumun, geliştirilen sezgisel yaklaşımın büyük boyutlu problemlerin çözümünde olumlu katkılarından biri olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Çizelge 4.5. Düğüm kaldırma operatörleri karşılaştırması

Düğüm kaldırma operatörü	Başarı yüzdesi
Rassal düğüm kaldırma operatörü	%64
Rota kaldırma operatörü	%22
En kötü düğümü kaldırma operatörü	%50

Çizelge 4.6’da klasik problem çözümleri ile bu çalışma kapsamında dikkate alınan OEARP çözümleri bazı performans ölçütleri baz alınarak karşılaştırılmıştır. Bunlar, toplam taşıma süresi ve fazla sürüş süresi olarak tanımlanabilir. Amaç fonksiyonunda çeşitli ağırlık değerleri verilerek farklı sonuçlar elde edilmektedir. Müşteri memnuniyetinin göz önünde bulunduğu durum için toplam taşıma süresinin daha fazla öneme sahip olduğu durumlar dikkate alınmıştır. Fazla sürüş süresi ise müşterinin araç içinde ve aracı beklediği süre olmak üzere toplam seyahat süresi olarak düşünülebilir.

Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi, klasik problem çözümleri genel olarak OEARP sonuçlarına göre daha düşük değerdedir. Bu durumun nedeni olarak Klasik DARP’nde şarj istasyonlarının dikkate alınmaması olduğu söylenebilir. OEARP’de araçlar, şarj seviyeleri belirli düzeye ulaştığında mutlaka şarj istasyonlarına uğrayarak bataryalarını şarj etmektedir. Bu yüzden şarj istasyonlarına erişim maliyeti süre olarak amaç fonksiyonuna yansımıştır. Çizelgede, önceki çizelgelerden farklı olarak her iki problemde de optimal sonuçların ulaşıldığı veri setlerine ait sonuçlara yer verilmiştir.

Diğer bir karşılaştırma, fazla sürüş süresi sonuçları üzerinden yapılabilir. Fazla sürüş süresi, amaç fonksiyonuna dahil edilmemiştir. Bu değer yalnızca bir performans ölçütü olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi, bir veri seti hariç (a3-24) diğer veri setlerinde klasik problem sonuçları daha yüksektir. OEARP formülasyonunda, müşterinin araç içinde iken şarj istasyonuna uğramama kısıtı sayesinde bu değerler daha düşük çıktığı yorumu yapılabilir. Problemin matematiksel formülasyonunda müşteri teslim düğümü sonrası şarj istasyonuna aracın boş olarak uğramasını sağlayan kısıt sayesinde fazla bekleme yaşanmadan müşterilerin taşınması sağlanmıştır.

Çizelge 4.6. Klasik DARP ile OEARP sonuçlarının karşılaştırılması

Veri seti	Klasik DARP Toplam taşıma süresi	OEARP Toplam taşıma süresi	Klasik DARP Fazla sürüş süresi	OEARP Fazla Sürüş Süresi
a2-16	276*	288*	220	173
a2-20	324*	344*	241	196
a2-24	406*	421*	306	169
a3-18	274*	301*	271	271
a3-24	313*	343*	378	415

Son olarak, Klasik DARP kapsamında kullanılan araçların yakıt özelliğinin dikkate alınmadığı söylenebilir. Burada kullanılan araçların yakıt tüketiminin fazlalığı ve olumsuz çevresel etkilerinin OEARP'ye göre kıyaslamasının yapılması ilerleyen çalışmalar için araştırılması gereken bir konu olarak düşünülebilir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, otonom elektrikli araç tabanlı araç paylaşım sisteminin şehir içi hareketlilik, güvenli seyahat, çevre dostu düşük emisyonu sahip ulaşım gibi konularda önemli potansiyel etkileri araştırılmıştır. Elektrikli araç kullanımında, yüksek maliyetli araç yer-değiştirme, sınırlı araç menzili, şarj istasyonlarına erişim ve uzun şarj süreleri gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu tür zorlukların dikkate alındığı, sistem kullanıcılarına ait seyahat taleplerinin olduğu bir araç paylaşım sisteminin yönetimi, çözülmesi gereken çeşitli zor problemleri karşımıza çıkarmaktadır.

Çalışma kapsamında araç paylaşım sistemlerinde ortaya çıkan sürüş paylaşımı problemi, için literatürde bulunan DARP zemininde bir problem kurgusu oluşturularak modellenmiş ve çözümüne yönelik kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşım geliştirilmiştir. “Yık-yeniden oluştur” prensibine dayanan sezgisel yaklaşımın yeniden çözüm oluşturma aşamasında geliştirilen kısıt programlama modelinden yararlanılmıştır. Geliştirilen kısıt programlama tabanlı sezgisel yaklaşımın, OEARP üzerinde çözüm performansı ve süre açısından iyi sonuçlar ürettiği gözlenmiştir.

Araç paylaşım sistemlerinde ortaya çıkan elektrikli araçlar özelinde şarj stratejisinin belirlenmesine yönelik DARP formülasyonuna ilaveten şarj kısıtları ve şarj süresi ile ilgili kısıtlar eklenerek model kapsamı genişletilmiş ve problem çözülmeye çalışılmıştır.

Araç paylaşım sistemlerinde ortaya çıkan yer değiştirme probleminin çözümü için her araca farklı bir kalkış ve varış depo düğümü atanarak sorunun çözülmesi ve araç dengesizliğinin önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada kullanılan araçların otonom elektrikli araç olma özelliği sayesinde, araçların kesintisiz gün boyu çalıştığı varsayımı rahatlıkla uygulanmıştır. Ayrıca, otonom araç özelliği sayesinde araçların merkezi şekilde kontrolünün daha kolay yapılacağı öngörülmektedir. Araçların otonom olma özelliği sayesinde, Klasik DARP’ne kıyasla sürücüye ait sürüş süresi, vardiya değişimi ile ilgili kısıtlar ortadan kaldırılmış, bu kısıtlar, çalışma kapsamında ele alınan OEARP formülasyonunda yer almamıştır. Böylece ele

alınan problem boyutunda sürücü kısıtlarından kaynaklanan büyüme ve karmaşıklık azaltılmıştır.

Çalışmanın ana katkılarından ilki, ele alınan OEARP'nin bir çizelgeleme problemine dönüştürülerek, problemin çözümü için kısıt programlama yaklaşımının uygulanmasıdır. Bu yaklaşım ile kısıt ve değişken sayısının oldukça azaldığı, bu sayede, özellikle büyük boyutlu problemlerin çözümü için önemli bir alternatif çözüm yaklaşımının geliştirildiği rahatlıkla söylenebilir.

Kısıt programlamanın hızlı ve iyi çözüm üretme gücü, çalışmanın diğer katkısını oluşturan sezgisel yaklaşımda da kullanılmaya devam edilmiştir. Böylece, literatürde UGKA algoritmasının yeniden oluştur mekanizmasında kullanılan bilindik yöntemlerin yerine, yeniden çözüm oluşturma süreci daha güçlü bir yapı ile desteklenmiştir. Kontrol edilmesi gereken ve geliştirilen yaklaşımın olurlu çözüm ürettiğinden emin olmamızı sağlayan kısıt programlama modeli sayesinde, üretilen çözümlerin kısıtlar açısından uygunluğunun kontrol edilme süreci ve buna bağlı zorluklar tamamen ortadan kaldırılmıştır.

Çalışmanın ana katkılarından bir diğeri ise kısıt programlamanın yeniden oluştur mekanizmasını oluşturduğu sezgisel yaklaşımdır. Sezgisel yaklaşımın özellikle işlev kazandığı husus, mevcut çözümlerin bir kısmının yıkıldığı (destroy) aşamadır. Bu aşamada kullanılan operatörler ile komşu çözümler araştırılarak, bu sayede daha iyi çözümlere ulaşılması sağlanmıştır. Rassal düğüm kaldırma operatörü ile yerel aramaya takılmanın önüne geçilip, farklı çözümlerin keşfedilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Geliştirilen algorithmada kullanılan düğüm kaldırma operatörleri çalışma kapsamında dikkate alınan OEAP'nin kendine özgü durumları dikkate alınarak uygulanmıştır. Her ne kadar literatürde sıklıkla kullanılan operatörler seçilmiş olsa da bu operatörler problem özelinde geliştirilmiş ve sezgisel yaklaşımın ilk aşamasında kullanılmıştır. Bu durum geliştirilen yaklaşımın hem “yıkma” hem “yeniden oluşturma” aşamalarının özgünlüğünü kanıtlar niteliktedir.

Gelecek çalışmalarda, önerilen araç paylaşım sisteminde özellikle elektrikli araç kullanımının çevresel etkileri araştırılabilir. Ayrıca, dinamik taleplerin oluştuğu bir araç paylaşım sisteminde ortaya çıkan taşıma probleminin çözümüne yönelik çeşitli yaklaşımlar geliştirilebilir. Uygulanan UGKA algoritmasının parametreleri ile ilgili çeşitli duyarlılık analizleri ve parametre optimizasyonu konu edinilebilir. Algoritmanın komşu çözüm arama süreci farklı düğüm kaldırma operatörleri kullanılarak daha etkin hale getirilebilir. Ayrıca, elektrikli araçlarda kullanılan güncel teknolojiler (örneğin, hidrojen yakıtlı araçlar) dikkate alınarak çeşitli yaklaşımlar geliştirilebilir. Araç paylaşım sisteminde merkezi bir filo yönetimi yerine dağıtık yönetim dikkate alınarak, buna yönelik etmen tabanlı simülasyon yaklaşımı kullanılabilir. Son olarak, gelecek çalışmalarda, şarj yönetimi süreci farklılaştırılarak, batarya değişimini daha hızlı sağlayan yardımcı araçlar (ekiciler) sürece dahil edilip rotalama formülasyonu geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Agatz, N. A. H. et al. 2011. Dynamic ride-sharing: A simulation study in metro Atlanta. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45 (9):, 1450–1464. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.05.017>
- Alexander, L. P., González, M. C. 2015. Assessing the Impact of Real-time Ridesharing on Urban Traffic using Mobile Phone Data. *Proceedings of UrbComp'15*, 1–9.
- Alonso-mora, J. et al. 2018. On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(3):, E555–E555. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721622115>
- Apt, K. 2003. *Principles of constraint programming*. Cambridge university press.
- Artmeier, A., Haselmayr, J. 2010. The optimal routing problem in the context of battery-powered electric vehicles. *Workshop: CROCS*
- Baptiste, P., Laborie, P., Le Pape, C., & Nuijten, W. 2006. Constraint-based scheduling and planning. In *Foundations of artificial intelligence 2*, 761-799.
- Beck, J.C., Prosser, P., Selensky, E., 2003. Vehicle routing and job shop scheduling: What's the difference? In: *International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 267–276.
- Berbeglia, G., Cordeau, J.F., Laporte, G., 2012. A hybrid tabu search and constraint programming algorithm for the dynamic dial-a-ride problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24(3), 343–355.
- Berman, O. et al. 2008. Optimal Location of Discretionary Service Facilities. *Transportation Science*. <https://doi.org/10.1287/trsc.26.3.201>
- Bongiovanni, C., Kaspi, M., & Geroliminis, N. (2019). The electric autonomous dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 436-456. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.004>
- Booth, K. E., Beck, J. C. 2019. A constraint programming approach to electric vehicle routing with time windows. In *International Conference on Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research*, 129-145.
- Booth, K.E.C., Nejat, G., Beck, J.C., 2016. A constraint programming approach to multi-robot task allocation and scheduling in retirement homes. In: *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, 539–555.
- Booth, K.E.C., Tran, T.T., Nejat, G., Beck, J.C., 2016. Mixed-integer and constraint programming techniques for mobile robot task planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(1), 500–507.

- Botsman, R., Rogers, R. 2010. What's Mine Is Yours - How Collaborative Consumption is Changing the Way we live. [https://doi.org/10.1016/S0168-9525\(00\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9525(00)00086-X)
- Boyaci, B. et al. 2015. An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems. *European Journal of Operational Research*, 240(3):, 718–733. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.020>
- Bradley, S., Hax, A., Magnanti, T. 1977. *Applied mathematical programming*. Addison-Wesley.
- Brailsford, S.C., Potts, C.N., and Smith, B.M. 1999. Constraint satisfaction problems: algorithms and applications, *European Journal of Operational Research*, 119, 557.
- Brandstatter, G. et al. 2016. Overview of Optimization Problems in Electric Car-Sharing. Ed.: H. D. et al. (eds.) (Ed.) (Vol. 22), Springer International Publishing Switzerland 2016: , 333–348. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39120-5>
- Brown, L. 2009. PLAN B 4.0, Mobilizing to Save Civilization. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Chen, T. D. et al. 2016. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94:, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.08.020>
- Chen, T. D., Kockelman, K. M. 2016. Management of a Shared Autonomous Electric Vehicle Fleet. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2572(2572):, 37–46. <https://doi.org/10.3141/2572-05>
- Chung, S. H., Kwon, C. 2015. Multi-period planning for electric car charging station locations: A case of Korean expressways. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.029>
- Cici, B., Markopoulou, A. 2014. Assessing the potential of ride-sharing using mobile and social data: a tale of four cities. *UbiComp*, 201–211. <https://doi.org/10.1145/2632048.2632055>
- Conrad, R. G., Figliozzi, M. A. 2011. The Recharging Vehicle Routing Problem. *IIE Annual Conference. Proceedings; Norcross*, 1–8. Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/1190410233/abstract>
- Cordeau, J.-F., Jean-Francois 2006. A Branch-and-Cut Algorithm for the Dial-a-Ride Problem. *Operations Research*, 54(3):, 573–586. <https://doi.org/10.1287/opre.1060.0283>
- Correia, G. H. D. A. et al. 2014. The added value of accounting for users flexibility and information on the potential of a station-based one-way car-sharing system: An application in Lisbon, Portugal. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*. <https://doi.org/10.1080/15472450.2013.836928>
- Correia, G. H. de A., Antunes, A. P. 2012. Optimization approach to depot location and trip selection in one-way carsharing systems. *Transportation Research Part E: Logistics*

- and Transportation Review, 48(1):, 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.06.003>
- Dantzig, G. B., Ramser, J. H. 2008. The Truck Dispatching Problem. Management Science. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Deng, Y., Cardin, M. A. 2018. Integrating operational decisions into the planning of one-way vehicle-sharing systems under uncertainty. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 86(November 2017):, 407–424. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.11.018>
- Desaulniers, G. et al. 2016. Exact Algorithms for Electric Vehicle-Routing Problems with Time Windows. Operations Research. <https://doi.org/10.1287/opre.2016.1535>
- Erdoğan, S., Miller-Hooks, E. 2012. A Green Vehicle Routing Problem. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48(1):, 100–114. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Fagnant, D. J., Kockelman, K. M. 2014. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 40:, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.001>
- Fagnant, D. J., Kockelman, K. M. 2018. Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. Transportation, 45(1):, 143–158. <https://doi.org/10.1007/s11116-016-9729-z>
- Farhan, J., Chen, T. D. 2018. Impact of ridesharing on operational efficiency of shared autonomous electric vehicle fleet. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 93(July 2017):, 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.04.022>
- Felipe, Á. et al. 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. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.003>
- Fromherz, M. P. 2001. Constraint-based scheduling. In Proceedings of the 2001 American Control Conference.(4), 3231-3244.
- Fu, L. 2002. Scheduling dial-a-ride paratransit under time-varying, stochastic congestion. Transportation Research Part B: Methodological. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(01\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00014-5)
- Garey, M. R. 1979. A Guide to the Theory of NP-Completeness. Computers and intractability.
- Gedik, R., Kirac, E., Milburn, A.B., Rainwater, C., 2017. A constraint programming approach for the team orienteering problem with time windows. Computers & Industrial Engineering, 107, 178–195.
- Goeke, D., Schneider, M. 2015. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. European Journal of Operational Research, 245(1):, 81–99.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.049>

He, L. et al. 2016. Service Region Design for Urban Electric Vehicle Sharing Systems. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2849400>

Hiermann, G. et al. 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. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.038>

Jaw, J. J. et al. 1986. A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. *Transportation Research Part B*. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(86\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0191-2615(86)90020-2)

Jorge, D. et al. 2014. With Simulated Relocation Policies in One-Way Carsharing Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(4):, 1667–1675. <https://doi.org/10.1109/Tits.2014.2304358>

Jorge, D., Correia, G. 2013. Carsharing systems demand estimation and defined operations: A literature review. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*.

Jung, J. et al. 2013. Design and Modeling of Real-time Shared-Taxi Dispatch Algorithms. *TRB 92nd Annual Meeting Compendium of Papers*.

Kanet, J. J., Ahire, S.L., & Gorman, M.F. 2004. Constraint programming for scheduling. *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis*.

Katzev, R. 2003. Car Sharing: A New Approach to Urban Transportation Problems. *Analyses of Social Issues and Public Policy*. <https://doi.org/10.1111/j.1530-2415.2003.00015.x>

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. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.013>

Kinable, J., van Hoesve, W.J., Smith, S.F., 2016. Optimization models for a real-world snow plow routing problem. In: *International Conference on AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, 229-245.

Lam, E., Van Hentenryck, P., Kilby, P., 2015. Joint vehicle and crew routing and scheduling. In: *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, 654–670.

Lenz, B., Fraedrich, E. 2016. New Mobility Concepts and Autonomous Driving: The Potential for Change. *Autonomous Driving : Autonomous Driving*, Ed.: W. H. Maurer M., Gerdes J., Lenz B. (Ed.), Springer, Berlin, Heidelberg: , 173–191. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_9

Levin, M. W. et al. 2017. A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application. *Computers*,

Environment and Urban Systems, 64:, 373–383.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.04.006>

Li, X. et al. 2016. Design framework of large-scale one-way electric vehicle sharing systems: A continuum approximation model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 88:, 21–45. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.014>

Liang, X. et al. 2016. Optimizing the service area and trip selection of an electric automated taxi system used for the last mile of train trips. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93(2016):, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.006>

Liang, X. et al. 2018. Applying a Model for Trip Assignment and Dynamic Routing of Automated Taxis with Congestion: System Performance in the City of Delft, The Netherlands. *Transportation Research Record*.
<https://doi.org/10.1177/0361198118758048>

Litman, T. 2015. Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. <https://doi.org/10.1613/jair.301>

Liu, C., Aleman, D.M., Beck, J.C., 2018. Modelling and solving the senior transportation problem. In: *International Conference on the Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research*, 412–428.

Loeb, B. et al. 2018. Shared autonomous electric vehicle (SAEV) operations across the Austin, Texas network with charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89(February):, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.019>

Lokhandwala, M., Cai, H. 2018. Dynamic ride sharing using traditional taxis and shared autonomous taxis: A case study of NYC. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 97(October):, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.10.007>

Ma, J. et al. 2017. Designing optimal autonomous vehicle sharing and reservation systems: A linear programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 84:, 124–141. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.022>

Martin, E. W., Shaheen, S. A. 2011. Greenhouse gas emission impacts of carsharing in North America. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2158539>

Martinez, L. M., Viegas, J. M. 2017. Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1):, 13–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.005>

Miao, H. et al. 2019. Autonomous connected electric vehicle (ACEV)-based car-sharing system modeling and optimal planning: A unified two-stage multi-objective optimization methodology. *Energy*, 169:, 797–818. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.066>

- Omidvar, A., Tavakkoli-Moghaddam, R. 2012. Sustainable vehicle routing: Strategies for congestion management and refueling scheduling. 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012 : 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012, , 1089–1094. <https://doi.org/10.1109/EnergyCon.2012.6347732>
- Pavone, M. et al. 2012. Robotic load balancing for mobility-on-demand systems. *International Journal of Robotics Research*, 31(7):, 839–854. <https://doi.org/10.1177/0278364912444766>
- Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation science*, 40(4), 455-472.
- Santi, P. et al. 2013. Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks. , 111(37):, 13290–13294. <https://doi.org/10.1073/pnas.1403657111>
- Scheltes, A., de Almeida Correia, G. H. 2017. Exploring the use of automated vehicles as last mile connection of train trips through an agent-based simulation model: An application to Delft, Netherlands. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1):, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.004>
- Schneider, M. et al. 2014. The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. *Transportation Science*, 48(4):, 500–520. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0490>
- Schrijver, A. 1998. *Theory of linear and integer programming*. John Wiley & Sons
- Shaheen A, S. et al. 2006. Carsharing in North America: Market Growth, Current Developments, and Future Potential. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- Shaheen, S. 1999. *Dynamics in Behavioral Adaptation to a Transportation Innovation: A Case Study of Carlink—A Smart Carsharing System*. Institute of Transportation Studies.
- Shaheen, S. A. et al. 2015. One-way carsharing’s evolution and operator perspectives from the Americas. *Transportation*, 42(3):, 519–536. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9607-0>
- Shaheen, S. A., Cohen, A. P. 2012. Carsharing and Personal Vehicle Services: Worldwide Market Developments and Emerging Trends. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7(1):, 5–34. <https://doi.org/10.1080/15568318.2012.660103>
- Shaheen, S. A., Sperling, D., and Wagner, C. 1999. *A Short History of Carsharing in the 90’s*. Institute of Transportation Studies. <https://doi.org/10.1007/s11116-007-9132-x>
- Shaheen, S. et al. 1997. Carsharing in Europe and North American: Past, Present, and Future. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(2):, 107–123. <https://doi.org/10.1068/a201285>

- Shaheen, S. et al. 1999. A Short History of Carsharing in the 90's. .
- Shaw, P.,1998. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In: International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, 417–431.
- Shen, Y. et al. 2018. Integrating shared autonomous vehicle in public transportation system: A supply-side simulation of the first-mile service in Singapore. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 113(June 2017):, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.04.004>
- Stiglic, M. et al. 2015. The benefits of meeting points in ride-sharing systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 82:, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.025>
- Vali, M., Salimifard, K., 2017. A constraint programming approach for solving multiple traveling salesman problem. In: The Sixteenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation.
- Vasconcelos, A. S. et al. 2017. Environmental and financial impacts of adopting alternative vehicle technologies and relocation strategies in station-based one-way carsharing: An application in the city of Lisbon, Portugal. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57(October):, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.019>
- Wang, H, Cheu, R. . 2014. Operations of a Taxi Fleet for Advance Reservations Using Electric Vehicles and Charging Stations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2352(1):, 1–10. <https://doi.org/10.3141/2352-01>
- Wang, Haixing, Shen, J. 2007. Heuristic approaches for solving transit vehicle scheduling problem with route and fueling time constraints. *Applied Mathematics and Computation*, 190(2):, 1237–1249. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.02.141>
- Weikl, S., Bogenberger, K. 2013. Relocation strategies and algorithms for free-floating car sharing systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 5(4):, 100–111. <https://doi.org/10.1109/MITS.2013.2267810>
- Wen, J. et al. 2017. Rebalancing Shared Mobility-on-Demand Systems : a Reinforcement Learning Approach. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC): Workshop : 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC): Workshop, , 220–225.
- Winston W., L., 2003. Operation Research Applications and Algorithms. *Duxbury Press*, 4. Basim.
- Worley, O. et al. 2012. Simultaneous vehicle routing and charging station siting for commercial electric vehicles. 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2012, 1–3. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183279>
- Zhang, R., Pavone, M. 2016. Control of robotic mobility-on-demand systems: A

queueing-theoretical perspective. *International Journal of Robotics Research*, 35(1–3):, 186–203. <https://doi.org/10.1177/0278364915581863>

Zhang, W. et al. 2015. The Performance and Benefits of a Shared Autonomous Vehicles Based 2 Dynamic Ridesharing System: An Agent-Based Simulation Approach. *Transportation Research Board*, 15.

EKLER

EK 1 Yıkma katsayısı ($d_{destruction}$) 0,01 olan çözümler

EK 2 Yıkma katsayısı ($d_{destruction}$) 0,1 olan çözümler

EK 3 Yıkma katsayısı ($d_{destruction}$) 0,4 olan çözümler

EK 2 Yıkma katsayısı ($d_{destruction}$) 0,5 olan çözümler

EK 1 Yıkma Katsayısı $d_{destruction}$ 0,01 olan çözümler

Veri Seti	Tamsayılı prog. çözümü	Çözüm Süresi (sn)	Kısıt prog. çözümü	Çözüm Süresi (sn)	Sezgisel yaklaşım	Çözüm Süresi (sn)
a2-16	288*	6	288*	120	288*	180
a2-20	344*	78	347	120	348	180
a2-24	421*	900	427	120	421*	180
a3-18	298*	5400	308	120	298*	210
a3-24	343*	2160	347	120	350	240
a3-30	542	7200	372**	120	373	270
a3-36	682	7200	459	120	434**	330
a4-16	285	7200	274	120	274**	210
a4-24	372**	7200	386	120	398	211
a4-32	570	7200	420	120	412**	210
a4-40	720	7200	468**	120	483	330
a4-48	-	7200	628	120	617**	270
a5-40	-	7200	509**	120	516	330
a5-50	-	7200	655**	120	663	360

* optimal çözüm

** bilinen en iyi çözüm

EK 2 Yıkma Katsayısı $d_{destruction}$ 0,1 olan çözümler

Veri Seti	Tamsayılı prog. çözümü	Çözüm Süresi (sn)	Kısıt prog. Çözümü	Çözüm Süresi (sn)	Sezgisel yaklaşım	Çözüm Süresi (sn)
a2-16	288*	6	288*	120	288*	180
a2-20	344*	78	347	120	348	180
a2-24	421*	900	427	120	421*	180
a3-18	301*	5400	308	120	305	180
a3-24	343*	2160	347	120	354	210
a3-30	542	7200	372	120	369**	270
a3-36	682	7200	459	120	411**	530
a4-16	285	7200	274	120	271**	330
a4-24	372**	7200	386	120	385	240
a4-32	570	7200	420	120	350**	300
a4-40	720	7200	468	120	463**	360
a4-48	-	7200	628	120	601**	270
a5-40	-	7200	509	120	447**	630
a5-50	-	7200	655**	120	658	330

* optimal çözüm

** bilinen en iyi çözüm

EK 3 Yıkma Katsayısı $d_{destruction}$ 0,4 olan çözümler

Veri Seti	Tamsayılı prog. çözümü	Çözüm Süresi (sn)	Kısıt prog. Çözümü	Çözüm Süresi (sn)	Sezgisel yaklaşım	Çözüm Süresi (sn)
a2-16	288*	6	288*	120	288*	180
a2-20	344*	78	347	120	344*	300
a2-24	421*	900	427	120	421*	300
a3-18	298*	5400	308	120	298*	180
a3-24	343*	2160	347	120	343*	160
a3-30	542	7200	372	120	366**	360
a3-36	682	7200	459	120	427**	211
a4-16	285	7200	274	120	269**	300
a4-24	372	7200	386	120	368**	140
a4-32	570	7200	420	120	374**	220
a4-40	720	7200	468	120	460**	240
a4-48	-	7200	628	120	561**	500
a5-40	-	7200	509	120	468**	272
a5-50	-	7200	655	120	640**	272

* optimal çözüm

** bilinen en iyi çözüm

EK 4 Yıkma Katsayısı $d_{destruction}$ 0,5 olan çözümler

Veri Seti	Tamsayılı prog. çözümü	Çözüm Süresi (sn)	Kısıt prog. Çözümü	Çözüm Süresi (sn)	Sezgisel yaklaşım	Çözüm Süresi (sn)
a2-16	288*	6	288*	120	288*	180
a2-20	344*	78	347	120	348	210
a2-24	421*	900	427	120	421*	300
a3-18	298*	5400	308	120	298*	270
a3-24	343*	2160	347	120	345	300
a3-30	542	7200	372**	120	380	330
a3-36	682	7200	459	120	447**	300
a4-16	285	7200	274	120	271**	240
a4-24	372**	7200	386	120	378	180
a4-32	570	7200	420	120	392**	180
a4-40	720	7200	468	120	466**	180
a4-48	-	7200	628	120	599**	575
a5-40	-	7200	509	120	459**	300
a5-50	-	7200	655**	120	692	272

* optimal çözüm

** bilinen en iyi çözüm

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:Merve KÖSE KÜÇÜK
Doğum yeri ve Tarihi	:Bursa, 05/08/1991
Yabancı Dili	:İngilizce
Eğitim Durumu	
Lise	:Hürriyet Anadolu Lisesi, 2009.
Lisans	:Bursa Uludağ Üniversitesi, 2013.
Yüksek Lisans	:Bursa Uludağ Üniversitesi, 2016.
Çalıştığı Kurum	:Bursa Uludağ Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, 2014-....

İletişim : mervekose@uludag.edu.tr

Yayınları :

1. Uluslararası hakemli dergilerdeki makaleler

- Cavdur, F., Kose, M. (2016). A fuzzy logic and binary-goal programming-based approach for solving the exam timetabling problem to create a balanced-exam schedule. *International Journal of Fuzzy Systems*, 18, 119-129.
- Cavdur, F., Kose-Kucuk, M.,Sebatli, A. (2016). Allocation of temporary disaster response facilities under demand uncertainty: An earthquake case study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 19, 159-166.
- Cavdur, F., Sebatli-Saglam, A., Kose-Kucuk, M. (2020). A spreadsheet-based decision support tool for temporary-disaster-response facilities allocation. *Safety Science*, 124, 104581.

- Cavdur, F., Kose-Kucuk, M., Sebatli, A. (2021). Allocation of temporary disaster-response facilities for relief-supplies distribution: a stochastic optimization approach for Afterdisaster uncertainty. *Natural Hazards Review*, 22(1), 05020013.
- Cavdur, F., Sebatli, A., Kose-Kucuk, M., Rodoplu, C. (2019). A two-phase binary-goal programming-based approach for optimal project-team formation. *Journal of the Operational Research Society*, 70(4), 689-706.
- Cavdur, F., Sebatli-Saglam, A., Kose-Kucuk, M. (2021). A scenario-based decision support system for allocating temporary-disaster-response facilities. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3), 1500-1514.
- Cavdur, F., SEBATLI, A., Küçük, M. K. (2019). Öğrenci-proje takımı oluşturma problemi için grup-karar verme ve hedef programlama temelli çözüm yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 505-522.

2. Ulusal hakemli dergilerdeki makaleler

- Cavdur, F., Değirmen, S., Küçük, M. K. (2018). Sınav Çizelgeleme Problemlerinde Homojen Sınav Dağılımının Oluşturulması İçin Kümeleme Ve Hedef Programlama Temelli Bir Yaklaşım. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(1), 167-188.
- Küçük, M. K., Tellioğlu, B., Cavdur, F., (2020). Sınav Çizelgeleme Probleminde Sınıf Ve Gözetmen Atamaları İçin İki Aşamalı Bir Çözüm Yaklaşımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 789-812.
- Küçük, M. K., Cavdur, F., (2019). Zaman Pencereli Bölünmüş-Dağıtım Araç Rotalama İle Afet Sonrası Yardım Malzemesi Dağıtım Planlaması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 127-146.

- Küçük, M. K., Cavdur, F., (2018). Afet Sonrası Yardım Malzemesi Dağıtımını İçin Rota Üretme-Elleme Algoritması Ve Tamsayı Programlama Kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(4), 27-40.

3. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler

- Kose-Kucuk, M., Cavdur, F., Sebatli, A., A Two-Phase Solution Approach For Allocation Of Temporary Disaster Response Facilities And Transportation Planning. In *Lm-Scm 2016 Xiv. International Logistics and Supply Chain Congress*, (2016).
- Kose-Kucuk, M., Cavdur, F., A Fuzzy Logic and Binary-Goal Programming Based Approach for Solving the Exam Timetabling Problem. *International Engineering and Technology Research Congress (IETRC-16)*, 2-3 June, Antalya, Turkey, (2016).
- Kose-Kucuk, M., Cavdur, F., A Fuzzy Automatic New Topic Identification System: FANTIS, *5th International Fuzzy Systems Symposium (FUZZYSS'17)*, 14-15 October, Ankara, Turkey, (2017)

4. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler

- Kose-Kucuk, M., Cavdur, F., Sebatli, A. 2016. A Two-Phase Binary-Goal Programming Based Approach for Optimal Project-Team Formation. *International Engineering and Technology Research Congress (IETRC-16)*, 2-3 June, Antalya, Turkey.
- Kose-Kucuk, M., Cavdur, F. 2016. A Fuzzy Logic and Binary-Goal Programming Based Approach for Solving the Exam Timetabling Problem. *International Engineering and Technology Research Congress (IETRC-16)*, 2-3 June, Antalya, Turkey.
- Köse-Küçük, M., Lök, B., Aksoy, A., Atılgan, B., Özdemir, Ş. 2016. Bir Otomotiv Yan Sanayi İşletmesinde Yurtdışı Müşterileri ile Bütünleşik Çekme Sistemi Uygulaması. *Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 36.Ulusal Kongresi*, 13-15- Temmuz, İzmir, Türkiye.

- Kose-Kucuk, M., Cavdur, F., Sebatli, A. 2017. Stokastik Optimizasyon Yaklaşımıyla Geçici Afet Müdahale Tesisleri Yerleşim Probleminin Çözümü, Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği (YAEM) 37. Ulusal Kongresi, 5-7 Temmuz, İstanbul, Türkiye.
- Kose-Kucuk, M., Cavdur, F., 2018. Zaman Pencereyi Bölünmüş-Dağıtım Araç Rotalama ile Afet Sontası Yardım Malzemesi Dağıtım Planlaması, Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği (YAEM) 37. Ulusal Kongresi, 26-29 Haziran, Eskişehir Türkiye.