



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim Yönetimi Bilim Dalı

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN DETAYLI ENERJİ TÜKETİMİNİ  
DİKKATE ALAN DİNAMİK GEZGİN SATICI PROBLEMİ**

Volkan ÜNAL

Doktora Tezi

Ankara, 2023

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN DETAYLI ENERJİ TÜKETİMİNİ  
DİKKATE ALAN DİNAMİK GEZGİN SATICI PROBLEMİ**

Volkan ÜNAL

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim Yönetimi Bilim Dalı

Doktora Tezi

Ankara, 2023

## KABUL VE ONAY

Volkan ÜNAL tarafından hazırlanan "Elektrikli Araçların Detaylı Enerji Tüketimini Dikkate Alan Dinamik Gezgin Satıcı Problemi" başlıklı bu çalışma, 09/01/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

---

Prof. Dr. Mine ÖMÜRGÖNÜLŞEN (Başkan)

---

Doç. Dr. Mehmet SOYSAL (Danışman)

---

Doç. Dr. Kazım Barış ATICI (Üye)

---

Doç. Dr. Çağrı KOÇ (Üye)

---

Doç. Dr. Sedat BELBAĞ (Üye)

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylım.

Prof.Dr. Uğur ÖMÜRGÖNÜLŞEN

Enstitü Müdürü

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinleri yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H.Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. <sup>(1)</sup>
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ..... ay ertelenmiştir. <sup>(2)</sup>
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. <sup>(3)</sup>

02/02/2023

Volkan ÜNAL

<sup>1</sup>“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir \*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.  
Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

\* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

## ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu, **Doç. Dr. Mehmet SOYSAL** danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

**Volkan ÜNAL**

Eşim Begüm EMRALİ ÜNAL'a ve  
Oğullarımız Alp ÜNAL ile Ali ÜNAL'a

## TEŞEKKÜR

*Doktora eğitimim boyunca emeğini esirgemeyen, zaman fark etmeksizin tecrübe ve bilgilerini bana aktarmaktan kaçınmayan ve yüksek çalışma motivasyonu ile bana yol gösterici olan değerli danışmanım Doç. Dr. Mehmet Soysal'a teşekkürlerimi sunarım.*

*Tez jürimde yer alan ve bana yol gösterici olan değerli jüri üyelerim Prof. Dr. Mine Ömürgönülşen'e, Doç. Dr. Kazım Barış Atıcı'ya, Doç. Dr. Çağrı Koç'a ve Doç. Dr. Sedat Belbağ'a teşekkürlerimi sunarım.*

*Tez çalışmamdaki katkıları nedeniyle Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Çimen'e, Arş. Gör. Erencan Yavrucu'ya ve değerli arkadaşım Dr. Ayşe Aydın Akkurt'a teşekkürlerimi sunarım.*

*Doktora eğitimim boyunca destek veren Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi sunarım.*

*Tez çalışmam boyunca manevi olarak desteğini ve anlayışını esirgemeyen değerli arkadaşım Fatma Soysal'a, ayrıca doktora eğitimim boyunca bana destek olan iş arkadaşlarım Fatih Aydemir, Mehmet Emin Duran ve Engin Öztürk'e şükranlarımı sunarım.*

*Doktora eğitimim sürecinde yoğun çalışma dönemlerimde, varlıkları ile aileme eksikliğini hissettirmeyen kayınvalidem Saliha Emrali ve kayınpederim Cem Emrali'ye teşekkürlerimi sunarım.*

*Yaşantım boyunca desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen canım ailem, başta annem Münevver Ünal ve babam Yılmaz Ünal'a, her zaman bana örnek ve yol gösterici olan abim Yalçın Ünal ve ablam Süheyla Tüzün'e bir teşekkürü borç bilirim.*

*Son olarak hayatımın her aşamasında yer alan, sevgisi ile bana daima mutluluk, huzur ve güç veren sevgili eşim Begüm Emrali Ünal'a, varlıkları ile bana enerji veren, mutluluk kaynaklarım, canım oğullarım Alp Ünal ve Ali Ünal'a teşekkürü bir borç bilirim.*

## ÖZET

ÜNAL, Volkan. *Elektrikli Araçların Detaylı Enerji Tüketimini Dikkate Alan Dinamik Gezgin Satıcı Problemi*, Doktora Tezi, Ankara, 2023.

Elektrikli araçlar, konvansiyonel araçlara oranla çevreye daha az zarar verdiklerinden son yıllarda özellikle şehir içinde lojistik operasyonlarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Hem araç teknolojilerindeki gelişim, hem de bilgi teknolojilerindeki ilerleme sayesinde araçlardan anlık olarak elde edilen veriler, araç rotalama yapılırken daha verimli ve daha az maliyetli dağıtım planlarının oluşumuna temel oluşturmuştur. Bu çalışmada ilk olarak seyahat esnasında araç hızlarının dinamik olarak değişebildiği varsayımıyla ele alınan deterministik batarya tüketimi altında dinamik Gezgin Satıcı Problemi için dinamik programlama tabanlı ve bağlantı eleme yöntemine dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Büyük ölçekli problemlerin çözümü için önerilen algoritma 90 problem üzerinde uygulanmış ve bu problemlerin 51 tanesinde önerilen algoritmanın Kısıtlı Dinamik Programlama algoritmasından daha iyi sonuçlar ürettiği gözlenmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan trafik yoğunluğunun belirsizliği nedeniyle batarya tüketim hızının kesin olarak bilinmemesi probleminde, belirsiz batarya tüketimi altında dinamik Gezgin Satıcı Problemi için dinamik programlama tabanlı ve Prim algoritması destekli sezgisel bir algoritma önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile trafik yoğunluğunun ve ihtiyaç duyulan batarya miktarının önceden kesin olarak bilinmediği, her ikisinin taşıma süreci içinde değişiklik gösterdiği durumlarda şehir içi trafik yoğunluğunun, CO<sub>2</sub> salınımlarının ve elektrikli araç sürücülerinin menzil kaygılarının (range anxiety) azaltılmasına katkı sağlayacak taşıma planlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Büyük ölçekli 270 problem üzerinde yapılan analizler, önerilen algoritmanın Kısıtlı Dinamik Programlama algoritmasına göre, toplam enerji tüketimi açısından ortalama %6,87 daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Detaylı enerji tüketimini dikkate alan her iki karar destek modeli de kısa mesafeli yük taşımacılığında karşılaşılan büyük ölçekli rotalama problemleri için dağıtım planlarının oluşturulmasında kullanılabilir.

### Anahtar Sözcükler

Sürdürülebilir Lojistik, Dinamik Gezgin Satıcı Problemi, Elektrikli Araçlar, Belirsiz Batarya Tüketimi, Dinamik Programlama



## ABSTRACT

ÜNAL, Volkan. *Dynamic Travelling Salesman Problem Considering Explicit Energy Consumption of Electric Vehicles*, PhD Dissertation, Ankara, 2023.

In recent years, electric vehicles have started to be used frequently in logistics operations, especially in cities, since they cause less damage to the environment compared to conventional vehicles. Instantaneous data from vehicles obtained with the help of the development in vehicle technologies and the progress in information technologies enable to have more efficient and less costly distribution routes. In this study, first, the dynamic travelling salesman problem, which is taken into account with the assumption that vehicle speeds can change dynamically during travel, is addressed. An algorithm based on dynamic programming and the link elimination method have been developed for the problem under the conditions of deterministic battery consumption. The proposed approach has been applied to 90 problems. In 51 of those problems, it has been found to perform better than the Restricted Dynamic Programming Algorithm. The other problem covered by the study is the dynamic travelling salesman problem with uncertain battery consumption, where the battery consumption rate is not precisely known due to the uncertainty of the traffic density. A dynamic programming-based and Prim's algorithm supported heuristic algorithm have been proposed for the problem. With the proposed approach, the purpose is to obtain transportation plans that will aid in lowering urban traffic density, emissions, and range anxiety among electric vehicle drivers in circumstances where traffic density and required battery capacity are both uncertain in advance and change throughout the transportation process. It has been found out that the proposed algorithm outperformed the Restricted Dynamic Programming algorithm in terms of total energy consumption by an average of 6.87%, based on an analysis of 270 large-scale problems. For large-scale routing problems that arise in short-haul freight transportation, distribution plans can be made using either of the decision support models that account for precise energy use.

### Key Words

Sustainable Logistics, Dynamic Travelling Salesman Problem, Electric Vehicles, Stochastic Battery Depletion, Dynamic Programming.

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY .....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI.....	ii
ETİK BEYAN.....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
KISALTMALAR .....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
GİRİŞ .....	1
1.1 Araştırma Tasarımı.....	3
1.2 Tez Taslağı .....	4
1. BÖLÜM.....	6
ŞEHİR İÇİ YÜK TAŞIMACILIĞI .....	6
1.1 Son Kilometre Koli Teslimatı.....	10
1.2 Araç Rotalama Problemleri .....	14
2. BÖLÜM.....	20
DİNAMİK GEZGİN SATICI PROBLEMİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI .....	20
3. BÖLÜM.....	31
DETERMİNİSTİK BATARYA TÜKETİMİ ALTINDA ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DİNAMİK GEZGİN SATICI PROBLEMİ.....	31
3.1 Problem Tanımı.....	31
3.2 Dinamik Programlama Algoritması .....	32

<b>3.3</b>	<b>Kısıtlı Dinamik Programlama Sezgiseli Tanıtımı.....</b>	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>RDP-Bağlantı Eleme Sezgisel Yöntemi .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5</b>	<b>Nümerik Analizler .....</b>	<b>35</b>
3.5.1	Örnek Vaka Tanıtımı.....	35
3.5.2	Örnek Vaka Çözümü.....	36
3.5.3	Dinamik Olarak Değişen Hızları Dikkate Almanın Faydası.....	37
3.5.4	Geliştirilen Sezgisel Yaklaşımının Performans Değerlendirmesi .....	38
<b>3.6</b>	<b>Analiz Sonuçları .....</b>	<b>44</b>
<b>4.</b>	<b>BÖLÜM.....</b>	<b>45</b>
	<b>BELİRSİZ BATARYA TÜKETİMİ ALTINDA ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN</b>	
	<b>DİNAMİK GEZGİN SATICI PROBLEMİ .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Problem Tanımı.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Stokastik Enerji Hesaplaması .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3</b>	<b>Dinamik Programlama Formülasyonu .....</b>	<b>47</b>
<b>4.4</b>	<b>Çözüm Yaklaşımı: Kısıtlı Dinamik Programlama ve Prim Algoritması ..</b>	<b>49</b>
<b>4.5</b>	<b>Nümerik Analizler .....</b>	<b>52</b>
4.5.1	Örnek Vaka Tanıtımı.....	53
4.5.2	Örnek Vaka Analizleri.....	55
4.5.3	Parametre Testleri ile Sezgisel Performans Değerlendirmesi .....	58
4.5.4	Geliştirilen Sezgisel Yaklaşımının Performans Değerlendirmesi .....	60
<b>4.6</b>	<b>Analiz Sonuçları .....</b>	<b>63</b>
	<b>SONUÇ VE TARTIŞMA.....</b>	<b>64</b>
	<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>68</b>
	<b>EKLER.....</b>	<b>82</b>
	<b>EK 1 ORJİNALLİK FORMU .....</b>	<b>85</b>
	<b>EK 2 ETİK KURUL MUAFİYET FORMU.....</b>	<b>87</b>

## KISALTMALAR

DP: Dinamik Programlama

RDP: Kısıtlı Dinamik Programlama

MYA: Minimum Yayılan Ağaç

ARP: Araç Rotalama Problemi

EARP: Elektrikli Araç Rotalama Problemi

TPG: Temel Performans Göstergesi

GPS: Global Konumlandırma Sistemi

CBS: Coğrafi Bilgi Sistemi

BM: Birleşmiş Milletler

OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development

İHA: İnsansız Hava Aracı

## TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1: Literatür Taraması Yapan Çalışmalar.....	25
Tablo 2: Enerji Tüketimi Hesaplaması İçin Gerekli Parametreler.....	32
Tablo 3: Noktalar Arası Mesafeler (metre).....	35
Tablo 4: Noktalar Arası Hız Verileri (metre/saniye) .....	36
Tablo 5: Elektrikli Araca İlişkin İhtiyaç Duyulan Parametre Değerleri .....	36
Tablo 6: İki Farklı Amaç Altında Elde Edilen Optimal Dağıtım Planları ve Temel Performans Göstergeleri Değerleri .....	37
Tablo 7: Statik ve Dinamik Durumlar Altında Elde Edilen Optimal Dağıtım Planları ve Temel Performans Göstergeleri Değerleri .....	38
Tablo 8: Problem Bilgileri .....	39
Tablo 9: Her Bir Problem İçin RDP ve RDP-Bağlantı Azaltma Sezgisel Yaklaşımları Kullanılarak Elde Edilen En İyi Uygulanabilir Çözümler .....	39
Tablo 10: Enerji Tüketimi Hesaplaması İçin Gerekli Parametreler.....	46
Tablo 11: Örnek Vaka Analizleri İçin Kullanılan Parametre Ayarları .....	53
Tablo 12: Örnek Vaka Analizlerinde Kullanılan Mesafe (km) Tablosu.....	54
Tablo 13: Örnek Vaka Analizlerinde Kullanılan Her Bir Yaydaki Minimum Hızlar (m/sn) .....	54
Tablo 14: Örnek Vaka Analizlerinde Kullanılan Her Bir Yaydaki Maksimum Hızlar (m/sn) .....	55
Tablo 15: Farklı Hedefler Altında Örnek Vakanın Optimal Çözümleri .....	56
Tablo 16: Statik ve Dinamik Ayarlar Altında Örnek Vaka İçin Elde Edilen Optimum Çözümler.....	56
Tablo 17: Farklı Hizmet Seviyesi ve CoV Varsayımları Altında Örnek Vaka Çözümleri .....	57
Tablo 18: Farklı H Ayarları İle RDP ve RDP-Prim Algoritmaları Kullanılarak Ele Alınan Her Sorun İçin En İyi Çözümler .....	61
Tablo 19: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) - Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi, 2 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler .....	82
Tablo 20: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) - Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi, 4 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler .....	82

Tablo 21: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) - Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi, 6 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler .....	83
Tablo 22: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi, 8 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler .....	83
Tablo 23: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) - Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi, 10 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler .....	84

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Çalışma Tasarımı .....	5
Şekil 2: Şehir Lojistiği Çerçevesi (Cardenas vd. 2017) .....	11
Şekil 3: Tüm Problem ve H Seviyesi Çiftleri İçin RDP ve RDP- Bağlantı Azaltma Sezgisel Algoritmaları Kullanıldığı Durumlarda Enerji Tüketimleri Arası Elde Edilen Yüzdeler Farkları.....	43
Şekil 4: Kısıtlı Dinamik Programlama ve Prim Algoritması .....	52
Şekil 5: Çeşitli CoV Ayarları Altındaki Sonuçlar ( $z=1.96$ ).....	59
Şekil 6: Çeşitli Hizmet Seviyeleri Altındaki Sonuçlar ( $CoV=0.2$ ) .....	60
Şekil 7: Klasik RDP Algoritmasının ve RDP-Prim Algoritmasının Problemdaki Düğüm Sayısı Arttıkça Gerekli Enerji ve Hesaplama Süresi Değişiklikleri İle İlgili Karşılaştırma Sonuçlarının Özeti.....	61

## GİRİŞ

Dünya nüfusunun artışıyla birlikte bireylerin yaşamlarını sürdürmelerinde etkili olan iş, eğitim, sağlık ve kültür olanaklarına erişim gibi faktörler şehirlerin kalabalıklaşmasıyla sonuçlanmıştır. Hava, gürültü ve görüntü kirliliği gibi çevre sorunları ve trafik sorunu şehirlerdeki nüfus yoğunluğuyla bağlantılı problemler olarak görülmektedir. Yolcu taşımacılığı ve insanların ihtiyaçlarını karşılamak üzere üretilen mal ve hizmetlerin veya bunların üretimi için gerekli olan tedarik zinciri ürünlerinin taşınmasına yönelik yük taşımacılığı faaliyetlerinin doğru planlaması sürekli büyümeye devam eden şehirler için önem kazanmaktadır. Gelecek nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakma motivasyonu son yıllarda gündemde olan sürdürülebilir kalkınma amacıyla uyumlu olarak, tedarik zinciri işlemlerinin yönetiminde sadece ekonomik faktörler değil (maliyet minimizasyonu, kâr maksimizasyonu vb.) aynı zamanda çevresel (enerji kullanımı, emisyon salınımı, atık bırakılması vb.) ve sosyal faktörler de (trafik sıkışıklığı, işçi çalışma süresi, vb.) dikkate alınmaya başlanmıştır (Koç, 2019).

Araştırmacılar tarafından geliştirilen nicel yaklaşımlar (optimizasyon teknikleri, sezgisel yöntemler vb.) ekonomik, çevresel ve sosyal faktörleri dikkate alarak tedarik zinciri ve lojistik yönetiminde karşılaşılan stratejik, taktiksel veya operasyonel problemleri çözümede karar vericilere yardımcı araçlar olarak sunulmaktadır (Soysal ve Bloemhof-Ruwaard, 2017). Geliştirilen modellerin gerçek hayat problemleri üzerinde uygulanması sonucunda elde edilen faydaların sunulduğu akademik çalışmalar büyük ilgi görmektedir. Konu ile ilgili makaleler üzerinde yapılan çalışmalarda (örn. Coelho vd., 2016, Demir vd., 2014) gerçek hayat uygulamalarına olan akademik ilgi rahatlıkla gözlemlenebilir.

Bu çalışmada, tedarik zinciri ve lojistik işlemleri kapsamında dinamik dağıtım problemleri üzerinde durulmaktadır. Bu bağlamda, dağıtım planlama aşamasında operasyonel seviyede karşılaşılan temel araç rotalama problemlerinden biri olan dinamik Gezgin Satıcı Problemi (Travelling Salesman Problem, TSP) ele alınmaktadır.

Gezgin Satıcı Problemi, belirli sayıdaki müşterilerin taleplerini karşılamak üzere bir başlangıç noktasından (depo , dağıtım merkezi vb.) hareket edilerek her bir müşterinin ziyaret edilmesini mümkün kılan bir araç rotasının belirlenmesini amaçlamaktadır. Söz konusu problemin farklı varyasyonları (zamana bağımlı hız altında rotalama, mesafe veya



zaman kısıtlı rotalama, statik rotalama, zaman pencereleri dikkate alınarak yapılan rotalama vb.) ilgili literatürde araştırmacılar tarafından ele alınmıştır (Eksioglu vd., 2009; Braekers vd., 2016). Bu çalışmaya konu olan iki farklı dinamik Gezgin Satıcı Problemi ise temel olarak lojistik ağında yer alan aktörlerin (depo, müşteriler) konumlarının ve müşterilerin taleplerinin bilindiği varsayımına dayanmakta; fakat dağıtım faaliyetleri sürdürülürken problem ile ilgili araç hızı parametresinde değişim gözlenebileceğini de göz önünde bulundurmaktadır. Farklı sektörlerde yer alan tedarik zinciri işlemlerinde dinamik Gezgin Satıcı Problemiyle sıklıkla karşılaşılmaktadır. Sağlık sektöründe faaliyet gösteren eczanelerin günlük ilaç ve ıtriyat, gıda sektöründe yer alan süpermarketlerin ürün, akaryakıt sektöründe faaliyet gösteren istasyonların yakıt taleplerinin karşılanması, eğitim sektöründe öğrencilerin okul servislerinin güzergahlarının belirlenmesi, belediyelerin geri dönüşüm kapsamında atık ve çöp toplama faaliyetlerinin planlanması gezgin satıcı ve araç rotalama problemleriyle karşılaşılan örneklerdendir. Bu problemlerde dağıtım faaliyetleri sürdürülürken talep, gezilecek nokta, trafik durumu, vb. değişikliklerle karşılaşmak mümkündür. Bu çalışmada ele alınan problemler bağlamında dağıtım sürecinde trafik durumu veya seyahat süresinin değişiklik gösterebileceği dinamik bir yapı dikkate alınmakta ve enerji tüketim belirsizliği göz önünde bulundurulmaktadır.

Farklı sektörlerde de karşılaşılan gezgin satıcı ve araç rotalama problemlerinin çözümüne yardımcı olacak yaklaşımların geliştirilmesi dağıtım faaliyetlerinden sorumlu karar vericiler açısından önem arz etmektedir. Gerçek hayatta karmaşık rotalama problemleri için genellikle araç sürücülerinin yol tercihlerine güvenilmektedir. Sürücüler mevcut bilgi ve deneyimlerini temel alarak ulaştıkları mantıksal çıkarımlarına göre belirledikleri rotaları takip etmektedirler. 2000-2015 yılları arasındaki gerçek hayat kara yolu dağıtım uygulamalarına ilişkin araştırmaların incelendiği Coelho vd.'nin (2016) çalışmasının sonuçları, analitik yaklaşımlardan faydalanılmasının işletmelerin dağıtım planlarında kullanmakta oldukları rotalarda önemli ilerlemelerin kaydedilebileceğini göstermektedir. Geliştirilecek yaklaşımların kullanılmasıyla elde edilecek dağıtım planlarının uygulanması sonucu toplam lojistik maliyeti, toplam enerji tüketimi, toplam emisyon miktarı veya toplam seyahat süresi gibi performans göstergelerinde sağlanacak olan tasarrufun ekonomik, çevresel ve sosyal alanda farkedilir düzeyde katkı sağlayacağı öngörülebilir.

## 1.1 Araştırma Tasarımı

Lojistik ağların genişlemesi ve bilgi iletişim teknolojilerinin ilerlemesi ile şehir içi dağıtım problemleri gerçeğe daha yakın varsayımlar ile planlanabilmektedir. Bu varsayımlar, dinamik olarak değişen parametreleri ve bunun elektrikli araçlarda batarya tüketimine olan etkilerini dikkate alan rotalama problemlerine yönelik çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi konusunda araştırma yapma gerekliliğini beraberinde getirmiştir.

Bu çalışmanın ana amacı, sürdürülebilir tedarik zinciri işlemleri yönetimi çerçevesinde operasyonel planlama seviyesinde karşılaşılan Gezgin Satıcı Problemi için karar vericilere yol gösterici nicel modellerin ve ilgili çözüm yöntemlerinin geliştirilmesidir. Bu süreçte literatürde yer alan gerçek hayat problemlerinden elde edilen veri setleri üzerinde söz konusu yeni yaklaşımların uygulanabilirliğinin ve kullanımı sonucu elde edilecek katma değer gösterilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada ele alınan iki alt problem için amaçlar şu şekildedir:

1. Problem: Deterministik batarya tüketimi altında elektrikli araçlar için dinamik Gezgin Satıcı Problemi

*Amaç: Daha sürdürülebilir ve daha az maliyetli dağıtım planlarının elde edilmesi amacıyla seyahat esnasında araç hızlarının dinamik olarak değişimi ve detaylı araç enerji tüketimi dikkate alınarak, elektrikli araçlar için dinamik Gezgin Satıcı Probleminin matematiksel olarak ifade edilmesi ve orta/büyük ölçekli problemlerin çözümü için bir sezgisel yaklaşımın geliştirilmesi.*

2. Problem: Belirsiz batarya tüketimi altında elektrikli araçlar için dinamik Gezgin Satıcı Problemi

*Amaç: Trafik yoğunluğunun ve ihtiyaç duyulan batarya miktarının önceden kesin olarak bilinmediği ve her ikisinin taşıma süreci içinde değişiklik gösterdiği durumlarda şehir içi trafik yoğunluğunun, emisyon salınımlarının ve elektrikli araç sürücülerinin menzil kaygılarının (range anxiety) azaltılmasına katkı sağlayacak dağıtım planlarının elde edilmesi için ilgili dinamik Gezgin Satıcı Probleminin matematiksel olarak ifade edilmesi ve orta/büyük ölçekli problemlerin çözümü için bir sezgisel yaklaşımın geliştirilmesi.*

## 1.2 Tez Taslağı

Bu çalışmanın birinci bölümünde, şehir içi yük taşımacılığı tanımlanmakta ve şehir içi yük taşımacılığında karşılaşılan sorunlar, çözümler, çevresel, sosyal ve ekonomik etkiler, son kilometre koli teslimatı ve araç rotalama problemleri tartışılmaktadır.

İkinci bölümde ise dinamik Gezgin Satıcı Problemi tanıtıldıktan sonra bu çalışmada incelenen problemlere benzer problemlerin tartışıldığı, elektrikli araç rotalama problemi üzerine literatür taraması bölümü yer almaktadır.

Üçüncü bölümde deterministik batarya tüketimi altında elektrikli araçlar için dinamik Gezgin Satıcı Probleminin tanımı yapılmış, ardından problemin Dinamik Programlama (DP) formülasyonuna yer verilmiştir. Sonrasında, önerilen Kısıtlı Dinamik Programlama (RDP)-Bağlantı Eleme tabanlı sezgisel algoritma kullanılarak literatürde yer alan hipotetik veriler üzerinde analizler yapılmış ve daha büyük örnekleri içeren 90 örnek üzerinden geliştirilen sezgisel yaklaşımın performansı ortaya konulmuştur. Son olarak ise elde edilen bulgular tartışılmıştır.

Dördüncü bölümde, belirsiz batarya tüketimi altında elektrikli araçlar için dinamik Gezgin Satıcı Probleminin tanımı yapılmış ve ardından problemin DP formülasyonuna yer verilmiştir. Ardından sezgisel bir yaklaşım olan DP tabanlı RDP-Prim algoritması önerilmektedir. Daha sonra önerilen sezgisel algoritma ile örnek vaka üzerinden analizler yapılmış ve geliştirilen sezgisel yaklaşımın performansı nispeten daha büyük örnekleri içeren 270 örnek üzerinden değerlendirilmiştir. Son olarak elde edilen bulgular tartışılmıştır.

Son bölümde ise genel tartışma, önerilen iki adet sezgisel algoritma performansının genel değerlendirmesi ve çalışmanın kısıtlamaları yer almaktadır (bkz: Şekil 1).



Şekil 1: Çalışma Tasarımı

## 1. BÖLÜM

### ŞEHİR İÇİ YÜK TAŞIMACILIĞI

Çalışmanın bu bölümünde şehir içi yük taşımacılığı tanıtılacak ve şehir içi yük taşımacılığında karşılaşılan problemler ile bu problemlerin çözümü için ortaya konulan yaklaşımlardan bahsedilecektir.

Şehir içi yük taşımacılığı (Urban Freight Transportation), İktisadi İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı (Organisation for Economic Co-operation and Development-OECD) tarafından tüketim ürünlerinin (sadece perakende sektöründe değil, aynı zamanda imalat gibi diğer sektörler tarafından) şehir ve banliyö bölgelerinde, atıkların geri toplanmasını da içine alacak şekilde teslimatı olarak tanımlanmıştır (OECD, 2003). Şehir içi yük taşımacılığının şehir içinde kurulmuş firmalar, tedarikçiler ve müşteriler arasında hayati bir bağ oluşturması nedeniyle kentsel alanlarda çok önemli bir faaliyettir. Bunun yanında şehir içi yük taşımacılığı sektörü önemli bir istihdam alanı olarak değerlendirilebilir (Crainic vd., 2004).

Günümüzde düşük ve orta gelirli birçok ülke dışında, örneğin Batı Avrupa, Amerika, Avustralya, Japonya ve Orta Doğu'daki yüksek gelirli ülkelerin çoğunda, nüfusun %80'inden fazlası şehirlerde yaşamaktadır. Ayrıca günümüzde dünya nüfusunun %57'si şehirlerde yaşamasına<sup>1</sup> rağmen hızla artan şehirleşme nedeniyle, 2050'li yıllara gelindiğinde toplam nüfusun üçte ikisinden fazlasının şehirlerde yaşayacağı tahmin edilmektedir. 2050 yılına kadar çok az ülkede, kırsal kesimdeki nüfusun şehirlerdeki nüfustan daha yüksek olması beklenmektedir<sup>2</sup>.

Şehirlerdeki nüfusun artması ile modern tedarik zincirlerinde son kilometreyi de içeren şehir içi yük taşımacılığı, şehirler için büyük bir sorun olan günlük trafik sıkışıklığına neden olmaktadır (Kechagias vd., 2020). Şehir içinde ürünlerin taşınması, çok büyük oranda özel lojistik hizmet sağlayıcıları (Private Logistics Service Providers) ve/veya aralarında herhangi bir iş birliği ya da koordinasyon olmaksızın kendi operasyonlarını

<sup>1</sup> <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2021&start=1960&view=chart>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>2</sup> <https://ourworldindata.org/urbanization>, Erişim Tarihi: Aralık 2021

yöneten nakliyeciler tarafından sağlanmaktadır. Bu durum şehirlerin yoğun trafik sıkıntısı yaşanan bölgelerinde yeterince etkili kullanılmayan fazla sayıda araç nedeniyle daha fazla trafiğe ve karmaşaya neden olmaktadır (Kant vd., 2016).

Trafik yoğunluğu ve araç kullanımının artması çevre sorunlarını beraberinde getirmektedir. Ulaşım ve nakliye sektörünün bugün geldiği noktada, dünyada her yıl artmaya devam eden sera gazı emisyonlarının %24'ü karayolu taşımacılığında kaynaklanmaktadır (Fernández vd., 2019). Avrupa Birliği'ndeki<sup>3</sup> toplam karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %30'undan ulaşım faaliyetleri sorumludur ve bunun %71,7'si karayolu taşımacılığında kaynaklanmaktadır. Bu oranın %60,6'sına otomobiller, %11'ine hafif kamyonlar, %27,1'ine ağır vasıta, kamyon ve otobüsler ve %1,3'üne motosikletler neden olmaktadır. İngiltere'de<sup>4</sup> 1990'dan bu yana demiryolu, otobüs ve yurtiçi nakliyeden kaynaklanan emisyonlar azalırken, kamyonet emisyonları %67 artmıştır. Kamyonet trafiği 1990 yılından itibaren ikiye katlanmıştır. İngiltere Ulaşım Departmanı 2022 raporuna<sup>5</sup> göre İngiltere'de karayollarında 1993 ile 2015 yılları arasında ağır vasıta ve araba trafiğindeki artış sırasıyla %11 ve %18 olurken, hafif kamyonların sayısı %82 artmıştır. İngiltere'de 1993'te yollarda katedilen mesafenin %10'u, 2015'te ise %15'i hafif kamyonlarca gerçekleştirilmiştir. Schoemaker (2006)<sup>6</sup> ise, şehir içi yük taşımacılığının bazı durumlarda ulaşımda gerçekleşen araç kilometrelerinin %14'üne, toplam enerji kullanımının %19'una ve toplam üretilen CO<sub>2</sub> emisyonlarının %21'ine neden olduğunu ortaya koymuştur. Şehir içi yük taşımacılığı, kısa seferler ve durakların sıklığı nedeniyle, çevreyi uzun mesafeli yük taşımacılığında daha fazla kirletmektedir. Bu durum şehir içi yük taşımacılığının CO<sub>2</sub> emisyon salınımlarında öne çıkmasına neden olmaktadır. Martensson'a<sup>7</sup> (2005) göre araçların çok sık durmak zorunda kaldığı durumlarda yakıt tüketimi keskin bir şekilde artmaktadır. Örneğin; 10 km içerisinde beş

<sup>3</sup> <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>4</sup> [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/945829/tsgb-2020.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/945829/tsgb-2020.pdf), Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>5</sup> [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/576095/tsgb-2016-report-summaries.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/576095/tsgb-2016-report-summaries.pdf), Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>6</sup> [http://www.bestufs.net/download/BESTUFS\\_II/key\\_issuesII/BESTUF\\_Quantification\\_of\\_effects.pdf](http://www.bestufs.net/download/BESTUFS_II/key_issuesII/BESTUF_Quantification_of_effects.pdf), Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>7</sup> [http://www.bestufs.net/download/conferences/Amsterdam\\_Jun05/BESTUFS\\_Amsterdam\\_June05\\_Martensson\\_Volvo.pdf](http://www.bestufs.net/download/conferences/Amsterdam_Jun05/BESTUFS_Amsterdam_June05_Martensson_Volvo.pdf), Erişim Tarihi: Ekim, 2022

durak olması durumunda yakıt tüketimi %140 artmaktadır. Bunun yanında, artan araç trafiğinin özellikle kalabalık şehir merkezlerinde gürültü kirliliğine neden olduğu ve gürültü kirliliğinin küresel bir halk sağlığı sorunu olarak değerlendirildiği yapılan çalışmalarda raporlanmıştır (Fiedler ve Zannin, 2015). Tüm bu sorunların birleşik etkileri şehir içi yük taşımacılığının verimliliğini azaltmakta, maliyetini artırmakta, vatandaşların yaşam kalitesini düşürmekte ve sağlıkları üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır (Kechagias vd., 2020). Sonuç olarak artan dünya nüfusu, devlet politikaları, ekonomik kaygılar ve yaşam kolaylığı gibi birçok faktör şehirleri kalabalık yerleşim birimleri haline getirmiştir. Artan şehirleşme ile birlikte hava kirliliği, gürültü ve trafik sıkışıklığı gibi çevre sorunları şehirlerin öne çıkan sorunları haline gelmektedir (Soysal ve Bloemhof-Ruwaard, 2017; Dünder vd., 2021).

Şehirleşmenin yanı sıra müşterilerin değişen satın alma davranışları nedeniyle artan e-ticaret faaliyetleri, şehir içi yük taşımacılığı sorunlarının karmaşıklığını arttırmaktadır. Artan şehirleşmeyle birlikte, e-ticaretin de özellikle şehirlerdeki satın alma faaliyetlerinde geldiği üst seviye, şahıslara teslim edilen ürün miktarını büyük ölçüde artırmış ve şehirlerde e-ticaret ürünlerinin nakliyesinden doğan araç trafiğini de arttırmıştır (Crainic vd., 2004 ; Dablanc, 2019; Giampoldaki vd., 2021). İnternet kullanımındaki<sup>8</sup> küresel boyutta artış ve internet kullanımının 2020'de dünya genelinde %63,2, Avrupa'da ise, %87,2 oranında olmasına ek olarak teknolojideki geniş bant internet erişimi, bağlantı hızının artması, akıllı telefonların gelişmesi ve ödeme yöntemlerinin basitleştirilmesi e-ticaretin popülaritesine katkıda bulunmaktadır. 2014 ve 2019 yılları arasında e-ticaret satış rakamları yaklaşık %300 artmış ve Amerika Birleşik Devletleri<sup>9</sup> rakamlarına göre, çevrimiçi satışlar 2012 yılında toplam perakende satışlarının %8'ini oluştururken 2021 yılında toplam perakende satışlarının %19,1'ini oluşturmaktadır. Ayrıca birçok ülkede COVID-19 pandemisinin yayılmasını kontrol altına almayı amaçlayan kısıtlamalar nedeniyle 2020'de e-ticarette büyüme daha da hızlanmıştır<sup>10</sup>. E-ticaret firmalarını içeren ve 32 ulusal pazarda yapılan bir ankette<sup>11</sup>, e-ticaret 2020 yılında bir önceki yıla göre

<sup>8</sup> <https://www.internetworldstats.com/stats.htm>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>9</sup> <https://www.digitalcommerce360.com/article/e-commerce-sales-retail-sales-ten-year-review>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>10</sup> <https://jungleworks.com/download/Last-Mile-Delivery-Look.pdf>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>11</sup> <https://www.emarketer.com/content/global-ecommerce-update-2021>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022

dünya çapında %27,6'lık bir büyüme göstermiştir. Ayrıca DHL'e<sup>12</sup> göre, dünya çapında tahmini e-ticaret satışları 2021'de 4,48 trilyon ABD Doları değerine ulaşmıştır. Şehirleşmedeki artış ve e-ticarete olan talebin artması nedeniyle son kilometre teslimatı talebinin 2030 yılına kadar %78 oranında artması beklenmekte ve bu da dünya çapında 100 şehirde teslimat araçlarının sayısının %36 oranında artacağı anlamına gelmektedir<sup>13</sup>.

Şehir nüfusundaki artış, arz ile talep noktaları arasındaki mesafenin artması, e-ticaretteki sürekli artış, düşük stoklar ile çalışma ve kısa zamanda teslimatlara (tam zamanında) dayalı üretim gibi nedenler çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan lojistik ve taşımacılık sektörlerinde köklü değişikliklere neden olmaktadır (Foiadelli vd., 2017; Crainic vd, 2004). Bu değişikliklerden biri de, sürdürülebilir şehir içi yük taşımacılığı (Sustainable Urban Freight Transportation) kavramının tartışılmasıdır. Şehir içi yük taşımacılık ağı, devlet kurumları, kuryeler ve nakliye elemanları, alıcılar, şehirde yaşayan insanlar ve şehirlerde trafik oluşturan diğer bütün unsurlar ile birlikte, şehirlerdeki kısıtlı alt yapıyı kullanarak günlük işlevlerini tamamlamayı hedeflemekte, bu durum da planlı, uygulanabilir ve sürdürülebilir bir lojistik çözümüne olan ihtiyacı doğurmaktadır (Kant vd., 2016). Sürdürülebilirlik kavramı ilk olarak Brundtland vd. (1987) tarafından Birleşmiş Milletler Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonunun "Ortak Geleceğimiz" (Our Common Future) başlığı ile yayınlanan raporunda gündeme getirilmiştir. Sürdürülebilir gelişim, Keeble tarafından (1988) gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilmelerine engel olmayacak şekilde, bugünün ihtiyaçlarının karşılanabilmesine olanak sağlayan kalkınma tarzı şeklinde tanımlanmıştır. Bu tanımdan hareketle uzun vadede ekonomik gelişim, sosyal uyum ve ekosistemin korunmasının birlikte düşünülmesi ve ortak bir şekilde ele alınması gereken kavramlar olduğu tartışılmıştır (Wolff, 2004). Sürdürülebilir şehir içi yük taşımacılığı, tüm yük taşımacılığı kategorilerine ulaşım sisteminin sunduğu erişilebilirliği sağlarken hava kirliliğini, sera gazı emisyonlarını, atıkları ve gürültü kirliliğini doğal yaşama ve insan sağlığına zarar vermeyecek düzeye indirebilen, kaynak ve enerji verimliliğini korurken ürünlerin maliyet-etkin taşınabilmesine olanak sağlayan ve yaşam alanlarında insanların

<sup>12</sup> <https://lot.dhl.com/glossary/first-mile-delivery>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>13</sup> [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Future\\_of\\_the\\_last\\_mile\\_ecosystem.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_the_last_mile_ecosystem.pdf), Erişim Tarihi: Ekim, 2022



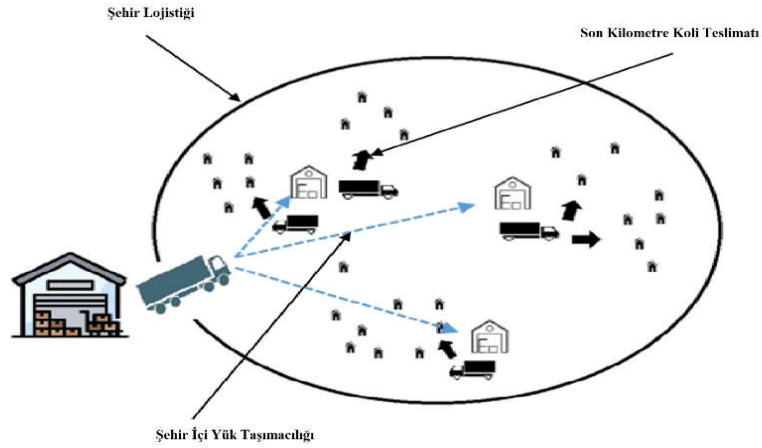
hareketliliğinden ödün vermeden bu yaşam alanlarını iyileştirmeye katkı sağlayabilen bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Behrends vd., 2008).

Akademik çalışmaların yanı sıra ülke yönetimleri de şehir içi yük taşımacılığının çevreye olan zararlı etkilerini azaltmak için çeşitli düzenlemeler yapılmaktadır. Örneğin; Londra'da karayolu fiyatlandırması, Kopenhag'da araç kısıtlamaları ve yük kontrolleri veya düşük emisyon belgeleri gibi önlemler alınmıştır (Giampoldaki vd., 2021). Bunun dışında İngiltere hükümeti 2035 yılına kadar benzinli ve dizel araç satışlarını sona erdirmeyi planlamaktadır (Anosike vd., 2021). Bu tür önlemlere ek olarak OECD ve Birleşmiş Milletler (BM) gibi uluslararası kuruluşlar, üyelerinin uygulaması için çevre kirliliği ve iklim değişikliği ile mücadele amaçlı öneriler geliştirmektedir. 2016 yılında BM tarafından Fransa'nın Paris kentinde düzenlenen XXI İklim Değişikliği Konferansı bu örneklerden birisidir (Gonzalez-Zavala ve Betanzo-Quezada, 2016).

### **1.1 Son Kilometre Koli Teslimatı**

Şehir içi yük taşımacılığının alt alanlarından birisi olan son kilometre koli teslimatı (Ducret, 2014), yüksek kaliteli bir teslimat hizmeti, uygun nakliye, sipariş iadeleri, esnek teslimat seçenekleri ve zamanında eve teslimat için müşteri beklentilerini karşılamak olarak tanımlanabilir. Bu yüksek kaliteli teslimat hizmeti, şirketlerin pazarlama faaliyetleri ve itibarı için anahtar faktörlerden biri olduğundan kapsamlı olarak araştırılmaktadır. Son kilometre koli teslimatı, çevrimiçi sipariş süreci ile ürünün fiziksel teslimatı arasındaki son bağlantı, başka bir deyişle, mal taşımacılığının son adımı olarak tanımlanmaktadır (Eliyan vd., 2021).

Cardenas vd. (2017) şehir lojistiğini incelemiş ve şehir lojistiği, şehir içi yük taşımacılığı ve son kilometre koli teslimatından oluşan Şekil 2'deki gibi bir çerçeveye sunmuştur. Bu çerçevede, şehir lojistiği şehir içi lojistik politikalarına odaklanan makro kararların verildiği bir aşama; şehir içi yük taşımacılığı, ürünlerin şehir içinde nasıl daha iyi dağıtılabileceğine odaklanılan süreç; son kilometre koli teslimatı ise müşteri beklentilerini karşılamak amacıyla araç türlerinin seçimi, yatay işbirliklerinin oluşturulması, teslimat yöntemlerinin belirlenmesi ve rota kararlarının verilmesi gibi mikro faaliyetlerin yerine getirildiği alan olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2: Şehir Lojistiği Çerçevesi (Cardenas vd. 2017)

Wang vd. (2016) tedarik zincirinde teslimat maliyetlerinin yaklaşık %28'inin son kilometre teslimat aşamasıyla ilgili geç teslimatlar, müşteri yokluğu, uzamış teslimat süreleri ve teslim edilmeyen siparişlerden kaynaklandığına dikkat çekmiştir. Gevaers vd. (2009) ise toplam tedarik zinciri maliyetinde son kilometre teslimatı oranının %13 ile %75 arasında olduğunu ve yüksek maliyetlere teslimat şekillerinin (kurye, ekspres ve paket hizmet sağlayıcıları) yol açtığını belirtmektedir.

Son kilometre teslimatında müşterilerin hızlı teslimat beklentileri artmakta (Sampaio vd., 2019; Daugherty vd., 2018) ve şirketler, rekabetçi kalabilmek amacıyla hızlı teslimat seçenekleri ile ürünlerine rekabetçi değer katmayı istemektedir (Agatz vd., 2008). Günümüzde çoğu çevrimiçi perakendecinin temel hizmet vaatlerinden biri aynı gün teslimatlar olabilmektedir (Yaman vd., 2012). Bu nedenle, son kilometre teslimatları zaman baskısı ile karşı karşıyadır. Teslimat hizmeti sağlayıcıları ise hızlı teslimat beklentilerini müşteri hizmet seviyesini olumsuz etkilemeden sağlamayı hedeflemektedirler. Bunun yanı sıra teslimat başarısızlık oranlarını düşürmek, yüksek düzeyde ürün iadelerini etkin bir şekilde yönetmek ve bunun sonucunda teslimat maliyetlerini azaltmayı amaçlamaktadırlar (Allen vd., 2018). Mevcut verilere göre, Dünya

Ekonomik Forumu'nun yakın tarihli bir raporunda<sup>14</sup> da belirtildiği gibi, son kilometre teslimat pazarının %17 büyümesi beklenmektedir. Gereksinimler, amaçlar ve büyüme beklentisi, alternatif son kilometre teslimat seçeneklerine ihtiyaç olduğunu göstermektedir (Schnieder vd., 2022).

E-ticaretin yol açtığı daha yüksek müşteri beklentilerinin karşılanabilmesi ve şirketlerin pazarda rekabetçi kalabilmesi için son kilometre teslimat stratejilerinin yeniden tasarlanması gerekmektedir (Eliyan vd., 2021). Tüm bu gelişmeler sonucunda son kilometre teslimatı, son birkaç yılda lojistik tedarikçileri ve perakende sektöründen büyük ilgi görmektedir. Hem pratikte karar vericiler hem de araştırmacılar, daha sürdürülebilir dağıtım planları elde etmek için kullanılacak yeni teknolojiler ve yaklaşımlar geliştirmek üzere çalışmaktadırlar.

Son kilometre teslimat kavramı, şehirlerdeki trafiği azaltmanın ve çevresel etkisini en aza indirmenin anahtarı olarak değerlendirilmektedir. Bu sebeple, şirketler son kilometre teslimatı için farklı yöntemler kullanmakta ve verimli hale getirmek için çalışmalar yapmaktadır. Lyons ve McDonald (2022) çalışmalarında son kilometre teslimat stratejilerini; müşteri teslimat noktaları, yenilikçi araçlar, şehir lojistiğinde rota iyileştirmeleri ve özel lojistik firmalarının uyması için kamu tarafından planlanan politikalar olmak üzere 4 grupta sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırma, son kilometre teslimat stratejilerinin teslimat kamyonları gibi basit çözümlerden teslimat robotları ve araç rotalama için gelişmiş algoritmalara kadar karmaşık çözümleri içerecek şekilde farklılaştığını göstermektedir.

Müşterilerin paketlerini kendilerine yakın olan ortak dağıtım tesislerinden istedikleri zaman almalarını sağlayan müşteri teslim alma noktaları, teslimat maliyetlerini ve karbon emisyonunu azaltma avantajları nedeniyle müşteriler ve lojistik firmaları arasında yaygın olarak popüler hale gelmiştir (Edwards vd., 2010). Punakivi vd. (2001) müşterilerin kolileri ortak kabul noktalarından almasıyla eve teslim maliyetinin yaklaşık %55-66 oranında azaltılabileceğini göstermiştir. Jiang vd., (2019) teslimat rotalarını planlarken müşteri teslimat noktalarının tahsisine karar vererek son kilometre teslimatının toplam maliyetini ve karbon emisyonlarını azaltmayı amaçlayan bir Gezgin Satıcı Problemi

<sup>14</sup> [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Future\\_of\\_the\\_last\\_mile\\_ecosystem.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_the_last_mile_ecosystem.pdf), Erişim Tarihi: Ekim, 2022

üzerine çalışmıştır. Jiang vd. (2020) çevrimiçi alışverişte son kilometre teslimatı için zaman pencereleri olan bir Gezgin Satıcı Problemi ile müşteri teslimat noktalarını kullanarak son kilometre teslimatının günlük lojistik maliyetini önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir.

Akademik çalışmaların yanı sıra müşteri teslimat noktaları, geleneksel ev teslimatlarına alternatif bir model olarak çevrimiçi perakendecilerden teslimat hizmeti sağlayıcılarına kadar lojistik sektöründe büyük bir ilgi görmektedir. Amazon için self servis paket teslimat hizmeti, gelecekteki şiddetli rekabetle başa çıkmak için otomatik depolar ile eşit derecede stratejik öneme sahiptir (Zhou vd., 2020). FedEx<sup>15</sup>, self servis paket teslimat projeleri de dahil olmak üzere 2017 yılında 19 tam otomatik teslimat noktası ve 69 yeniden dağıtım merkezi inşa etmek için yatırım yapmıştır. Ancak, tüketicilerin müşteri teslimat noktasından mal teslim alma isteğinin hizmet sağlayıcıların beklentilerini karşılayabilecek düzeyde olmadığını gösteren çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, Çin'deki çoğu teslimat şirketinin teslimat merkezlerini kullanım oranı %65'ten azdır (Chen vd., 2018).

Son kilometre dağıtımda zorlukların üstesinden gelmenin yollarından biri de teslimatları birleştirmek için nakliyeciler ve perakendeciler arasında işbirliği yapılması yoluyla seyahat eden yük araçlarının katettikleri mesafeleri azaltmaktır. Bu durum merkezi bir dağıtım noktası kurulması ile gerçekleşmektedir. Dağıtım merkezlerinin kullanımıyla nihai teslimat için gerekli olan yolculukların sayısı azaltılabilmektedir (Van vd., 2010). Bu tür bir organizasyonun başarısı, son kilometre teslimatı aktörlerinin (nakliyeciler ve perakendeciler) katılım ve işbirliği düzeyi, kamu kurumlarının mali desteği ve yerel yönetim gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Son kilometre teslimat için farklı bir yöntem ise, otonom teslimat araçlarının kullanılmasıdır. Otonom teslimat araçları için kargo bisikletlerinin kullanımı ve insansız hava araçlarıyla paket teslimatı gibi örnekler verilebilir (Otto vd., 2018). Teslimat şirketleri, teslimat hatalarını ve enerji tüketimini azaltması, teslimat süresini kısaltması ve bunların sonucunda maliyetlerini düşürmesi nedeniyle otonom teslimat araçlarını bir seçenek olarak görmektedir. Schnieder vd. (2022) otonom teslimat kavramı üzerine

<sup>15</sup> [https://s21.g4cdn.com/665674268/files/doc\\_financials/annual/2017/FedEx\\_2017\\_Annual\\_Report.pdf](https://s21.g4cdn.com/665674268/files/doc_financials/annual/2017/FedEx_2017_Annual_Report.pdf), Erişim Tarihi: Ekim 2022

çalışmış ve bunu Londra'daki bir yıllık gerçek paket teslimat verilerine uygulayan bir karar destek yöntemi önermiştir. Otonom teslimat araçları içerisinde yer alan ve insansız hava araçları olarak tanımlanan İHA, yollarda trafiğe maruz kalmamaları ve çevre dostu elektrikli motorları ile hızlı teslimatlara olanak sağlayabilmektedir (Borgetti vd., 2022). İHA normal bir teslimat kamyonu ile karşılaştırıldığında daha hızlı olma, karayolu trafik yoğunluğunu artırmama ve çok daha düşük maliyetle nakliye yapabilme gibi avantajlarının olmasının yanında teslimat aracını kullanacak personele ihtiyacı da ortadan kaldırmaktadır (Wang ve Sheu, 2019). İHA ile teslimat yapılması avantajların yanında olumsuz hava koşulları, karmaşık şehir içi senaryolar ve son müşteri tanımlama gibi sorunları da barındırmaktadır (Borgetti vd., 2022). Bu nedenle Jung ve Kim (2022) lojistik olarak ulaşılması zor olan bölgelerde küçük paket teslimatlarının İHA ile yapılabileceğini değerlendirmektedir.

Son kilometre teslimatında merkezi teslimat noktası ve merkezi dağıtım noktalarının kurulması, otonom teslimat araçlarının kullanılması gibi çözümlerde, verimli ve sürdürülebilir bir sonuç için araç rotalama problemleri ve çözüm yöntemleri aşılması gereken bir engel olarak değerlendirilmektedir.

## 1.2 Araç Rotalama Problemleri

Araç rotalama problemleri (ARP), bir aracın veya araç filosunun seyahat programlarını optimize etmeye izin veren bir takım kombinatoriyal optimizasyon problemleri olarak tanımlanabilir. Yöneylem Araştırması alanında en çok çalışılan problemlerden biridir. ARP, Gezgin Satıcı Probleminin bir uzantısıdır. Bir depo ve birkaç araç ve müşteri göz önüne alındığında amaç toplam seyahat mesafesini en aza indirmek ve araçları tüm müşterilere hizmet verecek şekilde yönlendirmektir. Şehir içi rotalama problemleri; rota maliyetlerini, kat edilen mesafeyi, seyahat süresini azaltma ve çevreye daha az zarar verme gibi konulara odaklanmaktadır. Şehir içi ARP, geleneksel araç rotalamasına göre trafik düzenlemeleri, trafik sıkışıklığı, yol durumu, park yeri, hava kirliliği, gürültü kirliliği, acil durumlar gibi farklı kriterleri de dikkate almaktadır (Kim vd., 2015).

ARP ilk olarak Dantzig ve Ramser (1959) tarafından “Kamyon Sevkiyat Problemi” olarak ortaya konmuştur. Bu çalışmada bir kamyon filosunun tek merkezden, minimum seyahat mesafesi ile bir dizi benzin istasyonunun petrol talebinin nasıl karşılayabileceğini modelleyen bir çözüm önerilmiştir. Clarke ve Wright (1964) ise bu çalışmayı doğrusal

bir optimizasyon problemi olarak genelleştirmiştir. Farklı kapasitelerde kamyon filoları kullanarak, merkezi depo çevresinde coğrafi olarak dağılmış bir dizi müşteriye nasıl hizmet verileceği problemi için çalışmıştır. Bu problem, Yöneylem Araştırması alanında en çok çalışılan konulardan biri olan “Araç Rotalama Problemi” olarak bilinir hale gelmiştir.

Günümüzde mevcut ARP modelleri, teknolojik ilerlemelerin de etkisiyle gerçek yaşam karmaşıklıklarını dikkate almaktadır ve bu nedenle Dantzig ve Ramser’in (1959) ve Clarke ve Wright’ın (1964) çalışmalarına göre farklılıklar göstermektedir. Trafik sıkışıklığı, zaman pencereleri ve zaman içinde değişen girdi bilgileri gibi parametreler, çalışılan problemlerin karmaşıklığını arttırmaktadır. Bu gibi nedenlerle ARP problemleri NP-Zor (NP-Hard) olarak sınıflandırılır (Lenstra ve Rinnooy, 1981). ARP problemlerinin NP-Zor olması nedeniyle kesin çözüm yöntemlerinin gerçek hayatta kullanılabilirliği mümkün olmamaktadır; çünkü bu kesin algoritmalar ile sadece küçük problem örneklerinin optimal çözümü bulunabilmektedir. Bu sebeple ARP çözümünde, sezgisel yöntemler, meta-sezgisel yöntemler ve son zamanlarda da makine öğrenimi gibi yaklaşımlar kullanılmaktadır (Cooray ve Rupasinghe, 2017).

Şehirlerdeki ARP problemine dağıtım amacıyla konu olan araçlar, şehir içindeki araç akışının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır (Cattaruzza vd., 2017). Bu nedenle çok sayıda akademik çalışma, karmaşık gerçek hayat araç rotalama problemi (ARP) varyantlarını çözmek için çeşitli optimizasyon yöntemleri geliştirmiştir (Coelho vd., 2016; Demir vd., 2014; Tunalıoğlu vd., 2016; Olgun vd., 2021). Problemlerin gerçek hayatta uygulanması, uygulama esnasında oluşan bilginin gelişiminin/değişiminin ve kalitesinin de incelenmesini sağlamıştır. Optimal rotalar oluşturulurken kullanılan parametrelere ek olarak, planlama ufku içinde optimal çözümü etkileyecek yeni bilgilerin ve durumların oluşumu bilginin değişimi ve kalitesi olarak tanımlanmaktadır. Bilginin değişimi ve kalitesi oluşturulan rotaların planlama ufku içinde dinamik olarak değişebilmesini mümkün kılmaktadır (Pillac vd., 2013a). Wilson ve Colvin'in (1977) müşteri isteklerinin dinamik olduğu tek araçlı dinamik rotalama problemine odaklandıkları ve düşük maliyet amacıyla sezgisel yöntemleri kullandıkları çalışma, dinamik araç rotalama problemine ilk değinilen çalışmalardan biridir. 1996 yılında Global Konumlandırma Sisteminin (GPS) devreye girmesine ek olarak mobil ve akıllı

telefonların yaygınlaşması ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) daha da gelişmiş ve şirketler artık filolarını gerçek zamanlı ve uygun maliyetle etkili bir şekilde takip edilebilir ve yönetilebilir duruma gelmiştir (Pillac vd., 2013a).

Emisyonların azaltılmasına odaklanması ve yasal düzenlemeler sonucunda sürdürülebilir şehir içi ARP alanında yapılan çalışmaların sayısında artış gözlemlenmektedir. Ürünlerin müşterilere taşınması, müşteri iadeleri, atıkların toplanması ve toplanan atıkların geri dönüşüm noktalarına taşınması gibi operasyonlar nedeniyle şehir için araç rotalama problemleri sürdürülebilirlik bağlamında çok önemli hale gelmektedir (Dündar vd., 2021). Uluslararası Enerji Ajansının Dünya Enerji Görünümü 2019 raporundaki<sup>16</sup> enerji sistemlerinin geleceğine yönelik tahminine göre 2040 yılına kadar fosil enerji kaynaklarında önemli kayıplar yaşanacaktır. Fosil yakıt rezervlerindeki bu azalma, fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan kirliliğin üstesinden gelinmesi için bir fırsat olarak görülmektedir. Sürdürülebilir kalkınma senaryosunda hidrojen ve yenilenebilir kaynakların doğrudan kullanımına ek olarak elektrik, 2040 yılına kadar tüketimi artan az sayıdaki enerji kaynaklarından biri olması öngörülmektedir (Höök vd., 2012).

Yüksek enerji verimliliği, düşük yakıt maliyeti ve sera gazı emisyonlarının olmaması, düşük gürültü kirliliği gibi çevresel avantajlar elektrikli araçların artan bir ilgi görmesine ve bu araçların pazar paylarının hızla artmasına neden olmuştur (Desaulniers vd., 2016; Murakami, 2017; 2018). Sürdürülebilir şehir içi yük taşımacılığı literatüründe elektrikli araçlar sıklıkla tartışılmaktadır. Elektrikli araçların sera gazı emisyonları konvansiyonel araçlara kıyasla daha düşük olduğundan çevreye daha az zararlı (Ahani vd., 2016); daha az gürültü kirliliğine neden olduklarından daha kullanıcı ve halk dostu (Graham-Rowe vd., 2012); vergi, sigorta, depolama ve yıpranma gibi operasyonel maliyetlerinin görece daha düşük olmasından dolayı daha ekonomiktir (Melo vd., 2014). Bu nedenle, elektrikli araçlar sürdürülebilir şehir içi yük taşımacılığı ve şehir içi ulaşım alanlarında uygun araçlar olarak kabul edilmektedirler (Altenburg vd., 2012). Dağıtım operasyonları için elektrikli araçların kullanıldığı elektrikli araç rotalama problemleri (EARP) üzerine yapılan çalışmalar, son on yılda elektrikli yük araçlarının yaygınlaşmasıyla artmaktadır (Xu vd., 2021; Taş, 2021; Erdem, 2022). EARP, gerçek hayatta karşılaşılan kısıtlamaları

<sup>16</sup> <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022

hesaba katarak, özellikle elektrikli araçlar için optimize edilmiş rotalar bulmakla ilgilenen, geleneksel araç rotalama probleminin bir uzantısı olarak tanımlanabilir (Küçüköğlü vd., 2021).

Elektrikli araçlar, Tesco, UPS, L’Oreal, Correos, TNT Express, JD ve UPS gibi lojistik şirketlerinin teslimat filolarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu şirketlerde bir çok operatör tarafından daha düşük yakıt maliyetleri rapor edilmiştir. Örneğin; TNT Express, dizel yakıt için ortalama olarak yaklaşık 200£ harcama yerine sıfır emisyonlu bir araca güç sağlamak için haftada 40£ harcadığını rapor etmiştir. Correos ise harcamalarını 100 kilometrede 1,50€ tutarında elektrik tüketimi olarak açıklamıştır (Nesterova vd., 2013). En büyük lojistik şirketlerinden olan DHL, hafif ticari araçlarının elektrifikasyonu konusuna büyük önem vermekte ve lojistik operasyonlarının emisyonlarını 2050 yılına kadar sıfıra indirmeyi hedeflemektedir. DHL<sup>17</sup> 16.000 elektrikli kamyonet, bisiklet ve üç tekerlekli bisiklet ile Almanya'daki en büyük elektrikli araç filosuna sahip şirkettir.

Ülkelerin elektrikli araç kullanımına yönelik teşvikleri artarak devam etmektedir. Örneğin; Avrupa ülkeleri 2020 yılında, yeni enerji araçlarının gelişimini teşvik etmek için yenilenebilir enerjili araç politikaları uygulamaya koymuştur. Almanya, Elektrikli Hareketlilik Yasası<sup>18</sup> ile düşük emisyonlu (tamamen elektrik ile çalışan veya hibrit) araçlara ücretsiz park yeri, otobüs şeritlerinin kullanımı ve kısıtlı trafik bölgeleri sağlamaları için yerel yönetimlere yetkiler tanımlamıştır. Ayrıca şarj tesislerinin yayılmasını teşvik etmek amacıyla “Şarj İstasyonu Yönetmeliği” yayımlayarak şarj altyapısının inşasını desteklemek için yatırımlar yapmıştır.

Elektrikli araçlar bir çok avantaja sahip olmasına rağmen, bu araçların yaygınlığı hala çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır (Schneider vd., 2014). Günümüzde elektrikli araçların lojistik operasyonlarda kullanımı için en etkili faktörler elektrik bataryalarının hizmet ömrü ve güvenliğindeki teknolojik gelişmelerdir (Martins vd., 2021). Elektrikli araçların batarya ömrü, ortaya çıktıklarından beri hem sürücüleri hem de üreticileri ilgilendiren bir

<sup>17</sup> [https://iea.blob.core.windows.net/assets/387e4191-acab-4665-9742-073499e3fa9d/Global\\_EV\\_Outlook\\_2018.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/387e4191-acab-4665-9742-073499e3fa9d/Global_EV_Outlook_2018.pdf), Erişim Tarihi: Ekim, 2022

<sup>18</sup> <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Artikel/Industry/regulatory-environment-and-incentives-for-using-electric-vehicles.html>, Erişim Tarihi: Ekim, 2022



sorundur. Bu sorun nedeniyle çalışmalarda, problem olarak elektrikli araçların sınırlı yük ve sürüş menzili dikkate alınmaktadır (Koç vd., 2019; Pelletier vd., 2019).

Elektrikli araçlarla ilgili güncel olarak üzerinde çalışılmakta olan problemlerden bir diğeri, şarj sürelerinin uzunluğuyla alakalıdır (Machado vd., 2020). Sahip oldukları sürüş menzilin yanı sıra, şarj süreleri de elektrikli araçların kullanımını ve verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Elektrikli araçların bataryalarının sınırlı kapasitesi nedeniyle sürücüler, istenen seyahat mesafesi için gerekli enerjiye sahip olmak ve depolanan enerjiyi optimum şekilde kullanmak amacıyla sürüş stratejilerini kontrol etmek zorunda kalmaktadır (Vaz, 2015). Elektrikli araç kullanıcılarında görülen menzil kaygısı (range anxiety), araçların bataryalarının istenen hızda şarj olmaması ve altyapı yetersizlikleri nedeniyle araç batarya kapasitesinin yolculuğun tümüne yetmemesi konusunda duyulan kaygı olarak tanımlanmaktadır (Noel vd., 2019). Menzil kaygısı elektrikli araçların daha fazla benimsenmesinin önündeki ana engellerden biri olarak kabul edilmektedir (Hipolito vd., 2022). Bu nedenle elektrikli araçlar için menzil tahmininin doğruluğunu geliştirmek, kullanıcıların menzil kaygısını hafifletmek açısından çok önemlidir (Zhang vd., 2020a). İyimser araç menzil hesaplaması veya belirsiz trafik sıkışıklığı gibi farklı unsurlardan kaynaklanan menzil kaygısının azaltılabilmesi için menzil tahminleme teknolojilerinin gelişimi öncelikli öneme sahiptir (Soysal vd., 2020). Elektrik bataryalarının menzilin etkileyen faktörler arasında artan enerji yoğunluğu, sıcaklık, kabin klima şarjı, akü soğutma şarjı, trafik koşulları, sürüş hızı, yuvarlanma direnci ve hava direnci ile araç ağırlığının sayılabilir (Malik vd., 2016).

Elektrikli araçlar henüz yaygınlaşma aşamasında olan bir araç türü oldukları için talep belirsizliğinden kaynaklanan şarj altyapısı sorununa sahiptir (Machado vd., 2020). Araç şarj istasyonlarının sıklıkları ülkeler arasında farklılık göstermektedir. Rota planlamalarında bu farklılıkların dikkate alınması gerekmektedir (Funke vd., 2019). Literatürde bu sorunun çözümüne yönelik çalışmalar mevcut olup, optimizasyon teknikleri kullanılarak elektrikli araç şarj istasyonlarını uygun şekilde konumlandırmak için çoklu metodolojiler geliştirilmektedir (Zhang vd., 2015).

Bu çalışmada, ele alınan her iki problemde seyahat esnasında araç hızlarının dinamik olarak değişmesi dikkate alınmıştır. Birinci problemde deterministik araç enerji tüketimini ikinci problemde ise belirsiz araç enerji tüketimini dikkate alan, elektrikli

araçlar için dinamik Gezgin Satıcı Probleminin çözümüne yönelik iki dinamik programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Çalışmanın izleyen bölümünde, üzerinde durulan problemler tanıtılmakta ve ilgili literatür sunulmaktadır.

## 2. BÖLÜM

### DİNAMİK GEZGİN SATICI PROBLEMİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

Çalışmanın bu bölümünde Gezgin Satıcı Problemi tanıtılacak ve Gezgin Satıcı Problemi üzerine yapılan literatür taraması sonucu ortaya çıkan temel görüşler ve sonuçlar değerlendirilecektir.

Gezgin Satıcı Problemi kabaca bir depo veya dağıtım merkezi gibi bir başlangıç noktasından hareket edip belirli sayıdaki müşterinin taleplerini karşılamak üzere her birini ziyaret edecek bir araç rotasının belirlenmesini amaçlamaktadır. Araç rotalama problemlerinin elektrikli araçlarda kullanılabilen varyantlarından biri olan Gezgin Satıcı Problemi, gerçek hayatta farklı sektörlerdeki (Örneğin; eczaneler için ilaç dağıtımı, akaryakıt istasyonları için yakıt dağıtımı veya belediyelerin atık ve çöp toplama faaliyetleri) tedarik zinciri operasyonlarında sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Gezgin Satıcı Probleminde zamana bağlı hız, mesafe veya zamana bağlı yönlendirme ve statik yönlendirme gibi çeşitli varsayımlar, ilgili literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Laporte ve Nobert, 1987; Bektaş, 2006; Braekers vd., 2016).

Literatürde rotalama problemleriyle ilgili çalışmalarda, dağıtım işlemleri sırasında bir veya daha fazla problem parametresi değişebilmektedir (Pillac vd., 2013a; Bektaş vd., 2014; Psaraftis vd., 2016; Ritzinger vd., 2016). Talep, araç hızı, servis süreleri gibi bazı problem parametrelerinin dağıtım işlemleri sırasında değişebileceği gerçeği dinamik rotalama problemlerinde dikkate alınmaktadır. Bilgi iletişim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, rotalama problemleri için çevrim içi kritik bilgilerin toplanması daha kolay hale gelmiştir. Araçlara yerleştirilen kablosuz teknolojiye sahip sistemler, araçlardan gerçek zamanlı veri aktarımı ve tam izleme olanağı sağlamaktadır (Ritzinger vd., 2016). Gerçek zamanlı veriler kullanılarak rota planlarının güncellenmesiyle günümüzde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu tür gelişmeler literatürdeki araştırmacıların da ilgisini çekmiştir (Pillac vd., 2013b; Ritzinger vd., 2016). Anlık verileri kullanarak veya parametre değişikliklerini dikkate alarak dağıtım planları oluşturan karar destek modelleri önem kazanmaktadır.

Problem dinamikliği dışında uygulamada belirsizliklerle karşılaşılabilmektedir. Belirsizlik, Şehir içi rotalama problemlerinde trafik sıklışıklığı ve buna bağlı olarak araç hızı ile ilgilidir. Gerçekte dağıtım ağındaki her bir yolda aracın hangi hızda gidebileceği tam olarak önceden bilinmemektedir. Araçlar, her yol veya bölge için belirlenen minimum ve maksimum hız limitleri dahilinde trafik sıklışıklığının derecesine göre değişen hızlarda seyahat etmektedir. Araç hızı, enerji tüketimini doğrudan etkileyen temel etkenlerden biri olduğu için noktalar arasındaki batarya tüketimini belirsiz hale getirmektedir.

Dinamik olarak değişen parametreler nedeniyle ortaya çıkan araç hızı belirsizliği elektrikli araçlarda batarya tüketimini etkilemektedir. Bu durum nedeniyle elektrikli araç rotalama problemlerine yönelik çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Buna göre, deterministik ve belirsiz batarya tüketime altında elektrikli araçlarla dinamik bir Gezgin Satıcı Problemini ele alınması bu çalışmanın ana erevesi içerisinde yer almaktadır.

Elektrikli Araç Rotalama Problemi'ne (EARP) yönelik literatür taraması, Web of Science Core Collection (WOS) veritabanında taranan makaleler arasında konu (topic) bazlı aramada “vehicle routing” (araç rotalama) anahtar sözcükleri kullanılarak yapılmış, ardından “electric” (elektrik) anahtar sözcüğü ile arama sonuçları daraltılmıştır. Elde edilen makaleler, bu çalışmada ele alınan konuyla ilgileri doğrultusunda incelenmiş, 86 çalışma konu ile alakalı görülüp detaylı olarak analiz edilmiştir. İncelenen çalışmalara dair zet bilgiler, Tablo 1'de gösterilmiştir. Tablo 1, her çalışmanın aşağındaki özellikleriyle ilgili bilgiler sağlamaktadır: (i) ele alınan problem, (ii) kullanılan amaç fonksiyonu, (iii) problem formülasyonu, (iv) kullanılan zm yaklaşımları, (v) dağıtım işlemleri sırasında değişiklik gösteren parametreler, (vi) planlama aşamasında önceden bilinmeyen belirsiz parametreler, (vii) dikkate alınan vresel veya sosyal etkiler ve (viii) enerji kullanımını, maliyeti veya emisyonla ilgili Temel Performans Göstergelerini (TPG) tahmin etmek için kullanılan enerji tüketime yaklaşımıdır.

İlgili literatür taraması sonucunda elde edilen temel görüşler ve sonuçlar şu Şekilde zetlenebilir. Araştırmacılar tarafından teslimat problemi (Soysal vd, 2020; Wang ve Cheu, 2013; Bruglieri vd., 2018; Goeke, 2019; Chen vd., 2018), araba paylaşımı (alık ve Fortz, 2019), müşteri rotalama (Bongiovanni vd., 2019) ve lokasyon rotalama

problemi (Zhang vd., 2020b; Schiffer ve Walther, 2018; Hof vd., 2017; Zhang vd., 2019) gibi çeşitli problem değişkenleri ele alınmıştır. Ayrıca, seyahat süresi (Li vd., 2018b), zamanında teslimat (Shen vd., 2019), yakıt tüketimi (Soysal vd., 2020), mesafe (Florio vd., 2021), araç sayısı (Desaulniers vd., 2016) ve şarj süresi (Masmoudi vd., 2018) gibi farklı kriterler de dikkate alınmıştır.

İncelenen çalışmalar arasında, nicel modelleri öneren çalışmalar göz önüne alındığında ise altı çalışma (Shao vd., 2017, Xiao vd., 2019, Bi ve Tang, 2019; Ge vd., 2020; Basso vd., 2022; Kim vd., 2022) parametre dinamikliğini hesaba katmaktadır. Shao vd. (2017) çalışmalarında, EVRP için karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. İnceledikleri problemde şehir trafiğini dinamik bir unsur olarak ele almışlar; bu amaçla seyahat süresini bir değişken faktör olarak modele dahil etmişlerdir. Seyahat süresini hesaplamak için, her iki dakikada bir değişen seyahat hızlarını dikkate almışlardır. Xiao vd. (2019), literatürde ilk defa zaman pencerelerinin gözetildiği, elektrikli araçların maksimum menzilin sabit bir değer kabul edilmesi yerine aracın hızı ve yüküne bağlı olarak dinamik biçimde değiştiği bir EVRP türevini incelemişler ve bu problemin çözümüne yönelik olarak karışık tamsayılı bir doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modele yönelik yaptıkları testlerde sabit menzil ve seyahat hızı varsayımlarına oranla dinamik menzil ayarlarının %17,9 ile %49,7 oranında maliyet tasarrufu sağladığını belirtmişlerdir. Çözüm yaklaşımı olarak Tekrarlayan Komşuluk Arama Algoritması tabanlı bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Bi ve Tang (2019) elektrikli aracın dahili enerji depolama sistemini takip edebilen dinamik bir kontrol sistemi uygulamışlardır. Markov Karar Zinciri yaklaşımı kullanarak modelledikleri EVRP türevi bir problemde aracın bataryasında kalan enerji miktarını dinamik bir unsur olarak ele almışlardır. Düğümler arasındaki seyahat süresini bilinmeyen bir unsur olarak geliştirdikleri matematiksel modele dahil ederek, çözüm yaklaşımı olarak bir Hibrit Rotalama Algoritması önermişlerdir. Ge vd. (2020), Basso vd. (2022) ve Kim vd. (2022), teslimat işlemleri sırasında müşteri talep değişikliklerini dikkate almışlardır. Ge vd. (2020), ürünlere olan talebin hem belirsiz hem de dinamik olarak değiştiğini varsayan bir EVRP türevi problemi incelemişlerdir. Problemde talebin stokastik olduğu durumda lokasyonu bilinen bir müşteri, bir olasılıksal dağılıma göre ürün talep etmekte, talebin dinamik olduğu durumda ise talebin oluşum zamanı, müşteri lokasyonu ve talep miktarı, yalnızca müşteriden talep geldiği zaman anlaşılabilir.

Bahsedilen problem için geliştirilen karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli hibrit bir meta sezgisel yöntem önerisiyle çözülmektedir. Basso vd. (2022) ise belirsiz enerji tüketimi, dinamik müşteri talepleri ve şarj planlaması içeren EVRP türevini literatürde ilk kez incelemişlerdir. Enerji tüketimini hesaplarken boş araç ağırlığı, yük miktarı, çekiş gücü, trafik, araç hızı, yol durumu gibi unsurları dikkate almışlar, Markov Karar Süreci metodu ile problemi matematiksel olarak modellemişler ve çözüm önerisi olarak bir Güvenli Pekiştirmeli Öğrenme (Safe Reinforcement Learning) yaklaşımı geliştirmişlerdir.

İncelenen çalışmalar arasında, içerdiği detaylı yakıt tüketimi fonksiyonunda, bu çalışmada ele alınan fonksiyon elemanlarına benzer nitelikte elemanlar içeren çalışmalara rastlanmıştır. Birkaç çalışma (Davis ve Figliozzi, 2013; Shen vd., 2019; Basso vd., 2019; Basso vd., 2021; Chen vd., 2021) kapsamlı hesaplama yaklaşımları aracılığıyla enerji tüketimini tahmin etmektedir. Bu çalışmalarda tanıtılan yaklaşımlar, ekonomik (enerji tüketimi için harcanan para miktarı) ve çevresel (enerji kullanımı ve emisyonlar) faydalar sağlayabilir. Davis ve Figliozzi (2013), elektrikli araçların konvansiyonel araçlarla rekabet kabiliyetini ölçmeye yönelik geliştirdikleri EVRP'yi MIP metodu ile modellemişlerdir. Modellerinde boş araç ağırlığı, yük miktarı, araç çekiş gücü ve hıza bağlı olmak üzere detaylı araç enerji tüketimi hesaplamasına yer vermişlerdir. Bu çalışmada elektrikli araçların konvansiyonel araçlarla rekabetinde en önemli unsurun, elektrikli araçların operasyonel maliyetlerde yüksek satın alım maliyetlerini karşılayabilecek miktarda düşüş yaratması koşulu olduğu belirtilmiştir. Basso vd. (2019) iki aşamalı EVRP için genişletilmiş enerji tüketimi hesaplaması içeren bir MILP modeli geliştirmişlerdir. Söz konusu çalışma literatürde enerji talebini, detaylı hız profili ve düğümler arasındaki yolların topografik özelliklerini dikkate alarak gerçekçi şekilde hesaplayan ilk araç rotalama problemi çalışmasıdır. Araç yakıt tüketimi hesaplanırken araç hızı, düğümler arasındaki yolların topografik özellikleri, araç çekiş gücü, ivme ve frenleme gibi unsurlar dikkate alınmıştır. Başka bir çalışmada Basso vd. (2021), enerji tüketiminin belirsiz bir unsur olarak ele alındığı bir diğer çalışmalarında, enerji tüketiminin boş araç ağırlığı, yük miktarı, çekiş gücü, yol durumu, ivme ve frenleme gibi unsurlar ile hesaplandığı bir EVRP türevi problemi C-MILP metodunu kullanarak matematiksel olarak modellemişlerdir. Chen vd. (2021) enerji tüketiminin ve seyahat süresinin belirsiz unsurlar olarak ele alındığı bir EVRP türevi bir problemi incelemiş, bu

problemin çözümü için bir Yol Bulma Algoritması (Path-Finding Algorithm – PFA) önermişlerdir. Kurulan bu matematiksel modelde, enerji tüketimini hesaplarken çekiş gücü, ivme ve frenleme, yay nitelikleri, araç yükü, boş araç ağırlığı gibi unsurları dikkate alınmıştır.

Literatürde parametrelerde hız, enerji tüketimi ve talep gibi belirsizliği hesaba katan elektrikli ARP ve türevleri ile ilgili genel bir bakış sunan literatür inceleme çalışmaları bulunmaktadır (Küçüköğlü vd., 2021; Xiao vd., 2021). Trafik yoğunluğu (Li vd., 2018a), şarj istasyonlarında bekleme süresi (Keskin vd., 2019a), enerji tüketimi (Basso vd., 2021), talep (Kullman vd., 2021) ve hizmet süresi (Zhang vd., 2020b) gibi çeşitli belirsizlikler dikkate alınmaktadır. Bazı çalışmalar (Li vd., 2018b; Zhang vd., 2020b), sosyal sürdürülebilirlik ile ilişkilendirilebilecek kentsel trafik yoğunluğunun azaltılmasına katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada ise, ilk olarak üçüncü bölümde seyahat esnasında araç hızlarının dinamik olarak değişmesi dikkate alınmış; elektrikli araçlar için dinamik Gezgin Satıcı Probleminin çözümüne yönelik bir dinamik programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde aracın yakıt tüketimi hesaplanırken boş araç ağırlığı, yol durumu, çekiş gücü, sürücü deneyimi gibi faktörleri dikkate alan detaylı bir yakıt tüketim fonksiyonu kullanılmıştır. Büyük ölçekli problemlerin çözülebilmesi için ise bir Kısıtlı Dinamik Programlama – Bağlantı Eleme Yaklaşımı algoritması önerilmiştir.

Dinamik problem parametrelerini (seyahat süresi vb.), belirsiz batarya tükenmesini ve enerji kullanımının ayrıntılı tahminini aynı anda hesaba katan herhangi bir Elektrikli Araç Gezgin Satıcı Problemi (ETSP) üzerine bir çalışma bulunamamıştır. Bu bağlamda dördüncü bölümde, ele alınan problem için DP tabanlı çözüm yaklaşımı önerilmiştir. DP modeli, küçük boyutlu problemler için en uygun çözümleri elde etme yeteneğine sahipken, nispeten daha büyük durumlar için uygulanabilir teslimat planları RDP ve Prim algoritması tabanlı çözüm yaklaşımı ile elde edilebilmektedir. Bu çalışmada çözüm yaklaşımının performans değerlendirmesi, optimal model ve DP tabanlı başka bir çözüm yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 1: Literatür Taraması Yapan Çalışmalar

#	Çalışma	Problem <sup>1</sup>	Amaç	Model <sup>2</sup>	Çözüm Yaklaşımı <sup>3</sup>	Dinamik faktörler	Belirsiz faktörler	Sürdürülebilirlik	Detaylı Tüketim Hesaplama
1	Wang ve Cheu, 2013	PDP	Mesafe	MINP	TPSH	-	-		-
2	Davis ve Figliozzi, 2013	EVRP	Enerji Tüketim, Maliyet	MIP	-	-	-	Enerji Kullanımı	Boş ağırlık, yük miktarı, çekiş gücü, araç hızı
3	Lu vd., 2014	EVRP	Mesafe	MOP	-	-	-		-
4	Schneider vd., 2014	EVRP	Mesafe	MIP	HMH	-	-	Enerji Kullanımı	-
5	Bruglieri vd., 2014a	PDP	Araç Sayısı	MILP	MH	-	-		-
6	Bruglieri vd., 2014b	PDP	Araç Sayısı	MILP	-	-	-		-
7	Wong vd., 2015	EVRP	Maliyet	MIP	GA	-	-		-
8	Schneider vd., 2015	EVRP	Maliyet	MIP	AVNS	-	-		-
9	Goeke ve Schneider, 2015	EVRP	Maliyet, Mesafe	MINP	ALNS	-	-		Çekiş gücü, araç hızı, yük miktarı, eğim
10	Keskin ve Çatay, 2016	EVRP	Maliyet	MILP	ALNS	-	-		-
11	Hiermann vd., 2016	EVRP	Maliyet	MIP	MH	-	-		-
12	Desaulniers vd., 2016	EVRP	Araç Sayısı, Maliyet	Analitik	-	-	-		-
13	Adler vd., 2016	EVSWP	Mesafe	IP	-	-	-		-
14	Abousleiman ve Rawashdeh, 2016	EVRP	Enerji Kullanımı	Analitik	PSO	-	-	Enerji Kullanımı	Çekiş gücü, araç hızı, yük miktarı, eğim
15	Abdulaal vd., 2016	VRP	Kar	MDP	HMH	-	Şarj istasyonlarındaki yoğunluk		-
16	Shao vd., 2017	EVRP	Maliyet, Mesafe	MILP	GA	Trafik	-		-
17	Pimenta vd., 2017	DARP	Yükleme-Boşaltma Operasyonları	MILP	HH	-	-		-
18	Murakami, 2017	EVRP	Maliyet	MILP	-	-	-		Çekiş gücü, boş ağırlık, yük miktarı



#	Çalışma	Problem <sup>1</sup>	Amaç	Model <sup>2</sup>	Çözüm Yaklaşımı <sup>3</sup>	Dinamik faktörler	Belirsiz faktörler	Sürdürülebilirlik	Detaylı Tüketim Hesaplama
19	Montoya vd., 2017	EVRP	Şarj İstasyonu	MILP	HMH	-	-	-	-
20	Yu vd., 2017	HVRP	Maliyet	MIP	TBA	-	-	-	-
21	Conway, 2017	EVRP	Şarj İstasyonu	Simülasyon	-	-	-	-	-
22	Hof vd., 2017	LRP	Mesafe, Maliyet	Analitik	AVNS	-	-	-	-
23	Zhang vd., 2018	EVRP	Enerji Kullanımı	MIP	ACO, ALNS	-	-	-	Boş ağırlık, yük miktarı, araç hızı, sürtünme
24	Shao vd., 2018	EVRP	Şarj İstasyonu, Mesafe	MILP	HGA	-	-	-	Çekiş gücü, araç hızı, yük miktarı
25	Schiffer ve Walther, 2018	LRP	Maliyet	MIP	ALNS	-	-	-	-
26	Li vd., 2018a	EVRP	Maliyet	İSP	TPSH	-	-	-	-
27	Li vd., 2018b	EVRP	Seyahat Süresi, Maliyet	MILP	-	-	Trafikte bekleme süresi	Trafik, Enerji Kullanımı	-
28	Keskin ve Çatay, 2018	EVRP	Maliyet	MILP	ALNS	-	-	-	-
29	Mirhedayatian ve Yan, 2018	EVRP	Maliyet	MILP	-	-	-	-	-
30	Masmoudi vd., 2018	DARP	Şarj Süresi	MINP	EVNS	-	-	-	Çekiş gücü, yük miktarı, araç hızı
31	Chen vd., 2018	PDP	Maliyet	MINP	-	-	-	-	-
32	Bruglieri vd., 2018	PDP	Mesafe	MOP	TPSH	-	-	-	-
33	Bi ve Tang, 2019	TSP	Servis Süresi	MDP	HRA	Kalan enerji miktarı	Seyahat süresi	Trafik, Enerji Kullanımı	Çekiş gücü, ivme, boş ağırlık, araç yükü
34	Rossi vd., 2019	EVRP	Maliyet	Analitik	MH	-	Ürün talebi	Trafik	-
35	Fernández vd., 2019	EVRP	Enerji Kullanımı	Analitik	-	-	Enerji tüketimi	-	Araç hızı, sürücü davranışları, çekiş gücü
36	Zuo vd., 2019	EVRP	Mesafe	MILP	-	-	-	-	-
37	Goeke, 2019	PDP	Enerji Kullanımı	MIP	MH	-	-	-	-
38	Xiao vd., 2019	EVRP	Maliyet	MILP	INS	Araç menzili	-	-	-

#	Çalışma	Problem <sup>1</sup>	Amaç	Model <sup>2</sup>	Çözüm Yaklaşımı <sup>3</sup>	Dinamik faktörler	Belirsiz faktörler	Sürdürülebilirlik	Detaylı Tüketim Hesaplama
39	Çalık ve Fortz, 2019	ECS	Kar	MISP	BD	-	Ürün talebi	-	-
40	Keskin vd., 2019a	EVRP	Bekleme Süresi	MIP	-	-	Şarj istasyonlarındaki bekleme süresi	-	-
41	Keskin vd., 2019b	EVRP	Maliyet	MILP	ALNS	-	-	-	-
42	Reyes-Rubiano vd., 2019	EVRP	Maliyet	Analitik	SHA	-	Seyahat süresi	-	-
43	Koç vd., 2019	EVRP	Maliyet	MILP	ALNS	-	-	-	-
44	Froger vd., 2019	EVRP	Mesafe	Analitik	HMH	-	-	-	-
45	Hiermann vd., 2019	EVRP	Maliyet	Analitik	HGA	-	-	-	-
46	Pelletier vd., 2019	EVRP	Maliyet	MILP	TPSH	-	Enerji tüketimi	Enerji Kullanımı	Boş ağırlık, çekiş gücü, ivme
47	Jie vd., 2019	EVRP	Maliyet	IP	HMH	-	-	Enerji Kullanımı	-
48	Breunig vd., 2019	EVRP	Maliyet	Analitik	LNS	-	-	-	-
49	Zhang vd., 2019	LRP	Maliyet	Analitik	HVNS	-	Ürün talebi	-	-
50	Bongiovanni vd., 2019	DARP	Seyahat Süresi	MILP	B&C	-	-	-	-
51	Basso vd., 2019	EVRP	Enerji Kullanımı, Seyahat Süresi	MILP	-	-	-	Enerji Kullanımı	Araç hızı, yay nitelikleri, çekiş gücü, ivme ve frenleme
52	Shen vd., 2019	EVRP	Enerji Verimliliği	Analitik	MH	-	Seyahat süresi	Trafik, Enerji Kullanımı	Çekiş gücü, frenleme gücü, ortalama seyahat süresi
53	Li vd., 2020a	EVRP	Maliyet, Emisyon	Analitik	ACO	-	-	Enerji Kullanımı	-
54	Li vd., 2020c	EVRP	Maliyet, Enerji Kullanımı, Seyahat Süresi	MIP	GA	-	-	-	Çekiş gücü, boş ağırlık, yük miktarı, mesafe
55	Chen vd., 2020	EVRP	Maliyet, Bekleme Süresi	NLP	-	-	-	-	-
56	Mao vd., 2020	EVRP	Maliyet	MINP	HMH	-	-	-	-

#	Çalışma	Problem <sup>1</sup>	Amaç	Model <sup>2</sup>	Çözüm Yaklaşımı <sup>3</sup>	Dinamik faktörler	Belirsiz faktörler	Sürdürülebilirlik	Detaylı Tüketim Hesaplama
57	Granada-Echeverri vd., 2020	EVRP	Mesafe	MILP	MH	-	-	-	-
58	Ferro vd., 2020	EVRP	Maliyet	MILP	-	-	-	Boş ağırlık, yük miktarı, araç hızı, ivme ve frenleme, çekiş gücü	-
59	Li vd., 2020b	EVRP	Maliyet	MILP	HMH	-	-	-	-
60	Zhu vd., 2020	EVRP	Mesafe	MIP	HMH	-	-	-	-
61	Zhang vd., 2020b	EVRP	Mesafe, Araç Sayısı	FO	HMH	-	Hizmet süresi, enerji tüketimi, seyahat süresi	Trafik, Enerji Kullanımı	-
62	Kancharla ve Ramadurai, 2020	EVRP	Seyahat Süresi	MILP	ALNS	-	-	-	-
63	Meng ve Ma, 2020	EVRP	Maliyet	MILP	ACO	-	-	-	-
64	Lu vd., 2020	EVRP	Maliyet	MILP	IVNS	-	-	Araç hızı, boş ağırlık, yük miktarı, mesafe	-
65	Soysal vd., 2020	PDP	Yakıt Tüketimi	C-MILP	-	-	Bataryalarda şarj eksilmesi	Enerji Kullanımı	-
66	Wang vd., 2020	EVRP	Enerji Kullanımı, Mesafe	MIP	VNS	-	-	-	Çekiş gücü
67	Ge vd., 2020	EVRP	Maliyet	MILP	HMH	Ürün talebi	Ürün talebi	-	-
68	Taş, 2021	EVRP	Maliyet	MILP	CG	-	-	-	-
69	Zhao vd., 2021	EVRP	Maliyet, Seyahat Süresi	MOP	HGA	-	-	Boş ağırlık, yük miktarı, mesafe	-
70	Yang vd., 2021	EVRP	Maliyet	Analitik	HMH	-	-	-	-
71	Deng vd., 2021	EVRP	Seyahat Süresi	MIP	HMH	-	-	-	-
72	Basso vd., 2021	EVRP	Enerji Kullanımı	C-MILP	-	-	Enerji tüketimi	Enerji Kullanımı	Boş ağırlık, yük miktarı, çekiş gücü, yol durumu, ivme ve frenleme
73	Messaoud, 2021	EVRP	Enerji Kullanımı	CCP	LNS	-	Seyahat süresi	-	-
74	Yindong vd., 2021	EVRP	Maliyet	MIP	EDA	-	-	-	-
75	Yu vd., 2021	EVRP	Enerji Kullanımı	MIP	ALNS	-	-	Enerji Kullanımı	Çekiş gücü, boş ağırlık, yük miktarı, araç hızı

#	Çalışma	Problem <sup>1</sup>	Amaç	Model <sup>2</sup>	Çözüm Yaklaşımı <sup>3</sup>	Dinamik faktörler	Belirsiz faktörler	Sürdürülebilirlik	Detaylı Tüketim Hesaplama
76	Wang ve Zhou, 2021	EVRP	Maliyet	MIP	VNS	-	-	-	-
77	Chen vd., 2021	EVRP	Enerji Kullanımı, Seyahat Süresi	Analitik	PFA	-	Enerji tüketimi, seyahat süresi	Enerji Kullanımı	Çekiş gücü, ivme ve frenleme, yay nitelikleri, araç yükü, boş ağırlık
78	Bac ve Erdem, 2021	EVRP	Şarj Süresi	MIP	HMH	-	-	-	-
79	Jia vd., 2021	EVRP	Mesafe	MOP	HMH	-	-	-	-
80	Rastani ve Çatay, 2021	EVRP	Araç Sayısı, Enerji Kullanımı	MILP- MINP	HMH	-	-	-	Çekiş gücü, boş ağırlık, yük miktarı, araç hızı
81	Florio vd., 2021	EVRP	Mesafe	Analitik	BC&P	-	Seyahat süresi	-	-
82	Keskin vd., 2021	EVRP	Maliyet	MILP	ALNS	-	Şarj istasyonlarında bekleme süresi	-	-
83	Karakatič, 2021	EVRP	Mesafe	MIP	GA	-	-	-	-
84	Kullman vd., 2021	EVRP	Maliyet	MDP	ADP	-	Şarj istasyonlarındaki yoğunluk	-	-
85	Basso vd., 2022	EVRP	Enerji Kullanımı	MDP	SRL	Ürün talebi	Enerji tüketimi	Enerji Kullanımı	Boş ağırlık, yük miktarı, çekiş gücü, trafik, araç hızı, yol durumu
86	Kim vd., 2022	VRP	Mesafe	RO	GA	Talep	-	Enerji Kullanımı, Trafik	-
	<b>Bu çalışma – (Bölüm 3)</b>	<b>ETSP</b>	<b>Enerji Kullanımı</b>	<b>DP</b>	<b>RDP-LE</b>	<b>Araç hızı</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>Boş ağırlık, yol durumu, çekiş gücü, sürücü deneyimi</b>
	<b>Bu çalışma – (Bölüm 4)</b>	<b>ETSP</b>	<b>Enerji Kullanımı</b>	<b>DP</b>	<b>RDP-Prim</b>	<b>Araç hızı</b>	<b>Enerji Tüketimi</b>	<b>-</b>	<b>Boş ağırlık, yol durumu, çekiş gücü, sürücü deneyimi</b>

1: VRP: Araç Rotalama Problemi, EVRP: Elektrikli VRP, PDP: Topla – Dağıt VRP, EVSWP: Elektrikli Araçlar- En Kısa Yürüme Problemi, HVRP: Hibrit VRP, DARP: Müşteri Rotalama Problemi, LRP: Lokasyon Rotalama Problemi, ECS: Elektrikli Araç Paylaşımı Problemi, TSP: Gezgin Satıcı Problemi, ETSP: Elektrikli Araç Gezgin Satıcı Problemi

2: MINP: Karma Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama, MIP: Karma Tam Sayılı Programlama, MOP: Çok Amaçlı Programlama, MILP: Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama, IP: Tam Sayılı Programlama, MDP: Markov Karar Süreci, İSP: İki Seviyeli Programlama, NLP: Doğrusal Olmayan Programlama, C-MILP: Şans Kısıtlı MILP, CCP: Şans Kısıtlı Programlama, FO: Bulanık Optimizasyon, MISP: Karma Tam Sayılı Stokastik Programlama, DP: Dinamik Programlama

3: TPSH: İki Aşamalı Çözüm Sezgiseli, HMH: Hibrit Meta Sezgisel Yaklaşım, MH: Meta Sezgisel Yaklaşım, GA: Genetik Algoritma, VNS: Değişken Komşuluk Arama, AVNS: Uyarlanabilir VNS, LNS: Büyük Komşuluk Arama, ALNS: Uyarlanabilir LNS, PSO: Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, TBA: Tavlama Benzetimi Algoritması, HH: Hibrit Sezgisel Yaklaşım, HRA: Hibrit Rotalama Algoritması ACO: Karınca Kolonisi Optimizasyonu, HGA: Hibrit GA, EVNS: Evrimsel VNS, INS: Tekrarlayan Komşuluk Arama, B&C: Dal-kesi algoritması, CG: Kolon Türetme Algoritması, IVNS: Tekrarlayan VNS, EDA: Dağılım Tahminleme Algoritması, BD: Bender Ayrıştırma Algoritması, SHA: Simheuristic Yaklaşım, HVNS: Hibrit VNS. SRL: Güvenli Pekiştirmeli Öğrenme, PFA: Yol Bulma Algoritması, ADP: Yaklaşık Dinamik Programlama, BC&P: Dal-kesi ve Değer Algoritması, RDP-LE: Kısıtlı Dinamik Programlama – Bağlantı Eleme Yaklaşımı

### 3. BÖLÜM

## DETERMİNİSTİK BATARYA TÜKETİMİ ALTINDA ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DİNAMİK GEZGİN SATICI PROBLEMİ

Bu bölümde ilk olarak ele alınan problemin tanımı yapılmış ve problemin Dinamik Programlama (DP) formülasyonu oluşturulmuştur. Ardından büyük ölçekli problemleri çözebilmek için literatürde yer RDP yaklaşımı ve bu yaklaşımı temel alarak bu çalışmada geliştirilen “RDP–Bağlantı Eleme” yaklaşımı tanıtılmıştır<sup>19</sup>.

### 3.1 Problem Tanımı

Bu problemde dinamik Gezgin Satıcı Problemi bir ağ olarak  $G=\{V,A\}$  şeklinde tanımlanmaktadır. Dğümler  $V=\{0,1,\dots,n\}$ , noktalar arası bağlantılar ise  $A$  harfiyle gösterilmektedir.  $\{0\}$  ile gösterilen düğüm depoyu temsil etmekte, kalan düğümler ise müşterilere karşılık gelmektedir. Depoda bulunan bir elektrikli araç ile her müşterinin tam olarak bir kez ziyaret edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada ele alınan dinamik Gezgin Satıcı Problemi, dağıtım esnasında dinamik olarak değişen araç hız verilerini dikkate almaktadır. Nihai hedef, en düşük enerji tüketimi maliyeti ile depodan başlayıp tüm müşterilerin birer kez gezildiği ve sonunda tekrar depoya dönülen bir rotanın elde edilmesidir. Noktalar arası seyahat için gerekli olan enerji tüketim miktarları detaylı olarak tahmin edilmektedir.

Barth vd. (2005) tarafından konvensiyonel araçların yakıt tüketim tahmini için ortaya konulan yaklaşım, Asamer vd. (2016) tarafından elektrikli yük araçlarının enerji tüketimini tahmin etmek üzere birçok çalışmada (Bektaş ve Laporte (2011), Demir vd. (2012) ve Franceschetti vd. (2013) kullanılan aşağıdaki formüle uyarlanmıştır. Buna göre; elektrikli araçlar için  $F(kg)$  yükü ile sabit  $v(m/s)$  hızında  $d(m)$  mesafe kat etmek için gereken  $Z(kWh)$  enerji tüketimleri şu şekilde hesaplanmaktadır.

<sup>19</sup> İlgili çalışmadan elde edilen yayının künyesi şu şekildedir: Ünal, V., Yavrucu, E., Soysal, M., Çimen, M. (2022). Elektrikli Araçlar İçin Dinamik Gezgin Satıcı Problemi Üzerine Bir Çalışma, Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi, 57(2), 970 - 996. 10.15659/3.sektor-sosyal-ekonomi.22.05.1786.

$$Z(v) = \max \left( 0, \frac{\beta d v^2 + \alpha (w + F) d}{(3.6)10^6} \right) \varepsilon + \frac{p \left( \frac{d}{v} \right)}{(3.6)10^6} \quad (1)$$

Formülde  $Z(v)$ ,  $v$  araç hızında harcanan enerji miktarını (kWh) ifade eder. Burada,  $\beta = 0.5C_d\rho A_e$  ve  $\alpha = g \sin \theta + gC_r \cos \theta$  olarak ifade edilir. Tablo 2, enerji tüketimi hesaplaması için gerekli parametreleri göstermektedir.

Tablo 2: Enerji Tüketimi Hesaplaması İçin Gerekli Parametreler

Parametre	Tanımı
$w$	Boş araç ağırlığı (kg)
$g$	Yerçekimi sabiti ( $m/s^2$ )
$C_d$	Aerodinamik sürtünme katsayısı
$C_r$	Yuvarlanma direnci katsayısı
$\rho$	Hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$A_e$	Ön yüzey alanı ( $m^2$ )
$\varepsilon$	Sürücü deneyimine ilişkin parametre
$\theta$	Yol açısı
$p$	Yardımcı güç talebi (W)

### 3.2 Dinamik Programlama Algoritması

Bellman (1962) ve Held ve Karp (1962), küçük ölçekli Gezgin Satıcı Problemlerinin DP yöntemi kullanılarak optimal çözülebileceğini ortaya koymuştur. Bellman tarafından bu problem için önerilen algoritma aşağıda kısaca anlatılmaktadır.

$\Phi$  herhangi bir zamanda ziyaret edilen düğümler kümesini ifade etmektedir.  $C(\Phi, j)$  düğüm 0'dan başlayan,  $\Phi$  içerisindeki tüm düğümleri tam olarak bir kez ziyaret eden ve  $j$  düğümünde biten bir araç rotası için harcanan toplam enerji miktarını göstermektedir ( $\Phi \subseteq V \setminus 0$ ). Bundan sonra  $(\Phi, j)$  metin boyunca kısmi tur olarak isimlendirilecektir.  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne seyahat nedeniyle harcanan enerji miktarı  $c_{i,j}$  ile gösterilmektedir. Algoritma içerisinde,  $C(\Phi, j)$  ilk (2) ve her ardışık aşamada (3) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$C(\{j\}, j) = c_{0,j}, \forall j \in V \setminus 0 \quad (2)$$

$$C(\Phi, j) = \min_{i \in \Phi \setminus j} \{C(\Phi \setminus j, i) + c_{i,j}\}, \forall j \in \Phi \quad (3)$$

Son olarak, düğüm 0'a dönüş de dahil olmak üzere eksiksiz tam bir tur için harcanan minimum toplam enerji miktarını gösteren  $C^*$  hesaplanması aşağıdaki gibidir:

$$C^* = \min_{j \in V \setminus 0} \{C(V \setminus 0, j) + c_{j,0}\} \quad (4)$$

### 3.3 Kısıtlı Dinamik Programlama Sezgiseli Tanıtımı

En iyi (optimal) çözümü veren DP algoritması her bir aşamada olası bütün durumları değerlendirmektedir. Üssel olarak artan bellek ve hesaplama süresi gereksinimleri büyük boyutlu problemlerde dinamik programlama yönteminin kullanılmasını olanaksız kılmakta veya maliyeti fazla olan donanım yatırımı gerektirmektedir (Soysal vd., 2020). Buna yönelik olarak literatürde geliştirilen birtakım yaklaşımlar bulunmaktadır. Malandraki ve Dial (1996) tarafından geliştirilen RDP algoritması, DP algoritması gibi tüm durumları incelemek yerine, her aşamada umut vadeden (maliyet açısından en avantajlı)  $H$  tane durumunun incelenmesi ve dikkate alınmasını öneren basit bir mantığa dayanmaktadır. Bu algorithmada  $H = \infty$  olarak tanımlanması, algoritmanın optimal çözümü bulan DP algoritması şekline dönüşmesini ifade etmektedir.

RDP algoritmasının her aşamasında yerine getirilen işlemler şu şekilde özetlenebilir;

1. Önceki aşamalarda gezilen noktaları dikkate alarak, bu aşamada tura eklenebilecek yeni noktaları belirle,
2. Bu aşamada karşılaşılan durumlar için toplam maliyeti hesapla,
3. Toplam maliyetlerine göre durumları küçükten büyüğe sırala,
4. En düşük maliyetli  $H$  tane durumu seç,
5. Diğer aşamada sadece seçilen  $H$  durumu dikkate alarak ilerle,
6. Eğer bütün noktalar gezildiyse, tüm turun toplam maliyetini hesapla ve algoritmayı sonlandır.
7. Eğer bütün noktalar gezilmediyse, 1. aşamaya dön.

RDP algoritması, her aşamada tüm durumların dikkate alınmaması nedeniyle en iyi çözümü garanti etmemektedir; ancak DP algoritmasının üssel olarak artan depolama ve zaman gereksinimini ortadan kaldırmaktadır.



### 3.4 RDP-Bağlantı Eleme Sezgisel Yöntemi

Bu bölümde, bağlantı eleme mantığı kullanılarak RDP yaklaşımını geliştiren yeni bir çözüm yaklaşımı önerilmektedir. Gezgin Satıcı Problemi için DP algoritmasının her durumu, o ana kadar ziyaret edilen düğümler (kısmi tur) ve önceden ziyaret edilen düğüm hakkındaki bilgileri içermektedir. RDP algoritması, o ana kadar elde edilen maliyetlere göre her aşamada durumların genişletilmesini önermektedir. Burada, DP'deki durumların nispeten daha iyi genişletilmesini sağlamak için bağlantı eleme mantığı RDP algoritmasına dahil edilmektedir. RDP algoritması, ilk aşamadan son aşamaya bir yönde hareket etmeyi içeren bir ileri özyineleme kullanır. Her aşamada, o ana kadar ilgili müşterilerin ziyaret edilmesinden kaynaklanan maliyetler göz önünde bulundurulmaktadır. Bağlantı eleme işleminde, noktalar arası bağlantılar arasındaki maliyetlerin ortalaması hesaplanarak, RDP algoritmasında seçilen durumların, ortalama maliyet altındaki bağlantılardan olması sağlanmaktadır. RDP algoritmasına bağlantı eleme mantığının uyarlanması esnasında gerçekleşen işlemler kısaca aşağıda özetlenmektedir.

İlk olarak tüm düğümler arasındaki hız ve mesafe bilgileri kullanılarak, düğümler arasındaki ortalama enerji tüketimi hesaplanır. Ortalama tüketim değeri  $\bar{X}$  olarak ifade edilmektedir.

1. Önceki aşamalarda gezilen noktaları dikkate alarak, bu aşamada tura eklenebilecek yeni noktaları belirle,
2. Yeni noktaların tüketim maliyetlerini hesapla,
3. İlk aşama ise, 6. aşamadan devam et, ilk aşamada değil ise hesaplanan maliyetler içerisinde  $\bar{X}$  değerinden daha düşük maliyetli bağlantı mevcudiyetini kontrol et,
4. Eğer daha düşük maliyetli bağlantı mevcut ise 5. aşamadan devam et, yok ise 6. aşamaya ilerle,
5.  $\bar{X}$  değerinden daha yüksek maliyette olan durumları dikkate alma ve  $\bar{X}$  değerinden daha düşük olan durumlar ile devam et,
6. Bu aşamada karşılaşılan durumlar için toplam maliyeti hesapla,
7. Toplam maliyetlerine göre durumları küçükten büyüğe sırala,
8. En düşük maliyetli  $H$  tane durumu seç,
9. Diğer aşamada sadece seçilen  $H$  durumu dikkate alarak ilerle,
10. Eğer bütün noktalar gezildiyse, tüm turun toplam maliyetini hesapla ve algoritmayı sonlandır.

11. Eğer bütün noktalar gezilmediyse, 1. aşamaya dön.

### 3.5 Nümerik Analizler

Bu bölümde literatürde yer alan hipotetik veriler üzerinde analizler yapılmakta ve geliştirilen sezgisel yaklaşımın performansı ortaya konulmaktadır.

#### 3.5.1 Örnek Vaka Tanıtımı

Örnek vaka olarak literatürde yer alan ve diğer çalışmalarda da sıklıkla kullanılmakta olan PRPLIB kütüphanesinden<sup>20</sup> 1 depo ve 10 noktadan oluşan bir örnek problem (UK10\_05) ele alınmıştır. İlgili problem İngiltere’de yer alan şehirlerarası gerçek mesafeleri ifade etmektedir. Problemi daha gerçekçi olması itibariyle şehir içi lojistik problemine evirmek için problemde verilen mesafeler 10’a bölünmüştür. Tablo 3 kullanılan noktalar arası mesafeleri göstermektedir. Problemde ihtiyaç duyulan ve bahsedilen kütüphanede tanımlanmamış olan noktalar arası hız verileri ise rassal olarak oluşturulmuştur (bkz: Tablo 4). Dağıtım için kullanılan elektrikli araca ilişkin veriler ise Tablo 5’te sunulmaktadır.

Tablo 3: Noktalar Arası Mesafeler (metre)

Depo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Depo	0.0	5030.0	2397.0	3434.0	4851.0	8572.0	2396.0	2764.0	5173.1	7253.0	9324.0
1	5149.0	0.0	3604.0	1930.0	3275.0	11506.0	3934.0	3192.0	4537.0	11467.1	12438.0
2	2448.0	3593.0	0.0	2230.0	3145.0	8274.0	581.0	2008.0	4793.0	8406.0	9206.0
3	3492.0	1929.0	2224.0	0.0	2962.0	10241.0	2675.0	1324.0	3270.0	9900.1	11173.0
4	4917.0	3306.0	3141.0	2981.0	0.0	10529.0	3471.0	3582.0	6064.0	11100.1	11649.0
5	8632.0	11669.0	8374.0	10320.0	10572.0	0.0	8047.0	10054.0	12839.0	5868.0	1233.0
6	2473.0	3999.0	580.0	2676.0	3551.0	7914.0	0.0	2454.0	5239.0	7950.0	8846.0
7	2783.0	3184.0	2006.0	1318.0	3547.0	9974.0	2457.0	0.0	3092.0	9613.0	10906.0
8	5137.1	4540.0	4792.0	3272.0	6048.0	12760.0	5243.0	3095.0	0.0	12292.2	13692.0
9	7283.0	11436.0	8440.0	9901.0	11105.0	5847.0	7959.0	9594.0	12266.1	0.0	6599.0
10	9378.0	12558.0	9263.0	11209.0	11704.0	1254.0	8936.0	10943.0	13728.0	6614.0	0.0

<sup>20</sup> The Pollution-Routing Problem Instance Library,  
<http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm>, Erişim Tarihi: Ocak, 2022

Tablo 4: Noktalar Arası Hız Verileri (metre/saniye)

	Depo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Depo	0	10,8	10,4	12	11,2	13,6	10,8	14,4	12,8	11,6	12
1	13,2	0	14	12	12	12	12,4	10,4	10,8	11,6	9,2
2	11,2	11,6	0	12,8	12,8	12	13,6	10,4	10	12	8,8
3	13,2	10,8	14,8	0	13,6	10,8	12,8	11,6	12,8	10,4	12,4
4	12	13,2	13,6	13,6	0	10,4	10,8	11,2	12,4	10,8	13,6
5	14	11,2	13,6	11,2	11,2	0	11,6	13,6	13,2	12,8	10,8
6	10,8	11,2	12,8	12	12,8	10	0	14,8	10,4	12	8,8
7	10,8	12,4	11,2	8,8	13,2	9,2	12,4	0	12	10,8	13,6
8	12	14,8	12	12,4	10,8	13,2	10,4	11,6	0	10	9,6
9	12,8	12	12	11,6	14,8	11,2	12,8	11,2	13,6	0	14,4
10	10	11,6	12,8	11,6	12,8	12,4	12,8	12,8	12	12,4	0

Tablo 5: Elektrikli Araca İlişkin İhtiyaç Duyulan Parametre Değerleri

Parametre	Değeri
Aerodinamik sürtünme katsayısı	0,6000
Ön yüzey alanı (m <sup>2</sup> )	2,5000
Hava yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1,2041
Yerçekimi sabiti (m/s <sup>2</sup> )	9,8100
Yuvarlanma direnci katsayısı	0,0100
Yol açısı	0,0000
Boş ağırlık (kg)	3500,0000
Araç yükü (kg)	0,0000
Araç sürücü deneyim etkinliği	1,3175
Yardımcı güç talebi (W)	1575,0000

Problemde amaç, depoda başlayan ve depoda biten tüm noktaların bir kez ziyaret edildiği, toplam enerji tüketimini en küçükleyen dağıtım planını elde etmektir.

### 3.5.2 Örnek Vaka Çözümü

Yukarıda tanıtilan problem DP algoritması kullanılarak iki farklı maliyet fonksiyonu altında çözülmüştür. Birinci maliyet fonksiyonu, (1) numaralı formülden faydalanarak araç enerji tüketimlerini detaylı olarak dikkate almakta ve toplam enerji tüketimini en

küçüklemeye çalışmakta; ikinci maliyet fonksiyonu ise, enerji gereksinimlerini göz ardı ederek sadece toplam kat edilen mesafeyi en küçüklemeye çalışmaktadır. Tablo 6 iki farklı amaç altında elde edilen optimal dağıtım planlarını ve temel performans göstergelerini sunmaktadır.

Tablo 6: İki Farklı Amaç Altında Elde Edilen Optimal Dağıtım Planları ve Temel Performans Göstergeleri Değerleri

Detaylı enerji tüketimi en küçükleme				Mesafe en küçükleme			
Yol (i-j)	Toplam Mesafe (metre)	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Toplam Seyahat Süresi (saniye)	Yol (i-j)	Toplam Mesafe (metre)	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Toplam Seyahat Süresi (saniye)
0->9	7253	1,51	625,26	0->9	7253	1,51	625,26
9->5	5847	1,21	522,05	9->10	6599	1,48	458,26
5->10	1233	0,25	114,17	10->5	1254	0,27	101,13
10->6	8936	1,91	698,13	5->6	8047	1,67	693,71
6->2	580	0,12	45,31	6->2	580	0,12	45,31
2->7	2008	0,41	193,08	2->7	2008	0,41	193,08
7->8	3092	0,65	257,67	7->8	3092	0,65	257,67
8->3	3272	0,69	263,87	8->3	3272	0,69	263,87
3->4	2962	0,65	217,79	3->4	2962	0,65	217,79
4->1	3306	0,72	250,45	4->1	3306	0,72	250,45
1->0	5149	1,11	390,08	1->0	5149	1,11	390,08
<b>Toplam</b>	<b>43638</b>	<b>9,23</b>	<b>3577,86</b>	<b>Toplam</b>	<b>43522</b>	<b>9,28</b>	<b>3496,61</b>

Farklı amaçlar gözetilerek yapılan analiz sonuçları detaylı enerji tüketimini dikkate almanın faydalarını ortaya koymaktadır. Geleneksel mesafe en küçüklemesi yapmak yerine detaylı enerji tüketimini dikkate almak dağıtım planlarını ve dolayısıyla temel performans göstergelerini etkileyebilmektedir. Mesafe en küçüklemesi altında elde edilen dağıtım planının daha kısa toplam mesafeye sahip olmasına rağmen, dağıtımı gerçekleştirmek için toplam enerji gereksiniminin daha fazla olduğu görülmektedir.

### 3.5.3 Dinamik Olarak Değişen Hızları Dikkate Almanın Faydası

Bu bölümde dinamik olarak değişen araç hızlarını dikkate almanın faydasını ortaya koymak için bir analiz yapılmaktadır. Bunun için, bir dağıtım ağına yer alan yollardaki her 2 nokta seyahatinde, araç hızlarında meydana gelen değişimler dikkate alınmaktadır. EK 1’de sunulan tablolarda (bkz: Tablo 19, Tablo 20, Tablo 21, Tablo 22 ve Tablo 23)

araç hızı değişimleri gösterilmektedir. Tablo 7 statik ve dinamik durumlar altında elde edilen optimal dağıtım planlarını ve temel performans göstergelerini sunmaktadır.

Tablo 7: Statik ve Dinamik Durumlar Altında Elde Edilen Optimal Dağıtım Planları ve Temel Performans Göstergeleri Değerleri

Statik Senaryo				Dinamik Senaryo			
Yol (i-j)	Toplam Mesafe (metre)	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Toplam Seyahat Süresi (saniye)	Yol (i-j)	Toplam Mesafe (metre)	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Toplam Seyahat Süresi (saniye)
0->9	7253	1,51	625,26	0->9	7253	1,51	625,26
9->5	5847	1,21	522,05	9->10	6599	1,37	568,88
5->10	1233	0,25	114,17	10->5	1254	0,27	101,13
10->6	8936	1,91	698,13	5->6	8047	1,66	718,48
6->2	580	0,12	45,31	6->2	580	0,12	53,70
2->7	2008	0,41	193,08	2->7	2008	0,45	139,44
7->8	3092	0,65	257,67	7->8	3092	0,65	257,67
8->3	3272	0,69	263,87	8->3	3272	0,69	272,67
3->4	2962	0,65	217,79	3->4	2962	0,62	246,83
4->1	3306	0,72	250,45	4->1	3306	0,69	275,50
1->0	5149	1,11	390,08	1->0	5149	1,14	367,79
<b>Toplam</b>	<b>43638</b>	<b>9,23</b>	<b>3577,86</b>	<b>Toplam</b>	<b>43522</b>	<b>9,16</b>	<b>3627,35</b>

Elde edilen sonuçlar, dinamik hız değişimlerini dikkate almanın faydalarını ortaya koymaktadır. Dinamik hızların dikkate alındığı senaryoda dağıtım planının ve dolayısıyla temel performans göstergelerinin değiştiği gözlemlenmektedir

### 3.5.4 Geliştirilen Sezgisel Yaklaşımın Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde geliştirilen sezgisel yaklaşımın performans değerlendirmesini yapmak üzere nümerik analizler yapılmıştır. Analizler için PRPLIB kütüphanesinden<sup>21</sup> değişik büyüklüklerde 90 farklı problem seçilmiştir. Problemler ile ilgili bilgiler Tablo 8’de sunulmaktadır. Her bir problem H= 50, 100, 250, 500, 1000 ve 2500 olmak üzere 6 farklı

<sup>21</sup> The Pollution-Routing Problem Instance Library, <http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm>, Erişim: Ocak, 2022

seviyede çözülmüştür. Dolayısıyla toplamda 540 (6\*90) problem üzerinde performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Tablo 8: Problem Bilgileri

Toplam	Problem kodu
11 nokta	UK10_01, UK10_02, UK10_03, UK10_04, UK10_05, UK10_06, UK10_07, UK10_08, UK10_09, UK10_10
16 nokta	UK15_01, UK15_02, UK15_03, UK15_04, UK15_05, UK15_06, UK15_07, UK15_08, UK15_09, UK15_10
21 nokta	UK20_01, UK20_02, UK20_03, UK20_04, UK20_05, UK20_06, UK20_07, UK20_08, UK20_09, UK20_10
26 nokta	UK25_01, UK25_02, UK25_03, UK25_04, UK25_05, UK25_06, UK25_07, UK25_08, UK25_09, UK25_10
51 nokta	UK50_01, UK50_02, UK50_03, UK50_04, UK50_05, UK50_06, UK50_07, UK50_08, UK50_09, UK50_10
76 nokta	UK75_01, UK75_02, UK75_03, UK75_04, UK75_05, UK75_06, UK75_07, UK75_08, UK75_09, UK75_10
101 nokta	UK100_01, UK100_02, UK100_03, UK100_04, UK100_05, UK100_06, UK100_07, UK100_08, UK100_09, UK100_10
151 nokta	UK150_01, UK150_02, UK150_03, UK150_04, UK150_05, UK150_06, UK150_07, UK150_08, UK150_09, UK150_10
201 nokta	UK200_01, UK200_02, UK200_03, UK200_04, UK200_05, UK200_06, UK200_07, UK200_08, UK200_09, UK200_10

Tablo 9, her bir problem için RDP ve RDP-bağlantı azaltma sezgisel yaklaşımları kullanılarak elde edilen en iyi uygulanabilir çözümleri sunmaktadır. Analiz sonuçlarına göre, bu çalışmada önerilen RDP-bağlantı azaltma sezgiseli 90 problemin 51 tanesinde daha iyi sonuç bulmakta, 16 tanesinde ise literatürde yer alan RDP sezgiseli ile aynı sonucu vermektedir. Geri kalan 23 problemde ise RDP sezgiseli daha iyi performans göstermektedir.

Tablo 9: Her Bir Problem İçin RDP ve RDP-Bağlantı Azaltma Sezgisel Yaklaşımları Kullanılarak Elde Edilen En İyi Uygulanabilir Çözümler

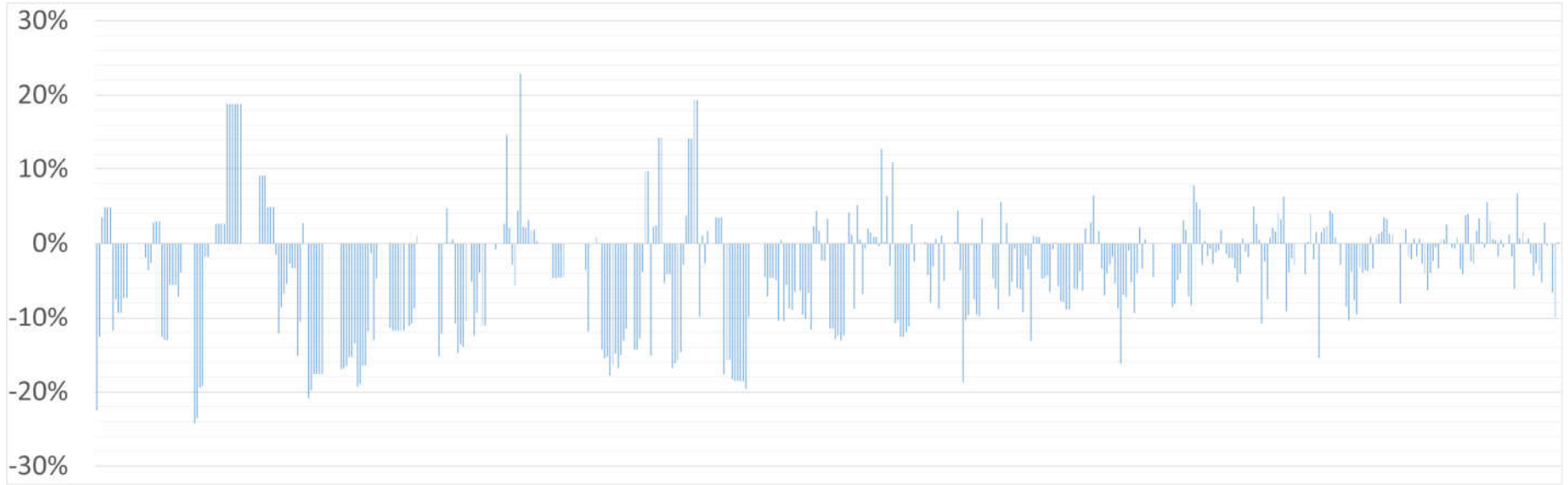
#	Problem	H	RDP		RDP-Bağlantı azaltma		Toplam Enerji Tüketimi Fark (%)	Hesaplama Süresi Fark (%)	
			Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Hesaplama Süresi (saniye)	H	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)			Hesaplama Süresi (Saniye)
1	UK10_01	500	7,22	0,138	50	7,45	0,000	3,1%	-100,0%

#	Problem	H	RDP		RDP-Bağlantı azaltma				
			Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Hesaplama Süresi (saniye)	H	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Hesaplama Süresi (Saniye)	Toplam Enerji Tüketimi Fark (%)	Hesaplama Süresi Fark (%)
2	UK10_02	1000	11,51	0,311	250	10,67	0,016	-7,3%	-95,0%
3	UK10_03	50	9,34	0,015	50	9,34	0,000	0,0%	-100,0%
4	UK10_04	1000	9,90	0,298	250	10,19	0,017	2,9%	-94,3%
5	UK10_05	500	9,23	0,138	100	8,72	0,014	-5,6%	-89,9%
6	UK10_06	250	11,40	0,053	50	11,39	0,006	-0,1%	-88,8%
7	UK10_07	1000	10,77	0,232	50	10,13	0,006	-5,9%	-97,4%
8	UK10_08	250	11,35	0,031	50	11,65	0,005	2,7%	-84,1%
9	UK10_09	50	9,05	0,010	50	10,76	0,006	18,8%	-40,6%
10	UK10_10	50	8,99	0,008	50	8,99	0,016	0,0%	94,5%
11	UK15_01	50	13,30	0,030	500	13,94	0,294	4,9%	875,0%
12	UK15_02	50	11,70	0,031	50	11,52	0,016	-1,5%	-50,0%
13	UK15_03	2500	13,30	3,452	250	12,93	0,062	-2,8%	-98,2%
14	UK15_04	250	13,26	0,109	250	10,93	0,070	-17,6%	-35,6%
15	UK15_05	100	14,51	0,031	100	14,51	0,031	0,0%	0,1%
16	UK15_06	2500	11,42	3,378	100	9,88	0,016	-13,5%	-99,5%
17	UK15_07	2500	11,92	3,046	2500	11,76	0,990	-1,3%	-67,5%
18	UK15_08	250	6,36	0,109	250	6,36	0,066	0,0%	-39,3%
19	UK15_09	100	11,29	0,047	100	9,96	0,031	-11,8%	-33,3%
20	UK15_10	2500	10,91	2,850	50	10,72	0,000	-1,7%	-100,0%
21	UK20_01	2500	13,39	11,477	2500	13,39	2,436	0,0%	-78,8%
22	UK20_02	2500	14,51	11,042	50	13,49	0,031	-7,0%	-99,7%
23	UK20_03	2500	9,51	5,914	2500	9,51	1,999	0,0%	-66,2%
24	UK20_04	2500	15,23	4,836	1000	13,54	0,578	-11,1%	-88,0%
25	UK20_05	1000	11,61	1,611	500	11,61	0,219	0,0%	-86,4%
26	UK20_06	2500	15,08	6,035	1000	14,53	0,519	-3,7%	-91,4%
27	UK20_07	500	7,08	0,426	1000	7,20	0,645	1,8%	51,2%
28	UK20_08	500	10,36	0,527	500	10,36	0,312	0,0%	-40,7%
29	UK20_09	2500	16,35	11,647	250	16,32	0,109	-0,1%	-99,1%
30	UK20_10	2500	10,38	5,482	2500	10,38	2,057	0,0%	-62,5%
31	UK25_01	1000	11,36	1,902	2500	11,37	2,978	0,1%	56,5%
32	UK25_02	2500	13,86	7,727	500	11,80	0,391	-14,9%	-94,9%
33	UK25_03	1000	7,87	2,099	1000	7,87	1,130	0,0%	-46,2%
34	UK25_04	500	12,37	0,782	50	11,04	0,016	-10,8%	-98,0%
35	UK25_05	500	12,57	0,895	2500	11,90	3,765	-5,3%	320,8%
36	UK25_06	2500	13,25	7,284	250	11,32	0,172	-14,6%	-97,6%
37	UK25_07	250	12,35	0,447	50	14,11	0,031	14,2%	-93,0%
38	UK25_08	2500	15,83	7,366	50	14,60	0,031	-7,8%	-99,6%
39	UK25_09	50	10,54	0,053	50	10,90	0,047	3,5%	-11,3%
40	UK25_10	500	13,92	0,810	2500	11,19	4,134	-19,6%	410,5%
41	UK50_01	2500	20,21	26,380	50	19,79	0,156	-2,0%	-99,4%
42	UK50_02	1000	22,26	6,457	2500	20,64	10,302	-7,3%	59,5%
43	UK50_03	50	23,23	0,229	1000	22,42	3,579	-3,5%	1459,6%
44	UK50_04	50	23,17	0,240	2500	21,35	13,047	-7,9%	5339,2%
45	UK50_05	100	25,80	0,432	1000	26,22	2,868	1,6%	563,9%
46	UK50_06	2500	20,80	28,162	2500	18,22	14,742	-12,4%	-47,7%
47	UK50_07	50	19,89	0,204	50	19,89	0,152	0,0%	-25,8%
48	UK50_08	500	20,76	2,449	1000	20,91	3,155	0,7%	28,8%

#	Problem	H	RDP		RDP-Bağlantı azaltma				
			Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Hesaplama Süresi (saniye)	H	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Hesaplama Süresi (Saniye)	Toplam Enerji Tüketimi Fark (%)	Hesaplama Süresi Fark (%)
49	UK50_09	2500	25,05	17,088	1000	24,76	2,794	-1,2%	-83,6%
50	UK50_10	2500	23,10	19,440	2500	20,51	10,830	-11,2%	-44,3%
51	UK75_01	2500	30,65	35,690	1000	30,69	5,856	0,1%	-83,6%
52	UK75_02	500	23,99	4,826	250	24,15	1,339	0,6%	-72,3%
53	UK75_03	100	30,11	0,880	50	29,79	0,273	-1,1%	-69,0%
54	UK75_04	1000	24,77	11,154	2500	22,92	24,005	-7,5%	115,2%
55	UK75_05	1000	29,73	10,027	1000	29,73	6,200	0,0%	-38,2%
56	UK75_06	2500	31,42	30,501	250	31,51	1,314	0,3%	-95,7%
57	UK75_07	1000	32,67	9,903	50	30,57	0,234	-6,4%	-97,6%
58	UK75_08	500	31,12	4,972	250	30,26	1,362	-2,8%	-72,6%
59	UK75_09	1000	29,75	9,772	250	29,07	1,341	-2,3%	-86,3%
60	UK75_10	2500	32,60	38,993	500	30,60	2,843	-6,1%	-92,7%
61	UK100_01	2500	36,79	51,916	500	35,91	4,460	-2,4%	-91,4%
62	UK100_02	2500	40,37	53,296	2500	37,55	32,569	-7,0%	-38,9%
63	UK100_03	100	31,77	1,437	2500	29,29	32,224	-7,8%	2142,2%
64	UK100_04	250	33,60	3,687	250	33,28	2,266	-0,9%	-38,5%
65	UK100_05	50	33,36	0,771	100	32,91	1,001	-1,4%	29,9%
66	UK100_06	2500	36,11	60,226	2500	36,11	34,274	0,0%	-43,1%
67	UK100_07	2500	37,66	53,585	500	36,48	4,792	-3,1%	-91,1%
68	UK100_08	250	37,46	3,890	50	37,85	0,453	1,0%	-88,4%
69	UK100_09	2500	33,35	53,044	1000	33,02	10,461	-1,0%	-80,3%
70	UK100_10	100	40,88	1,484	100	40,88	0,986	0,0%	-33,6%
71	UK150_01	2500	42,03	112,620	100	40,75	2,140	-3,0%	-98,1%
72	UK150_02	1000	48,01	33,434	500	46,66	10,360	-2,8%	-69,0%
73	UK150_03	2500	38,56	106,258	1000	40,54	23,532	5,1%	-77,9%
74	UK150_04	2500	46,74	101,789	50	46,17	1,331	-1,2%	-98,7%
75	UK150_05	50	40,92	1,673	50	40,92	1,363	0,0%	-18,6%
76	UK150_06	2500	40,48	109,343	50	39,48	1,268	-2,5%	-98,8%
77	UK150_07	50	50,04	1,674	1000	46,86	21,030	-6,4%	1156,1%
78	UK150_08	2500	41,40	104,180	2500	39,94	80,961	-3,5%	-22,3%
79	UK150_09	2500	49,73	105,405	1000	50,43	24,974	1,4%	-76,3%
80	UK150_10	2500	46,41	104,386	2500	46,41	76,939	0,0%	-26,3%
81	UK200_01	2500	49,06	173,219	50	48,08	2,000	-2,0%	-98,8%
82	UK200_02	100	49,37	5,719	100	49,68	3,793	0,6%	-33,7%
83	UK200_03	2500	50,39	176,109	1000	50,71	52,033	0,6%	-70,5%
84	UK200_04	2500	48,67	173,456	2500	46,66	156,517	-4,1%	-9,8%
85	UK200_05	2500	51,74	173,596	2500	53,47	154,830	3,4%	-10,8%
86	UK200_06	100	49,67	5,764	100	49,39	4,734	-0,6%	-17,9%
87	UK200_07	1000	50,48	61,269	500	50,56	27,838	0,2%	-54,6%
88	UK200_08	1000	49,62	59,574	1000	49,70	46,884	0,2%	-21,3%
89	UK200_09	2500	49,16	174,101	1000	48,88	40,940	-0,6%	-76,5%
90	UK200_10	2500	52,03	169,896	2500	52,03	124,964	0,0%	-26,4%



Şekil 3 ise, tüm problem ve H seviyesi çiftleri için RDP ve RDP-Bağlantı azaltma sezgiselleri kullanıldığı durumlarda enerji tüketimleri arası elde edilen %'lik farkları göstermektedir. Elde edilen sonuçlar tüm problem – H seviyesi çiftleri dikkate alındığı durumda, RDP-Bağlantı azaltma sezgiselinin RDP sezgiseline göre ortalama %3,13 daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir.



Şekil 3: Tüm Problem ve H Seviyesi Çiftleri İçin RDP ve RDP- Bağlantı Azaltma Sezgisel Algoritmaları Kullanıldığı Durumlarda Enerji Tüketimleri Arası Elde Edilen Yüzdelerik Farklar

### 3.6 Analiz Sonuçları

Bu bölümde, elektrikli araçların kullanıldığı dinamik Gezgin Satıcı Probleminin çözümüne yönelik bir dinamik programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Çalışmada müşterilerin talep ettikleri ürünlerin dağıtımını esnasında araç hızlarının dinamik olarak değişmesi dikkate alınmış, en düşük enerji tüketimi maliyeti ile depodan başlayıp tüm müşterilerin birer kez gezildiği ve sonunda tekrar depoya dönülen bir rotanın elde edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen modelde aracın yakıt tüketimi hesaplanırken boş araç ağırlığı, yol durumu, çekiş gücü, sürücü deneyimi gibi faktörleri dikkate alan detaylı bir yakıt tüketim fonksiyonu kullanılmıştır. Model formülasyonunun ardından büyük ölçekli problemlerin çözülebilmesi için bir Kısıtlı Dinamik Programlama – Bağlantı Eleme Yaklaşımı algoritması önerilmiştir. Ardından geliştirilen model ve önerilen algoritmanın işlevselliğini test etmek için bir örnek problem ele alınmıştır. Ele alınan problem, önerilen DP formülasyonu kullanılarak hem araç enerji tüketimlerini detaylı olarak dikkate alan ve toplam enerji tüketimini en küçükmeye çalışan bir maliyet fonksiyonu ile, hem de enerji gereksinimlerini göz ardı ederek sadece toplam kat edilen mesafeyi en küçükmeye çalışan farklı bir maliyet fonksiyonu gözetilerek çözülmüştür.

Analizler sonucunda, mesafe en küçükleme altında elde edilen dağıtım planının daha kısa toplam mesafeye sahip olmasına rağmen, dağıtımını gerçekleştirmek için toplam enerji gereksiniminin daha fazla olduğu görülmüştür. Ardından araç hızlarının dinamik olarak değişmesinin çözüme etkisini görebilmek için, kat edilen her iki düğümde bir araç hızlarının değiştiği ve güncellendiği bir senaryo ele alınmıştır. Araç hızlarının dinamik olarak ele alındığı durumda, dağıtım planının dolayısıyla ilgili temel performans göstergelerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum da araç hızlarının dinamik olarak ele alınmasının önemini göstermektedir. Son olarak, geliştirilen sezgisel çözüm yaklaşımının işlevselliğini gösterebilmek için değişik büyüklüklerde 90 problem seçilmiş ve önerilen algoritma ile bu problemler çözülmüştür. Bu bölümde önerilen Kısıtlı Dinamik Programlama – Bağlantı Eleme Yaklaşımı algoritmasının 90 problemde 51 tanesinde, karşılaştırma amacıyla kullanılan Kısıtlı Dinamik Programlama yaklaşımından daha iyi sonuç verdiği ve çözümlerin iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan analizlerde, çözülen tüm problemler dikkate alındığında RDP – Bağlantı Eleme Yaklaşımı algoritmasının RDP sezgisel yöntemine göre enerji tüketimi açısından ortalama %3,13 daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır.

## 4. BÖLÜM

### BELİRSİZ BATARYA TÜKETİMİ ALTINDA ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DİNAMİK GEZGİN SATICI PROBLEMİ

Bu bölümde ilk olarak ele alınan problemin formal bir tanımı yapılmaktadır. Ardından, problemin Dinamik Programlama (DP) formülasyonu verilmiştir. Son olarak daha büyük ölçekli problemleri çözebilmek için bir RDP-Prim yaklaşımı tanıtılmıştır<sup>22</sup>.

#### 4.1 Problem Tanımı

Bu problemde dinamik Gezgin Satıcı Problemi bir ağ olarak  $G=\{V,A\}$  şeklinde tanımlanmaktadır. Dğümler  $V=\{0,1,\dots,n\}$ , noktalar arası bağlantılar ise  $A$  harfiyle gösterilmektedir.  $\{0\}$  ile gösterilen düğüm depoyu temsil etmekte, kalan düğümler ise müşterilere karşılık gelmektedir. Depoda bulunan bir elektrikli araç ile her müşterinin tam olarak bir kez ziyaret edilmesi gerekmektedir.

Elektrikli yük araçlarının enerji tüketimini tahmin etmek üzere Asamer vd. (2016) tarafından aşağıdaki formül önerilmiştir.

$$Z(v) = \max \left( 0, \frac{\beta d v^2 + \alpha(w+F)d}{(3.6)10^6} \right) \varepsilon + \frac{p\left(\frac{d}{v}\right)}{(3.6)10^6} \quad (1)$$

Formülde  $Z(v)$ ,  $v$  araç hızında harcanan enerji miktarını (kWh) ifade eder. Burada,  $\beta = 0.5C_d\rho A_e$  ve  $\alpha = g \sin \theta + gC_r \cos \theta$  olarak ifade edilir. Tablo 10 enerji tüketimi hesaplaması için gerekli parametreleri göstermektedir.

<sup>22</sup> İlgili çalışmadan elde edilen yayının künyesi şu şekildedir: Ünal, V., Soysal, M., Çimen, M., Koç, Ç. (2022). Dynamic Routing Optimization with Electric Vehicles under Stochastic Battery Depletion, Transportation Letters, 10.1080/19427867.2022.2157365.

Tablo 10: Enerji Tüketimi Hesaplaması İçin Gerekli Parametreler

Parametre	Tanımı
$w$	Boş araç ağırlığı (kg)
$g$	Yerçekimi sabiti ( $m/s^2$ )
$C_d$	Aerodinamik sürtünme katsayısı
$C_r$	Yuvarlanma direnci katsayısı
$\rho$	Hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$A_e$	Ön yüzey alanı ( $m^2$ )
$\varepsilon$	Sürücü deneyimine ilişkin parametre
$\theta$	Yol açısı
$p$	Yardımcı güç talebi (W)

Asamer vd. (2016) tarafından sunulan enerji tüketimi yaklaşımı, seyahat hızlarının deterministik olduğu varsayımına dayanmaktadır. Ancak bu bölümde incelenen problemde, düğümler arasındaki seyahat hızlarının önceden kesin olarak bilinmediği varsayılmaktadır. Bu durum, kentsel bölgelerde son kilometre taşımacılığının temel zorluklarından biridir. Aracın ulaşabileceği seyir hızının, ortalama  $\mu_{i,j}$  ve standart sapma  $\sigma_{i,j}$  ile  $v_{i,j}^{\min}$  ve  $v_{i,j}^{\max}$  hız sınırları arasında normal olarak dağıldığı varsayılmaktadır. Belirlenen limitler, hız ortalaması ve sapmayla ilgili rakamlar değişen trafik koşullarına bağlı olarak teslimat operasyonlarında değişiklik gösterebilmektedir. Bu bağlamda stokastik enerji tüketiminin tahmin edilmesi için bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır.

## 4.2 Stokastik Enerji Hesaplaması

$Z(v)$  enerji tüketimi fonksiyonu seyahat hızlarının deterministik olduğunu varsaymaktadır. Bu problemde ise  $Z(v)$  enerji tüketimi fonksiyonu için beklenen ve varyans değerleri hesaplanmaktadır. Çalışılan problemde araç hızları, hız aralıkları arasında değişmektedir. Koşullu olasılık kuralı kullanılarak enerji tüketimi işlevi için bir olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) oluşturulmaktadır. PDF, araç hızının  $v_{i,j}^{\min}$  ve  $v_{i,j}^{\max}$  arasında olması koşuluyla bir yay üzerindeki aracın hızının  $v_{i,j}$  olma olasılığını hesaplamayı sağlamaktadır.

$$P_{i,j}(v_{i,j}) = P_{i,j}(v_{i,j} | v_{i,j}^{\min} \leq v_{i,j} \leq v_{i,j}^{\max}) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{i,j}} e^{-\frac{(v_{i,j}-\mu_{i,j})^2}{2\sigma_{i,j}^2}}}{\int_{v_{i,j}^{\min}}^{v_{i,j}^{\max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{i,j}} e^{-\frac{(v_{i,j}-\mu_{i,j})^2}{2\sigma_{i,j}^2}} dv_{i,j}}, \forall (i,j) \in A \quad (2)$$

PDF türetildikten sonra, her yay için enerji tüketiminin beklenen değeri  $E[Z_{i,j}(v_{i,j})]$  aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E[Z_{i,j}(v_{i,j})] = \int_{v_{i,j}^{\min}}^{v_{i,j}^{\max}} Z_{i,j}(v_{i,j}) P_{i,j}(v_{i,j}) dv_{i,j}, \forall (i,j) \in A \quad (3)$$

Enerji tüketiminin beklenen değeri kullanılarak, ilgili fonksiyonun varyansı  $Var[Z_{i,j}(v_{i,j})]$  aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$Var[Z_{i,j}(v_{i,j})] = E[(Z_{i,j}(v_{i,j}))^2] - E[Z_{i,j}(v_{i,j})]^2, \forall (i,j) \in A \quad (4)$$

Son olarak, (i,j) yayı üzerinde hareket ederken, önceden tanımlanmış bir hizmet seviyesini (aracın bataryası bitmeden tamamlama olasılığı,  $z_\alpha$ ) karşılamak için gerekli elektrik tüketim miktarı olan  $c_{i,j}$ , aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$c_{i,j} = E[Z_{i,j}(v_{i,j})] + z_\alpha \sqrt{Var[Z_{i,j}(v_{i,j})]}, \forall (i,j) \in A \quad (5)$$

Dinamik Gezgin Satıcı Problemi, belirsiz araç hızlarını ve dolayısıyla batarya tüketimini ve dinamik olarak değişen problem parametrelerini (araç hız verileri vb.) dikkate alarak, depodan başlayan ve yolculuğunu depoda bitiren bir araç için maliyeti en düşük olan turu bulmayı amaçlamaktadır.

### 4.3 Dinamik Programlama Formülasyonu

Tanımlanan problem, Bellman (1962) ve Held ve Karp (1962) tarafından tanıtılan DP, formülasyonuna göre matematiksel olarak formüle edilmektedir. Karar durumları her düğüm ziyareti için tanımlanmaktadır. Bu nedenle, aşamalar ziyaret edilen düğümlerin sayısını ifade etmektedir (Aşama 0, hiçbir düğümün ziyaret edilmediği ilk aşamayı, Aşama 1 ise birinci düğümün ziyaret edildiği aşamayı ifade eder).  $\Upsilon$  durum uzayını,

tanımlamaktadır ve zaman içindeki herhangi bir karar noktası için her bir eleman ( $\xi$ ) şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\xi = \{\Phi, j\} \quad (6)$$

$\Phi$  herhangi bir zamanda ziyaret edilen düğümler kümesini ifade etmektedir ( $\Phi \subseteq V$ ).  $C(\Phi, j)$ ,  $j$  ise aracın şu anda bulunduğu düğümdür (yani, ziyaret edilen son düğümdür). Bundan sonra  $(\Phi, j)$  metin boyunca kısmi tur olarak isimlendirilecektir. Her kısmi tur düğüm 0'dan başlamakta ve bir dizi potansiyel düğümü ziyaret ettikten sonra herhangi bir düğümde sona ermektedir. İlk aşama olan  $\xi$  şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\xi = \{\{0\}, 0\} \quad (7)$$

Herhangi bir  $\xi = \{\Phi, j\}$  durumu için eylem, ziyaret edilecek bir sonraki düğümü tanımlamaktır.  $\xi$  durumu için verilen eylem uzayı ( $\Delta$ ), aracın bir sonraki düğüme olası her hareketi, diğer bir deyişle potansiyel kısmi turlar için tanımlanmaktadır.

$$\Delta_\xi = \{\delta : (j, \delta) \in A; \delta \notin \Phi\} \quad (8)$$

Burada  $\delta$  ardıl düğümü (yani eylemi) ifade etmektedir. Araç mevcut  $j$  düğümünden hareket ettiğinde, mevcut  $\xi$  durumunu geçiş fonksiyonu tarafından  $\delta(\xi^\delta)$  kararı altında ardıl duruma dönüştürür:

$$\xi^\delta = \{\Phi \cup \delta, \delta\} \quad (9)$$

$C^*(\xi)$ ,  $\xi^\delta = \{\Phi \cup \delta, \delta\}$  durumu tarafından verilen kısmi turu tamamlamak için optimal enerji gereksinimini göstermektedir. Ardından, aşağıdaki DP özyinelemesi, karar problemini en iyi şekilde çözmek için tüm düğümler ziyaret edilene kadar (son aşama) her aşamadaki tüm olası durumları yinelemeli olarak çözmektedir.

$$C^*(\xi^\delta) = \min_{j \in \Phi} \{c_{j,\delta} + C(\Phi, j)\} \quad (10)$$

$$C^*(\xi_0) = 0 \quad (11)$$

Son olarak, tam bir tur için minimum toplam enerji gereksinimini gösteren  $C^*$ 'nin hesaplanması (tüm düğümler ziyaret edilir ve araç depoya geri döndürülür) aşağıdaki gibidir:

$$C^* = \min_{j \in V \setminus 0} \{c_{j,0} + C^*(V, j)\} \quad (12)$$

#### 4.4 Çözüm Yaklaşımı: Kısıtlı Dinamik Programlama ve Prim Algoritması

Tanıtilen DP algoritmasının depolama ve hesaplama süresi gereksinimleri, yeni düğümlerin eklenmesiyle katlanarak büyümektedir. Bu durum, DP'yi daha büyük problemler için uygulanamaz hale getirmektedir. DP'nin bu dezavantajından hareketle, Gromicho vd. (2008) pratikte karşılaşılan daha büyük problemlere uygun çözümler elde etmek için klasik RDP algoritmasını önermiştir. Daha sonra birkaç çalışma, farklı ARP varyantları için RDP algoritmasını kullanmıştır. Gromicho vd.'nin (2012) çalışması zamana bağlı seyahat süreleri ve sürüş saatleri düzenlemeleri gibi uygulamada düzenli olarak ortaya çıkan çeşitli kısıtlamaları barındırmaktadır. Kok vd. (2010), sezgisel bir RDP yöntemiyle, zaman pencerelerini, sürücülerin sürüş ve çalışma saatlerini dikkate alarak Avrupa Sosyal Mevzuatına ilişkin rotalama sorununu ele almıştır. Kok vd. (2012), daha büyük ARP'ler için trafik sıkışıklığından kaçınmanın etkisini sezgisel bir RDP çözümüyle değerlendirmiştir. Sezgisel RDP çözümü, durum uzayını azaltma fikrine dayanmaktadır. Her RDP aşamasında, tüm olası durumlar değerlendirildikten sonra, bir sonraki yinelemeye kadar bu durumların yalnızca bir kısmına ait bilgiler korunmakta; başka bir deyişle, ardışık yinelemede, önceki aşamadaki durumların yalnızca bir kısmı olası durumlar olarak kabul edilmektedir. Seçilen durumlar, şimdiye kadarki en düşük maliyetli ve “en umut verici durumlar” olarak anılan durumlardır. Algoritma, DP algoritmasının üstel bellek artışını ve zaman gereksinimlerini önlemektedir, ancak optimal bir sonuca yol açan bir durum kısıtlanabileceği için optimal durumu garanti etmemektedir.

RDP durum genişletme mantığını geliştirmeyi amaçlayan rotalama çalışmaları mevcuttur. Soysal ve Çimen (2017), pratik boyuttaki örneklerden uygulanabilir çözümler elde etmek için ağırlıklı rastgele örnekleme, klasik RDP sezgiseli ve simülasyondan oluşan entegre bir yaklaşım kullanmaktadır. Elde ettikleri sonuçlara göre, önerilen sezgisel yöntem RDP'den ortalama %2,3 daha iyi performans göstermektedir. Soysal vd.



(2021) kısıtlama, simülasyon ve parametrelerin çevrimiçi kontrolünü içeren DP tabanlı bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. Bu yaklaşımla, sezgisel RDP yöntemine kıyasla ortalama olarak %1,96 tasarruf elde edildiğini saptamışlardır. Bu çalışmada, Prim Algoritması kullanılarak RDP mantığını geliştiren yeni bir çözüm yaklaşımı önerilmektedir. Prim Algoritması, yönlendirilmemiş ve bağlantılı grafikler için Minimum Yayılan Ağacı (Minimum Spanning Tree-MST) bulmayı amaçlayan bir grafik teorisi yöntemidir (Iqbal vd., 2017).

$G = \{V, E\}$  bir grafik olarak tanımlanırsa, V köşeleri ve E kenarları ifade etmektedir. G grafiğinin yayılan ağacı, herhangi bir döngü olmaksızın G'nin her köşesini kapsayan bir ağaçtır ve ağaçtaki her kenar G grafiğine aittir. Yayılan ağacın maliyeti, ağaçta bulunan tüm kenarların ağırlıkları toplanarak hesaplanabilir. Minimum Yayılan Ağaç (MYA), alternatif yayılan ağaçlar arasında en düşük maliyetli olanıdır.

Asimetrik komşuluk matrislerine sahip bağlantılı grafikler için, çift yönlü yayların ortalama maliyetleri kenar ağırlıkları olarak kullanılabilir. Bu problemde kenar ağırlıkları olarak enerji tüketim oranları belirlenirken çift yönlü yayların ortalama mesafeleri ile minimum ve maksimum hız limitleri kullanılmaktadır. Çift yönlü yayların ortalama maliyetlerinin kullanılması için, yönsüz bir grafiğe sahip olunması gerekmektedir.

Prim algoritması, MYA problemini ele alan Greedy algoritmalarından biridir. Algoritma iki kümenin oluşturulmasıyla başlar. Bu kümeler, MYA'a dahil edilmiş olan bir köşe kümesi (ilk olarak başlangıç noktasını içerir) ve MYA'a dahil edilecek bir köşe kümesidir (başlangıç düğümü hariç kalan tüm köşeleri içerir). Her adımda, iki kümeyi birbirine bağlayan tüm kenarlar dikkate alınır ve minimum ağırlık kenarı seçilir.<sup>23</sup>

Prim algoritması aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. MYA'da bulunan noktaların kaydını tutan bir MYA seti oluşturulur.
2. Giriş grafiğindeki tüm köşelere bir anahtar değer atanır. Tüm anahtar değerleri sonsuz olarak işaretlenir. İlk olarak ilgili noktanın seçilmesini sağlayan ilk nokta

<sup>23</sup> <https://www.geeksforgeeks.org/prims-minimum-spanning-tree-mst-greedy-algo-5/>, Erişim Tarihi: Kasım 2021.

için anahtar değeri “0” olarak atanır. (Problemde depo başlangıç noktası olarak alınmıştır.)

3. MYA tüm köşeleri içerene kadar aşağıdaki adımlar gerçekleştirilir.
  - Henüz MYA’da dahil edilmeyen tüm potansiyel köşeler için anahtar değerleri güncellenir. Bu köşeler için anahtar değeri, onları MYA’da bulunan köşeler kümesine bağlayan minimum ağırlık kenarlarını belirtir. Bu problemde anahtar değerler, MYA kümesinde listelenen köşelerin oluşturduğu köşe ve kısmi grafik arasındaki minimum enerji tüketim oranı ile hesaplanır.
  - MYA’da bulunmayan ve minimum anahtar değerine (enerji tüketim oranı) sahip bir u noktası seçilir.
  - MYA’da u köşesi eklenerek MYA güncellenir.

Gezgin Satıcı Problemi için DP algoritmasının her durumu, o ana kadar ziyaret edilen düğümler (kısmi tur) ve önceden ziyaret edilen düğüm hakkındaki bilgileri içerir. RDP algoritması, her aşamada durumların o ana kadar elde edilen maliyetlerine göre genişletilmesini önerir. Bu problemde, DP’deki durumların nispeten daha iyi genişlemesini sağlamak için Prim algoritması RDP algoritmasına dahil edilmiştir.

RDP algoritması, ilk aşamadan son aşamaya bir yönde hareket etmeyi içeren bir ileri özyineleme kullanır. Her aşamada o ana kadar ilgili müşterilerin ziyaret edilmesinden kaynaklanan maliyetleri göz önünde bulundurur. Önerilen çözümde, kısmi tura yeni bir düğümün (müşteri) dahil edilmesi değerlendirilirken Prim algoritması kullanılır. Bu da grafikte kalan ziyaret edilmemiş müşterileri ziyaret etmenin gelecekteki maliyetini göz önünde bulundurmayı sağlar. Prim algoritmasında kalan müşterileri kapsayacak şekilde elde edilen MYA, Gezgin Satıcı Problemi için optimum çözüm olarak değerlendirilemez ancak kalan ziyaret edilmemiş müşterileri ziyaret etmenin maliyeti için daha düşük bir sınır elde edilmesini sağlamaktadır. Prim algoritması tarafından sağlanan alt sınır maliyetlerinin kullanılması, her aşamada durumların daha iyi genişletilmesini sağlamaktadır. RDP-Prim algoritmasını uygulamak için DP algoritmasının her aşamasında aşağıdaki adımların uygulanması gerekmektedir (bkz: Şekil 4).

1: **ADIM 1: Başlatma**  
2: Tüm değişkenleri hazırla  
3: Yalnızca  $\xi_0$  içerecek şekilde taşınan durumlar kümesini ( $\bar{Y}$ ) başlat  
4:  
5: **while** (tüm düğümlerin ziyaret edilmediği durum) **do**  
6:     **ADIM 2: Potansiyel olarak taşınacak durumları seç**  
7:          $\bar{Y}$  'deki her bir durum, her karar (ardıl durum seçimi) için şimdiye kadarki optimal maliyeti hesapla  
8:         (Hesaplamak için denklem 10'u kullan  $C^*(\xi^\delta) \forall \xi \subset \bar{Y}, \delta \in \Phi$ )  
9:          $H$  ardıl durumlarını ( $\xi^\delta$ ) şimdiye kadarki en küçük optimal maliyetle seç ve kaydet ( $C^*(\xi^\delta)$ )  
10:  
11:     **ADIM 3: Taşınacak Durumları Seç**  
12:         Seçilen  $H$  ardıl durumlarının her biri için öngörülen toplam maliyeti hesapla:  
13:         Kalan ziyaret edilmemiş düğümler için depodan başlayarak bir MST oluştur ( $i \in \Phi$ )  
14:         En düşük maliyetli yayı kullanarak son ziyaret edilen düğümü MST'ye bağla  
15:         MYA'nın maliyetini topla; en son ziyaret edilen düğümün yayılan ağaca en düşük bağlantı maliyeti ve durumun o ana kadarki en uygun maliyeti.  
16:         En küçük tahmini toplam maliyeti veren  $P(P \leq H)$  ardıl durumlarını seç  
17:  
18:     **ADIM 4: Sonraki Aşamaya Geç**  
19:          $\bar{Y}$  boşalt ve seçilen  $P$  ardıl durumlarını buna ekle  
20:  
21: **end while**  
22:  $\bar{Y}$  'deki her durumun eksiksiz bir turu için minimum toplam enerji gereksinimini hesapla  
23:  $C^* \forall \xi \subset \bar{Y}$  değerini hesaplamak için Formül 12'yi kullan

Şekil 4: Kısıtlı Dinamik Programlama ve Prim Algoritması

Önerilen RDP-Prim algoritması, RDP algoritmasından daha iyi uygulanabilir bir çözüm elde etmeyi her zaman garanti etmemektedir. Bununla birlikte önerilen sınırlama yöntemi, daha iyi uygulanabilir bir çözüme yol açabilecek, daha umut verici bir yola doğru ilerleme şansını arttırmaktadır. Klasik RDP algoritmasına karşı önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek için bir sonraki bölümde kapsamlı sayısal analizler sunulmaktadır.

#### 4.5 Nümerik Analizler

Bu bölüm, elektrikli araçlarla Gezgin Satıcı problemlerinde belirsiz batarya tüketimi, kapsamlı enerji kullanımı tahmini ve dinamikliğin dikkate alınmasının katkısını göstermeyi ve önerilen RDP-Prim algoritması yaklaşımının büyük boyutlu problemlerde uygulanabilirliğini ve performansını göstermeyi amaçlamaktadır.

İlk olarak örnek bir çözümün detaylı analizi için bir örnek vaka tanımlanmakta ve sonrasında çözülmektedir. Performansı test etmek ve önerilen RDP-Prim algoritması yaklaşımının büyük boyutlu problemlerde uygulanabilirliğini göstermek için, farklı boyutlarda problemlerle daha geniş bir veri setinde çeşitli analizler yapılmıştır. Performans değerlendirmesi için, RDP-Prim algoritmasının sonuçları klasik RDP algoritması ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır.

#### 4.5.1 Örnek Vaka Tanıtımı

Bu bölümde, ilk önce derinlemesine analiz için örnek vaka tanımlanmaktadır. Daha sonra, parametre testleri ve sezgisel performans değerlendirmesi için kullanılan değişen boyutlarda farklı problemler tanıtılacaktır.

Örnek vaka için veriler TSPLIB kütüphanesinden<sup>24</sup> alınmıştır. İlgili kütüphanede “burma14.tsp” olarak adlandırılan problem, bir depo ve 13 müşteriden oluşmaktadır. Tablo 11, Tablo 12, Tablo 13 ve Tablo 14, örnek vaka analizlerinde kullanılan başlangıç parametreleri özetlemektedir. Her bir yay için hız ortalamaları, bir sabitin (örnek vaka için 0.8) her bir yayın minimum ve maksimum hızlarının ortalaması ile çarpılmasıyla belirlenirken, her bir yaydaki hızların standart sapması 0,2 (analizlerde aksi belirtilmedikçe) olarak sabit bir Varyasyon Katsayısı (CoV) ile hesaplanmaktadır. Dinamik ayar için minimum ve maksimum hızlar ve dolayısıyla ortalama hızlar her iki ziyaretten sonra güncellenmektedir.

Tablo 11: Örnek Vaka Analizleri İçin Kullanılan Parametre Ayarları

Parametre	Değer
Servis Seviyesi	1.96
Hız Ortalama Oranı	0.8
Varyasyon Katsayısı	0.2
Aerodinamik Sürüklenme Katsayısı	0.6
Ön Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )	2.5
Hava yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1.2041
Yerçekimi Sabiti (m/s <sup>2</sup> )	9.81
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	0.01
Yol Açısı	0
Boş Ağırlık (kg)	3500

<sup>24</sup> MP-TESTDATA-The TSPLIB Symmetric Travelling Salesman Problem Instances, <http://elib.zib.de/pub/mp-testdata/tsp/tsplib/tsp>, Erişim Tarihi: Ocak 2022

Parametre	Değer
Yük (kg)	0
Araç Aktarma Organı Verimliliği	1.3175
Yardımcı Güç Talebi (W)	1575
Minimum Hız Aralığı Alt Sınır	5 m/s
Minimum Hız Aralığı Üst Sınır	12 m/s
Maksimum Hız Aralığı Alt Sınır	17 m/s
Maksimum Hız Aralığı Üst Sınır	25 m/s

Tablo 12: Örnek Vaka Analizlerinde Kullanılan Mesafe (km) Tablosu

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0	15.3	51	70.6	96.6	58.1	45.5	7	16	37.2	15.7	56.7	34.2	39.8
1	15.3	0	42.2	66.4	99.7	59.8	50.7	19.7	31.1	47.9	31	58.1	41.7	37.6
2	51	42.2	0	28.9	74.4	39	43.7	49.1	64.5	88	61.8	37.4	45.5	21.1
3	70.6	66.4	28.9	0	49.1	26.5	41	66.4	80.4	107	76.8	25.9	49.9	31
4	96.6	99.7	74.4	49.1	0	40	51.4	90.2	99	126.1	94.7	41.8	63.5	63.6
5	58.1	59.8	39	26.5	40	0	16.8	52.2	63.4	91	59.3	1.9	28.4	23.9
6	45.5	50.7	43.7	41	51.4	16.8	0	38.9	48.2	75.7	43.9	16.3	12.4	23.2
7	7	19.7	49.1	66.4	90.2	52.2	38.9	0	15.4	40.6	13.3	50.8	27.3	35.5
8	16	31.1	64.5	80.4	99	63.4	48.2	15.4	0	27.6	4.3	62.3	35.8	49.8
9	37.2	47.9	88	107	126.1	91	75.7	40.6	27.6	0	31.8	89.8	63.3	76.1
10	15.7	31	61.8	76.8	94.7	59.3	43.9	13.3	4.3	31.8	0	58.2	31.5	46.4
11	56.7	58.1	37.4	25.9	41.8	1.9	16.3	50.8	62.3	89.8	58.2	0	27.5	22.1
12	34.2	41.7	45.5	49.9	63.5	28.4	12.4	27.3	35.8	63.3	31.5	27.5	0	24.7
13	39.8	37.6	21.1	31	63.6	23.9	23.2	35.5	49.8	76.1	46.4	22.1	24.7	0

Tablo 13: Örnek Vaka Analizlerinde Kullanılan Her Bir Yaydaki Minimum Hızlar (m/sn)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0.0	8.0	5.0	7.0	5.0	10.0	10.0	6.0	11.0	10.0	9.0	12.0	8.0	12.0
1	8.0	0.0	5.0	9.0	8.0	12.0	9.0	6.0	7.0	10.0	6.0	11.0	5.0	12.0
2	5.0	5.0	0.0	12.0	11.0	12.0	6.0	5.0	8.0	12.0	10.0	6.0	12.0	11.0
3	7.0	9.0	12.0	0.0	12.0	6.0	6.0	6.0	5.0	9.0	5.0	12.0	9.0	7.0
4	5.0	8.0	11.0	12.0	0.0	11.0	11.0	5.0	8.0	11.0	5.0	8.0	8.0	11.0
5	10.0	12.0	12.0	6.0	11.0	0.0	6.0	10.0	6.0	9.0	9.0	9.0	10.0	10.0
6	10.0	9.0	6.0	6.0	11.0	6.0	0.0	12.0	10.0	7.0	12.0	10.0	9.0	11.0
7	6.0	6.0	5.0	6.0	5.0	10.0	12.0	0.0	5.0	11.0	11.0	9.0	9.0	12.0
8	11.0	7.0	8.0	5.0	8.0	6.0	10.0	5.0	0.0	9.0	5.0	11.0	5.0	12.0
9	10.0	10.0	12.0	9.0	11.0	9.0	7.0	11.0	9.0	0.0	5.0	6.0	5.0	8.0
10	9.0	6.0	10.0	5.0	5.0	9.0	12.0	11.0	5.0	5.0	0.0	6.0	12.0	12.0
11	12.0	11.0	6.0	12.0	8.0	9.0	10.0	9.0	11.0	6.0	6.0	0.0	5.0	7.0
12	8.0	5.0	12.0	9.0	8.0	10.0	9.0	9.0	5.0	5.0	12.0	5.0	0.0	9.0
13	12.0	12.0	11.0	7.0	11.0	10.0	11.0	12.0	12.0	8.0	12.0	7.0	9.0	0.0

Tablo 14: Örnek Vaka Analizlerinde Kullanılan Her Bir Yayıdaki Maksimum Hızlar (m/sn)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0.0	17.0	19.0	20.0	25.0	22.0	25.0	24.0	24.0	20.0	24.0	23.0	23.0	21.0
1	17.0	0.0	23.0	24.0	22.0	22.0	17.0	25.0	18.0	18.0	24.0	20.0	18.0	22.0
2	19.0	23.0	0.0	18.0	22.0	19.0	24.0	20.0	23.0	23.0	19.0	25.0	20.0	21.0
3	20.0	24.0	18.0	0.0	20.0	20.0	25.0	20.0	19.0	22.0	21.0	20.0	21.0	17.0
4	25.0	22.0	22.0	20.0	0.0	25.0	17.0	22.0	17.0	22.0	18.0	20.0	21.0	18.0
5	22.0	22.0	19.0	20.0	25.0	0.0	24.0	21.0	20.0	24.0	19.0	24.0	19.0	17.0
6	25.0	17.0	24.0	25.0	17.0	24.0	0.0	24.0	23.0	18.0	22.0	19.0	25.0	23.0
7	24.0	25.0	20.0	20.0	22.0	21.0	24.0	0.0	22.0	22.0	20.0	19.0	21.0	22.0
8	24.0	18.0	23.0	19.0	17.0	20.0	23.0	22.0	0.0	18.0	23.0	17.0	17.0	21.0
9	20.0	18.0	23.0	22.0	22.0	24.0	18.0	22.0	18.0	0.0	17.0	25.0	20.0	18.0
10	24.0	24.0	19.0	21.0	18.0	19.0	22.0	20.0	23.0	17.0	0.0	17.0	24.0	25.0
11	23.0	20.0	25.0	20.0	20.0	24.0	19.0	19.0	17.0	25.0	17.0	0.0	24.0	25.0
12	23.0	18.0	20.0	21.0	21.0	19.0	25.0	21.0	17.0	20.0	24.0	24.0	0.0	21.0
13	21.0	22.0	21.0	17.0	18.0	17.0	23.0	22.0	21.0	18.0	25.0	25.0	21.0	0.0

Genişletilmiş sayısal analizlerde, “Pollution-Routing Problem Instance Library<sup>25</sup>” kütüphanesinden elde edilen verilerden uyarlanan problem durumları kullanılmaktadır. Bu kütüphane, seçilen Birleşik Krallık şehirleri arasındaki gerçek mesafeleri<sup>26</sup> içermekte ve örnek rotalama problemlerini sağlamaktadır. Analizlerde belirtilen her problem boyutu (yani ağdaki düğüm sayısı) için, kütüphanede sağlanan ilk beş örnek veri seti ele alınmıştır.

#### 4.5.2 Örnek Vaka Analizleri

Burada, ilk olarak (i) sadece başlangıç hız değerlerinin dikkate alındığı problemin statik bir çözümü ve (ii) hız verilerinin her iki ziyarette bir değişmesinin sonucundaki bir çözüm gözlemlenmektedir. Tablo 15 ayrıca, farklı hedefler altında (zaman, mesafe ve enerji tüketimini en aza indirme) elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı bir analizi ve doğru enerji tüketimi tahmininin faydasını göstermek için deterministik ve belirsiz enerji tüketimi varsayımlarından elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı bir analizi içerir.

<sup>25</sup> Pollution-Routing Problem Instance Library, [www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm](http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm), Erişim Tarihi: Kasım 2021

<sup>26</sup> Analizlerde kentsel senaryolar oluşturmak için şehirler arası verilen mesafeler 10'a bölünmüştür.

Tablo 15: Farklı Hedefler Altında Örnek Vakanın Optimal Çözümleri

	Mesafe Küçükleme	Zaman Küçükleme	Enerji İhtiyacı Küçükleme
<b>TPG</b>			
<b>Toplam Mesafe (km)</b>	332.3	333.6	347.1
<b>Seyahat Süresi (saat)</b>	7.45	7.28	8.91
<b>Ortalama Tüketim (kWh)</b>	70.79	71.77	71.86
<b>E* (kWh)</b>	81.95	83.91	79.77
<b>E* (kWh) % Değişimi</b>	2.73	5.19	-
<b>Hesaplama Süresi (saniye)</b>	30.14	35.56	31.07

\*İstenen hizmet seviyesini sağlamak için her yayda gereken minimum enerji

Tablo 16: Statik ve Dinamik Ayarlar Altında Örnek Vaka İçin Elde Edilen Optimum Çözümler

Statik Çözüm					Dinamik Çözüm				
Rota	Toplam Mesafe (km)	Seyahat Süresi (saat)	Ort. E (kWh)	E* (kWh)	Rota	Toplam Mesafe (km)	Seyahat Süresi (saat)	Ort. E (kWh)	E* (kWh)
0->7	7.00	0.16	1.47	1.66	0->7	7.00	0.16	1.47	1.66
7->10	13.30	0.30	2.82	3.26	7->10	13.30	0.40	2.68	2.81
10->9	31.80	1.00	6.39	6.72	10->8	31.80	0.10	0.90	1.02
9->8	27.60	0.71	5.65	6.22	8->9	27.60	0.66	5.74	6.42
8->12	35.80	1.13	7.19	7.56	9->12	35.80	1.83	12.77	13.52
12->6	12.40	0.25	2.72	3.21	12->6	12.40	0.31	2.56	2.82
6->5	16.80	0.39	3.52	3.98	6->11	16.80	0.38	3.42	3.89
5->11	1.90	0.04	0.41	0.48	11->5	1.90	0.05	0.38	0.41
11->4	41.80	1.04	8.62	9.55	5->4	41.80	0.90	8.47	9.67
4->3	49.10	1.07	10.51	12.32	4->3	49.10	1.26	10.05	10.98
3->13	31.00	0.90	6.25	6.62	3->2	31.00	0.63	6.18	7.19
13->2	21.10	0.46	4.52	5.27	2->13	21.10	0.43	4.62	5.49
2->1	42.20	1.05	8.70	9.61	13->1	42.20	0.97	7.70	8.47
1->0	15.30	0.43	3.10	3.32	1->0	15.30	0.35	3.21	3.62
<b>Toplam</b>	<b>347.10</b>	<b>8.91</b>	<b>71.86</b>	<b>79.77</b>	<b>Toplam</b>	<b>347.10</b>	<b>8.43</b>	<b>70.14</b>	<b>77.98</b>

\*İstenen hizmet seviyesini sağlamak için her yayda gereken minimum enerji

Dinamik parametrelere uyulmasının optimal planı önemli ölçüde değiştirebileceği Tablo 16'da görülmektedir; Dinamik optimal plandaki 14 yaydan 9'u statik çözümdekinden farklıdır. Statik çözüm, dinamik parametreleri göz ardı etmenin bir maliyeti olarak

%2'den fazla enerji gerektirmektedir. Çözümlere ait sonuçlar, dinamik parametre değişimini dikkate almanın önemini göstermektedir. Bu çalışmada da önerildiği şekilde, ani çevresel değişimlere ve buna bağlı olarak uygulanabilir sezgisel yaklaşımlara ihtiyaç artmaktadır.

Model öncelikle bir enerji gereksinimi minimizasyon hedefi ile sunulsa da, diğer birçok amaca hizmet etmek için kolayca uyarlanabilir. Tablo 15, bu tür uyarlamalar için çözümlerin temel performans göstergelerinin (seyahat mesafesi ve seyahat süresi) bir karşılaştırmasını sunmaktadır. Beklendiği gibi, her bir hedef uyarlaması sonucunda, küçüklenen TPG'sinde düşüş diğer TPG'lerde ise yükseliş ortaya çıkmaktadır. Karar vericiler, arzu ettikleri amaç doğrultusunda bu tür ödünleşme analizlerini gerçekleştirebilir. Analizler ayrıca, doğru enerji tüketimi tahmininin faydasını da göstermektedir. Tablo 16'da araç rotası belirlenirken seyahat mesafesi, araç yükü, belirsiz hız ve araç özellikleri de dikkate alındığında, en yüksek seyahat mesafesine (347.1 km) sahip bir çözümün en az enerji tüketimi miktarını (79,77 kWh) sağlayabileceği görülmektedir.

Farklı derecelerde belirsizlik ve farklı hizmet seviyesi gereksinimleri çözümleri etkiler. Artan hizmet seviyesi, yüksek bir olasılıkla bataryanın yeterli olacağından emin olmayı gerektirmesi nedeniyle daha fazla menzil kaygısına karşılık gelir. Daha yüksek hizmet seviyeleri, aşırı batarya tükenmesi durumlarında bile operasyonların başarılı olmasını sağlar. Buna göre, Tablo 17'da gösterildiği gibi, belirsizlik seviyesindeki veya hizmet seviyesindeki bir artış, teslimat işlemlerini gerçekleştirmek için daha yüksek enerji gerektirmektedir. Bu durum, muhtemel teslimat planlarını değiştirmektedir.

Tablo 17: Farklı Hizmet Seviyesi ve CoV Varsayımları Altında Örnek Vaka Çözümleri

TPG		$z = 1.65$	$z = 1.96$	$z = 2.58$
<b>CoV = 0.1</b>	Toplam Mesafe (km)	334.60	334.60	347.10
	Seyahat Süresi (saat)	7.71	7.71	8.91
	Ortalama Tüketim (kWh)	70.56	70.56	71.86
	E* (kWh)	74.41	75.00	76.05
<b>CoV = 0.2</b>	Toplam Mesafe (km)	347.10	347.10	347.10
	Seyahat Süresi (saat)	8.91	8.91	8.91
	Ortalama Tüketim (kWh)	71.86	71.86	71.86
	E* (kWh)	78.8	79.77	81.72



TPG		$z = 1.65$	$z = 1.96$	$z = 2.58$
CoV = 0.3	Toplam Mesafe (km)	347.10	347.10	347.10
	Seyahat Süresi (saat)	8.91	8.91	8.91
	Ortalama Tüketim (kWh)	71.86	71.86	71.86
	E* (kWh)	82.87	84.33	87.25

\*İstenen hizmet seviyesini sağlamak için her yayda gereken minimum enerji

Önerilen karar destek aracını gerçek bir ağda uygularken karşılaşılan ana zorluk, enerji tüketim dağılımlarının hız dışında sürücü davranışı, hava koşulları, yol bakım faaliyetleri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebileceği gerçeği olarak kabul edilebilir. Bu nedenle, önce yukarıda belirtilen faktörler göz önünde bulundurularak temsili hız dağılımları oluşturulmalıdır. Ardından, kullanılacak araca özgü enerji tüketim parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir (Asamer vd., 2016). Son adım olarak ise, daha iyi çözümler olasılığı ve hesaplama süresi arasında bir dengeyi içeren H ve P parametrelerinin değerleri ayarlanmalıdır. RDP mantığının kullanılmasıyla elde edilen durum uzayı azalması, algoritmanın gerçek boyutlu ağlar için uygulanmasına izin vermektedir.

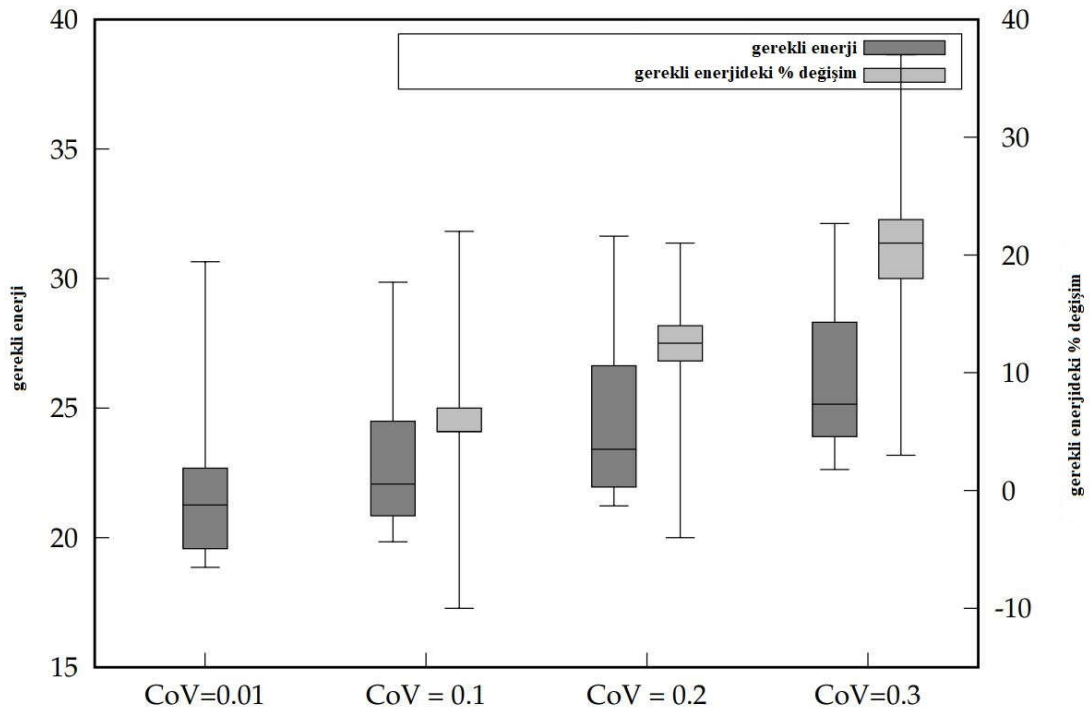
#### 4.5.3 Parametre Testleri ile Sezgisel Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde, parametre değerlerindeki değişikliklerin problemin çözümüne etkilerini ve sezgisel algoritmanın performansını gözlemlemek için, çeşitli parametre ayarları altında farklı boyutlardaki örnek problemler RDP-Prim algoritması kullanılarak çözülmektedir. Farklı parametre ayarları, özellikle problem özelliklerinin, belirsizliğin ve detaylı enerji hesaplamasının önemini göstermek için seçilmiştir.

##### 4.5.3.1 Belirsiz batarya tüketiminde farklı derecelerde varyasyon değerinin dikkate alınması

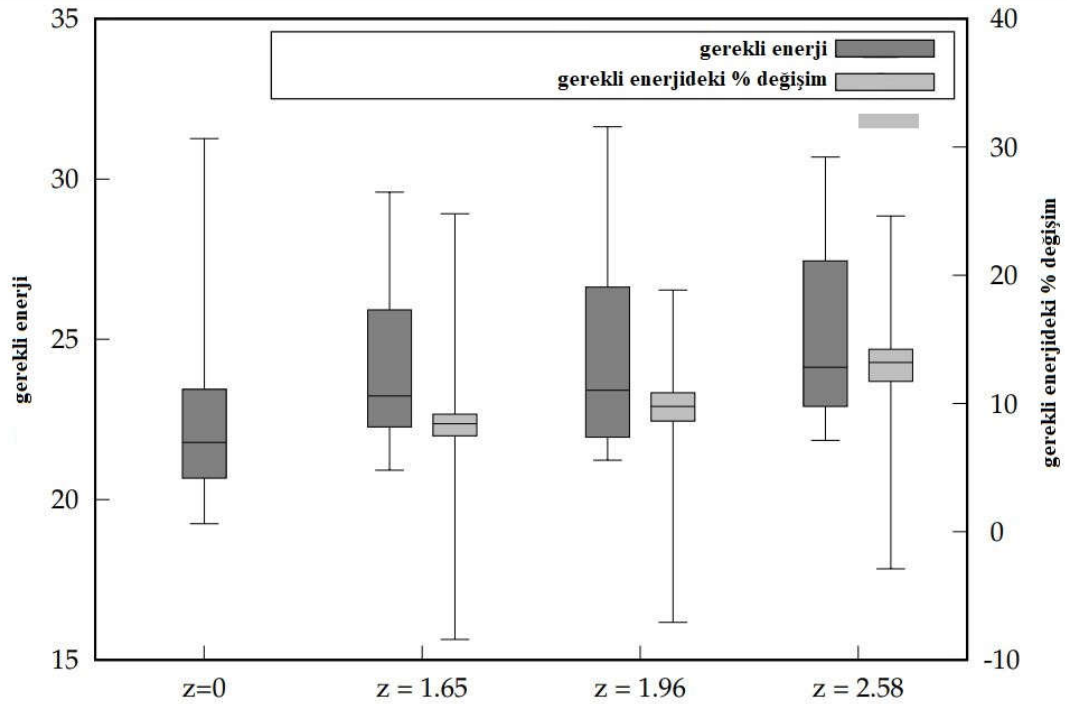
Batarya tükenmesindeki belirsizlik, sürücüler için menzil kaygısına neden olur. Belirsizliği ve buna bağlı olarak menzil kaygısını ele almak, batarya azalma varyansını ve ilgili hizmet düzeyinin dikkate alınmasını gerektirir. Daha yüksek batarya tüketimi varyasyonları ve daha yüksek hizmet seviyesi, planlamalarda ortalamaya kıyasla daha yüksek enerji tüketimi oranlarına yol açmaktadır. Burada, yukarıda sunulan daha küçük boyutlu örnek vaka problemi için en uygun sonuçlara ek olarak, 50 düğümlü problem örneklerinde CoV ve servis seviyesi ayarları değiştirilmekte ve bu problemler 6 farklı H ayarı altında RDP-Prim algoritması ile çözülmektedir ( $H \in \{50, 100, 250, 500, 1000, 2500\}$ ). Analizler için sözü edilen “Pollution-Routing Problem Instance Library”

kütüphanesinde bulunan ilk beş sıradaki 50 düğümlü örnekler kullanılmaktadır. Şekil 5 ve Şekil 6, CoV ve servis seviyesi ayarlarını ve bunlara karşılık gelen sonuçları özetlemektedir. Sonuçlar, CoV ve hizmet seviyesi artışının enerji tüketim seviyeleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Sabit bir hizmet seviyesi değerinde, CoV değerindeki bir artış, daha fazla enerji tüketimine yol açmaktadır. Aynı şekilde, sabit bir CoV değeri ile her hizmet seviyesindeki artış, daha fazla enerji tüketimine yol açmaktadır.



\*İstenilen servis seviyesini sağlamak için her yerde gereken minimum enerjinin, düşük varyasyon (CoV = 0.01) durumu ile karşılaştırılması ve her CoV seviyesi için bu enerjinin yüzde artışları

Şekil 5: Çeşitli CoV Ayarları Altındaki Sonuçlar (z=1.96)



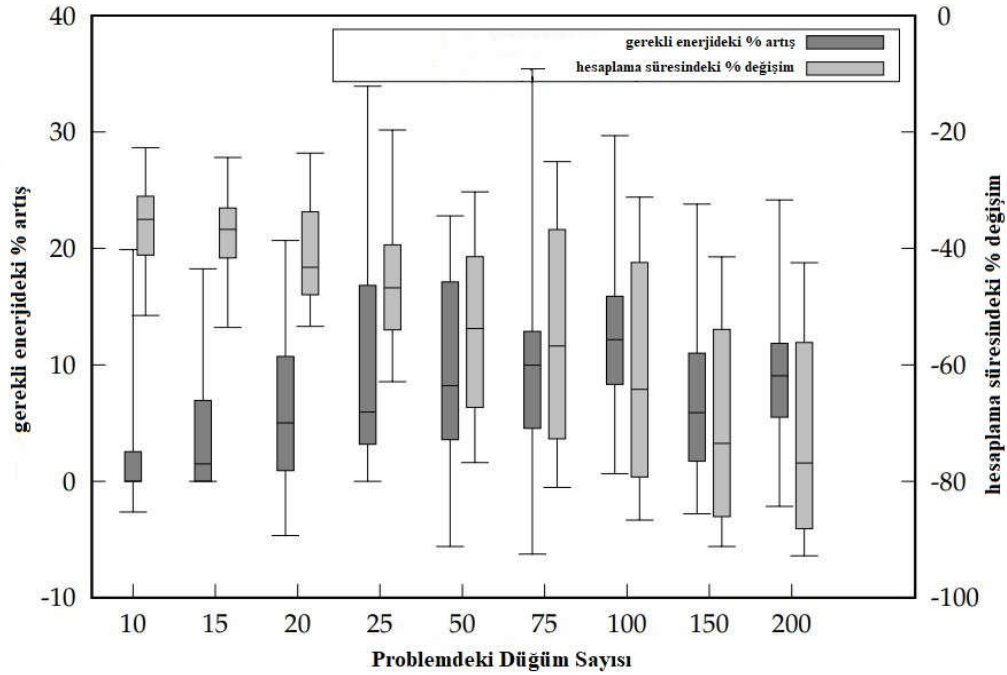
\*İstenilen servis seviyesini sağlamak için her yayda gereken minimum enerjinin deterministik ( $z=0$ ) duruma göre karşılaştırılması ve her servis seviyesi için bu enerjinin yüzde artışları

Şekil 6: Çeşitli Hizmet Seviyeleri Altındaki Sonuçlar (CoV=0.2)

#### 4.5.4 Geliştirilen Sezgisel Yaklaşımın Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde, örnek vaka ve değişen büyüklükteki problemler için önerilen sezgisel algoritmanın performans değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu amaçla, örnek vaka ve altı farklı H ayarı ( $H \in \{50, 100, 250, 500, 1000, 2500\}$ ) altında her boyut için yukarıda bahsedilen “Pollution-Routing Problem Instance Library” kütüphanesinde yer alan ilk beş problem çözülmüştür. Toplamda 45 problem (dokuz farklı boyuttan ilk beş problem), 270 örnek-ayar çifti oluşturan 6 farklı H ayarıyla çözülmüştür. “Pollution-Routing Problem Instance Library” kütüphanesindeki örnekler için, örnek vakada kullanılan aynı parametreler kullanılmıştır (bkz: Tablo 11).

Örnek vakaya ilişkin karşılaştırma sonuçları, her iki sezgisel yöntemin de saniyeler içinde en uygun çözümleri elde etme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. “Pollution-Routing Problem Instance Library” kütüphanesindeki örnekler için, Şekil 7 RDP-Prim algoritması ile klasik RDP algoritmasının gerekli enerji ve hesaplama süresi değişiklikleriyle ilgili karşılaştırma sonuçlarının özetini sunmaktadır. Toplam 270 örnek-ayar çiftine göre, RDP-Prim algoritması tarafından elde edilen belirli hizmet seviyesi altında gereken enerji, klasik RDP algoritmasından ortalama olarak %6,87 daha düşüktür.



Şekil 7: Klasik RDP Algoritmasının ve RDP-Prim Algoritmasının Problemdeki Düğüm Sayısı Arttıkça Gerekli Enerji ve Hesaplama Süresi Değişiklikleri İle İlgili Karşılaştırma Sonuçlarının Özeti

Tablo 18, farklı H ayarlarında RDP ve RDP-Prim algoritmalarını kullanarak ele alınan her problem için bulunan en iyi çözümleri sunmaktadır. Sonuçlar, UK75\_05 problemi dışında, önerilen RDP-Prim algoritmasının klasik RDP algoritmasına kıyasla daha iyi veya en azından aynı uygulanabilir çözümü bulmayı sağladığını göstermektedir. 45 problemde 8'inde, her iki sezgisel yöntem ile aynı sonuçlar elde edilirken, RDP-Prim 36 problemde RDP'den daha iyi performans göstermektedir.

Tablo 18: Farklı H Ayarları İle RDP ve RDP-Prim Algoritmaları Kullanılarak Ele Alınan Her Sorun İçin En İyi Çözümler

Problem	RDP			RDP & Prim		
	E* (kWh)	H Ayarı	Hesaplama Süresi (saniye)	E* (kWh)	H Ayarı	Hesaplama Süresi (saniye)
UK10_01	7.9*	500	1*	7.9*	250	2
UK10_02	12.65*	1000	1*	12.65*	500	2

Problem	RDP			RDP & Prim		
	E* (kWh)	H Ayarı	Hesaplama Süresi (saniye)	E* (kWh)	H Ayarı	Hesaplama Süresi (saniye)
UK10_03	10.44*	50	1*	10.44*	50	1*
UK10_04	11.16*	1000	1*	11.16*	500	2
UK10_05	10.53*	500	1*	10.53*	500	1*
UK15_01	15.06	50	2*	14.81*	2500	8
UK15_02	13	2500	5*	11.42*	2500	9
UK15_03	14.96	2500	5	14.39*	100	3*
UK15_04	14.85	2500	5*	14.64*	2500	8
UK15_05	16.68	250	2*	16.37*	2500	8
UK20_01	14.96*	2500	8*	14.96*	1000	10
UK20_02	16.23*	2500	8	16.23*	500	7*
UK20_03	32417	2500	9*	10.42*	1000	9*
UK20_04	16.82	2500	8	16.48*	50	5*
UK20_05	13.11	1000	5*	12.86*	50	6
UK25_01	12.57	2500	11*	12.01*	2500	28
UK25_02	14.91	50	5*	14.31*	50	7
UK25_03	8.85	1000	8*	8.61*	2500	30
UK25_04	13.85	500	6*	10.89*	250	9
UK25_05	14.16*	500	6*	14.16*	250	10
UK50_01	22.56	2500	51	21.37*	50	34*
UK50_02	24.91	2500	51	21.23*	100	36*
UK50_03	26.02	100	22*	23.25*	50	35
UK50_04	25.78	500	25*	23.2*	1000	90
UK50_05	29.32	250	23*	27.91*	2500	184
UK75_01	34.73	2500	113*	31.68*	2500	555
UK75_02	26.54	2500	118*	24.06*	2500	565
UK75_03	34.13	50	53*	32.82*	2500	560
UK75_04	29.81	2500	109*	26.92*	500	159
UK75_05	33.05*	100	53*	33.81	2500	546
UK100_01	40.43	1000	110*	38.78*	50	158
UK100_02	45.06	2500	169	39.02*	100	149*
UK100_03	34.77	1000	112*	31.32*	500	322
UK100_04	37.35	500	97*	33.52*	250	209
UK100_05	35.47	250	90*	31.68*	2500	1212
UK150_01	47.36	2500	347	44.6*	50	311*
UK150_02	53.61	500	198*	49.18*	2500	3774
UK150_03	43.32	100	174*	40.69*	1000	1659
UK150_04	50.97	2500	346*	46.74*	2500	3849
UK150_05	45.83	250	183*	45.69*	500	947
UK200_01	55.94	50	331*	52.78*	500	2070
UK200_02	57.15	50	344*	52.17*	2500	8792
UK200_03	55.21	2500	647*	50.72*	2500	8774
UK200_04	54.01	2500	640*	48.94*	250	1264
UK200_05	58.02	250	350*	53.7*	2500	8914

\* İstenen hizmet seviyesini sağlamak için her yayda gereken minimum enerji

#### 4.6 Analiz Sonuçları

Yukarıda bahsedilen sezgisel yöntemler arasında genel bir karşılaştırma yapıldığında, önerilen çözüm yaklaşımının katma değeri görülmektedir. DP algoritmasının durum uzayında Prim algoritması aracılığıyla sınırlayıcı mantığın kullanılması, önerilen çözüm yaklaşımıyla nispeten daha iyi çözümler elde edilmesini sağlamaktadır.

Önerilen modelin ve çözüm yaklaşımının katma değerleri, bir örnek probleme ve nispeten daha büyük problemleri de içeren 270 örnek ayar çiftine dayalı olarak gösterilmiştir. Örnek vaka üzerindeki nümerik analizlerin sonuçları, dinamikliğin göz ardı edilmesinin %2'den fazla enerjiye mal olduğunu ve farklı bir teslimat planının elde edilmesine yol açtığını göstermektedir ki bu da teslimat operasyonları sırasında değişen dinamik parametreleri dikkate almanın önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, şehir içi araç rotalama yönetimi, hızla güncellenen çözümleri ve buna uygun olarak uygulanabilir sezgisel yaklaşımları gerektirmektedir. Kapsamlı sayısal performans değerlendirme analizleri, önerilen RDP-Prim algoritmasının makul sürelerde umut veren çözümler bulmayı sağladığını göstermektedir. Ortalama 270 örnek ayar çifti analiz sonuçlarında görüldüğü üzere, verilen hizmet seviyesi altında RDP-Prim algoritması tarafından elde edilen gereken enerji, klasik RDP algoritmasına göre %6,87 daha düşüktür. Ayrıca, belirsiz batarya tükenmesinin veya detaylı enerji tahmininin teslimat planlarını ve dolayısıyla ortaya çıkan TPG'lerini etkileyebileceği gözlemlenmiştir.

RDP-Prim algoritmasının daha iyi performansı, çözüm süresinde bir artış maliyeti ile birlikte gelmektedir. Bununla birlikte özellikle her iki algoritmanın da uygun zamanlarda çözümler sunabileceği düşünüldüğünde çoğu durumda çözüm süresi artışı önemli olarak değerlendirilmemektedir. Bu nedenle, RDP-Prim algoritması, belirsiz Gezgin Satıcı Problemleri için umut veren bir karar destek modeli olarak kullanılabilir.

## SONUÇ VE TARTIŞMA

Şehirleşmenin artmasıyla ekonomik, çevresel ve sosyal sorunlarda artışlar gözlemlenmektedir. Şehirlerin büyümesiyle birlikte tedarik zincirinde yer alan ürünlerin taşınması için yük taşımacılık faaliyetlerinin değişime uygun şekilde güncellenmesi ve doğru planlanması önem kazanmaktadır. Bu çalışma ile şehir içi lojistik problemleri için sürdürülebilirliği dikkate alan yeni karar destek modellerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen modellerde ekonomik faktörlerin yanı sıra, dağıtım faaliyetlerindeki enerji tüketimi ve emisyon salınımları, şehir içi trafik sıkışıklığı, konvansiyonel araçlar yerine çevre dostu elektrikli araçların kullanımı gibi faktörler de dikkate alınmıştır. Çevresel ve sosyal faktörlerin ölçülebilmesi ve karar verme süreçlerinde bu faktörlerin dikkate alınabilmesi için tedarik zinciri alanındaki karar vericilerin geliştirilen modelleri kullanmasının fayda sağlayabileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, daha çevre ve toplum dostu bir yaklaşımla planlamaların yapılması ve maliyetlendirilmesi mümkün olacaktır.

Bu çalışmada, lojistik işlemleri kapsamında dinamik dağıtım problemlerine odaklanılmıştır. Bu bağlamda, dağıtım planlama aşamasında operasyonel seviyede (i) dinamik deterministik batarya tüketimi altında elektrikli araçlar için Gezin Satıcı Problemi ve (ii) dinamik belirsiz batarya tüketimi altında elektrikli araçlar için Gezin Satıcı Problemi ele alınmıştır. Literatürde yer alan gerçek hayat problemlerinden elde edilmiş veri setlerinin analizleri sonucunda, bu çalışmada önerilen yeni yaklaşımların uygulanabilirliği ve kullanımları sonucunda elde edilecek katma değer gösterilmiştir. Uluslararası ve ulusal literatürde, bu çalışma kapsamında odaklanılan problemler hakkında kısıtlı sayıda çalışmanın yer aldığı görülmektedir. Odaklanılan problemler için geliştirilen kantitatif yaklaşımların hem teoride, hem de pratikte sürdürülebilir lojistik yönetimi alanına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

*Dinamik deterministik batarya tüketimi altında elektrikli araçlar için Gezin Satıcı Problemi kapsamında yapılan çalışmalar ve analizler:*

- Bu problem için geliştirilen RDP-Bağlantı eleme sezgisel yaklaşımı, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak, (i) dağıtım faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları, (ii) deterministik batarya tüketimini, (iii) detaylı enerji tüketimi

hesaplamasını ve (iv) dinamik olarak farklılık gösteren önemli problem parametrelerini eşanlı olarak dikkate almaktadır.

- DP terminolojisinde yer alan probleme özgü aşama, durum, geçiş fonksiyonları, karar ve optimal politika kavramları tanımlanmış ve çok aşamalı DP modeli bir yazılım dili kullanılarak kodlanmıştır.
- Bir örnek problem üzerinde yapılan analizlerin sonucunda detaylı enerji tüketiminin dikkate alınmasının faydaları belirlenmiştir. Analiz sonuçları, mesafe en küçüklemesi altındaki dağıtım planının daha kısa toplam mesafeye sahip olmasına rağmen, gerçekleştirilmesi için gereken toplam enerji miktarının daha fazla olduğunu göstermektedir.
- Örnek problem üzerinde ziyaret edilen her iki düğüm sonrasında araç hızı güncellenerek yapılan analiz, dinamik hız değişimlerini dikkate almanın faydalarını ortaya koymuştur. Dinamik hızların dikkate alındığı senaryoda alınan sonuçlar, dağıtım planının ve temel performans göstergelerinin değiştiğini göstermektedir.
- 90 problemin 6 farklı parametre değeri altında, toplamda 540 problem ile yapılan performans analizi sonuçları, toplam enerji tüketimi göz önüne alındığında, RDP-Bağlantı Eleme sezgisel algoritmasının RDP algoritmasına göre ortalama %3,13 daha iyi çözümler ürettiğini göstermektedir.

*Dinamik belirsiz batarya tüketimi altında elektrikli araçlar için Gezgin Satıcı Problemi kapsamında yapılan çalışmalar ve analizler:*

- Bu problem için geliştirilen RDP-Prim sezgisel yaklaşımı, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak, (i) dağıtım faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları, (ii) belirsiz batarya tüketimini, (iii) detaylı enerji tüketimi hesaplamasını ve (iv) dinamik olarak farklılık gösteren önemli problem parametrelerini eşanlı olarak dikkate almaktadır.
- DP terminolojisinde yer alan probleme özgü aşama, durum, geçiş fonksiyonları, karar ve optimal politika kavramlarını tanımlanmış ve çok aşamalı DP modeli bir yazılım dili kullanılarak kodlanmıştır.
- Bir örnek problem üzerinde farklı amaç fonksiyonlarıyla (zaman, mesafe ve enerji tüketimini en küçükleme) analiz yapılmıştır. Geliştirilen sezgisel yöntemin farklı



hedeflere uyarlanabilir olması, karar vericilerin farklı TPG açısından ödünleşme analizi yapabilmelerine olanak vermektedir.

- Örnek problem üzerinde ziyaret edilen her iki düğüm sonrasında araç hızı güncellenerek yapılan analiz, dinamik parametre değişimini dikkate almanın önemini göstermektedir. Dinamik parametreleri göz ardı etmenin maliyeti %2'den daha fazla oranda enerji tüketimi olarak belirlenmiştir.
- Analizlerde detaylı enerji tüketimi hesaplanırken araç yükü, belirsiz hız ve araç özelliklerinin göz önünde bulundurulması daha fazla seyahat mesafesine sahip olmasına rağmen daha az enerji tüketimi miktarı ile tamamlanabilecek dağıtım planlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır.
- Menzil kaygısının ele alınması amacıyla, 50 düğüme sahip, 5 örnek problemin 6 farklı parametre (H) değeri ile analizi yapılmıştır. Nümerik analizler, CoV veya hizmet seviyesi artışının enerji tüketim seviyeleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. CoV ve hizmet seviyesindeki artış daha fazla enerji gereksinimine sebep olmaktadır.
- 45 problemin 6 farklı parametre değerinde toplamda 270 problem ile yapılan performans analizi sonuçları, toplam enerji tüketimi göz önüne alındığında, RDP-Prim sezgisel algoritmasının RDP algoritmasına göre ortalama %6,87 daha iyi çözümler ürettiğini göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen karar destek modellerinin hizmet sektöründe lojistik yönetimi alanında kullanılmasının rekabetçi üretim ve verimlilik hedefine ulaşma konusunda işletmelere fayda sağlayabileceği düşünülmektedir. Dağıtım faaliyetleri için ihtiyaç duyulan enerjinin etkin kullanılması, çeşitli operasyonel maliyetler arası ödünleşmelerin hesaplanması, ayrıca küresel anlamda önem kazanan çevresel ve sosyal faktörlerin dikkate alınmasıyla dağıtım planlarının hazırlanması işletmelerin taşımacılık ve lojistik sektöründe rekabet gücünün artırılmasına katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada önerilen sezgisel çözümlerle elde edilen teslimat planlarından, operasyonlarını elektrikli araçlarla sürdürmeyi hedefleyen kargo şirketlerinin, ilaç firmalarının, belediyelerin ve diğer profesyonellerin faydalanabilecekleri düşünülmektedir. Daha iyi araç rotaları, daha az; enerji ihtiyacı, emisyon, trafik sıklığı ve gürültü oluşumunu etkiler. Bu nedenle

önerilen sezgisel çözümlerle geliştirilen dağıtım/teslimat planları, sürdürülebilirliğe ekonomi boyutunda katkı sağladığı gibi, kısa mesafeli yük taşımacılığı operasyonlarının çevresel ve sosyal etkilerinin azaltılmasına da katkı sağlayabilir.

Literatürde ilgili problemler için DP tabanlı sezgisel çalışmalar bulunmaktadır (örneğin; Gromicho vd., 2008, Soysal ve Çimen 2017; Soysal vd., 2021). Bu tez kapsamında geliştirilen yeni DP tabanlı sezgisel yaklaşımlar, daha kısa sürede daha iyi çözümlerin ortaya konulabileceğini, dolayısıyla pratikte karar vericiler için daha kullanışlı karar destek modellerinin oluşturabileceğini göstermektedir. Literatürde elektrikli araçlarda detaylı enerji tüketimini ele alan ve farklı belirsizlikleri göz önünde bulunduran çalışmalar mevcuttur (örneğin; Basso vd., 2021, Chen vd., 2021, Basso vd., 2022). Bu çalışmada yapılan analizler detaylı enerji tüketimini ve enerji tüketim belirsizliğini dikkate almanın dağıtım planlarını etkileyebildiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki ilgili çalışmaların sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

Mevcut çalışmada kullanılan RDP durum uzayını kısıtlama ve geliştirme mantığı, ziyaret edilmemiş müşterilerin gezilmesinin yaklaşık maliyetine göre çalışmaktadır. Gezilmemiş müşterilerin ziyaret edilmesinin toplam maliyetini daha iyi hesaplamaya imkan tanıyan yaklaşımların kullanılması DP tabanlı sezgisel yaklaşımların performansını arttırabilir ve daha iyi dağıtım planlarının elde edilmesini sağlayabilir. İleriki çalışmalarda, DP tabanlı sezgisel çözümler öğrenme temelli yaklaşımlar ile desteklenebilir. Ayrıca, birden fazla aracın bulunduğu, teslimat işlemleri sırasında batarya değiştirme istasyonu ziyaretlerinin yapıldığı veya farklı parametre belirsizliklerinin (örneğin; talep belirsizliği, şarj istasyonun bekleme süresi belirsizliği) dikkate alındığı problemler için yeni sezgisel yaklaşımlar geliştirilebilir.

## KAYNAKÇA

- Abdulaal, A., Cintuglu, M. H., Asfour, S. ve Mohammed, O. A. (2016). Solving the multivariant EV routing problem incorporating V2G and G2V options. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(1), 238-248.
- Abousleiman, R. ve Rawashdeh, O. (2016). Electric vehicle modelling and energy-efficient routing using particle swarm optimisation. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(2), 65-72.
- Adler, J. D., Mirchandani, P. B., Xue, G. ve Xia, M. (2016). The electric vehicle shortest-walk problem with battery exchanges. *Networks and Spatial Economics*, 16(1), 155-173.
- Agatz, N. A., Fleischmann, M. ve Van Nunen, J. A. (2008). E-fulfillment and multi-channel distribution—A review. *European Journal of Operational Research*, 187(2), 339-356.
- Ahani, P., Arantes, A. ve Melo, S. (2016). A portfolio approach for optimal fleet replacement toward sustainable urban freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 357-368.
- Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., McLeod, F., Cherrett, T., Ghali, K. ve Austwick, M. (2018). Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 325-338.
- Altenburg, T., Bhasin, S. ve Fischer, D. (2012). Sustainability-oriented innovation in the automobile industry: advancing electromobility in China, France, Germany and India. *Innovation and Development*, 2(1), 67-85.
- Anosike, A., Loomes, H., Udokporo, C. K. ve Garza-Reyes, J. A. (2021). Exploring the challenges of electric vehicle adoption in final mile parcel delivery. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-25.
- Asamer, J., Graser, A., Heilmann, B. ve Ruthmair, M. (2016). Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles. *Transportation Research Part D*, 46, 182–199.
- Bac, U. ve Erdem, M. (2021). Optimization of electric vehicle recharge schedule and routing problem with time windows and partial recharge: A comparative study for an urban logistics fleet. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102883.
- Barth, M., Younglove, T. ve Scora, G. (2005). Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model; California PATH Program, Institute of Transportation Studies. University of California, Berkeley.
- Basso, R., Kulcsár, B., Egardt, B., Lindroth, P. ve Sanchez-Diaz, I. (2019). Energy consumption estimation integrated into the electric vehicle routing problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 141-167.

- Basso, R., Kulcsár, B. ve Sanchez-Diaz, I. (2021). Electric vehicle routing problem with machine learning for energy prediction. *Transportation Research Part B: Methodological*, 145, 24-55.
- Basso, R., Kulcsár, B., Sanchez-Diaz, I. ve Qu, X. (2022). Dynamic stochastic electric vehicle routing with safe reinforcement learning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 157, 102496.
- Behrends, S., Lindholm, M. ve Woxenius, J. (2008). The impact of urban freight transport: A definition of sustainability from an actor's perspective. *Transportation planning and technology*, 31(6), 693-713.
- Bektaş, T. (2006). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34(3), 209–219.
- Bektaş, T. ve Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing problem. *Transportation Research Part B*, 45, 1232–1250.
- Bektaş, T., Repoussis, P. ve Tarantilis, C. (2014). Dynamic vehicle routing problems. *Toth, D., Vigo, D. (Eds.), Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, 299–347. MOS-SIAM Series on Optimization, Philadelphia.
- Bellman, R. (1962). Dynamic programming treatment of the travelling salesman problem, *Journal of the ACM (JACM)*, 9(1), 61-63.
- Bi, X. ve Tang, W. K. (2019). Logistical planning for electric vehicles under time-dependent stochastic traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(10), 3771-3781.
- Bongiovanni, C., Kaspi, M. ve Geroliminis, N. (2019). The electric autonomous dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 436-456.
- Borghetti, F., Caballini, C., Carboni, A., Grossato, G., Maja, R. ve Barabino, B. (2022). The Use of Drones for Last-Mile Delivery: A Numerical Case Study in Milan, Italy. *Sustainability*, 14(3), 1766.
- Braekers, K., Ramaekers, K. ve Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313.
- Breunig, U., Baldacci, R., Hartl, R. F. ve Vidal, T. (2019). The electric two-echelon vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 103, 198-210.
- Bruglieri, M., Colorni, A. ve Lue, A. (2014a). The vehicle relocation problem for the one-way electric vehicle sharing: an application to the Milan case. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, 18-27.
- Bruglieri, M., Colorni, A. ve Luè, A. (2014b). The relocation problem for the one-way electric vehicle sharing. *Networks*, 64(4), 292-305.

- Bruglieri, M., Pezzella, F. ve Pisacane, O. (2018). A two-phase optimization method for a multiobjective vehicle relocation problem in electric carsharing systems. *Journal of Combinatorial Optimization*, 36(1), 162-193.
- Brundtland, G. H., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S. ve Chidzero, B. J. N. Y. (1987). *Our Common Future*. New York.
- Cardenas, I., Borbon-Galvez, Y., Verlinden, T., Van de Voorde, E., Vanelslander, T. ve Dewulf, W. (2017). City logistics, urban goods distribution and last mile delivery and collection. *Competition and regulation in network industries*, 18(1-2), 22-43.
- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D. ve González-Feliu, J. (2017). Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), 51-79.
- Chen, R., Qian, X., Miao, L. ve Ukkusuri, S. V. (2020). Optimal charging facility location and capacity for electric vehicles considering route choice and charging time equilibrium. *Computers & Operations Research*, 113, 104776.
- Chen, X. W., Chen, B. Y., Lam, W. H., Tam, M. L. ve Ma, W. (2021). A bi-objective reliable pathfinding algorithm for battery electric vehicle routing. *Expert Systems with Applications*, 182, 115228.
- Chen, Y., Yu, J., Yang, S. ve Wei, J. (2018). Consumer's intention to use self-service parcel delivery service in online retailing: An empirical study. *Internet Research*.
- Clarke, G. ve Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568-581.
- Coelho, L. C., Renaud, J. Ve Laporte, G. (2016). Road-based goods transportation: a survey of real-world logistics applications from 2000 to 2015. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 54(2), 79-96.
- Conway, T. (2017). On the effects of a routing and reservation system on the electric vehicle public charging network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(9), 2311-2318.
- Cooray, P. L. N. U. ve Rupasinghe, T. D. (2017). Machine learning-based parameter tuned genetic algorithm for energy minimizing vehicle routing problem. *Journal of Industrial Engineering*, 2017.
- Crainic, T. G., Ricciardi, N. ve Storchi, G. (2004). Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(2), 119-137.
- Çalık, H. ve Fortz, B. (2019). A Benders decomposition method for locating stations in a one-way electric car sharing system under demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 125, 121-150
- Dantzig, G. B. ve Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80-91.

- Davis, B. A. ve Figliozzi, M. A. (2013). A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 8-23.
- Dablanc, L. (2019). E-commerce trends and implications for urban logistics. *Urban logistics. Management, policy and innovation in a rapidly changing environment*, 167-195.
- Daugherty, P. J., Bolumole, Y. ve Grawe, S. J. (2018). The new age of customer impatience: An agenda for reawakening logistics customer service research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- Demir, E., Bektaş, T. ve Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 346-359.
- Demir, E., Bektas, T. ve Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 775–793.
- Deng, J., Li, J., Li, C., Han, Y., Liu, Q., Niu, B. ve Zhang, B. (2021). A hybrid algorithm for electric vehicle routing problem with nonlinear charging. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(3), 5383-5402.
- Desaulniers, G., Errico, F., Irnich, S. ve Schneider, M. (2016). Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Operations Research*, 64(6), 1388-1405.
- Ducret, R. (2014). Parcel deliveries and urban logistics: Changes and challenges in the courier express and parcel sector in Europe—The French case. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 15-22.
- Dündar, H., Ömürgönülşen, M. ve Soysal, M. (2021). A review on sustainable urban vehicle routing. *Journal of Cleaner Production*, 285,125444.
- Edwards, J., McKinnon, A., Cherrett, T., McLeod, F. ve Song, L. (2010). Carbon dioxide benefits of using collection–delivery points for failed home deliveries in the United Kingdom. *Transportation Research Record*, 2191(1), 136-143.
- Eksioglu, B., Vural, A. V. ve Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483.
- Eliyan, A., Elomri, A. ve Kerbache, L. (2021). The last-mile delivery challenge: Evaluating the efficiency of smart parcel stations. *In Supply Chain Forum: An International Journal*, 22(4), 360-369. . Taylor & Francis.
- Erdem, M. (2022). Optimisation of the electric truck route for milk collection problem: A real case study. *Transportation Letters*, 1–18.
- Fernández, R. Á., Caraballo, S. C. ve López, F. C. (2019). A probabilistic approach for determining the influence of urban traffic management policies on energy consumption

- and greenhouse gas emissions from a battery electric vehicle. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117604.
- Ferro, G., Paolucci, M. ve Robba, M. (2020). Optimal Charging and Routing of Electric Vehicles With Power Constraints and Time-of-Use Energy Prices. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(12), 14436-14447.
- Fiedler, P. E. K. ve Zannin, P. H. T. (2015). Evaluation of noise pollution in urban traffic hubs—Noise maps and measurements. *Environmental Impact Assessment Review*, 51, 1-9.
- Florio, A. M., Absi, N. ve Feillet, D. (2021). Routing electric vehicles on congested street networks. *Transportation Science*, 55(1), 238-256.
- Foiadelli, F., Longo, M., Delfino, F., Bracco, S., Spina, D. ve Dhaene, T. (2017). Electric vehicle use in public fleets: The case of the Genoa University. In *2017 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, 490-494. IEEE.
- Froger, A., Mendoza, J. E., Jabali, O. ve Laporte, G. (2019). Improved formulations and algorithmic components for the electric vehicle routing problem with nonlinear charging functions. *Computers & Operations Research*, 104, 256-294.
- Franceschetti, A., Honhon, D., Van Woensel, T., Bektaş, T. ve Laporte, G. (2013). The time dependent Pollution-Routing problem. *Transportation Research Part B Methodological*, 56, 265-293.
- Funke, S. Á., Sprei, F., Gnann, T. ve Plötz, P. (2019). How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison. *Transportation research part D: transport and environment*, 77, 224-242.
- Ge, X., Zhu, Z. ve Jin, Y. (2020). Electric vehicle routing problems with stochastic demands and dynamic remedial measures. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- Gevaers, R., Van de Voorde, E. ve Vanelslander, T. (2009). Characteristics of innovations in last-mile logistics-using best practices, case studies and making the link with green and sustainable logistics. *Association for European Transport and Contributors*, 1, 21.
- Giampoldaki, E., Madas, M., Zeimpekis, V. ve Vlachopoulou, M. (2021). A state-of-practice review of urban consolidation centres: practical insights and future challenges. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-32.
- Goeke, D. ve Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 81-99.
- Goeke, D. (2019). Granular tabu search for the pickup and delivery problem with time windows and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 821-836.
- Gonzalez-Zavala, E. ve Betanzo-Quezada, E. (2016, May). Urban freight transport planning policies in the metropolitan zone of Tijuana. In *2016 12th Congreso Internacional de Ingeniería (CONIIN)*, 1-5. IEEE.

- Graham-Rowe, E., Gardner, B., Abraham, C., Skippon, S., Dittmar, H., Hutchins, R. ve Stannard, J. (2012). Mainstream consumers driving plug-in battery-electric and plug-in hybrid electric cars: A qualitative analysis of responses and evaluations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(1), 140-153.
- Granada-Echeverri, M., Cubides, L. ve Bustamante, J. (2020). The electric vehicle routing problem with backhauls. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(1), 131-152.
- Gromicho, J., van Hoorn, J., Kok, A. ve Schutten, J. (2008). The flexibility of restricted dynamic programming for the VRP. *Beta Working Pap. Ser.*, 266(2008), 1–20.
- Gromicho, J., van Hoorn, J. J., Kok, A. L. ve Schutten, J. M. (2012). Restricted dynamic programming: a flexible framework for solving realistic VRPs. *Computers & Operations Research*, 39(5), 902–909.
- Held, M. ve Karp, R. M. 1962. A dynamic programming approach to sequencing problems, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 10(1), 196-210.
- Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S. ve Hartl, R. F. (2016). The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *European Journal of Operational Research*, 252(3), 995-1018.
- Hiermann, G., Hartl, R. F., Puchinger, J. ve Vidal, T. (2019). Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 272(1), 235-248.
- Hipolito, F., Vandet, C. ve Rich, J. (2022). Charging, steady-state soc and energy storage distributions for ev fleets. *Applied Energy*, 317, 119065.
- Hof, J., Schneider, M. ve Goeke, D. (2017). Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops. *Transportation research part B: methodological*, 97, 102-112.
- Höök, M., Li, J., Johansson, K. ve Snowden, S. (2012). Growth rates of global energy systems and future outlooks. *Natural Resources Research*, 21(1), 23-41.
- Iqbal, M., Siahaan, A. P. U., Purba, N. E. ve Purwanto, D. (2017). Prim's algorithm for optimizing fiber optic trajectory planning. *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol*, 3(6):504–509.
- Jia, Y. H., Mei, Y. ve Zhang, M. (2021). A Bilevel Ant Colony Optimization Algorithm for Capacitated Electric Vehicle Routing Problem. *IEEE Transactions on Cybernetics*.
- Jiang, L., Dhiaf, M., Dong, J., Liang, C. ve Zhao, S. (2020). A traveling salesman problem with time windows for the last mile delivery in online shopping. *International Journal of Production Research*, 58(16), 5077-5088.
- Jiang, L., Chang, H., Zhao, S., Dong, J. ve Lu, W. (2019). A travelling salesman problem with carbon emission reduction in the last mile delivery. *IEEE Access*, 7, 61620-61627.



- Jie, W., Yang, J., Zhang, M. ve Huang, Y. (2019). The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 879-904.
- Jung, H. ve Kim, J. (2022). Drone scheduling model for delivering small parcels to remote islands considering wind direction and speed. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107784.
- Kancharla, S. R. ve Ramadurai, G. (2020). Electric vehicle routing problem with non-linear charging and load-dependent discharging. *Expert Systems with Applications*, 160, 113714.
- Kant, G., Quak, H., Peeters, R. ve van Woensel, T. (2016). Urban freight transportation: challenges, failures and successes. *In Logistics and Supply Chain Innovation*, 127-139, Springer, Cham.
- Karakatič, S. (2021). Optimizing nonlinear charging times of electric vehicle routing with genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 164, 114039.
- Kechagias, E. P., Gayialis, S. P., Konstantakopoulos, G. D. ve Papadopoulos, G. A. (2020). An application of an urban freight transportation system for reduced environmental emissions. *Systems*, 8(4), 49.
- Keeble, B. R. (1988). The Brundtland report: 'Our common future'. *Medicine and war*, 4(1), 17-25.
- Keskin, M., Akhavan-Tabatabaei, R. ve Çatay, B. (2019a, December). Electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. *In 2019 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1649-1659). IEEE
- Keskin, M., Laporte, G. ve Çatay, B. (2019b). Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 107, 77-94.
- Keskin, M., Çatay, B. ve Laporte, G. (2021). A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 125, 105060.
- Keskin, M. ve Çatay, B. (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation research part C: emerging technologies*, 65, 111-127.
- Keskin, M. ve Çatay, B. (2018). A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers. *Computers & operations research*, 100, 172-188.
- Kim, G., Ong, Y. S., Heng, C. K., Tan, P. S. ve Zhang, N. A. (2015). City vehicle routing problem (city VRP): A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), 1654-1666.

- Kim, J., Park, H. ve Jeong, B. (2022). Robust optimization model for the electric vehicle routing problem under battery energy consumption uncertainty with arc segmentation. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1–12.
- Kullman, N. D., Goodson, J. C. ve Mendoza, J. E. (2021). Electric vehicle routing with public charging stations. *Transportation Science*, 55(3), 637-659.
- Koç, Ç. (2019). Analysis of vehicle emissions in location-routing problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31(1), 1–33
- Koç, Ç., Jabali, O., Mendoza, J. E. ve Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with shared charging stations. *International Transactions in Operational Research*, 26(4), 1211-1243.
- Kok, A. L., Hans, E. W. ve Schutten, J. M. (2012). Vehicle routing under time-dependent travel times: the impact of congestion avoidance. *Computers & Operations Research*, 39(5), 910–918.
- Kok, A. L., Meyer, C. M., Kopfer, H. ve Schutten, J. M. J. (2010). A dynamic programming heuristic for the vehicle routing problem with time windows and European community social legislation. *Transportation Science*, 44(4), 442–454.
- Küçükoğlu, I., Dewil, R. ve Cattrysse, D. (2021). The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107650.
- Laporte, G. ve Nobert, Y. (1987). Exact algorithms for the vehicle routing problem. *NorthHolland Mathematics Studies*, 132, 147–184. Elsevier.
- Lenstra, J. K. ve Kan, A. R. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 221-227.
- Li, Y., Zhang, P. ve Wu, Y. (2018a). Public recharging infrastructure location strategy for promoting electric vehicles: a bi-level programming approach. *Journal of cleaner production*, 172, 2720-2734.
- Li, C., Ding, T., Liu, X. ve Huang, C. (2018b). An electric vehicle routing optimization model with hybrid plug-in and wireless charging systems. *IEEE Access*, 6, 27569-27578.
- Li, Y., Lim, M. K., Tan, Y., Lee, Y. ve Tseng, M. L. (2020a). Sharing economy to improve routing for urban logistics distribution using electric vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104585.
- Li, X., Shi, X., Zhao, Y., Liang, H. ve Dong, Y. (2020b). SVND enhanced metaheuristic for plug-in hybrid electric vehicle routing problem. *Applied Sciences*, 10(2), 441.
- Li, J., Wang, F. ve He, Y. (2020c). Electric vehicle routing problem with battery swapping considering energy consumption and carbon emissions. *Sustainability*, 12(24), 10537.

- Lu, X. C., Chen, Q. B. ve Zhang, Z. J. (2014). The electric vehicle routing optimizing algorithm and the charging stations' layout analysis in Beijing. *International journal of simulation modelling*, 13(1), 116-127.
- Lu, J., Chen, Y., Hao, J. K. ve He, R. (2020). The time-dependent electric vehicle routing problem: model and solution. *Expert Systems with Applications*, 161, 113593.
- Lyons, T. ve McDonald, N. C. (2022). Last-Mile Strategies for Urban Freight Delivery: A Systematic Review. *Transportation Research Record*, 03611981221103596.
- Mao, H., Shi, J., Zhou, Y. ve Zhang, G. (2020). The electric vehicle routing problem with time windows and multiple recharging options. *IEEE Access*, 8, 114864-114875.
- Machado, C. A. S., Takiya, H., Yamamura, C. L. K., Quintanilha, J. A. ve Berssaneti, F. T. (2020). Placement of Infrastructure for Urban Electromobility: A Sustainable Approach. *Sustainability*, 12(16), 6324.
- Malandraki, C. ve Dial, R. B. (1996). A restricted dynamic programming heuristic algorithm for the time dependent traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 90(1), 45-55.
- Malik, M., Dincer, I. ve Rosen, M. A. (2016). Review on use of phase change materials in battery thermal management for electric and hybrid electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 40(8), 1011-1031.
- Martins, L. D. C., Tordecilla, R. D., Castaneda, J., Juan, A. A. ve Faulin, J. (2021). Electric vehicle routing, arc routing, and team orienteering problems in sustainable transportation. *Energies*, 14(16), 5131.
- Masmoudi, M. A., Hosny, M., Demir, E., Genikomsakis, K. N. ve Cheikhrouhou, N. (2018). The dial-a-ride problem with electric vehicles and battery swapping stations. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 118, 392-420.
- Melo, S., Baptista, P. ve Costa, Á. (2014). Comparing the use of small sized electric vehicles with diesel vans on city logistics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, 1265-1274.
- Meng, M. ve Ma, Y. (2020). Route Optimization of Electric Vehicle considering Soft Time Windows and Two Ways of Power Replenishment. *Advances in Operations Research*, 2020.
- Messaoud, E. (2021). A chance constrained programming model and an improved large neighborhood search algorithm for the electric vehicle routing problem with stochastic travel times. *Evolutionary Intelligence*, 1-16.
- Mirhedayatian, S. M. ve Yan, S. (2018). A framework to evaluate policy options for supporting electric vehicles in urban freight transport. *Transportation research part D: transport and environment*, 58, 22-38.

- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E. ve Villegas, J. G. (2017). The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B: Methodological*, 103, 87-110.
- Murakami, K. (2017). A new model and approach to electric and diesel-powered vehicle routing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 107, 23-37.
- Murakami, K. (2018). Formulation and algorithms for route planning problem of plug-in hybrid electric vehicles. *Operational Research*, 18(2), 497-519.
- Nesterova, N., Quak, H., Balm, S., Roche-Ceraso, I. ve Tretvik, T. (2013). State of the art of the electric freight vehicles implementation in city logistics. *FREVUE Project Deliverable D*, 1.
- Noel, L., de Rubens, G. Z., Sovacool, B. K. ve Kester, J. (2019). Fear and loathing of electric vehicles: The reactionary rhetoric of range anxiety. *Energy research & social science*, 48, 96-107.
- OECD (2003) Delivering the goods: 21st century challenges to urban goods transport. *Organisation for Economic Co-Operation and Development, OECD Publishing*, 2003
- Olgun, B., Koç, Ç. ve Altıparmak, F. (2021). A hyper heuristic for the green vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 153, 107010.
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B. ve Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4), 411-458.
- Pelletier, S., Jabali, O. ve Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 225–255
- Pillac, V., Gendreau, M., Gueret, C. ve Medaglia, A. L. (2013a). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1):1–11
- Pillac, V., Gueret, C. ve Medaglia, A. L. (2013b). A parallel matheuristic for the technician routing and scheduling problem. *Optimization Letters*, 7(7), 1525-1535.
- Pimenta, V., Quilliot, A., Toussaint, H. ve Vigo, D. (2017). Models and algorithms for reliability-oriented dial-a-ride with autonomous electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 601-613.
- Psaraftis, H. N., Wen, M. ve Kontovas, C. A. (2016). Dynamic vehicle routing problems: Three decades and counting. *Networks*, 67(1), 3–31.
- Punakivi, M., Yrjölä, H. ve Holmström, J. (2001). Solving the last mile issue: reception box or delivery box?. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.

- Rastani, S. ve Çatay, B. (2021). A large neighborhood search-based matheuristic for the load-dependent electric vehicle routing problem with time windows. *Annals of Operations Research*, 1-33.
- Reyes-Rubiano, L., Ferone, D., Juan, A. A. ve Faulin, J. (2019). A simheuristic for routing electric vehicles with limited driving ranges and stochastic travel times. *SORT*, 1, 3-24
- Ritzinger, U., Puchinger, J. ve Hartl, R. F. (2016). A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*, 54(1), 215–231.
- Rossi, F., Iglesias, R., Alizadeh, M. ve Pavone, M. (2019). On the interaction between Autonomous Mobility-on-Demand systems and the power network: Models and coordination algorithms. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 7(1), 384-397
- Sampaio, A., Savelsbergh, M., Veelenturf, L. ve Van Woensel, T. (2019). Crowd-based city logistics. In *Sustainable Transportation and Smart Logistics*, 381-400. Elsevier.
- Schiffer, M. ve Walther, G. (2018). An adaptive large neighborhood search for the location-routing problem with intra-route facilities. *Transportation Science*, 52(2), 331-352.
- Schneider, M., Stenger, A. ve Goeke, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation science*, 48(4), 500-520.
- Schnieder, M., Hinde, C. ve West, A. (2022). Land Efficient Mobility: Evaluation of Autonomous Last Mile Delivery Concepts in London. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10290.
- Schneider, M., Stenger, A. ve Hof, J. (2015). An adaptive VNS algorithm for vehicle routing problems with intermediate stops. *Or Spectrum*, 37(2), 353-387.
- Shao, S., Guan, W., Ran, B., He, Z. ve Bi, J. (2017). Electric vehicle routing problem with charging time and variable travel time. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- Shao, S., Guan, W. ve Bi, J. (2018). Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(3), 202-212.
- Shen, L., Shao, H., Wu, T., Lam, W. H. ve Zhu, E. C. (2019). An energy-efficient reliable path finding algorithm for stochastic road networks with electric vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 102, 450-473.
- Soysal, M. ve Bloemhof-Ruwaard, J. M. (2017). Toward sustainable logistics. In *Sustainable Logistics and Transportation*, 1–17. Springer, Cham.
- Soysal, M. ve Çimen, M. (2017). A simulation based restricted dynamic programming approach for the green time dependent vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 88:297–305.
- Soysal, M., Çimen, M. ve Belbağ, S. (2020). Pickup and delivery with electric vehicles under stochastic battery depletion. *Computers & Industrial Engineering*, 146, 106512.

- Soysal, M., Çimen, M., Sel, Ç. ve Belbağ, S. (2021). A heuristic approach for green vehicle routing. *RAIRO-Operations Research*, 55, S2543-S2560.
- Taş, D. (2021). Electric vehicle routing with flexible time windows: a column generation solution approach. *Transportation Letters*, 13(2), 97-103.
- Tunalıoğlu, R., Koç, Ç. ve Bektaş, T. (2016). A multiperiod location-routing problem arising in the collection of olive oil mill wastewater. *Journal of the Operational Research Society*, 67(7), 1012–1024.
- Wang, L., Gao, S., Wang, K., Li, T., Li, L. ve Chen, Z. (2020). Time-Dependent Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Path Flexibility. *Journal of Advanced Transportation*, 2020.
- Wang, H. ve Cheu, R. L. (2013). Operations of a taxi fleet for advance reservations using electric vehicles and charging stations. *Transportation research record*, 2352(1), 1-10.
- Wang, D. ve Zhou, H. (2021). A Two-Echelon Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Battery Swapping Stations. *Applied Sciences*, 11(22), 10779.
- Wang, Y., Zhang, D., Liu, Q., Shen, F. ve Lee, L. H. (2016). Towards enhancing the last-mile delivery: An effective crowd-tasking model with scalable solutions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 279-293.
- Wang, Z. ve Sheu, J. B. (2019). Vehicle routing problem with drones. *Transportation research part B: methodological*, 122, 350-364.
- Wilson, N. H. M. ve Colvin, N. J. (1977). Computer control of the Rochester Dial-A-Ride system. *Dept of Civil Engineering*.
- Wolff, P. (2004). EU Member State experiences with sustainable development indicators. *Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities*
- Wong, D. W., Choy, K. L., Lin, C., Lam, H. Y., Lee, C. K. H., Chow, H. K. ve Pang, G. K. (2015). An intelligent battery information management system to support information sharing and vehicle routing planning for battery distribution in Hong Kong. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 9(1), 1-27.
- Xiao, Y., Zuo, X., Kaku, I., Zhou, S. ve Pan, X. (2019). Development of energy consumption optimization model for the electric vehicle routing problem with time windows. *Journal of Cleaner Production*, 225, 647-663.
- Xu, Y., Zheng, Y. ve Yang, Y. (2021). On the movement simulations of electric vehicles: a behavioral model-based approach. *Applied Energy*, 283, 116356.
- Yaman, H., Karasan, O. E. ve Kara, B. Y. (2012). Release time scheduling and hub location for next-day delivery. *Operations research*, 60(4), 906-917.

- Yang, S., Ning, L., Tong, L. C. ve Shang, P. (2021). Optimizing electric vehicle routing problems with mixed backhauls and recharging strategies in multi-dimensional representation network. *Expert Systems with Applications*, 176, 114804.
- Yindong, S. H. E. N., Liwen, P. E. N. G. ve Jingpeng, L. I. (2021). An improved estimation of distribution algorithm for multi-compartment electric vehicle routing problem. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 32(2), 365-379.
- Yu, V.F., Redi, A. P., Hidayat, Y. A. ve Wibowo, O. J. (2017). A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, 53, 119-132.
- Yu, V.F., Jodiawan, P. ve Gunawan, A. (2021). An Adaptive Large Neighborhood Search for the green mixed fleet vehicle routing problem with realistic energy consumption and partial recharges. *Applied Soft Computing*, 105, 107251.
- Van Duin, J. R., Quak, H. ve Muñuzuri, J. (2010). New challenges for urban consolidation centres: A case study in The Hague. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6177-6188.
- Vaz, W., Nandi, A. K., Landers, R. G. ve Koylu, U. O. (2015). Electric vehicle range prediction for constant speed trip using multi-objective optimization. *Journal of Power Sources*, 275, 435-446.
- Zhang, H., Hu, Z., Xu, Z. ve Song, Y. (2015). An integrated planning framework for different types of PEV charging facilities in urban area. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5), 2273-2284.
- Zhang, S., Gajpal, Y., Appadoo, S. S. ve Abdulkader, M. M. S. (2018). Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption. *International journal of production economics*, 203, 404-413.
- Zhang, S., Chen, M. ve Zhang, W. (2019). A novel location-routing problem in electric vehicle transportation with stochastic demands. *Journal of Cleaner Production*, 221, 567-581
- Zhang, J., Wang, Z., Liu, P. ve Zhang, Z. (2020a). Energy consumption analysis and prediction of electric vehicles based on real-world driving data. *Applied Energy*, 275, 115408.
- Zhang, S., Chen, M., Zhang, W., and Zhuang, X. (2020b). Fuzzy optimization model for electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *Expert systems with applications*, 145:113123.
- Zhao, P., Liu, F., Guo, Y., Duan, X. ve Zhang, Y. (2021). Bi-Objective Optimization for Vehicle Routing Problems with a Mixed Fleet of Conventional and Electric Vehicles and Soft Time Windows. *Journal of Advanced Transportation*, 2021.
- Zhou, M., Zhao, L., Kong, N., Campy, K. S., Xu, G., Zhu, G. ve Wang, S. (2020). Understanding consumers' behavior to adopt self-service parcel services for last-mile delivery. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 52, 101911.

- Zhu, X., Yan, R., Huang, Z., Wei, W., Yang, J. ve Kudratova, S. (2020). Logistic optimization for multi depots loading capacitated electric vehicle routing problem from low carbon perspective. *IEEE Access*, 8, 31934-31947.
- Zuo, X., Xiao, Y., You, M., Kaku, I. ve Xu, Y. (2019). A new formulation of the electric vehicle routing problem with time windows considering concave nonlinear charging function. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117687.



## EKLER

### EK 1

Tablo 19: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) - Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi,  
2 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler

	Depo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Depo	0	12,8	12,8	12,8	10,4	10,8	10,8	12	11,2	13,2	9,6
1	12	0	12,8	13,6	11,6	12	13,2	9,6	12,8	13,6	11,6
2	13,6	10	0	14,4	12	10,4	11,6	12,4	12,4	12,4	14,8
3	13,6	9,6	10,8	0	10	12	9,6	11,6	13,6	10	10
4	11,2	10,8	11,6	9,2	0	10,4	10,8	10,8	12	10,4	12
5	12,8	10,4	13,6	13,2	12,4	0	12	9,2	14,4	10	9,6
6	12,4	9,6	12	10,8	14,4	13,6	0	12,4	9,2	10	10
7	12	10,8	10,8	12	11,2	10,8	10,8	0	11,6	12,4	12
8	12,8	12	10,8	9,2	12,8	12,8	13,6	11,2	0	10,8	12
9	12,4	12,4	12,8	12,4	11,2	13,6	9,6	10,4	11,2	0	11,6
10	12,4	9,2	9,6	13,2	12,4	12,4	10,4	12,8	12,4	10,8	0

Tablo 20: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) - Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi,  
4 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler

	Depo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Depo	0	12,8	12,8	13,6	10	13,2	11,6	12	12,4	10,4	12
1	12,4	0	11,6	12,4	9,6	9,6	13,6	13,6	12,4	11,6	10
2	12,4	12,8	0	12,8	10,4	12,4	12,8	14	11,6	9,6	10,8
3	13,6	11,6	10	0	10,4	11,6	10	12,8	10	11,2	10,8
4	11,2	12,4	10,8	10	0	10	12,4	11,6	9,2	12,4	10,8
5	11,2	12,4	9,2	12,8	12	0	11,2	13,2	14,8	10,4	13,6
6	10,4	13,6	10,8	12,8	13,6	12,4	0	12	10	10,4	11,6
7	11,2	10,8	11,6	8,8	11,6	11,6	12	0	9,6	11,6	11,6
8	11,6	9,2	9,6	12,4	11,6	12,8	12,8	9,6	0	14,8	14
9	14,4	11,6	12,8	10,8	12,8	14	14,4	8,8	10,4	0	12
10	11,6	12,4	12,4	10	12,8	10,4	11,6	9,6	13,6	10,8	0

Tablo 21: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) - Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi, 6 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler

	Depo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Depo	0	11,2	11,6	11,2	11,2	12	13,6	12,4	11,2	14,4	14,4
1	12,8	0	12,4	12	10,4	11,6	12,4	12	11,2	13,2	11,6
2	10,8	10	0	10,8	11,6	13,6	14	14,4	9,6	11,2	13,6
3	11,6	13,2	12,4	0	11,2	12,8	10,8	10,4	12,8	11,6	9,6
4	13,6	10	10	12	0	13,2	12	13,2	10,4	12,8	11,2
5	12	9,6	12,8	10,4	10,8	0	11,6	10,4	11,2	12,4	9,6
6	13,6	11,6	12,4	10	9,6	10,4	0	12	12	11,6	11,2
7	13,2	11,2	9,2	12	11,2	12,8	11,2	0	12	10,4	12
8	9,2	10,8	14	12,8	13,2	13,2	10,8	14	0	13,6	12,4
9	12	9,6	13,6	12,8	11,2	10	12	11,6	11,6	0	14,4
10	11,2	9,2	11,6	12,8	12	11,2	11,6	10,8	14	13,6	0

Tablo 22: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi, 8 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler

	Depo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Depo	0	10,4	12	12,4	11,2	11,6	8,8	12	10,8	12	11,2
1	13,2	0	14,4	11,6	13,2	12	12	12,4	11,2	11,6	12,4
2	13,2	12,4	0	10,4	11,2	9,2	11,6	10,8	12,4	12,8	12,4
3	12,8	11,2	9,6	0	12	11,6	14,4	13,2	10	12,4	11,2
4	13,2	12,4	12	12,4	0	11,2	12,8	10,8	11,2	12,4	10
5	13,2	12	11,6	13,6	10,8	0	10,4	10,4	13,2	12,4	9,6
6	14,4	14	12,4	10	10,4	12,4	0	12,4	13,6	10,4	8,8
7	12,4	11,6	9,6	11,6	14	12,4	11,6	0	12,8	9,6	14,4
8	12,4	12	11,2	12	9,6	10	12	13,2	0	12	12,8
9	11,2	13,2	14,8	14	13,6	12,8	13,6	11,6	10	0	10,8
10	11,2	11,6	12	12	10,8	12	10,8	14,4	12	13,2	0

Tablo 23: Noktalar Arası Hız Verisi (metre/saniye) - Bağlantı Eleme Yöntemi Dinamik Hız Problemi,  
10 Hedef Gezilmesi Sonrasında Güncellenen Veriler

	Depo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Depo	0	10,8	12	10,8	11,6	12	11,2	13,6	13,2	12	13,2
1	14	0	11,2	12	13,2	12	11,2	11,6	10,4	14	13,2
2	13,6	12,4	0	11,6	10	14	10	11,2	14,8	12,8	11,6
3	12,4	10,8	12,8	0	12	10,4	12,8	11,6	12,4	10	13,6
4	10	12	12	14	0	11,2	11,2	13,2	9,2	12,8	12,4
5	12	11,2	10	14	12,4	0	10,8	10	12,8	12,8	12,8
6	11,2	11,2	12,4	14	10,8	10	0	11,6	10,4	12	10,8
7	11,2	12	13,6	9,6	14	13,2	13,2	0	9,6	10	12,4
8	9,2	11,2	10,4	9,6	11,2	12,4	14	11,2	0	11,6	9,2
9	12,8	12,8	12,4	12	13,6	10,8	9,2	12,4	12	0	10
10	12,4	12	13,6	11,6	9,2	11,6	14,4	12	8,8	10	0