



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
İşletme Anabilim Dalı
Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BELİRSİZ BATARYA KULLANIMI
VARSAYIMIYLA BİR TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMİ**

Merve İBİŞ

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2022

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BELİRSİZ BATARYA KULLANIMI
VARSAYIMIYLA BİR TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMİ**

Merve İBİŞ

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
İşletme Anabilim Dalı
Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2022

KABUL VE ONAY

Merve İBİŞ tarafından, “**Elektrikli Araçların Belirsiz Batarya Kullanımı Varsayımıyla Bir Toplama ve Dağıtım Problemi**” başlıklı bu çalışma, 30.5.2022 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mine Ömürgönülşen (Başkan)

Doç. Dr. Mehmet Soysal (Danışman)

Doç. Dr. Çağrı Koç

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Çimen

Dr. Öğr. Üyesi Bülent Çekiç

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

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

30/05/2022

[İmza]

Merve İBİŞ

“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 **danışmanın** 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 **danışmanın** 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 tezlerle 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 **danışmanın** 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 zgn olduğunu, Doç. Dr. Mehmet Soysal danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

[İmza]

Merve İBİŞ



Canım aileme

TEŞEKKÜR

Gerek bu tez çalışmasında gerekse yaptığımız diğer akademik çalışmalarda akademik bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, tüm sorularıma sabırla cevap veren, her anlamda bana yol gösteren, en iyisini yapabilmem için beni motive eden, destekleyen çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Mehmet SOYSAL'a,

Hem akademik yaşamımda hem bu çalışma sürecinde yardımlarını, bilgi, tecrübe ve rehberliğini benden esirgemeyen, akademik hayata atılmamda büyük katkıları ve emeği olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇİMEN'e,

Beni akademik hayata hazırlayan, ilham veren ve her konuda yardımcı olan sevgili hocam Prof. Dr. Mine ÖMÜRGÖNÜLŞEN'e,

Bugünlere gelmemi sağlayan, her zaman arkamda olan, beni her zaman koşulsuz destekleyen değerli aileme, canım annem Şükran İBİŞ'e ve canım babam Dursun İBİŞ'e, ve benden bir an olsun desteğini ve yardımını esirgemeyen ikiz kardeşim Mine İBİŞ'e,

Sürecin başından sonuna kadar tüm sıkıntılarında bana hep destek olan, yüzümü güldüren, yardımlarını benden esirgemeyen, her zaman yanımda olan en yakın arkadaşım, biricik dostum İbrahim BOZYEL'e, süreç boyunca beni hep destekleyen ve motive eden Zeyneb Esra BOZYEL, Zeliha BOZYEL ve Adnan BOZYEL'e,

Zorlu geçen bu tez sürecini beraber paylaştığımız, uzakta olsa da her an yanımda olan, beni anlayan, motive eden, destekleyen, beraber çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum biricik kader arkadaşım Damla BENLİ'ye,

Zorlu geçen çalışma sürecimde her zaman yanımda olan arkadaşım Beyza KÜÇÜK-TOP'a

Çalışmanı olduğum Başkent Üniversitesi'ndeki değerli hocalarıma, çalışma arkadaşlarıma ve adını sayamadığım tüm arkadaşlarıma teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

ÖZET

İBİŞ, Merve. *Elektrikli Araçların Belirsiz Batarya Kullanımı Varsayımıyla Bir Toplama ve Dağıtım Problemi* Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2022

Lojistik faaliyetler tedarik zincirinde ürünlerin zamanında teslimi ve üretim/hizmet süreçlerinin başarılı bir şekilde uygulanması açısından önemli bir yere sahiptir. Kent merkezlerinde gerçekleştirilen yük taşımacılığı faaliyetlerinde fosil yakıtlı araçlar yerine elektrikli araçların kullanılması lojistik operasyonların karbon ayak izini azaltmak için iyi bir alternatiftir. Fakat, elektrikli araçlar için batarya değişim/şarj istasyonları konusunda önemli altyapı eksiklikleri mevcuttur. Bu durum, elektrikli araçların seyahat rotalarının optimizasyonunu daha önemli ve karmaşık hale getirmektedir. Öte yandan elektrikli araçların lojistik faaliyetlerde kullanılması bazı önemli riskleri de beraberinde getirmektedir. Özellikle şehir içi taşımacılık faaliyetlerinde araç hızı günün farklı saatlerindeki trafik yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Araç hızlarındaki belirsizlik durumu aynı zamanda enerji tüketimindeki belirsizliği de arttırmaktadır. Bu yüzden lojistik planlamalarda hız ve enerji tüketimindeki belirsizlik durumunun ele alınması önemlidir. Ayrıca, araçların planlanan rotayı tamamlamadan bataryalarının tükenmesi ihtimali sürücülerin menzil kaygısını arttırmakta ve firmalar için ek ceza maliyetlerine sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada, araç rotalama problemlerinin bir varyantı olan çoktan-çoğa toplama ve dağıtım problemi ele alınmıştır. Literatürde bu problem tipini ele alan diğer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada dağıtım planlaması yapılan filoda elektrikli araçlar bulunmaktadır ve araçların hareket ettiği noktalar arasında tüketilecek enerji miktarları belirsizdir. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada, elektrikli araçların kullanıldığı çoktan çoğa toplama ve dağıtım problemi için bir Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama modeli ve sezgisel bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir.

Yapılan sayısal analizler enerji tüketimini detaylı tahmin etmenin ve batarya tüketimindeki belirsizliği ele almanın önemini vurgulamaktadır. Sayısal analizler, enerji tüketimi belirsizliğinin dağıtım planlarını ve araçların rota boyunca harcadığı enerji tüketimi miktarını etkilediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca enerji tüketimindeki belir-

sizliğin dikkate alınması, sürücülerin menzil kaygısını azaltarak aracın yolda kalması ve ürünlerin zamanında teslim edilememesi gibi beklenmeyen maliyetlerin oluşmasının önüne geçmektedir.

Anahtar Sözcükler

Toplama ve dağıtım problemi, Belirsiz enerji tüketimi, Elektrikli araçlar, Şehir içi yük taşımacılığı, Sezgisel yöntem, Kuadratik Şans Kısıtlı Karma-Tamsayı Programlama



ABSTRACT

İBİŞ, Merve. *A Pickup and Delivery Problem Under the Assumption of Stochastic Battery Depletion of Electric Vehicles* Master of Science Thesis, Ankara, 2022

Logistics activities play a critical role in the supply chain, in terms of on-time product delivery and successful implementation of production/service processes. Electric vehicles, rather than fossil fuel vehicles, can be used in freight transportation activities in urban areas to lower the carbon footprint of logistic operations. However, there are considerable infrastructure gaps in electric vehicle battery swap/charging facilities. As a result, optimizing electric vehicle travel routes has become increasingly complicated and essential. There are some concerns regarding the use of electric vehicles in transport activities. Vehicle speed might fluctuate based on traffic density at different times of the day, particularly in urban transportation operations. Uncertainty in vehicle speed can have an impact on energy consumption. Therefore, it is significant to address speed and energy consumption uncertainty while planning logistics operations. Furthermore, the risk of vehicles running out of batteries before completing the planned route elevates drivers' range anxiety and may result in increased penalty costs for businesses.

In this study, a many-to-many pickup and delivery problem, which is a variant of vehicle routing problem, is addressed. Unlike previous attempts in the literature on the same type of problem, here, electric vehicles are employed for delivery operations and the energy consumption of vehicles is not known in advance. From this point of view, in this study, a Quadratic Chance Constraint Mixed-Integer Programming model and a heuristic solution approach are proposed for the many-to-many pickup and delivery problem using electric vehicles.

The numerical analyses highlight the importance of estimating energy consumption in detail and addressing the uncertainty in energy consumption. According to the findings, it has been revealed that the uncertainty of energy consumption affects the distribution plans and the amount of energy consumed by the vehicles along the route.

Considering the uncertainty of energy consumption reduces drivers' range anxiety and avoids unexpected costs such as vehicle downtime and inability to deliver products on time.

Keywords

Pickup and delivery problem, Uncertain energy consumption, Electric vehicles, Urban freight transportation, Heuristic method, Quadratic Chance Constrained Mixed-Integer Programming



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI.....	ii
ETİK BEYAN.....	iii
ADAMA.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
GİRİŞ.....	1
1. BÖLÜM: ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE YÜK TAŞIMACILIĞI.....	4
1.1 YÜK TAŞIMACILIĞI.....	4
1.2 KARA YOLU YÜK TAŞIMACILIĞI.....	6
1.3 KARA YOLU YÜK TAŞIMACILIĞINDA ELEKTRİKLİ ARAÇLAR.....	7

1.4	TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMLERİ.....	9
1.4.1	Bire-Bir (One-to-One) Toplama Ve Dağıtım Problemleri . . .	10
1.4.2	Birden-Çoğa-Çoktan-Bire (One-to-Many-to-One) Toplama Ve Dağıtım Problemleri	11
1.4.3	Çoktan-Çoğa (Many-to-Many) Topmalama Ve Dağıtım Problemleri	11
2.	BÖLÜM: LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	14
3.	BÖLÜM: PROBLEM TANIMI, MATEMATİKSEL MODEL VE SEZGİSEL YAKLAŞIM.....	22
3.1	PROBLEM TANIMI.....	22
3.2	ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ TAHMİNİ VE ELE ALINAN PROBLEM İÇİN SUNULAN MATEMATİKSEL MODEL.....	23
3.2.1	Elektrikli Araçlar için Enerji Tahmininin Detaylı Hesaplanması	25
3.2.1.1	Riemann Toplamı Yöntemi Kullanılarak Beklenen Enerji Tüketiminin Hesaplanması	26
3.2.1.2	Yaklaşık Enerji Tüketimi Fonksiyonu Kullanılarak Varyans Değerlerinin Hesaplanması	28
3.2.2	Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama Modeli	29
3.3	ELE ALINAN PROBLEM İÇİN SUNULAN SEZGİSEL ÇÖZÜM ALGORİTMASI.....	33
4.	BÖLÜM: SAYISAL ANALİZLER.....	40
4.1	ÖRNEK OLAY İNCELEMESİ.....	40
4.2	ENERJİ TÜKETİMİNİ DETAYLI TAHMİN ETMENİN FAYDALARI.....	42
4.3	HİZMET SEVİYESİ VE VARYASYON KATSAYISININ DAĞITIM PLANLARINA ETKİSİ.....	44

4.4 SEZGİSEL ÇÖZÜM YAKLAŞIMININ PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	45
4.5 BÜYÜK VERİ SETLERİ İLE ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMLERİ.....	47
SONUÇ.....	50
KAYNAKÇA.....	53
EK 1: ÖRNEK OLAYDA KULLANILAN PARAMETRELER.....	60
EK 2: TOPLAMA NOKTASI/NOKTALARINA KARŞILIK GELEN DAĞITIM NOKTALARINA TESLİM EDİLMESİ GEREKEN YÜK MİKTARLARI.....	61
EK 3: ENERJİ TÜKETİMİNİ HESAPLAMAK İÇİN KULLANILAN PARAMETRE DEĞERLERİ VE GÖSTERİMLERİ.....	62
EK 4: ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN DÜĞÜMLER ARASINDAKİ MESAFELER.....	63
EK 5: ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN DÜĞÜMLER ARASINDAKİ SEYAHAT SÜRELERİ.....	64
EK 6: ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN DÜĞÜMLER ARASINDAKİ MİNİMUM ARAÇ HIZLARI.....	65
EK 7: ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN DÜĞÜMLER ARASINDAKİ MAKSİMUM ARAÇ HIZLARI.....	66
EK 8: ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN DÜĞÜMLER ARASINDAKİ ARAÇ HIZI ORTALAMALARI.....	67
EK 9: BÜYÜK VERİ ANALİZLERİ İÇİN SUNULAN ÖRNEK OLAYLARDA TOPLAMA NOKTASI/NOKTALARINA KARŞILIK GELEN DAĞITIM NOKTALARINA TESLİM EDİLMESİ GEREKEN YÜK MİKTARLARI.....	68
EK 10: ORJİNALLİK RAPORU.....	72
EK 11: ETİK KURUL MUAFİYET FORMU.....	73

KISALTMALAR DİZİNİ

EA	Elektrikli Araç
TDP	Toplama ve Dağıtım Problemi
PDF	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
ARP	Araç Rotalama Problemi
EARP	Elektrikli Araç Rotalama Problemi
LTL	Parsiyel Araç Taşımacılığı
FTL	Tam Yüklü Araç Taşımacılığı
AGF	Anahtar Performans Göstergesi

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1 Belirsizliğe dayalı elektrikli araç rotalama problemlerini ele alan çalışmalar	21
Tablo 2 Matematiksel modelde kullanılan parametreler ve karar değişkenleri	25
Tablo 3 Enerji tüketimi fonksiyonunda kullanılan parametre gösterimleri . .	26
Tablo 4 Örnek olayın yaklaşık optimal sonuçları	42
Tablo 5 Farklı yaklaşımlar sonucu elde edilen dağıtım planları	43
Tablo 6 Tahmini ve gerçek minimum gereken enerji miktarı hesaplamaları (kWh)	43
Tablo 7 Sezgisel yaklaşım ile elde edilen dağıtım planı ve enerji tüketimi değerlerinin (kWh) karşılaştırması	46
Tablo 8 Örnek olay 1'e ait dağıtım planı ve enerji tüketimi	47
Tablo 9 Örnek olay 2'ye ait dağıtım planı ve enerji tüketimi	48
Tablo 10 Örnek olay 3'e ait dağıtım planı ve enerji tüketimi	48
Tablo 11 Örnek olay 4'e ait dağıtım planı ve enerji tüketimi	49
Tablo 12 Örnek olayda kullanılan parametreler	60
Tablo 13 Toplama noktası/noktalarına karşılık gelen dağıtım noktalarına teslim edilmesi gereken yük miktarları	61
Tablo 14 Enerji tüketimini hesaplamak için kullanılan parametre değerleri ve gösterimleri	62

Tablo 15	Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki mesafeler (m)	63
Tablo 16	Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki seyahat süreleri (dakika)	64
Tablo 17	Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki minimum araç hızları (m/s)	65
Tablo 18	Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki maksimum araç hızları (m/s)	66
Tablo 19	Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki araç hızı ortalamaları (m/s); varyasyon katsayısı: 0.2	67
Tablo 20	Büyük veri analizleri için sunulan örnek olaylarda toplama noktası/noktalarına karşılık gelen dağıtım noktalarına teslim edilmesi gereken yük miktarları	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1	Bire-bir TDP gösterimi (Cordeau ve diğ., 2008)	10
Şekil 2	Birden-çoğa-çoktan-bire TDP gösterimi (Cordeau ve diğ., 2008) .	11
Şekil 3	Çoktan-çoğa TDP gösterimi (Cordeau ve diğ., 2008)	12
Şekil 4	Ele alınan çoktan-çoğa TDP için örnek araç rotaları	12
Şekil 5	Riemann Toplamı yönteminin gösterimi	27
Şekil 6	Örnek olayda kullanılan lojistik ağ gösterimi	41
Şekil 7	Farklı hizmet seviyeleri ve varyasyon katsayısı kombinasyonla- rıyla elde edilen sonuçlar	45

GİRİŞ

Son dönemlerde trafikteki araç sayısında görülen artış, trafik yoğunluğuna ve araçlardan yayılan egzoz dumanı ve gürültü sebebiyle çevre kirliliğine yol açmaktadır. Araçların sebep olduğu bu kirlilik, yalnızca çevreyi değil insan sağlığını da etkilemektedir. Ek olarak trafikteki yoğunluk metropol ve şehirlerdeki yaşantıyı da zorlaştırmaktadır. Son dönemlerde küresel ısınma ve çevre kirliliğinin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla “temiz (yeşil)” faaliyetlere yönelik eğilimler artış göstermektedir. Avrupa Komisyonu (European Commission) tarafından, yayınlanan bir beyaz bültende kentsel ulaşımın, ulaşımdan kaynaklanan CO2 emisyonlarının yaklaşık dörtte birini oluşturduğundan ve trafik kazalarının %69’unun şehirlerde meydana geldiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca, bu belgede Avrupa’da 2050 yılına kadar ulaşımdaki karbon emisyonlarının %60 oranında azaltılmasını içeren bazı hedefler de bulunmaktadır (Commission, 2011).

Kara yolu yük taşımacılığı dünya ekonomisinde oldukça önemli bir yere sahiptir, fakat çevreye yönelik olumsuz etkileri de göz ardı edilemez bir sorundur. Elektrik, hidrojen ve hibrit teknolojilerin kullanımı sadece hava emisyonlarını değil, aynı zamanda gürültüyü de azaltacaktır. Bu yüzden zararlı ve kirli gaz salınımı yapmayan ve fosil yakıtlı araçlara göre çok daha sessiz çalışan elektrikli araçların günlük yaşamda ve lojistik faaliyetlerde kullanımı giderek artmaktadır.

Yük taşımacılığının sebep olduğu çevresel ve sosyal etkiler, hükümetler, piyasalar ve özel kuruluşlar tarafından tanınmaya başlamıştır (Kazanç ve diğ., 2021). Emisyon ile ilgili sıkı düzenlemeler, çevresel kaygılar ve artan yakıt fiyatları nedeniyle lojistik firmaları, fosil yakıtlı araçlar yerine elektrikli araçları (EA’ları) benimsemeye başlamışlardır. EA’lar, firmalara karbondioksit emisyonlarını azaltma, enerji tasarrufu sağlama ve düşük bakım maliyetleri gibi çeşitli avantajlar sağlamaktadır (Abdulaal ve diğ., 2016). Aynı zamanda, EA’lar taşımacılığın çevre üzerindeki olumsuz etkisini azaltmada önemli gelişmelerden biri olarak görülmektedir. Ancak, bataryaların ağır, büyük ve maliyetli olmasından dolayı batarya kapasiteleri sınırlıdır ve bu durum sürüş mesafesinin de sınırlı olmasına sebep olmaktadır (Basso ve diğ., 2021). Tüm bunların yanı sıra, EA’lar fosil yakıtlı muadillerine kıyasla sınırlı depolama kapasite-

sine sahiptir ve yeterli sayıda batarya değişim/şarj istasyonları bulunmamaktadır. Bu durum EA'ların seyahat rotalarının optimizasyonunu daha önemli ve karmaşık hale getirmektedir.

EA'lar, fosil yakıtlı araçlardan daha az hava kirliliği ve daha az gürültüye neden olmaktadır. Bu sebeple EA'lar daha sürdürülebilir bir ürün dağıtım aracı olarak kabul edilmektedir. Bu araçların tüm çevresel faydalarına rağmen, ürünlerin dağıtım planlarında kullanılmasında bazı önemli sorunlar ortaya çıkabilmektedir (Pelletier ve diğ., 2019). Bir EA'nın tüketeyeği enerji miktarı yol yüzeyinin fiziksel şekli, araç ağırlığı ve araç yükü gibi birçok farklı parametreye göre değişkenlik gösterebilmektedir. Aynı zamanda, günün farklı saatlerinde trafik yoğunluğundan etkilenen hız ve sürücü davranıőı gibi belirsiz faktörler de bulunmaktadır. Bu nedenle, beklenen (ortalama) enerji tüketimini tahmin etmenin yanında, enerji tüketimi varyansını da tahmin etmek gereklidir (Barth & Boriboonsomsin, 2009). Lojistik firmalarındaki karar vericiler için, gerçek hayattaki kentsel problemlerde belirsizliği ele alan ve yol ile trafik koşullarını hesaba katan verimli bir sürüş rotası planlamak önemlidir.

Kentsel lojistik operasyonlarında EA'ların benimsenmesinin önündeki temel engellerden biri menzil kaygısıdır. Menzil kaygısı, bataryanın tükenmesi durumunda sürücünün yolda kalması ve planlanan yolculuğun tamamlanamaması anlamına gelmektedir (Eisel ve diğ., 2016). EA'ları kentsel uygulamalarda kullanmanın önündeki diğer bir engel ise, uzun şarj süreleridir. Bu istenmeyen bekleme süresinden kaçınmak için bir başka yakıt ikmali altyapısı tasarımı olan hızlı pil değiştirme istasyonları kullanılabilir (Jing ve diğ., 2016). Bu istasyonlarda, bir araçtaki bitmiş bir batarya şarjlı bir batarya ile deęiőtirilir ve bu yöntem diğer yakıt ikmali yöntemlerine göre daha hızlıdır. Bu çalışmada, bahsedilen avantajlardan dolayı batarya değişim istasyonları bir yakıt ikmali yöntemi olarak ele alınmıştır.

Toplama ve dağıtım problemleri, malların veya yolcuların çıkış noktalarından farklı varış noktalarına taşınması durumunu içeren önemli bir araç rotalama problemi (ARP) türüdür. Kentsel lojistik operasyonlarında karar vericiler, malların toplanması ve/veya dağıtımı ile ilgili araç rotalama problemleri ile karşı karşıya kalmaktadır. Klasik ARP, bir araç filosunu müşteriilere gerekli arz ve talep kısıtları altında hizmet verecek şekilde yönlendirmeyi ve aynı zamanda operasyonel maliyetleri veya mesafeyi en aza

indirmeyi amaçlar (Koç & Karaoglan, 2016). Toplama (pickup) ve dağıtım (delivery) problemleri (TDP'ler), konum çiftleri arasındaki bir dizi toplama ve dağıtım taleplerinin karşılanması amacıyla araçların rotalarının ortak bir depodan başlayıp bitecek şekilde planlandığı bir ARP sınıfını oluşturmaktadır (Berbeglia ve diğ., 2007; Cordeau ve diğ., 2008).

Bu noktadan hareketle bu tez çalışması, EA'ların kullanıldığı TDP için bir Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam sayılı Programlama (Quadratic Chance Constraint Mixed-Integer Programming) modeli ve sezgisel çözüm yaklaşımı önermeyi amaçlamaktadır. Önerilen nicel araçlar, enerji tüketimini daha iyi tahmin etmeye izin veren kapsamlı enerji tahmini yaklaşımlarını içermektedir. Sayısal analizler, önerilen model ve çözüm yaklaşımı ile elde edilebilecek faydaları göstermektedir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: 1. BÖLÜM: . Bölümde, yük taşımacılığının tanımı yapılmış, kara yolu yük taşımacılığı kavramı ayrıntılı olarak açıklanmış, kara yolu yük taşımacılığında elektrikli araçların öneminden bahsedilmiş ve ele alınan toplama ve dağıtım problemi detaylıca açıklanmıştır. Bölüm 2. BÖLÜM: 'de, akademik katkıyı göstermek amacıyla yapılan konuyla ilgili detaylı literatür araştırmasına yer verilmiştir. Bölüm 3. BÖLÜM: 'te, çalışılan problem ve önerilen karar destek modeli anlatılmıştır. Bölüm 4. BÖLÜM: 'te, sayısal analizlerin sonuçları sunulmuştur ve son bölümde ise, çalışmanın sonuçları ve gelecekteki araştırma yönleri ortaya koyulmuştur.

1. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE YÜK TAŞIMACILIĞI

Bu bölümde yük taşımacılığının tanımı yapılmış ve çeşitleri incelenmiştir. Ardından bu çalışmada ele alınan taşıma tipi olarak kara yolu yük taşımacılığının tanımı yapılmıştır ve kara yolu yük taşımacılığında elektrikli araçlar konusu ele alınmıştır. Bölümün devamında ise toplama ve dağıtım problemleri ve varyantları ile ilgili bilgi verilmiştir.

1.1 YÜK TAŞIMACILIĞI

Tedarik zinciri, ürünlerin/hizmetlerin tedarikçiden müşteriye ulaştırılması için gereken tüm faaliyetleri kapsayan bir sistemdir. Taleplerin yerine getirilmesinde üreticiler, tedarikçiler, nakliyeciler, depolar, perakendeciler ve müşterilerin kendisi yer almaktadır (Chopra & Meindl, 2007).

Lojistik, kurumlardaki malzeme ve bilgi planlaması ve kontrolünün sağlanması ile ilgili tedarik zincirinin önemli bir bileşenidir. Genel anlamda maliyetleri/karşı da göz önünde bulundurarak doğru ürünleri, doğru zamanda, doğru yere ulaştırmak lojistik faaliyetlerin temel amacını oluşturmaktadır. Mamul/Ürün üreten ve dağıtan firmalar lojistik problemlerle karşı karşıya kalabilmektedir. Bu firmalar için, ham maddelerin, yarı mamul ve mamul malların ne zaman üretilmesi, ne şekilde ve yine ne zaman taşınması ve depolanması gerektiğine karar vermek kritik noktalardır (Ghiani ve diğ., 2004, 2013).

Enerji maliyetlerinin giderek artması ile birlikte lojistik faaliyetler, firmalarda önemli bir maliyet kalemi olarak görülmeye başlanmıştır. Bu faaliyetler, küreselleşen endüstriden temelde iki şekilde etkilenmiştir. Birincisi, uluslararası rekabetin artması, kuruluşların kendi kurumlarını ve ürünlerini farklılaştırmanın yollarını aramasına sebep olmuştur. İkincisi, artan denizaşırı ticaret miktarı ile birlikte, tedarik zinciri daha uzun, daha maliyetli ve daha karmaşık hale gelmiştir. Küresel fırsatlardan yararlanabilmek için lojistik faaliyetlerin iyi yönetilmesi gerekmektedir.

Taşımacılık, ürünlerin bir tedarik zincirinin farklı aşamaları arasındaki hareketleri

olarak ifade edilebilmektedir ve taşımacılık faaliyetleri hem pazara yanıt verme hızını hem de verimliliği etkilemektedir. Ulaşımın hızlı ve zamanında gerçekleştirilmesi, bir tedarik zincirinin daha duyarlı olmasını sağlamaktadır, ancak aynı zamanda tedarik zinciri verimliliğini de olumsuz etkileyebilmektedir. Örneğin, hava yolu yük taşımacılığını kullanmak firmaların pazara yanıt süresini olumlu yönde etkilerken ürünlerin ya da ham maddelerin gemi ya da demir yoluyla taşınmasından daha maliyetli olduğu için tedarik zinciri verimliliğini olumsuz etkilemektedir (Chopra & Meindl, 2007).

Yük taşımacılığı faaliyetleri, mesafeler açısından incelendiğinde uzun mesafe yük taşımacılığı ve kısa mesafe yük taşımacılığı olarak ikiye ayrılmaktadır. Uzun mesafe taşımacılık faaliyetleri, esas olarak malların şehirler arasında nispeten uzun mesafe-deki hareketiyle ilgilenen taşımacılık operasyonlarıdır. Kısa mesafe taşımacılık faaliyetleri ise, genellikle şehir içi mesafeler ve belirlenen yarıçap içinde (genellikle başlangıç noktasından 250 km) kalan alanda daha küçük araçların kullanıldığı taşımacılık işlemlerini içermektedir.

Yük taşımacılığı, beş temel taşıma modunda faaliyet gösteren araçlar ve taşıyıcılardan oluşmaktadır. Bir mod, temel bir taşıma yöntemini veya biçimini tanımlamaktadır. Demiryolu taşımacılığı, özellikle uzun mesafeli taşımacılık faaliyetleri için en ucuz taşımacılık modlarından biridir, fakat diğer modlara göre daha yavaştır. Kara yolu yük taşımacılığı çoğunlukla yarı mamul ve bitmiş ürünlerin taşınmasında kullanılır. Demiryollarına kıyasla, motorlu taşıtlar daha az sabit maliyete sahiptir. Denizyolu yük taşımacılığı ise son derece büyük miktardaki ürünlerin uzun mesafelerde taşınabilmesine olanak sağlamaktadır. Boru hattı yük taşımacılığı temel yapısı, diğer herhangi bir taşıma şekline kıyasla oldukça farklıdır. Boru hatları genellikle sıvı ya da gaz halindeki ürünlerin borular aracılığıyla bir yerden bir yere taşınması işlemlerini kapsar. Hava yolu yük taşımacılığında ise bir kıtadan diğer kıtaya, diğer modlarda günler sürebilecek bir sevkiyat sadece birkaç saatte gerçekleştirilebilir.

Taşımacılık faaliyetlerinde gönderici temelde iki parametreyi göz önünde bulundurmaktadır: fiyat (veya maliyet) ve taşıma süresi. Bir taşıma hizmetinin maliyeti, işletim terminalleri ve araçlarla ilgili tüm maliyetleri kapsamaktadır. Taşıma hizmetinin fiyatı, basitçe taşıyıcının göndericiye uyguladığı ücrettir. Taşıma süresi ise, bir gönderinin çıkış noktası ile varış noktası arasında hareket etmesi için geçen süredir. Bu

süre, hava ve trafik koşullarından etkilenebilen bir değişkendir.

Kentsel alanlarda dağıtım operasyonlarının planlanması, şehirdeki trafik yoğunluğundan ve dolayısıyla seyahat sürelerinden etkilenebilir. Lojistik sektöründeki karar vericiler filosunda mevcut her araca birden fazla sipariş atamak, her araç için bir teslimat planı yapmak ve kabul edilebilir bir maliyetle müşteri taleplerini karşılamak gibi konular arasında bir denge sağlamak zorundadır. Bu kararlar verilirken aracın özellikleri, taşınacak yüklerin ağırlıkları, sürücülerin çalışma saatleri, şehir içerisindeki seyahat süreleri ve farklı araç hızları gibi dikkate alınması gereken birçok kısıt bulunmaktadır. Son zamanlarda çevrimiçi alışverişin artması sebebiyle yük paketlerinin boyutları küçülmüş ve sevkiyat sıklıkları artmıştır. Bu durum şehir içi taşımacılık faaliyetlerinin daha karmaşık bir yapıya sahip olmasına sebep olmaktadır (Kant ve diğ., 2016). Tüm bunların yanında trafik sıkışıklığı durumunun, ürünlerin zamanında teslim edilmesini sektöre uğratması ve araçların tüketeceği enerji miktarını etkilemesi şehir içi taşımacılık faaliyetlerindeki belirsizliği de arttırmaktadır. Bu nedenle firmalar kendileri için en uygun teslimat güzergahlarını planlamak amacıyla matematiksel modeller ve ARP yazılımları benimsemeye başlamışlardır (Gayialis ve diğ., 2019).

1.2 KARA YOLU YÜK TAŞIMACILIĞI

“Ulaşım ağı içerisinde bir motorlu araç filosu tarafından taşınan malların başlangıç ve varış noktaları arasındaki hareketlerini içeren faaliyetler” olarak tanımlanan kara yolu yük taşımacılığı, en sık kullanılan taşımacılık modudur (Zak ve diğ., 2011). Hem kısa mesafeli hem de uzun mesafeli taşımacılık operasyonları için elverişlidir. Kısa mesafeli taşımacılık daha çok kentsel alanlarda gerçekleştirilmektedir. Değişken varış noktaları, daha küçük boyutlu yük miktarı, dar sokaklar, trafik yoğunluğu, çoklu duraklar gibi sebeplerden dolayı kısa mesafeli taşımacılık faaliyetlerinde küçük ve orta büyüklükteki kara yolu taşıtları (araba, kamyon vb.) tercih edilmektedir. Uzun mesafeli kara yolu taşımacılığı ise hemen hemen tüm lokasyonlar için kullanıma hazır altyapıların (ör. yollar, depolar) olması, farklı lojistik operasyonlara hizmet edebilecek farklı filolar oluşturabilme yeteneği gibi sebeplerden dolayı birçok lojistik sistemde sıklıkla kullanılmaktadır.

Araçların kısmen yüklü (less than truck-load, LTL) veya tam yüklü (full truck-load, FTL) olarak kullanılabilmesi, karar vericilerin uzun mesafelerde kara yolu taşımacılığını tercih etmelerinin nedenlerinden birisidir. LTL taşımacılığında, tek bir teslimat bir kamyonun tam kapasitesini doldurmaz, bu nedenle bir kamyon aynı anda birden fazla konumdan toplanan yükleri taşıyabilir (Cruz ve diğ., 2020). Böylece, daha küçük yükler birleştirilerek daha hızlı ve daha az maliyetli ulaşım sağlanabilir. FTL taşımacılığında, tek bir teslimat bir kamyonun tüm yük kapasitesini kaplar, bu nedenle bir kamyon bir seferde tek bir siparişi taşıyabilir (Skobelev & Lada, 2016). Bu durumda tek bir talebe/müşteriye tahsis edilen araçlar, hizmetlerin her müşteriye özel olarak gerçekleştirilmesini sağlar, müşteriler için esnekliği artırır ve daha yüksek bir katma değer yaratır. Hem LTL hem de FTL seçenekleri, belirli koşullar altında müşteri memnuniyetini artırabilir.

1.3 KARA YOLU YÜK TAŞIMACILIĞINDA ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Avrupa Komisyonu tarafından taşımacılık üzerine hazırlanan rapora göre petrol, gelecek yıllarda giderek daha fazla kıt bir kaynak haline gelecektir (Commission, 2011). Ayrıca ilgili raporda, ulaşım da petrole bağımlılığın oranının hala %80'nin üzerinde olduğu belirtilmiştir.

Kara yolu yük taşımacılığı ekonomik kalkınmada önemli bir yere sahiptir, ancak aynı zamanda çevreye ve insan sağlığına da olumsuz etkileri bulunmaktadır (Demir ve diğ., 2014). Ulaşım faaliyetleri fosil yakıtların büyük bir kısmının tüketilmesine sebep olmaktadır. Bu durum, doğrudan iklim değişikliği ve küresel ısınmanın önemli bir nedeni olan, insan sağlığına zarar veren ve hava kirliliğini arttıran sera gazı üretimine sebep olmaktadır (Qin ve diğ., 2021). Hükümetler, sera gazı emisyonlarını ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak için çevresel önlemler ve düzenlemeler getirmektedirler (Keskin & Çatay, 2018).

Elektrikli araçların fosil yakıtlı motorlara kıyasla hem ulaşım maliyetlerini düşürme hem de kirlilik etkilerini azaltma gibi olumlu etkileri bulunmaktadır (Küçüköğlü ve diğ., 2021). Uluslararası Enerji Derneği (International Energy Association)'nin elektrikli araçlar ile ilgili hazırladığı rapora göre 2020 yılının sonunda dünyada 10 milyon

elektrikli araç bulunmaktaydı. Araç satışlarındaki pandemi kaynaklı dünya çapındaki düşüşe (yaklaşık %16) rağmen, elektrikli araçların satışının 2020 yılında %41 oranında arttığı görülmüştür. Tüm bu gelişmeler sonucu Avrupa dünyanın en büyük elektrikli araç pazarı olarak Çin Halk Cumhuriyeti'ni geride bırakmıştır. Elektrikli otobüs ve kamyon satışları da büyük pazarlarda genişleyerek sırasıyla 600.000 ve 31.000 adet küresel stoka ulaşmıştır (Bibra ve diğ., 2021). Tüm bunların yanında akademik çalışmalara bakıldığında kara yolu yük taşımacılığı literatüründe karbondioksit emisyonlarına lojistik faaliyetlerin katkısını azaltmak amacıyla yapılan çalışmaların sayısı artmış ve literatürde konunun çevresel yönlerine giderek daha fazla odaklanıldığı görülmüştür (Bektaş ve diğ., 2019; Budak & Sarvari, 2021; Kellner, 2022; Meyer, 2020; Wei & Liu, 2020).

Tüm bu gelişmelerin yanında elektrikli araçların taşımacılık faaliyetlerinde kullanılması durumunda karşılaşılabilecek birçok problem bulunmaktadır. Bataryalardaki yüksek maliyet nedeniyle piyasaya sürülen veya önümüzdeki birkaç yıl içinde piyasaya sürülmesi planlanan elektrikli araçların birçoğu sınırlı bir batarya kapasitesine sahiptir. Sınırlı batarya kapasitesi nedeniyle, elektrikli araçların tam dolu bir batarya ile gidebileceği menzil uzunluğu 160-240 km'dir, bu da fosil yakıtlı araçların menziline (480-650 km) çok daha kısadır (Young ve diğ., 2013). Geleneksel motorlu araçlara benzer bir sürüş menzili elde etmek için elektrikli araçların batarya değişim istasyonlarını çok daha sık ziyaret etmesi gerekir ancak hem Türkiye'de hem de dünyada elektrikli araçlar için batarya değişim/şarj istasyonları konusunda altyapı eksiklikleri mevcuttur. Bataryası bitmiş bir elektrikli aracın tekrar kullanılabilir hale getirilebilmesi için iki seçenek vardır: (i) batarya değişim istasyonunda boş bataryayı dolu batarya ile değiştirmek ve (ii) boş bataryayı şarj etmek. İlk seçenek geleneksel motorlu araçların yakıt almasına benzer bir sürede gerçekleştirilebilir. Öte yandan elektrikli aracı güç kaynağına bağlayarak pillerini şarj etme süresi bataryanın ve aracın türüne veya işlevine göre değişkenlik gösterebilir.

Kısa menzil uzunluğu, şarj istasyonlarının azlığı ve uzun şarj süreleri ile birlikte lojistik firmalarındaki karar vericiler taşımacılık faaliyetlerinde elektrikli araç kullanımından kaçınma eğiliminde olabilirler. Fakat fosil yakıtlı araçların çevreye olumsuz etkileri ve hükümetlerin çevre kirliliği üzerine çalışmaları da göz ardı edilemez bir gerçektir. Tüm bu sebeplerden akademik araştırmacılar ve mühendisler elektrikli

araçların sınırlı batarya kapasitesinin kullanımını optimize ederek sürüş verimliliğini artırmak için çalışmalar yapmaktadırlar. Bu konuda en önemli araştırma konularından birisi de rota planlaması yoluyla enerji tüketimini optimize etmektir. Geleneksel rotalama algoritmaları fosil yakıtlı araçlar için geliştirildiğinden elektrikli araçlar için yeterli olmayabilir. Bu sebeple elektrikli araçlar ARP literatüründe oldukça önemli bir yere sahiptir.

1.4 TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMLERİ

Dantzig ve Ramser (1959) ilk kez Kamyon Sevkiyat Problemini (Truck dispatching Problem) çalıştığından bu yana akademisyenler ve araştırmacılar araçların rotalarının ve dağıtımların planlanması üzerinde çalışmaktadırlar (Konstantakopoulos ve diğ., 2020). Bir dizi müşterinin taleplerini karşılamak üzere bir araç/kamyon filosu için en düşük maliyetli rotaların belirlenmesi ile ilgili çalışmalar literatürde genel adıyla "Araç Rotalama Problemleri" olarak bilinmektedir. ARP'lerde genellikle bir depo araçlar için başlama ve bitiş noktası görevi görmektedir ve düğümler genellikle araçlar tarafından bir kez ziyaret edilmektedir. Standart ARP'deki geleneksel amaç, tüm araçların kat ettiği toplam mesafeyi en aza indirmektir. Bu amaç, yakıt tüketimi ile ilgili terimlerin dahil edilmesiyle zenginleştirilebilir (Demir ve diğ., 2014).

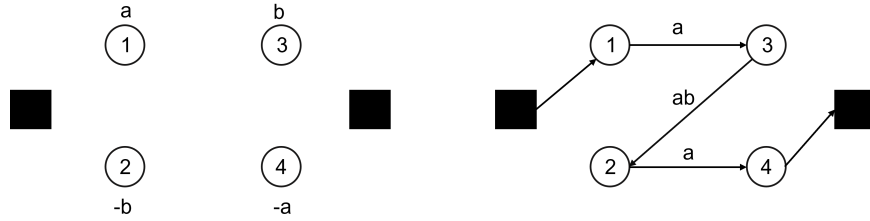
Literatürde farklı amaç fonksiyonu ve kısıtlara sahip ARP türü bulunmaktadır. Envanter rotalama problemi (Soysal ve diğ., 2019, bknz.), zaman pencereli ARP (Desrochers ve diğ., 1992, bknz.), gezgin satıcı problemi (Gendreau ve diğ., 1998, bknz.), kapasiteli ARP (Soysal ve diğ., 2015, bknz.), heterojen filolu ARP (Taillard, 1999) ve toplama ve dağıtım problemi (Dumas ve diğ., 1991, bknz.) bu ARP'lere örnek olarak gösterilebilir.

TDP'ler, ürünlerin ya da insanların belirli bir başlangıç ve varış noktası arasında taşınmasını konu alan bir araç rotalama problemi varyantıdır. Bu problem türünde depoda başlayıp biten, araç kapasitesini aşmadan tüm talepleri yerine getiren ve toplam maliyeti minimum olan bir rota bulunması amaçlanır. TDP'lerde belirli bir düğüm bir aracın deposu olarak kabul edilirken, diğer düğümler müşteri olarak tanımlanır ve gerekli toplama veya dağıtım hizmetlerine göre üç gruba ayrılır (Hernández-Pérez

& Salazar-González, 2007). İlk varyant, bire-bir TDP (one-to-one)'dir ve eşleştirilmiş toplama ve dağıtım taleplerini karşılamayı amaçlar, burada her bir toplama noktası tek bir dağıtım hedefi ile ilişkilendirilir. İkinci varyant, her müşterinin ortak bir depodan gelen bir teslimatı aldığı ve depoya belirli bir miktar ürün gönderdiği birden-çoğa-çoktan-bire (one-to-many-to-one) TDP'dir. Sonuncusu ise, bir malın birçok lokasyondan birinden alınabileceği ve ayrıca birçok lokasyona teslim edilebileceği çoktan-çoğa (many-to-many) TDP'dir (Cordeau ve diğ., 2008).

1.4.1 Bire-Bir (One-to-One) Toplama Ve Dağıtım Problemleri

Bu problem türünde, her müşterinin talebi o müşteri noktasından tek bir dağıtım noktasına taşınması durumunu inceler. Bu problem tipi "bire-bir" olarak adlandırılır, çünkü her talep bir yerden başlar ve başka bir yere gönderilir. Bu tip sorunlara, kentsel kurye hizmetlerinde, LTL taşımacılık sistemlerinde ve deniz taşımacılığında sıklıkla karşılaşılmaktadır.

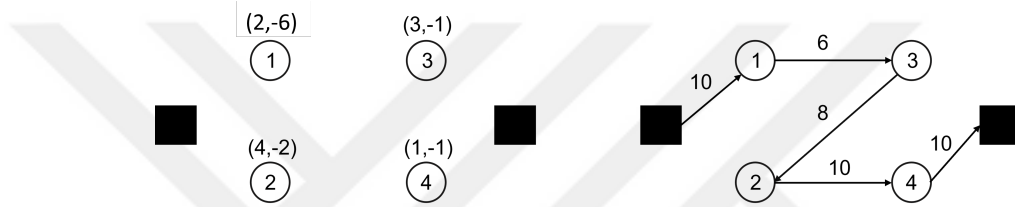


Şekil 1. Bire-bir TDP gösterimi (Cordeau ve diğ., 2008)

Şekil 1'de bire-bir TDP'ye ait bir örnek sunulmuştur. Burada daireler toplama ve dağıtım düğümlerini kareler ise depoyu temsil etmektedir. Dairelerin üzerindeki harfler ise talepleri ifade etmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere düğüm 1'den a birim ürünün düğüm 4'e taşınması gerekmektedir, benzer ilişki düğüm 2 ve 3 arasında da mevcuttur. Görselde yaylar üzerinde aracın taşıdığı birim yük gösterilmektedir. Burada araç depodan çıktıktan sonra önce düğüm 1'den a birim yük ardından düğüm 3'ten b birim yük toplamıştır, sonrasında önce b birim yükü düğüm 2'ye ve a birim yükü düğüm 4'e dağıtıp başladığı noktaya yani depoya dönmüştür.

1.4.2 Birden-Çoğa-Çoktan-Bire (One-to-Many-to-One) Toplama Ve Dağıtım Problemleri

Bu problemler, bir depodan çok sayıda müşteriye dağıtılacak bazı malların ve müşterilerden toplanıp depoya geri taşınacak başka malların varlığı ile karakterize edilebilir. Bu problem türünün uygulamalarına boş teneke ve şişelerin toplanması gibi durumlarda rastlanmaktadır. Ayrıca, yeni ürünlerin teslim edilmesine ek olarak bu tür uygulamalar kullanılmış, kusurlu veya eski ürünlerin toplanması durumunun planlandığı tersine lojistik sistemlerinde ortaya çıkmaktadır.

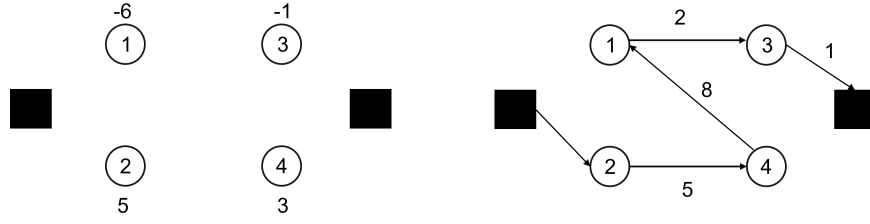


Şekil 2. Birden-çoğa-çoktan-bire TDP gösterimi (Cordeau ve diğ., 2008)

Şekil 2'de kareler depoyu ve daireler ise toplama dağıtım noktalarını temsil etmektedir. $(x, -y)$ koordinatları ise o noktanın x birim ürün tedarik ettiği ve y birim ürün talep ettiği anlamına gelmektedir. Yaylar üzerinde ise aracın taşıdığı yük miktarı gösterilmektedir. Örneğin şekilde araç depodan 10 birim yükle ayrılmıştır ve düğüm 1'e gitmiştir ve 2 birim yük teslim alıp 6 birim yük teslim etmiştir, ardından düğüm 3'te 3 birim yük almış ve 1 birim yük bırakmıştır. Yoluna 8 birim yükle devam etmiştir ve düğüm 2'de 4 birim yük alıp 2 birim yük bırakmıştır. Son olarak araç düğüm 4'te 1 birim yük alıp 1 birim yük bırakmıştır ve 10 birim yükle depoya geri dönmüştür.

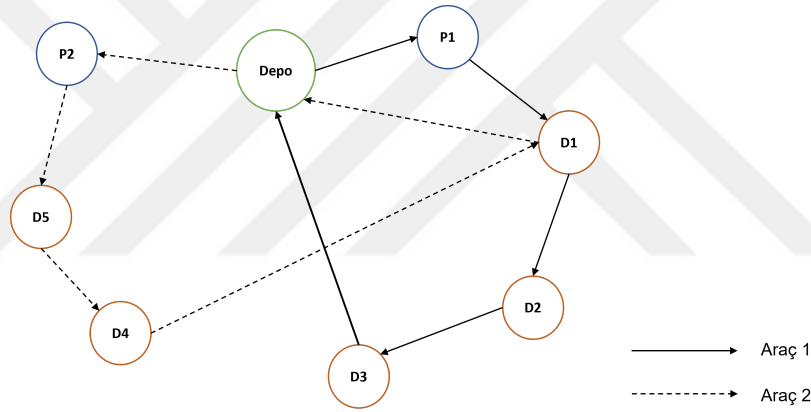
1.4.3 Çoktan-Çoğa (Many-to-Many) Topmalama Ve Dağıtım Problemleri

Bu problem türü genellikle, bir malın birden çok toplama ve dağıtım noktası arasında taşınması gerektiği duruma odaklanır. Çoktan-çoğa TDP'lerde, her bir malın birden fazla menşei ve varış yeri olabilir. Bu problemler, perakende mağazaları arasında envanterin yeniden konumlandırılmasında veya bisiklet/araba paylaşım sistemlerinin yönetiminde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3. Çoktan-çoğa TDP gösterimi (Cordeau ve diğ., 2008)

Şekil 3 çoktan-çoğa TDP için bir lojistik ağ örneği sunmaktadır. Burada güzergahına depodan başlayan araç önce düğüm 2'den 5 birim yük, ardından düğüm 4'ten 3 birim yük toplamıştır. Toplam 8 birim yükü rotasına devam eden araç düğüm 1'e 6 birim yükü düğüm 3'e de 1 birim yük dağıtımını yaptıktan sonra depoya geri dönmüştür.



Şekil 4. Ele alınan çoktan-çoğa TDP için örnek araç rotaları

Bire-bir TDP ile çoktan-çoğa TDP arasındaki temel fark aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Bire-bir TDP, i talebi, i ($i = \{1, ..n\}$) toplama düğümü ve $n + i$ ilgili dağıtım düğümü ile tanımlanır. Mevcut problem tipinde, her bir toplama noktası birden fazla dağıtım noktasıyla eşleşebilir ve farklı toplama noktaları aynı dağıtım noktasına hizmet verebilir. Şekil 4, $(P1; D1, D2, D3)$ ve $(P2; D1, D4, D5)$ çiftlerine sahip tek bir depo ve iki araç içeren TDP türü için bir örnek olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada, dağıtım işlemleri için EA'ların kullanıldığı çoktan-çoğa TDP ele alınmıştır. EA'ların menzili teslimat rotalarını tamamlamak için yeterli olmayabilir ve kullanılmış pillerin tam şarjlı pillerle değiştirilmesi gerekebilir. Ayrıca güzergâh üzerindeki araçların enerji tüketimi sürücülerin menzil kaygısını artırmaktadır. Özellikle

şehir içi lojistik operasyonlarında trafik yoğunluğundaki belirsizlik araçların hızları ve tükettikleri enerji miktarındaki belirsizliği de arttırmaktadır. Bu durum, araç kurtarma hizmeti ve zamanında tamamlanmamış dağıtım planları için ceza maliyetleri dahil olmak üzere çeşitli potansiyel maliyetlerle sonuçlanabilir (Soysal ve diğ., 2020).



2. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Elektrikli Araç Rotalama Problemleri (EARP'ler) literatürde yaygın olarak ele alınan problemler arasındadır. EA'ların fosil yakıtlı araçlara kıyasla menzil uzunluğu ve enerji tüketimi gibi farklı bazı karakteristik özellikleri bulunmaktadır. Lojistik ve taşımacılık faaliyetlerinde EA'ların kullanılması yeni ARP varyantlarının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Örneğin elektrikli ve fosil yakıtlı araçlardan oluşan karma bir araç filosu kullanımı, kısmi şarj, batarya değişim/şarj istasyonlarının konumlandırılması, EA'ların rotalanması, doğrusal olmayan enerji tüketimi, farklı şarj teknolojileri, batarya değiştirme teknolojisi ve hibrit araçlar gibi konular literatürde çalışılmaktadır.

Konuyla ilgili olarak yayınlanan literatür araştırması makaleleri bu alana genel bir bakış sağlamak açısından faydalı olabilir (bkz. ör. Erdelić & Carić, 2019; Küçükoglu ve diğ., 2021; Qin ve diğ., 2021; Xiao ve diğ., 2021). Bu çalışmalarda EARP ile ilgili incelenen makaleler arasından çok sayıda çalışmanın batarya şarj etme ve enerji tüketimi konularını matematiksel modellere dahil ettiklerini ortaya koymuştur. Çözüm yaklaşımları açısından ise, çalışmaların çoğu ARP çözüm yöntemlerini kullanarak EA'ların özelliklerine göre bazı değişiklikler yapmışlardır. Ayrıca bu literatür araştırması makaleleri, EARP literatüründe TDP konusuyla ilgili yapılan çalışma sayısının da sınırlı olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada ilgili literatürü incelemek amacıyla öncelikle Web of Science (WOS) Core Collection veri tabanında indekslenen makaleler için "konu (topic)" alanında "araç rotalama (vehicle routing) " anahtar kelimesi ile arama yapılmıştır ve "elektrik (electric)" anahtar kelimesi kullanılarak arama daraltılmıştır. Ardından "belirsiz (uncertain)", "belirsizlik (uncertainty)", "rastgele (stochastic)" ve "rastgelelik (stochasticity)" anahtar kelimeleri kullanılarak arama yeniden daraltılmıştır. Sonuçlar arasından 22 çalışma kapsam ve alaka düzeyine göre seçilmiştir. Bu bölümde ele alınan çalışmalar tematik olarak sınıflandırılmış ve özetlenmiştir. Tablo 1, belirsizliğe dayalı EARP literatürünün bir özetini sunmaktadır.

TDP, her müşterinin toplama ve dağıtım talepleri ile ilişkili olduğu önemli bir ARP konusudur. Berbeglia ve diğ. (2010), TDP'yi üç farklı gruba ayırmıştır. İlk grup çoktan-

çoğa (many-to-many) problemlerdir, yani herhangi bir nokta, herhangi bir ürün için bir kaynak veya hedef nokta olabilir (Anily & Hassin, 1992; H.-K. Chen ve diğ., 2015). İkinci grup birden-çoğa-çoktan-bire (one-to-many-to-one) problemlerdir, bu problemlerde mallar önce depoda tutulur ve ardından müşteri noktalarına taşınır (Euchi & Frifita, 2017; Zhu ve diğ., 2016). Son olarak, bire-bir (one-to-one) problemlerde, her malın belirli bir menşei ve belirli bir varış noktası vardır (Factorovich ve diğ., 2020; Soysal ve diğ., 2020; Soysal ve diğ., 2018). Bunların yanı sıra sınırlı sayıda olmakla birlikte literatürde farklı TDP tiplerinin uygulandığı bazı çalışmalar da mevcuttur. Nair ve diğ. (2016), toplama düğümlerinden alınan yükün herhangi bir dağıtım düğümüne bırakılabileceği periyodik bir ARP için özel bir durumu ele almıştır; yani eşleşme ilişkisi (pair relationship) yoktur. Naccache ve diğ. (2018), her bir talebin, ürünlerin farklı konumlardan toplanması ve tek bir dağıtım konumuna bırakılması durumunu zaman penceresi varsayımı ile birlikte ele almıştır. Ky Phuc ve Phuong Thao (2021), her aracın bazı toplama noktalarını ziyaret etmesi ve birden fazla müşteriden oluşan bir listedeki dağıtım noktalarına teslim etmesi gerektiği araç rotalama problemine odaklanmıştır.

Literatür araştırmasında, dokuz çalışmanın araç hızlarındaki ve seyahat süresindeki belirsizliği ele aldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar arasında, Reyes-Rubiano ve diğ. (2019), taşıma sürelerinin rastgele değişkenler olduğu bir ARP'yi ele almıştır. Bu çalışma, enerji güvenlik stoklarının kullanımını göz önünde bulundurmıştır, yani araç bataryasının belirli bir yüzdesi, araç rotası sırasında beklenenden daha uzun seyahat sürelerine sahip olabilen acil durumlar için ayrılmıştır. Hizmet süresi (Messaoud, 2021) ve batarya seviyeleri (Basso ve diğ., 2021; Soysal ve diğ., 2020) ile ilişkili araç rotalama problemleri için şans kısıtlı programlama modelleri (chance constraint programming models) öneren bazı çalışmalar da vardır.

Duan ve diğ. (2021), stokastik seyahat süresini ele alarak elektrikli otobüsler ve geleneksel motorlu otobüsleri içeren karma filoların çizelgeleme problemini çözmek için bir metodoloji sunmuştur. Bu çalışmada hem filo tiplerinin birleşimini hem de zaman belirsizliğini göz önünde bulundurarak önerilen modelin etkinliğini doğrulamak için Pekin'deki gerçek otobüs hatları kullanılarak vaka çalışmaları yapılmıştır. Florio ve diğ. (2021), rotalar boyunca bataryanın yeniden şarj edilmesine izin verilmeyen, belirsiz ve zamana bağlı seyahat sürelerine sahip elektrikli araçlar için rotalama sorununu

çözmek amacıyla bir matematiksel model sunmuştur. Bu yöntemde, gözlemlenen hız profilleri ve alan bağımlılığı kümeleri kullanılarak gerçeğe yakın senaryolar oluşturulmuştur.

Zhang ve diğ. (2020), bir zaman penceresine bağlı, hizmet süresi, enerji tüketimi ve seyahat süresi gibi belirsiz parametrelerin dikkate alındığı EARP için bulanık bir optimizasyon modeli (fuzzy optimization model) oluşturmuştur. Belirsiz ortamda, bataryaların kısmi olarak şarj edilmelerine izin verilmiştir ve böylece sunulan modelin kullanılabilirliği de arttırılmıştır. X.-W. Chen ve diğ. (2021), enerji tüketimi güvenilirliğini ve seyahat süresi güvenilirliğini aynı anda en üst düzeye çıkarmak için iki amaçlı, güvenilir yol bulma algoritması (bi-objective reliable path-finding algorithm) kullanmıştır. Bu çalışmada, ele alınan problem iki alt problemden oluşmaktadır: (i) seyahat süresi güvenilirliği hedefini maksimize etmek için en güvenilir yolu bulmak ve (ii) enerji tüketimi güvenilirliği hedefini optimize etmek için en güvenilir yolu bulmak.

Literatürdeki güncel çalışmalar arasından birkaç çalışma EA'lar için belirsiz enerji tüketimini ele almıştır. İlgili literatürde, enerji tüketimini benzer şekilde tahmin eden üç çalışma olduğu görülmüştür (Basso ve diğ., 2021; X.-W. Chen ve diğ., 2021; Pelletier ve diğ., 2019). Bu çalışmalar, araç özelliklerini, hızlarını ve yüklerini dikkate alan emisyon modellerini kullanmışlardır. Pelletier ve diğ. (2019), enerji tüketimi belirsizliklerinin dikkate alındığı bir matematiksel model önermiştir. Çalışmanın amacı bir aracın rotası boyunca bataryasının tükenmeyeceğine dair garantiyi sağlayabilecek minimum maliyete sahip dağıtım rotaları belirlemektir. Ele alınan problemde güçlü (robust) karma tam sayılı doğrusal programlama çözüm yöntemi kullanılmıştır ve küçük örneklerle sayısal analizler yapılmıştır. Ayrıca daha büyük örnekleri çözebilmek için de sezgisel bir yöntem önerilmiştir ve önerilen yöntemi değerlendirmek amacıyla sayısal örnekler çözülmüştür. Basso ve diğ. (2021) çalışmasında, stokastik enerji tüketimini ve dinamik müşteri taleplerini dikkate alarak, güvenilir şarj planlaması ile EA'nın rotalanması için tahmine dayalı bir yöntem önermiştir. Önerilen enerji tüketimi modelinde hızlanma, sabit hız ve frenleme durumları da dikkate alınmıştır. Böylece trafik ışıklarının, kavşakların ve yol boyunca hız değişimlerinin etkileri incelenmiştir. Benzer şekilde, X.-W. Chen ve diğ. (2021) tahmini enerji tüketimini hesaplamak için her bir yayadaki belirsiz araç hızının minimum ve maksimum aralıkta olduğu ve normal dağılıma sahip olduğu varsayımını kullanmıştır. Bu çalışmada, se-

yahat süresi ve enerji tüketimi belirsizliklerini dikkate alarak elektrikli araçlar için iki amaçlı bir yol bulma algoritması sunulmuştur.

Bu literatür araştırması, EA'lar kullanılarak TDP için belirsizliği ele alan yalnızca iki çalışmanın olduğunu ortaya koymaktadır (Abdulaal ve diğ., 2016; Soysal ve diğ., 2020). Abdulaal ve diğ. (2016), elektrikli araçların uzun şarj süresine ve şarj istasyonlarındaki olası gecikmelere odaklanmıştır. Bu makale, çok değişkenli EARP'ye bir çözüm yöntemi sunmayı amaçlamıştır. Göz önünde bulundurulan değişkenler arasında belirsiz bir ortam, birden fazla araç, zaman penceresi kısıtlamaları, eş zamanlı ve eş zamanlı olmayan toplama ve dağıtım varsayımları yer almaktadır. Soysal ve diğ. (2020) ise çalışmasında, sürücü kaygısını (driver anxiety) ve belirsiz batarya tüketimini dikkate alan bir matematiksel model ve doğrusal yaklaşım modeli önermiştir. Bu çalışma belirsizliğin dikkate alınmadığı teslimat planlarında menzil kaygısının istenilenden daha yüksek olduğunu ve bataryanın tükenmesi durumuyla karşı karşıya kalma olasılığının arttığını ortaya koymuştur.

Ele alınan konu ile ilgili ulusal dizin "Toplama ve Dağıtım Problemi" ve "Elektrikli Araç" anahtar kelimeleri ile incelenmiştir. İncelemenin sonucunda Türkçe literatürde TDP'yi ele alan çalışma sayısının kısıtlı olduğu görülmüştür. Taşdan (2020) tez çalışmasında elektrikli ve fosil yakıtlı araçların bulunduğu bir filo varsayımı ile bire-bir TDP için bir karar destek modeli sunmuştur. Ek olarak bu çalışmada yapılan sayısal analizlerde EA'ların kullanacağı elektrik enerjisi için güneş panellerinin kullanılması durumu ve güneş panellerine yapılacak yatırımların maliyet analizi de yapılmıştır. Sonuç olarak güneş panellerine yapılacak yatırımın finansal açıdan karlı olmayacağı sonucuna varılmıştır.

Kucuk ve Topaloglu Yıldız (2019) çalışmasında zaman penceresi varsayımı altında bire-bir TDP için yeni bir Kısıt Programlama (CP) modeli sunmuştur. Bacaksız (2018) tarafından yapılan tez çalışması kapsamında ise afet sonrası hastaların taşınması amacıyla bir tahliye planı yapmak için bire-bir TDP ele alınmış ve sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, elektrikli araçlarla çoktan-çoğa (many-to-many) TDP'ye belirsiz enerji tüketimini dahil eden herhangi bir çalışma bulunmamıştır. Bu çalışma, (i) belirsiz enerji tüketimi varsayımı altında EA'larla çoktan-çoğa

TDP için Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama (Quadratic Chance-constrained Mixed-Integer Programming) modeli geliştirerek, (ii) EA'lar için enerji tüketimi fonksiyonu aracılığıyla yaylar arasındaki beklenen enerji tüketimini hesaplayarak (iii) sezgisel bir çözüm yöntemi önererek ve (iiii) sunulan çözüm yöntemlerinin katma değerini ve uygulanabilirliğini sayısal analizlerle sunarak literatüre katkıda bulunmuştur.



#	Çalışma	Problem	Model	Çözüm Yöntemi	Belirsizlik	Enerji Tüketimi			
						Hız	Yük	Araç Özelliği	Mesafe
1	Abdulaal ve diğ. (2016)	EE-TDP	MKS	DP	Talep				
2	Bi ve Tang (2018)	D-EARP	MKS	YDP	Trafik durumu	✓	✓	✓	✓
3	Li ve diğ. (2018)	EARP	KTDP	CPLEX çözücü	Bekleme zamanı				
4	Reyes-Rubiano ve diğ. (2019)	YARP	SOY	SY	Seyahat süresi				
5	Zhang ve diğ. (2019)	BDS-LRP	Analitik	HDKA	Talep				
6	Rossi ve diğ. (2019)	ARŞP	Analitik	PPA	Talep				
7	Pelletier ve diğ. (2019)	EARP	R- KTDP	Meta Sezgisel	Enerji tüketimi	✓	✓	✓	✓
8	Keskin ve diğ. (2019)	EARP	KTDP	CPLEX çözücü	Bekleme süresi				✓
9	Fernández ve diğ. (2019)	EARP	Analitik	BRHP	Seyahat süresi	✓	✓		
10	Shen ve diğ. (2019)	EARP	Analitik	PFA	Seyahat süresi	✓	✓		✓
11	Ge ve diğ. (2020)	EARP	KTDP	Sezgisel	Talep				

12	Zhang ve diğ. (2020)	BEARP	Analitik	Meta Sezgisel	Hizmet süresi, enerji tüketimi, ve seyahat süresi				
13	Soysal ve diğ. (2020)	B-TDP	Ş-KTDP	CPLEX çözücü	Batarya tüketimi	✓			✓
14	Messaoud (2021)	EARP	Ş-KTDP	UBKA	Seyahat süresi ve araç hızı				
15	Keskin ve diğ. (2021)	EARP	İ-KTDP	Meta Sezgisel	Bekleme süresi				✓
16	Florio ve diğ. (2021)	EARP	Analitik	CG	Seyahat süresi	✓	✓		
17	Duan ve diğ. (2021)	OÇP	ÇM	GGA	Seyahat süresi				
18	Kullman ve diğ. (2021)	EARP	MKS	YDP	Talep				
19	Pugliese ve diğ. (2021)	EARP	RTİRM	DY	Bekleme süresi				
20	Basso ve diğ. (2021)	EARP	Ş-KTDP	CPLEX çözücü	Enerji tüketimi	✓	✓	✓	✓
21	X.-W. Chen ve diğ. (2021)	EARP	Analitik	PFA	Enerji tüketimi ve seyahat süresi	✓	✓	✓	✓
22	Basso ve diğ. (2022)	DB-EARP	MKS	SRLY	Enerji tüketimi ve müşteri talepleri	✓		✓	✓
23	Bu çalışma	ÇTDP	Ş-KTDP	-	Araç hızı	✓	✓	✓	✓

EARP: Elektrikli Araç Rotalama Problemi	SY: Simheuristic Yaklaşım
D-EARP: Dinamik Araç Rotalama Problemi	KTDP: Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
YARP: Yeşil Araç Rotalama Problemi	R-KTDP: Robust Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
BDS: Batarya Değişim İstasyonu	Ş-KTDP: Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama
TDP: Toplama ve Dağıtım Problemi	İ-KTDP: İki Aşamalı Karma Tam Sayılı Programlama
OÇP: Otobüs Çizelgeleme Problemi	YDP: Yaklaşımsal Dinamik Programlama
LRP: Lokasyon Rotalama Problemi	MKS: Marcov Karar Süreci
EE-TDP: Eş zamanlı ve Eş zamanlı olmayan TDP	ARŞP: Araç Rotalama ve Şarj Problemi
TÇDP: Toplama ve Çoklu Dağıtım Problemi	B-TDP: Bire-Bir Toplama ve Dağıtım Problemi
UBKA: Uyarlanabilir Büyük Komşu Araması	DP: Dinamik Programlama
PPA: Privacy-preserving Algoritması	HDKA: Hibrit Değişken Komşu Araması
CG: Column Generation	GGA: Grouping Genetic Algoritması
DY: Dekompozisyon Yaklaşımı	PFA: Path-finding Algoritması
RTİRM: Rota Tabanlı İki Aşamalı Robust Model	BRHP: Belirsiz Rota Hız Profili
DB-EARP: Dinamik Belirsiz EARP	SRLY: Safe Reinforcement Learning Yaklaşımı
BEARP: Bulanık EARP	ÇM: Çizelgeleme Modeli
ÇTDP: çoktan-çoğa TDP	SOY: Simülasyon-Optimizasyon Yaklaşımı

Tablo 1. Belirsizliğe dayalı elektrikli araç rotalama problemlerini ele alan çalışmalar

3. BÖLÜM

PROBLEM TANIMI, MATEMATİKSEL MODEL VE SEZGİSEL YAKLAŞIM

Bu bölümde ilk olarak ele alınan problemin tanımı yapılmıştır. Ardından Bölüm 3.2’de ele alınan problem için önerilen matematiksel model ve elektrikli araçlar için enerjimi tüketimi tahmini anlatılmıştır. Son olarak Bölüm 3.3’te çoktan-çoğa TDP için geliştirilen sezgisel yaklaşım açıklanmıştır.

3.1 PROBLEM TANIMI

Ele alınan toplama ve dağıtım problemi $G = \{V, A\}$ grafiğinde tanımlanmaktadır; burada V verteks kümesidir ve A yay kümesidir. Verteks kümesi $\{P, D, S, \{0\}\}$ kümelerinden oluşmaktadır, burada $P = \{1, \dots, n\}$ toplama noktalarını, $D = \{n + 1, \dots, n + m\}$ ise dağıtım noktalarını ifade eder, $S = \{n + m + 1, \dots, n + m + |S|\}$ elektrikli araçlar için batarya değişim noktalarını gösterir ve depo aynı zamanda batarya değişim istasyonu olarak da kullanılabilirdiğinden $\{n + m + 1\}$ depo için bir kukla (dummy) nokta anlamına gelmektedir. $\{0\}$, dağıtım işlemleri için başlangıç ve bitiş noktası olan depoyu ifade etmektedir. Sipariş, toplama düğümü i ile dağıtım düğümü j arasında mevcutsa, R kümesi $(i, j) \in A$ çiftlerini içerir. Yay kümesi şu şekilde tanımlanır: $A = \{(i, j) : i = 0, j \in P \cup S / \{n + m + 1\}; \text{ veya } (i, j) \in P \cup D \cup S : i \neq j; \text{ veya } i \in D \cup S / \{n + m + 1\}, j = 0\}$.

Bu problemde toplama taleplerinin karşılanması için bir dizi elektrikli araç ($K = \{1, \dots, |K|\}$) kullanılmaktadır. Bu talepler karşılanırken aşağıdaki kısıtların yerine getirilmesi gerekmektedir: (i) $i \in P$ düğümü $j \in D$ düğümünden önce ziyaret edilmelidir ((i, j) toplama - dağıtım çiftleri için öncelik ilişkisi) ve (ii) aynı araç hem toplama hem de ilgili dağıtım noktalarını ziyaret etmelidir (eşleşme ilişkisi).

$\sum_{i \in P: (i, j) \in Y} q_{i, j} = - \sum_{j \in D: (i, j) \in Y} q_{i, j}$ ’yi sağlayan her $(i, j) \in R$ çifti ile bir $q_{i, j}$ yükü ilişkilendirilmiştir.

Her k aracı, η_k batarya kapasitesine sahiptir. $(i, j) \in A$, yolları üzerindeki $\nu_{i, j}$ hareket hızının normal dağıldığı ve $\mu_{i, j}$ ortalama ve $\sigma_{i, j}$ standart sapmaya sahip olduğu

varsayılmıştır. Ayrıca önceden tanımlanmış maksimum ($\nu_{i,j}^{max}$) ve minimum ($\nu_{i,j}^{min}$) hız sınırları mevcuttur. Ek olarak, toplam seyahat süresi hesaplanırken düğümlerdeki hizmet süreleri de dikkate alınmaktadır.

Bir aracın kullandığı yaylar kümesine o aracın rotası denir. Araçlar hem depodan hem de batarya değişim noktalarından dolu bataryalarla ayrılmaktadır. Rotalar oluşturulurken depo veya batarya değişim noktalarında başlayıp biten her bir kısım bir tur ($t \in T$) olarak tanımlanmıştır. Tek bir rota bir veya daha fazla sayıda tur içerebilmektedir.

Ele alınan problem, dağıtım operasyonları için gereken toplam enerji tüketimi maliyetini en küçükleyecek şekilde yukarıda belirtilen varsayımları ele alarak bir dağıtım planı belirlemeyi amaçlamaktadır.

3.2 ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ TAHMİNİ VE ELE ALINAN PROBLEM İÇİN SUNULAN MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölüm şu şekilde yapılandırılmıştır: Alt bölüm 3.2.1’de EA’larda enerji tüketimi tahmini için kullanılan fonksiyon açıklanmıştır. Alt bölüm 3.2.1.1’de Riemann Toplamı yöntemi ve beklenen enerji tüketimi hesaplaması anlatılmıştır. 3.2.1.2 alt bölümünde yaklaşık beklenen enerji tüketimi ve varyans değerlerinin hesaplanması için kullanılan yaklaşımsal yöntem açıklanmıştır. Bölüm 3.2.2’te ise Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama Modeli sunulmuştur. Model için gerekli notasyon ise Tablo 2’de gösterilmiştir.

Sembol	Tanım	Birim
P	Toplama noktaları kümesi; $P = \{1, \dots, n\}$,	-
D	Dağıtım noktaları kümesi; $D = \{n + 1, \dots, n + m\}$,	-
S	Batarya değişim noktaları kümesi; $D = \{n + m + 1, \dots, n + m + S \}$, $\{n + m + 1\} = \{0\}$,	-
V	Tüm noktaların kümesi; $V = \{P \cup D \cup S \cup \{0\}\}$,	-
Y	(i, j) çiftleri kümesi; i toplama noktalarını ve j ise ilgili dağıtım noktalarını temsil eder,	-
T	Depodan ya da batarya değişim noktalarından başlayan ve depoda ya da batarya değişim noktalarında biten noktalar kümesi; $T = \{1, \dots, T \}$,	-
K	Araçlar kümesi; $K = \{1, \dots, K \}$,	-
A	Tüm yayların kümesi,	-
I	Alt aralık kümesi; $I = \{1, \dots, I \}$,	-
M	Yeterince büyük bir sayı,	-
$q_{i,j}$	$i \in P$ noktasından toplanıp ilgili $j \in D$ noktasına teslim edilmesi gereken ürün miktarı,	kg
h_i	$i \in V$ noktalarının hizmet süreleri,	dakika
Q_k	$k \in K$ aracının yük kapasitesi	kg
η_k	$k \in K$ aracının batarya kapasitesi,	kWh
c	Birim enerji tüketim maliyeti,	€
$d_{i,j}$	i ve j noktaları arasındaki mesafe; $(i, j) \in A$,	metre
$\nu_{i,j}$	i ve j noktaları arasındaki belirsiz araç hızı; $(i, j) \in A$,	m/s
$t_{i,j}$	i ve j noktaları arasındaki toplam seyahat süresi; $(i, j) \in A$,	dakika
$\nu_{i,j}^{min}$	$(i, j) \in A$ yayı üzerindeki hız alt limiti,	(m/s)
$\nu_{i,j}^{max}$	$(i, j) \in A$ yayı üzerindeki hız üst limiti,	(m/s)
$\nu_{i,j}^a$	$(i, j) \in A$ yayı üzerinde $a \in I$ alt aralığındaki araç hızı,	(m/s)
$Z_{i,j,k,t}[\nu_{i,j}]$	$k \in K$ aracının $\nu_{i,j}$ hızı ile $t \in T$ turunda, $(i, j) \in A$ yayı üzerinde hareket ettiğinde tükettiği enerji miktarını hesaplamak için kullanılan fonksiyon,	kWh

$Z_{i,j,k,t}^{approx} [\nu_{i,j}]$	$k \in K$ aracının $\nu_{i,j}$ hızı ile $t \in T$ turunda, $(i, j) \in A$ yayı üzerinde hareket ettiğinde tükettiği yaklaşık enerji tüketimini hesaplamak için kullanılan fonksiyon,	kWh
$E[.]$	Fonksiyonun beklenen değeri,	-
$P[.]$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu,	-
$R[.]$	Geliştirilen olasılık yoğunluk fonksiyonu,	-
$Var[.]$	Varyans,	-
$X_{i,j,k,t}$	$k \in K$ aracı $t \in T$ turunda, $(i, j) \in A$ yayı üzerinde hareket ederse ikili değişken 1'e eşittir, aksi takdirde 0,	-
$Y_{i,k}$	$k \in K$ aracının $i \in V$ düğümünde hizmete başladığı zaman, $Y_{0,k} = 0, \forall k \in K$,	dakika
$F_{i,j,k,t}$	$k \in K$ aracı $t \in T$ turunda $(i, j) \in A$ yayı üzerinde taşıdığı yük miktarı,	kg

Tablo 2. Matematiksel modelde kullanılan parametreler ve karar değişkenleri

3.2.1 Elektrikli Araçlar için Enerji Tahmininin Detaylı Hesaplanması

Bu çalışmada yük taşımacılığında kullanılan EA'ların enerji tüketimi tahmin edilirken Asamer ve diğ. (2016) tarafından önerilen yaklaşım kullanılmıştır. $v(m/s)$ hızında ve $F(kg)$ yükü ile $d(m)$ mesafeyi kat eden bir EA için harcanan enerji miktarı (kWh) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$Z(\nu) = \max \left(0, \frac{\beta d \nu^2 + \alpha (w + F) d}{(3.6)10^6} \right) \varepsilon + \frac{p(d/\nu)}{(3.6)10^6} \quad (3.1)$$

burada, $Z(\nu)$ harcanan enerji miktarını (kWh cinsinden) ifade eder. $\beta = 0.5C_d\rho A_e$ ve $\alpha = g \sin\theta + gC_r \cos\theta$, burada α yol özellikleriyle ilişkili bir sabittir, θ yol açısıdır ve C_r yuvarlanma direnci katsayısıdır. Enerji tüketimi fonksiyonunda kullanılan tüm parametrelerin gösterimi Tablo 3'te verilmiştir.

Sembol	Tanım
w	Yüksüz araç ağırlığı (kg)
g	Yerçekimi sabiti (m/s ²)
C_d	Aerodinamik sürtünme katsayısı
C_r	Yuvarlanma direnci katsayısı
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m ³)
A_e	Ön yüzey alanı (m ²)
ε	Araç aktarma organları verimliliği
θ	Yol açısı
p	Yardımcı güç talebi (W)
ν	Araç hızı (m/s)

Tablo 3. Enerji tüketimi fonksiyonunda kullanılan parametre gösterimleri

3.2.1.1 Riemann Toplamı Yöntemi Kullanılarak Beklenen Enerji Tüketiminin Hesaplanması

Bu alt bölüm, enerji tüketimi fonksiyonunun beklenen değerinin hesaplama aşamalarını göstermektedir. Denklem (3.2), normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonunun (PDF) genel gösterimidir (Ross, 1976) ve $P(\nu)$, $[-\infty, +\infty]$ aralığında 1 olarak tanımlanır. Problemimizde yaylardaki araç hızlarının ν^{min} ile ν^{max} arasında olduğu varsayılmaktadır. Buna göre belirli bir aralıktaki σ ve μ değerleri ile hesaplanan olasılıkların toplamı 1'e eşit olmayabilir ve bu da bazı hesaplama hatalarına neden olabilir. Bu durumu önlemek amacıyla (3.3) denkleminde belirtilen koşullu olasılık kullanılarak enerji tüketimi fonksiyonu için yeni bir PDF oluşturulmuştur. Burada (3.3) hızın ν^{min} ile ν^{max} arasında olması koşuluyla, aracın hızının ν olma olasılığını ifade eder.

$$P(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\nu-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.2)$$

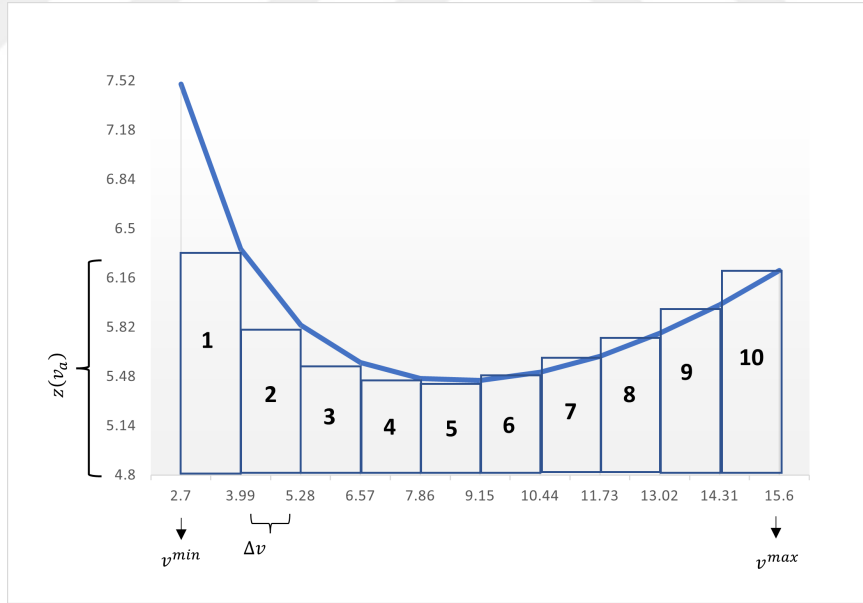
$$R(\nu) = P(\nu | \nu^{min} \leq \nu \leq \nu^{max}) = \frac{P(\nu)}{\int_{\nu^{min}}^{\nu^{max}} P(\nu) \cdot d\nu} \quad (3.3)$$

$Z(\nu)$ enerji tüketimi fonksiyonunun PDF'si belirlendikten sonra, fonksiyonun beklenen değerinin ((3.4)) hesaplanması için enerji tüketim fonksiyonu ((3.4)), olasılık

yoğunluk fonksiyonu ((3.3)) ile çarpılır ve tanımlanan aralıkta integrali alınır.

$$E [Z(\nu)] = \int_{\nu^{min}}^{\nu^{max}} Z(\nu)R(\nu).d\nu \quad (3.4)$$

Bu çalışmada, integralin yaklaşık değerini hesaplamak için Riemann Toplamı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, belirli bir aralıkta tanımlı sonlu integralin kesin bir yaklaşımıdır. Bu yöntemde, fonksiyonun oluşturduğu grafiğin altında kalan alanı yaklaşık olarak hesaplamak amacıyla dikdörtgenler kullanılır. Şekil 5'te, Riemann Toplamı yönteminin uygulaması gösterilmektedir. Burada araç hızının üst ve alt sınırı ([2.7, 15.6]), 10 alt aralığa bölünmüştür. Dikdörtgenlerin genişliği ve yüksekliği sırasıyla $\Delta\nu$ ve $Z(\nu_{i,j}^a)$ ile temsil edilmektedir. Her bir dikdörtgenin alanı karşılık gelen yükseklik ve genişliğinin çarpımı şeklinde hesaplanır. Son adımda, fonksiyonun oluşturduğu grafiğin yaklaşık alanını bulmak için hesaplanan tüm alanlar toplanır.



Şekil 5. Riemann Toplamı yönteminin gösterimi

(3.5) ile (3.9) arasındaki denklemler, Riemann Toplamı yöntemini kullanarak yaklaşık beklenen enerji tüketimi hesaplamasının aşamalarını göstermektedir. Denklem (3.5), karar değişkenleri ile enerji tüketimi fonksiyonunu göstermektedir.

$$Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j}) = \left[\max \left(0, \frac{\beta d_{i,j} \nu_{i,j}^2 X_{i,j,k,t} + \alpha_{i,j} (w X_{i,j,k,t} + F_{i,j,k,t}) d_{i,j}}{(3.6)10^6} \right) \varepsilon + \frac{p^{(d_{i,j}/\nu_{i,j})} X_{i,j,k,t}}{(3.6)10^6} \right] \quad (3.5)$$

$$\Delta\nu = \frac{\nu_{i,j}^{max} - \nu_{i,j}^{min}}{n} \quad (3.6)$$

$$\nu_{i,j}^a = \nu_{i,j}^{min} + a\Delta\nu \quad (3.7)$$

$$R(\nu_{i,j}^a) = \frac{\Delta\nu \cdot P(\nu_{i,j}^a)}{\sum_{(a \in I)} \Delta\nu \cdot P(\nu_{i,j}^a)}, \quad \forall (i,j) \in A, a \in I \quad (3.8)$$

$$E[Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j})] = \sum_{a \in I} [Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j}^a)] [R(\nu_{i,j}^a)], \quad \nu_{i,j}^{min} \leq \nu_{i,j} \leq \nu_{i,j}^{max} \quad (3.9)$$

Burada $Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j})$, $k \in K$ aracının $\nu_{i,j}^{min}$ ve $\nu_{i,j}^{max}$ hız aralığı ile $t \in T$ turunda, $(i,j) \in A$ yayı üzerinde hareket ettiğindeki enerji tüketimi fonksiyonunu ifade eder. Denklem (3.6), $[\nu_{i,j}^{min}, \nu_{i,j}^{max}]$ aralığının $|I|$ alt aralık sayısına bölündüğünü gösterir. $\Delta\nu$ her bir dikdörtgenin genişliğini ifade eder. Her dikdörtgenin ($a \in I$ için $\nu_{i,j}^a$) bitiş noktaları (3.7) denklemiyle hesaplanır. $Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j}^a)$ dikdörtgenlerin yüksekliklerini temsil etmektedir ve bu dikdörtgenlerin alanı $\Delta\nu Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j}^a)$ şeklinde hesaplanmaktadır. Sonuç olarak, (3.9) denkleminde, fonksiyonun yaklaşık beklenen değerini bulmak için hesaplanan tüm alanlar toplanır.

3.2.1.2 Yaklaşık Enerji Tüketimi Fonksiyonu Kullanılarak Varyans Değerlerinin Hesaplanması

$k \in K$ aracının $\nu_{i,j}$ hızı ile $t \in T$ turunda, $(i,j) \in A$ yayı üzerinde hareket ettiğindeki enerji tüketimi varyansı (3.11) fonksiyonu kullanılarak (3.10) denklemi ile hesaplanmıştır. Burada, kullanılan varyans denkleminde (3.5) fonksiyonunun karesini almak modeli doğrusal olmayan hale getirmektedir. Bu yüzden (3.5) fonksiyonundaki $F_{i,j,k,t}$ karar değişkeni yerine sabit bir F yük değeri kullanılarak $Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})$ fonksiyonu elde edilmiştir.

$$Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j}) = X_{i,j,k,t} \left[\max \left(0, \frac{\beta d_{i,j} \nu_{i,j}^2 + \alpha_{i,j} (w + F) d_{i,j}}{(3.6)10^6} \right) \varepsilon + \frac{p^{(d_{i,j}/\nu_{i,j})}}{(3.6)10^6} \right] \quad (3.10)$$

(3.10) fonksiyonu mevcut haliyle sadece $X_{i,j,k,t}$ karar değişkenini içerdüğinden, bu ifade parantez dışında çarpan olarak tutulabilir ve fonksiyonun karesi alınabilir ve bu ifadenin doğrusallığını etkilemez. Böylece, (3.10) fonksiyonu ile yaylar arasında enerji tüketimlerinin beklenen değerleri Riemann Toplamı yöntemiyle hesaplanır ve ardından (3.11) ifadesi kullanılarak enerji tüketimlerine ait varyans değerleri hesaplanır.

$$Var [Z_{i,j,k,t}^{approx} (\nu_{i,j})] = E [(Z_{i,j,k,t}^{approx} (\nu_{i,j}))^2] - E [Z_{i,j,k,t}^{approx} (\nu_{i,j})]^2 \quad (3.11)$$

3.2.2 Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama Modeli

Bu bölüm, çalışılan problem için Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama formülasyonunu sunar. Bu formülasyon, bire bir TDP için Soysal ve diğ. (2020) tarafından önerilen modeli temel almaktadır. Bu çalışmada Soysal ve diğ. (2020)' nin önerdiği problem, çoktan-çoğa TDP kullanılarak ve belirsiz araç hızları ile beklenen enerji tüketimini hesaba katarak genişletilmiştir. Model için gerekli olan notasyon bilgisi Tablo 2'de sunulmuştur.

En küçük

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} cE [Z_{i,j,k,t} (\nu_{i,j})] \quad (3.12)$$

Amaç fonksiyonu (3.12), toplama ve dağıtım işlemleri sırasında oluşan beklenen enerji tüketim maliyetini içermektedir.

$$\sum_{i \in P \cup S / \{m+n+1\}} \sum_{t \in T} X_{0,i,k,t} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in P \cup S / \{m+n+1\}} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{0,i,k,t} = \sum_{i \in D \cup S / \{m+n+1\}} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{i,0,k,t}, \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in V: (i,j) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{i,j,k,t} = 1, \quad \forall i \in P \quad (3.15)$$

$$\sum_{a \in V: (i,j) \in A} \sum_{t \in T} X_{a,i,k,t} - \sum_{b \in V / \{0\}: (i,j) \in A} \sum_{t \in T} X_{b,j,k,t} = 0, \quad \forall i, j: (i,j) \in Y, k \in K \quad (3.16)$$

$$\sum_{j \in V: (j,i) \in A} X_{j,i,k,t} - \sum_{j \in V: (i,j) \in A} X_{i,j,k,t} = 0, \quad \forall i \in P \cup D, k \in K, t \in T \quad (3.17)$$

$$\sum_{j \in V: (j,i) \in A} \sum_{t \in T} X_{j,i,k,t} - \sum_{j \in V: (i,j) \in A} \sum_{t \in T} X_{i,j,k,t} = 0, \quad \forall i \in S, k \in K \quad (3.18)$$

$$\sum_{i \in S \cup \{0\}} \sum_{j \in V: (i,j) \in A} \sum_{k \in K} X_{i,j,k,t} \leq 1, \quad \forall t \in T. \quad (3.19)$$

(3.13) ve (3.14) kısıt setleri, araçların rotalarının depodan (0) başlayıp depoda bitmesi gerektiğini ifade etmektedir. (3.15). ve (3.16). kısıtlar, i toplama düğümü ile j dağıtım düğümü arasında bir talep varsa, bu talebin aynı k aracı tarafından (eşleştirme) karşılanmasını zorunlu kılar (çift ilişkisi). (3.17)–(3.19) kısıtları toplama, dağıtım ve batarya değişim konumlarındaki akışı sağlamaktadır.

$$Pr \left(\eta_k - \sum_{(i,j) \in A} E [Z_{i,j,k,t} (\nu_{i,j})] \geq 0 \right) \geq \alpha, \quad \forall t \in T, k \in K. \quad (3.20)$$

(3.20) kısıtı, sürücülerin menzil kaygısını azaltmak için her $t \in T$ turunda bataryanın tükenmesi durumuyla karşılaşma olasılığına ilişkin hizmet seviyesini ifade etmektedir.

$$\sum_{j \in V: (j,i) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} F_{j,i,k,t} - \sum_{j \in V: (i,j) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} F_{i,j,k,t} = - \sum_{(i,j) \in R: i \in P} q_{i,j}, \quad \forall i \in P \quad (3.21)$$

$$\sum_{j \in V: (j,i) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} F_{j,i,k,t} - \sum_{j \in V: (j,i) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} F_{i,j,k,t} = \sum_{(i,j) \in R: j \in D} q_{i,j}, \quad \forall i \in D \quad (3.22)$$

$$\sum_{j \in V: (j,i) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} F_{j,i,k,t} - \sum_{j \in V: (j,i) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} F_{i,j,k,t} = 0, \quad \forall i \in S \quad (3.23)$$

$$F_{i,j,k,t} \leq Q_k X_{i,j,k,t}, \quad \forall (i,j) \in A, k \in K, t \in T \quad (3.24)$$

$$\sum_{i \in P \cup S / \{m+n+1\}} F_{0,i,k} = 0 \quad \forall k \in K, t \in T. \quad (3.25)$$

(3.21)–(3.23) kısıtları araçların yüklerini toplama ((3.21)), dağıtım ((3.22)) ve batarya değişim konumlarına ((3.23)) göre takip etmek için kullanılır. (3.24) kısıtı ise, araç yük kapasitelerinin aşılmasını önlemektedir. Kısıt (3.25)'te belirtildiği gibi araçlar depodan ayrılırken boştur.

$$Y_{i,k} \leq Y_{j,k}, \quad \forall i, j : (i, j) \in Y, k \in K \quad (3.26)$$

$$Y_{i,k} + h_i + t_{i,j} \leq Y_{j,k} + M(1 - \sum_{t \in T} X_{i,j,k,t}), \quad \forall (i, j) \in A : j \neq 0, k \in K. \quad (3.27)$$

Kısıt (3.26) toplama düğümüne, ilgili dağıtım çifti ziyaret edildikten sonra gidilmesini sağlar. Kısıt (3.27), dağıtım işlemleri sırasındaki sürenin takip edilmesine olanak sağlar.

$$X_{i,j,k,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, t \in T \quad (3.28)$$

$$F_{i,j,k,t} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, t \in T. \quad (3.29)$$

$$Y_{i,k} \geq 0, \quad \forall i \in V, k \in K. \quad (3.30)$$

(3.28) - (3.30) kısıtları karar değişkenlerine uygulanan kısıtlamalardır.

(3.20) stokastik kısıtları şu şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$Pr\left(\eta_k - \sum_{(i,j) \in A} E[Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j})] \geq 0\right) \geq \alpha, \quad \forall t \in T, k \in K. \quad (3.31)$$

$\gamma_{k,t} = \sum_{(i,j) \in A} E[Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j})]$, $\forall k \in K, t \in T$ ifadesinde eğer $G_{\gamma_{k,t}}(y)$, $\gamma_{k,t}$ 'nin kümülatif dağılım fonksiyonuysa, o halde,

$$G_{E_{k,t}}^{-1}(\alpha) = \sum_{(i,j) \in A} E[Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j})] + z_\alpha \sqrt{\sum_{(i,j) \in A} Var[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})]}, \quad \forall t \in T, k \in K. \quad (3.32)$$

Burada z_α hizmet düzeyi parametresini, yani kümülatif olasılığı α olan standart bir değişkeni ifade eder. Bu nedenle, belirsizlik kısıtlarının ((3.20)) deterministik eşdeğeri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\eta_k \geq \sum_{(i,j) \in A} E[Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j})] + z_\alpha \sqrt{\sum_{(i,j) \in A} Var[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})]}, \quad \forall t \in T, k \in K. \quad (3.33)$$

(3.33) kısıt kümesinde eşitsizliğin sağ tarafının ikinci bileşeni doğrusallığı bozmaktadır. Bu doğrusal olmayan bileşen için aşağıdaki gibi bir yaklaşım sunulmuştur:

$$\eta_k - \sum_{(i,j) \in A} E[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})] \geq z_\alpha \sqrt{\sum_{(i,j) \in A} Var[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})]}, \quad \forall t \in T, k \in K. \quad (3.34)$$

$$\left(\eta_k - \sum_{(i,j) \in A} E[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})]\right)^2 \geq \left(z_\alpha \sqrt{\sum_{(i,j) \in A} Var[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})]}\right)^2, \quad \forall t \in T, k \in K. \quad (3.35)$$

$$\left(\eta_k - \sum_{(i,j) \in A} E[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})]\right)^2 \geq z_\alpha^2 \left(\sum_{(i,j) \in A} Var[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})]\right), \quad \forall t \in T, k \in K. \quad (3.36)$$

$$\eta_k \geq \sum_{(i,j) \in A} E[Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})] \quad \forall t \in T, k \in K. \quad (3.37)$$

Başlangıçta, (3.34) ifadesinde, sağ tarafın ilk bileşeni eşitliğin sol tarafına atılır. Sonra (3.35) ifadesini karekök içerisinde çıkararak için her iki tarafın karesi alınır. Sonuç

olarak (3.36) kısıtının sol tarafında ikinci dereceden bir terim bulunmaktadır. Bu durumda kısıtlardaki ikinci dereceden terim yalnızca ikili değişkenleri içeriyorsa CPLEX Çözücüsü ikinci derece kısıt içeren bu modeli çözebilmektedir. (3.36) kısıtının sol tarafının karesi alındığı için her zaman pozitif bir ifade olmaktadır. Bu sebeple kısıt (3.37), beklenen enerji tüketiminin batarya kapasitesini aşmasını önlemektedir.

Sonuç olarak, önerilen yaklaşımsal Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama modeli, (3.13) – (3.19), (3.21) – (3.30), (3.36), ve (3.37) kısıtlarından ve bir (3.12) amaç fonksiyonundan oluşmaktadır.

3.3 ELE ALINAN PROBLEM İÇİN SUNULAN SEZGİSEL ÇÖZÜM ALGORİTMASI

Bu bölümde daha önce tanımlanan EA'ların kullanıldığı TDP için geliştirilen çözüm algoritması sunulmuştur. Geliştirilen çözüm yönteminde her bir aracın gideceği nokta, tanımlanan bir olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak seçilmektedir. Öncelikle, kullanılan parametreler ve değişkenler tanımlanmıştır. Ardından araçların her bir $(i, j) \in A$ yayı üzerinde hareket etmesi durumunda tüketileceği yaklaşık enerji miktarları hesaplanmıştır. Bu değerlerin hesaplanabilmesi için araçların taşıdığı yük değişkeni miktarı başlangıç noktasında sabit bir değer olarak (araç yük kapasitesinin yarısı) tanımlanmıştır.

Araçların yollar üzerindeki enerji tüketim ortalaması ve varyans değerleri hesaplanırken daha önce tanımlanan EA'lar için enerji tüketimi fonksiyonu ((3.1)) ve olasılık dağılım fonksiyonu ((3.3)) kullanılmıştır. Burada ortalama ve varyans değerleri ilgili fonksiyonların minimum ve maksimum araç hızları arasındaki integrali alınarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların detayları Bölüm 3.2.1'de açıklanmıştır.

Sunulan çözüm algoritmasında tüm araçlar rotalarına depodan ($\{0\}$) başlamaktadır. Her bir araç için araçların buldukları noktadan gidebilecekleri alternatif noktalar toplama/dağıtım önceliklerine uygun olarak ilgili kümeye eklenir (*current_array*). Ardından bu noktaların hepsi için üç farklı durum şartı kontrol edilir. Öncelikle olası hedef noktaya gidildiğinde toplanacak yük miktarı ile beraber aracın yük kapasitesi aşıyorsa bu nokta alternatif noktalar kümesinden silinir. Sonrasında benzer şekilde

olası hedef noktaya gidildiği durumda aracın batarya kapasitesi aşılsa bu nokta ilgili kümeden silinir. Son olarak araçların gidilen hedef noktada mahsur kalmasını (hedef noktadan yeterli enerjisi olmadığı için gidebileceği hiçbir noktanın olmaması durumu) önlemek amacıyla olası hedef nokta ile batarya değişim noktaları arasındaki enerji tüketimleri kontrol edilir. Burada eğer aracın batarya değişim istasyonlarının hiçbirine gidebilecek enerjisi kalmıyorsa yine bu hedef nokta ilgili kümeden silinir. Sonuç olarak araçların gidebilecekleri alternatif noktalar kümesi sadece tüm bu üç şartı sağlayan noktaları içermektedir.

Tüm bu düzenlemelerden sonra eğer aracın gidebileceği hiçbir uygun nokta kalmamışsa, uygun batarya değişim noktaları alternatif noktalar kümesine eklenir. Böylece bataryası tükenmiş olan araç batarya değişim istasyonuna gidebilmektedir. Bu şekilde araçlar sadece ihtiyaç durumlarında batarya değişim istasyonlarına gideceklerdir.

current_array kümesindeki tüm bu düzenlemelerin ardından her bir olası yay için 0 ve 1 arasında bir ağırlıklandırma yapılmıştır. Bu ağırlıklandırma enerji tüketimi düşük olan yaya daha yüksek ağırlık, enerji tüketim değeri yüksek olan yaya daha düşük ağırlık olacak şekildedir. Bunun için tanımlanan ağırlık/olasılık fonksiyonu Algoritma 1’ de gösterilmiştir.

Algorithm 1 Ağırlık/olasılık fonksiyonu

- 1: *current_array* yayların enerji tüketimi değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanır.
 - 2: *first_part* = $\text{length}(\text{current_array})$ 'in %20'si alınır ve değer aşağı yuvarlanır
 - 3: *second_part* = $\text{length}(\text{current_array}) - \text{first_part}$
 - 4: **for** $x \in \text{Range}(1, \text{first_part})$ **do**
 - 5: $\text{weighted_array}[x] = 0.2x / \sum_{i=1}^{\text{first_part}} i$
 - 6: **end for**
 - 7: **for** $y \in \text{Range}(\text{first_part}, \text{second_part})$ **do**
 - 8: $\text{weighted_array}[y] = 0.8y / \sum_{i=\text{first_part}}^{\text{second_part}} i$
 - 9: **end for**
-

Burada enerji tüketimlerinin büyükten küçüğe sıralanmasının ardından dizinin ilk %80'ine daha düşük ağırlık verilmiş, kalan %20'si ise daha yüksek ağırlık almıştır. Böylece düşük enerji tüketimine sahip yayların seçilme olasılığı daha yüksek olacaktır.

Algorithm 2 Çözüm algoritması

- 1: **STEP 1: Algoritmada kullanılan notasyon**
 - 2: state_count = Her bir durum için iterasyon sayısı
 - 3: state[state_count][k]= Her bir $k \in K$ aracının ziyaret ettiği noktalar kümesi;
 $\forall k \in K$
 - 4: current_battery_consumption[k]= $k \in K$ aracının $(i, j) \in A$ yayı üzerindeki enerji tüketimi
 - 5: current_load[k]= $k \in K$ aracının $(i, j) \in A$ yayı üzerinde taşıdığı yük miktarı
 - 6: current_array = Araçların buldukları noktalardan gidebilecekleri noktalar kümesi
 - 7: next_load= Seçilen olası hedef nokta için hesaplanan yük miktarı.
 - 8: next_consumption= Seçilen olası hedef nokta için hesaplanan enerji tüketimi miktarı
 - 9: consumption_array = Seçilen olası hedef nokta ile tüm batarya değişim noktaları arasındaki enerji tüketimleri kümesi
 - 10: weighted_array = current_array'deki yaylara ait enerji tüketimi değerlerine bağlı olarak hesaplanan 0 – 1 arasındaki ağırlık değerleri
 - 11: cumulative_array = weighted_array değerlerinin birikimli olarak toplanmasıyla elde edilen değerler kümesi
 - 12: total_consumption= tüm araçların toplamda tükettiği enerji miktarları
 - 13:
 - 14: **STEP 1: Başlatma**
 - 15: $(i, j) \in A$ yayları için yaklaşık ortalama enerji tüketimi değerleri hesaplanır
 - 16: $(i, j) \in A$ yayları için yaklaşık enerji tüketimi varyans değerleri hesaplanır
 - 17: $(i, j) \in A$ yayları için yaklaşık gerçek enerji tüketim $(\mu + z\sqrt{\sigma})$ değerleri hesaplanır
 - 18: state_count = 0
 - 19: State[0][k] = 0; $\forall k \in K$
 - 20: current_battery_consumption[k] = 0; $\forall k \in K$
 - 21: current_load[k] = 0; $\forall k \in K$
 - 22:
-

Algorithm 3 Çözüm algoritması (devamı)

23: **STEP 2: Eylem seçme**

24: **while** Tüm toplama ve ilgili dağıtım düğümleri ziyaret edilmemiştir **do**

25: Araçların mevcut konumuna göre uygun hedef düğümleri `current_array`'e eklenir.

26: **for** `length(current_array)` **do**

27: **for** $k \in K$ **do**

28: **if** Olası hedef nokta bir toplama (pickup point) konumudur **then**

29: `next_load = current_load[k] + toplama noktasından alınması gereken yük miktarı`

30: **if** `next_load > Yük kapasitesi` **then**

31: Olası hedef nokta `current_array`'den çıkarılır.

32: Break

33: **end if**

34: `next_consumption = current_battery_consumption[k] + kalkış noktası ile hedef nokta arasındaki batarya tüketimi`

35: **if** `next_consumption > Araç batarya kapasitesi` **then**

36: Olası hedef nokta `current_array`'den çıkarılır.

37: Break

38: **end if**

39: **for** Tüm batarya değişim noktaları **do**

40: Olası hedef nokta ile tüm batarya değişim noktaları arasındaki enerji tüketimi hesaplanır.

41: `consumption_array`'e eklenir.

42: **end for**

43: **if** `min(consumption_array) + next_consumption > Araç batarya kapasitesi` **then**

44: Olası hedef nokta `current_array`'den çıkarılır

45: Break

46: **end if**

47: **end if**

Algorithm 3 Çözüm Algoritması (devamı)

```

48:         if Olası hedef nokta bir dağıtım (delivery) konumudur & ilgili toplama
           noktası  $k \in K$  aracı tarafından ziyaret edilmiştir then
49:             next_consumption = current_battery_consumption[k] + kalkış noktası
           ile hedef nokta arasındaki batarya tüketimi
50:             if next_consumption > araç batarya kapasitesi then
51:                 Olası hedef nokta current_array'den çıkarılır
52:                 Break
53:             end if
54:             for Tüm batarya değişim noktaları do
55:                 Olası hedef nokta ile tüm batarya değişim noktaları arasındaki enerji
           tüketimi hesaplanır.
56:                 consumption_array'e eklenir.
57:             end for
58:             if min(consumption_array) + next_consumption > araç batarya kapa-
           sitesi then
59:                 Olası hedef nokta current_array'den çıkarılır
60:                 Break
61:             end if
62:         end if
63:     end for
64: end for
65: if  $k \in K$  aracının batarya değişim noktaları dışında gidebileceği nokta yoktur
           then
66:     current_array'e uygun batarya değişim noktaları eklenir
67: end if
68: Algoritma 1 kullanılarak weighted_array hesaplanır.
69: for  $i \in \text{Range}(1, \text{lenght}(\text{weighted\_array}))$  do
70:     cumulative_weight[i] = cumulative_weight[i] + weighted_array[i]
71: end for

```

Algorithm 3 Çözüm algoritması (devamı)

```

72:   0 ile 1 arasında tekdüze bir dağılımdan rastgele bir  $e$  sayısı üretilir
73:   Oluşturulan  $e$  rastgele sayısı ve cumulative_weight[i] değerleri kullanılarak
      current_array içerisinde bir hedef varış noktası seçilir
74:   for  $k \in K$  do
75:     current_battery_consumption[k] güncellenir.
76:     if seçilen hedef nokta, toplama konumudur then
77:       Toplama noktasının yük toplamı current_load[k]'a eklenir.
78:     end if
79:     if Seçilen hedef nokta, dağıtım konumudur then
80:       Dağıtım noktasının yük miktarı current_load[k]'dan azaltılır.
81:     end if
82:     if Seçilen hedef nokta, batarya değişim istasyonudur then
83:       total_consumption = total_consumption + current_battery_consumption[k]
84:       current_battery_consumption[k] = 0
85:     end if
86:     Hedef nokta state[state_count][k]'ya eklenir.
87:     state_count = ++
88:   end for
89: end while
90: for  $k \in K$  do
91:   state[state_count][k] = 0
92:   next_consumption = current_battery_consumption[k] + Depoya geri dön-
      mek için tüketilen enerji miktarı
93:   if next_consumption > araç batarya kapasitesi then
94:     Araç önce en yakın batarya değişim istasyonuna ardından depoya giderek
      rotasını tamamlar
95:   end if
96: end for
97:

```

Sunulan çözüm yönteminde tüm toplama noktaları sadece bir kez ziyaret edilebilir ve dağıtım noktaları birden fazla kez ziyaret edilebilmektedir. Ele alınan problemde ortak bir toplama noktası talebine sahip farklı dağıtım noktaları bulunmaktadır. Burada eğer ortak toplama noktasına ait dağıtım noktalarının hepsi aynı araç tarafından daha önce gezildiyse, bu teslimat noktası sadece bir kez ziyaret edilecektir. Bu şekilde araçların fazladan bir noktaya daha gitmesi önlenmekte ve enerji tüketimi de optimal sonuca daha fazla yaklaşmaktadır.

Önerilen algoritma büyük ölçekli problem örneklerinde optimal çözüm veren yöntemlere göre daha hızlı uygun bir çözüm vermektedir. Bu yöntem ile ilgili performans analizleri ve örnek çözümleri 4. BÖLÜM: . bölümde sunulmuştur.

4. BÖLÜM

SAYISAL ANALİZLER

Bu bölümde, önerilen matematiksel modelin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla yapılan sayısal analizlerin sonuçları sunulmuştur. Sunulan modeli çözmek için ILOG-OPL CPLEX 12.8 optimizasyon paketi kullanılmıştır. Analizler, 16 GB belleğe sahip i7 işlemcili, 2.4 GHz CPU'lu bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde numerek analizler için kullanılan veri setleri Ek'te özetlenmiştir.

Bölümün geri kalanı aşağıdaki gibi yapılandırılmıştır. Alt bölüm 4.1'de, gerçek hayattaki çoktan-çoğa TDP örneği için, teslimat planı ve önerilen modelden elde edilen ilgili anahtar performans göstergeleri (APG) sunulmuştur. Daha sonra, enerji tüketimini detaylı tahmin etmenin faydasını açıklamak amacıyla analiz sonuçları açıklanmıştır. Ardından, elektrikli araç sürücülerinin menzil kaygısına yönelik yapılan analizler ve APG'ler gösterilmiştir.

4.1 ÖRNEK OLAY İNCELEMESİ

Çalışmanın bu alt bölümünde, önerilen modele ait yaklaşık optimal sonuçları göstermek amacıyla Türkiye'deki bir lojistik ağ kullanılmıştır. Söz konusu ağda, bir süpermarket zincirinin şubeleri olan 12 nokta vardır, bunlardan 4'ü toplama noktası ve kalan 8'i ise eşleştirilmiş dağıtım noktalarıdır. Bahsedilen ağda ayrıca depo ve batarya değişim konumları olarak hizmet veren dört düğüm daha vardır. Şekil 6'da, kullanılan lojistik ağdaki tüm noktaların konumları gösterilmektedir. Tüm rotaların başladığı ve bittiği depo, aynı zamanda batarya değişim işlemi için de kullanılabilir. Depo, batarya değişim konumları, toplama ve dağıtım düğümleri dahil olmak üzere ağdaki tüm düğümler Ankara, Türkiye'de bulunmaktadır.

Örnek olay incelemesi için, bu bölümde kullanılan veriler Tablo 12'de özetlenmiştir. Her bir düğümde yükleme/boşaltma işlemleri için gerekli olan hizmet süreleri 20 ile 50 dakika arasından rastgele belirlenmiştir, bu sürenin batarya değişim konumlarında (S1, S2, S3, S4) 15 dakika ve depoda 10 dakika olduğu varsayılmıştır. Toplama (P) ve ilgili dağıtım (D) çiftleri ilişkileri ve talepler Tablo 13'te sunulmuştur. Toplam



Şekil 6. Örnek olayda kullanılan lojistik ağ gösterimi

enerji tüketiminin hesaplanmasında kullanılan araçla ilgili parametrelerin değerleri Tablo 14'te belirtilmiştir. Düğümler arasındaki mesafeler ve seyahat süreleri Google Haritalar kullanılarak elde edilmiştir. Ek'teki Tablo 15, her bir yay için mesafe matrisini içermektedir. Her yay için ortalama seyahat süreleri, minimum ve maksimum hareket hızları ve ortalama hareket hızları, Ek'teki 16, 17, 18 ve 19 Tablolarında sunulmaktadır. Belirli düğümler arasında yollar olmadığı için ağ toplamda 258 yaydan oluşmaktadır. Örneğin bir araç, gerekli yükü almadan önce depodan teslimat noktasına doğrudan hareket edemez. Ek'te verilen tablolarda, (-) ile gösterilen hücreler, kullanılmayan yaylara atıfta bulunmaktadır.

Önerilen yaklaşımsal model, bahsedilen çoktan-çoğa TDP'deki batarya tükenmesi belirsizliğini ele almaktadır. Buna göre, bir aracın ilgili turu tamamlamadan bataryasının bitmesi durumuyla karşı karşıya kalma olasılığı 0,95 olarak varsayılmış ve buna bağlı olarak örnek olay için z değeri 1,96 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4, önerilen modelden elde edilen optimal sonuçları sunmaktadır ve bahsedilen yaklaşımlar altında elde edilen teslimat planını, ilgili enerji tüketim miktarlarını, mesafeyi ve seyahat süresini içermektedir. İlgili turlarda hizmet düzeyini (0,95) karşılamak için gerçek enerji hesaplamasına ihtiyaç vardır. Sonuçlar, teslimat planının müşteri taleplerini karşılarken aracın batarya değişim istasyonunu iki kez ziyaret ettiğini göstermektedir.

	Turlar	MER	Varyans (kWh)	AMER	Mesafe (km)	Seyahat Süresi (saat)
Araç 1 Rotası*	T1 Depo - P4 - P3 - S4	7.0	1.0	9.0	62.8	2.7
	T2 S4 - D4 - D5 - D6 - P2 - D2- P1 - S3	12.0	0.7	13.6	97.1	6.1
	T3 S3 - D8 - D1 - D7 - D3 - Depo	7.2	0.6	8.7	69.8	3.1
Toplam		26.2	2.2	31.3	229.7	11.9

*İkinci araç kullanılmamıştır.

MER: Minimum gerekli enerji miktarı (kWh)

AMER: Gerçek minimum gerekli enerji tüketimi (kWh)

Tablo 4. Örnek olayın yaklaşık optimal sonuçları

4.2 ENERJİ TÜKETİMİNİ DETAYLI TAHMİN ETMENİN FAYDALARI

Bu alt bölüm, tahmin edilen ve hesaplanan gerçek enerji tüketimi değerlerini kullanarak belirsizliği ele almanın ve enerji tüketimini tahmin etmenin faydalarını ortaya koymaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada kullanılan yaklaşımın, mevcut yaklaşımın¹ ve belirsizliğin ele alınmadığı deterministik yaklaşımın sonuçları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Tahmini değerler, karşılaştırılan yaklaşımların sonuçlarından elde edilen değerlerdir. Model sonucunda elde edilen rotalar için gerçek minimum enerji tüketimi değerleri ise bu çalışmada açıklanan yaklaşım kullanılarak (rotalara ait beklenen enerji tüketimi ve varyans değerleri Riemann Toplamı yöntemi yerine integral kullanılarak hesaplanmıştır) hesaplanmıştır.

Belirsizliğin ele alınmadığı deterministik yaklaşımda Denklem 3.34'teki ortalama enerji tüketimi ve varyans değerleri göz ardı edilmiştir. Bu yaklaşımda, her tur için enerji tüketimi, enerji tüketimi fonksiyonu (3.5) kullanılarak hesaplanmıştır.

Mevcut yaklaşımda, k aracının (i, j) yayındaki enerji tüketimi belirsizdir ve normal dağılıma sahip bir rastgele $e_{i,j,k}$ değişkeni ile temsil edilir. Bu değişken ortalaması $\mu_{i,j,k}$ ve standart sapması $\sigma_{i,j,k}$ olan bir değişkendir. $\mu_{i,j,k}$ değerleri, bir fonksiyon kullanılarak belirlenmiştir. Her yay için ortalama enerji tüketimi $\psi(d_{i,j}, \nu_{i,j}) = 0.125(d_{i,j} + (\sqrt{|15.2 - \nu_{i,j}|}))$ kullanılarak hesaplanır, burada 0.125 (kWh) enerji tüketim oranıdır, 15.2m/s ideal hızdır, $d_{i,j}$ mesafeleri ifade eder ve $\nu_{i,j}$ o yay için ortalama seyahat hızını ifade eder. Her yay için ortalama enerji tüketimini hesapladıktan sonra, karşılık gelen standart sapmaları ($\sigma_{i,j,k}$) hesaplamak için sabit bir varyasyon katsayısı (0.2) kullanılmıştır.

¹ Soysal ve diğ. (2020) tarafından önerilen enerji tüketimi yaklaşımı kullanılmıştır.

		Deterministik Model	Mevcut yaklaşım**	Bu çalışmadaki yaklaşım**
Araç 1 Rotası*	T1	Depo - P4 - P3 - D4 - D5 - S2	Depo - P4 - P3 - D5 - D6 - P2 - S2	Depo - P4 - P3 - S4
	T2	S2 - D6 - P2 - D2 - P1 - D8 - D1 - D7 - D3 - Depo	S2 - D2 - P1 - D8 - D4 - D1 - D7 - D3 - Depo	S4 - D4 - D5 - D6 - P2 - D2 - P1 - S3
	T3	-	-	S3 - D8 - D1 - D7 - D3 - Depo

*Araç 2 kullanılmamıştır

**z = 1.96, varyasyon katsayısı = 0.2

Tablo 5. Farklı yaklaşımlar sonucu elde edilen dağıtım planları

Tablo 5, deterministik ortam, Soysal ve diğ. (2020)'nin yaklaşımı ve bu çalışmada kullanılan yaklaşım ile elde edilen teslimat planlarını sunmaktadır. Sonuçlar, her üç teslimat planında da araçların müşteri taleplerini karşılarken en az bir kez bir batarya değişim noktasını ziyaret ettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, model, üç farklı enerji tüketimi yaklaşımı dikkate alındığında farklı teslimat planları sunmaktadır.

		Deterministik		Mevcut yaklaşım		Bu çalışma	
		Tahmini	Gerçek**	Tahmini	Gerçek**	Tahmini	Gerçek**
Araç 1 Rotası*	T1	10.5	13.1	16.1	15.3	9.1	9.1
	T2	15.0	17.5	16.5	16.7	13.9	13.8
	T3			-		8.9	8.8
Toplam		25.5	30.5	32.6	32.0	31.9	31.7

*Araç 2 kullanılmamıştır.

**z = 1.96, varyasyon katsayısı = 0.2

Tablo 6. Tahmini ve gerçek minimum gereken enerji miktarı hesaplamaları (kWh)

Tablo 6, her tur için kWh cinsinden tahmini ve gerçek minimum gerekli enerji miktarlarını sunmaktadır. Tahmini enerji tüketimi miktarı, ilgili yaklaşıma ait modelden elde edilmektedir. Rotaların gerçek minimum gerekli enerji tüketimi miktarları ise şu şekilde elde edilmiştir: İlgili yaklaşımlardan elde edilen rotalar için beklenen enerji tüketimi ve varyans değerleri bu makalede kullanılan enerji tahmin yöntemi ile elde edilmiştir ve ardından hizmet seviyesi değeri ile birlikte $(\mu + z\sqrt{\sigma})$ gerçek minimum gerekli enerji tüketimi değerleri hesaplanmıştır. Burada gerçek enerji tüketimini hesaplamak amacıyla elde edilen rotaya ait beklenen enerji tüketimi ve varyans değerleri integral kullanılarak hesaplanmıştır.

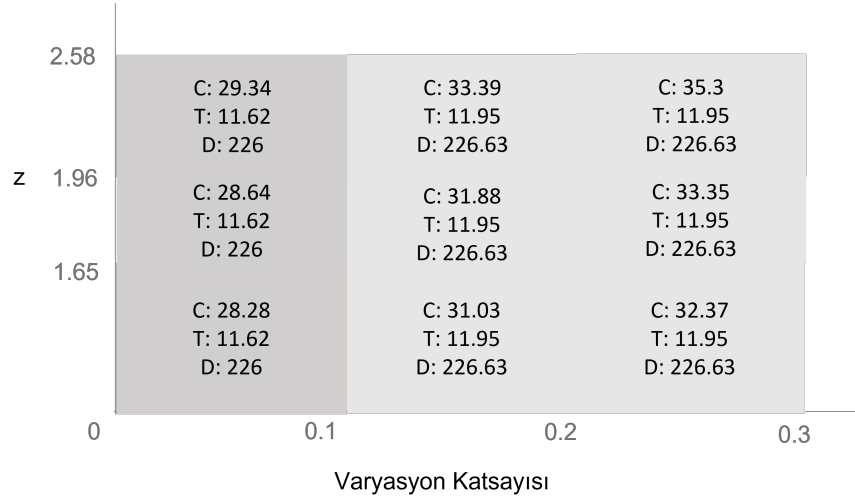
Sonuçlara göre, belirsizliğin dikkate alınmadığı deterministik varsayımda, tahmini enerji tüketiminin toplamı 15 kWh'dir (Tur 2 için). Araç batarya değişim istasyonuna gitmeden önce bataryada ($17 - 15 = 2kWh$) enerji kalması beklenmektedir. Ancak, ilgili tur için (3.36) ve (3.37) denklemleriyle hesaplanan (0.95) hizmet seviyesini karşılamak için gereken gerçek enerji tüketimi miktarı 17.5 kWh'tir. Bu durumda hesaplanan gerçek enerji tüketimi miktarının, batarya kapasitesinden (17 kWh) daha yüksek olduğu görülmüştür. Belirsizliğin göz ardı edildiği modelin, ele alınan problem için uygun bir çözüm olmadığı söylenebilir. Bu teslimat planı, istenenden daha sık batarya tükenmesine neden olacağından ve sürücülerin menzil kaygısını artıracığından pratikte uygulanamaz. Belirsizliği ele alan çözüm yöntemleri için durum böyle değildir. Bu yöntemler belirlenen hizmet seviyesini karşılayarak, sürücülerin menzil kaygılarının daha iyi yönetilmesine katkıda bulunulabilir.

Soysal ve diğ. (2020)'nin yaklaşımıyla elde edilen teslimat planında gerçek hesaplanan enerji tüketim miktarlarının tüm turlarda batarya kapasitesi kısıtlarını karşıladığı görülmektedir. İlgili güzergahın toplam gerçek enerji tüketimi miktarının bu çalışmada sunulan yaklaşıma göre %1.02 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

4.3 HİZMET SEVİYESİ VE VARYASYON KATSAYISININ DAĞITIM PLANLARINA ETKİSİ

Bu alt bölümde, belirsizliği ele almanın faydalarını ortaya koymak amacıyla 9 farklı problem örneği çözülmüştür ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Belirsizliği dikkate almanın potansiyel faydalarını değerlendirmek için örnek olay, farklı varyasyon katsayısı (0.1, 0.2, 0.3) ve z değeri (1.65, 1.96, 2.58) kombinasyonları ile çözülmüştür. Şekil 7'de, her bir örnek problem çözümüne ait APG'ler sunulmuştur. Gri tonlama rotaları temsil eder, aynı renkteki kombinasyonların aynı teslimat rotası sonucunu verdiğini göstermektedir.

Sonuçlar, belirsizliği ele almanın dağıtım planlarını ve hesaplanan gerçek enerji tüketimini etkilediğini göstermektedir. Varyasyon katsayısı ve farklı hizmet seviyesi değerleri kombinasyonlarına göre bu etki artabilmektedir. Varyasyon katsayısı ve hizmet seviyesindeki artış, ortaya çıkan enerji tüketimi gereksinimleri ve dolayısıyla tes-



C: Enerji tüketimi (kWh)
T: Seyahat süresi (saat)
D: Mesafe (km)

Şekil 7. Farklı hizmet seviyeleri ve varyasyon katsayısı kombinasyonlarıyla elde edilen sonuçlar

limat planları üzerinde daha fazla etkiye yol açmaktadır. Ele alınan örneklerde varyasyon katsayısının teslimat planlarına etkisinin daha çok olduğu görülmektedir. Varyasyon katsayısının 0.1 olduğu teslimat problemlerinde araç batarya değişim noktasına bir kez uğrarken, katsayının 0.2 ve 0.3 olduğu durumlar için araç batarya değişim noktasını iki kez ziyaret etmiştir. Bu durum varyasyon katsayısının doğrudan beklenen enerji tüketimini ve yaklaşık enerji tüketimi varyansını etkilemesinden kaynaklanmaktadır.

4.4 SEZGİSEL ÇÖZÜM YAKLAŞIMININ PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde örnek olayda kullanılan parametreler ve veri setleri ile Bölüm 3.3'te açıklanan sezgisel çözüm algoritması çalıştırılmıştır. Burada sunulan çözüm yaklaşımında dağıtım planı rastgele üretilen 0-1 arasındaki bir değişken ve tanımlanan ağırlık/olasılık fonksiyonu kullanılarak bulunmaktadır. Bu durumda algoritma ilk kez çalıştırıldığında optimalden uzak sonuçlar da verebilmektedir. Dolayısıyla sonuçların optimale yaklaşması için modelin birçok kez çalıştırılması gerekebilir. Bu amaçla algoritma

1000 tekrar olacak şekilde çalıştırılmıştır ve tüm iterasyonlar arasındaki en iyi sonuç saklanmıştır. Sunulan çözüm yöntemi tek bir uygun çözümü yaklaşık 19 saniyede vermektedir. Algoritmanın 1000 kez çalışması yaklaşık 5.5 - 6 saatte tamamlanmaktadır. CPLEX Çözücü’de aynı veri seti ile sunulan modelin optimal çözümü yaklaşık 10 saatte alınmaktadır.

	Turlar	Integral **			Riemann Toplamı**			Riemann Toplamı**			
		Yük Karar Değişkeni			Yük Karar Değişkeni			Yük Sabit			
		Beklenen	Varyans	Gerçek	Beklenen	Varyans	Gerçek	Beklenen	Varyans	Gerçek	
Araç 1 Rotası*	T1	Depo - P4 - P3 - D5 - D6 - P2 - D2 - S2	14.11	1.37	16.40	14.14	1.38	16.44	15.17	1.38	17.47
	T2	S2 - P1 - D8 - D4 - D1 - D7 - D3 - Depo	12.61	0.92	14.49	12.64	0.93	14.53	13.33	0.93	15.22
Toplam			26.7	2.3	30.9	26.8	2.3	31.0	28.5	2.3	32.7

*Araç 2 kullanılmamıştır

**z = 1.96, varyasyon katsayısı = 0.2

Tablo 7. Sezgisel yaklaşım ile elde edilen dağıtım planı ve enerji tüketimi değerlerinin (kWh) karşılaştırması

Tablo 7’de öncelikle sezgisel yöntemden elde edilen dağıtım planlaması sunulmuştur. Ardından bu rotadaki turlara ait enerji tüketimi değerleri integral ve Riemann Toplamı yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlarda görüldüğü üzere sunulan sezgisel çözüm yönteminden elde edilen sonuçların CPLEX Çözücü’den elde edilen yaklaşık optimal sonuçlara (Tablo 4) göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki temel sebep Bölüm 3.2.2’de sunulan modelde varyans değerlerinin hesaplanmasında $Z_{i,j,k,t}^{approx}(\nu_{i,j})$ fonksiyonunun kullanılmasıdır. Burada yük karar değişkeni sabit bir yük değeri ile değiştirildiğinden beklenen enerji tüketiminin ve varyans değerlerinin daha yüksek hesaplanmasına sebep olabilmektedir. Tablo 7’de görüldüğü gibi sezgisel yaklaşımdan elde edilen sonuç (3.36) kısıtını sağlayamamaktadır (Tur 1’de batarya kapasitesi aşılmıştır). Dolayısıyla bu rota CPLEX Çözücü için uygun olmayan bir çözümdür.

Sunulan çözüm algoritmasında yük karar değişkeni dinamik olarak takip edilmektedir ve beklenen enerji tüketimi ile varyans değerleri de yaklaşık fonksiyonla değil $Z_{i,j,k,t}(\nu_{i,j})$ enerji tüketimi fonksiyonu ile integral kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu yöntemin dağıtım rotalarının planlanmasında daha doğru sonuçlar verdiği söylenebilir.

4.5 BÜYÜK VERİ SETLERİ İLE ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMLERİ

Bu bölümde sunulan sezgisel çözüm yöntemi kullanılarak dört farklı örnek olay çözülmüştür. Ardından bu örnek olaylara ait dağıtım planları ve her tura ait enerji tüketimi değerleri (kWh) sunulmuştur. Örnek olay çözümleri için gerekli mesafe matrisi verileri “The Pollution-Routing Problem Instance Library ²” isimli veri kütüphanesinden alınmıştır. Burada örnek olayların her biri için farklı büyüklükte veri setleri seçilmiştir³. Araçların hızlarının üst ve alt limitleri belirli aralıklarda rastgele değerler olarak belirlenmiştir. Minimum araç hızları [5.6, 11.1] m/s ve maksimum araç hızları ise [16.7, 22.2] m/s’dir. Her $(i, j) \in A$ yayı için ortalama araç hızları o yaya ait minimum ve maksimum araç hızlarının toplamının yarısı hesaplanarak elde edilmiştir. Varyasyon katsayısı ise 0.2 olarak belirlenmiştir.

Örnek olaylarda kullanılan araçların batarya kapasiteleri 17 kWh’dir ve örnek olay 1 ve 2’ de 2 araç, örnek olay 3 ve 4’te 4 araç mevcuttur. Araç sayılarındaki farklılık veri setlerinin büyüklükleriyle ilişkilidir. Her bir örnek olaya ait toplama ve dağıtım eşleştirmeleri ile ilgili çifte ait yük talepleri Tablo 20’de sunulmuştur. Her bir örnek olay sezgisel algoritma ile 3 saat çalıştırıldıktan sonra sonuçlar alınmıştır. Veri setlerinin büyük olması sebebiyle, CPLEX çözücü aynı veri setlerinde çözüm vermemektedir. Örnek olaylara ait sonuçlar Tablo 8, 9, 10 ve 11’de sunulmuştur.

Araçlar	Turlar	Rotalar	Enerji Tüketimi (kWh)
Araç 1	T1	Depo - P4 - P2 - D8 - D2 - D3 - P3 - D7 - D6 - P7 - D5 - D14 - S4	16.85
	T2	S4- D4 - Depo	3.02
Araç 2	T1	Depo - P5 - D11 - P1 - D2 - D1 - P6 - D10 - D9 - D13 - D12 - Depo	11.71
	Toplam		31.59

Tablo 8. Örnek olay 1’e ait dağıtım planı ve enerji tüketimi

Tablo 8’de büyük veri seti le çözülen ilk örnek olaya ait dağıtım planı ve rota boyunca harcanan enerji tüketimi miktarları verilmiştir. Birinci örnek olayda 7 toplama

² “The Pollution-Routing Problem Instance Library”, <http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm> (erişim: 16.03.2022)

³ Örnek Olay 1: UK25_01, Örnek Olay 2: UK50_01, Örnek Olay 3: UK75_01, Örnek Olay 4: UK100_01, <http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm> (erişim: 16.03.2022)

noktası, 14 dağıtım noktası ve 5 batarya değişim noktası bulunmaktadır. Bu veri seti ile sezgisel algoritmanın tek iterasyon çalışarak uygun çözüm vermesi yaklaşık 1 dakika sürmektedir. Sonuçlardan görüldüğü üzere rota boyunca iki araç kullanılmıştır ve araçlardan yalnızca bir tanesi batarya değişim noktasını ziyaret etmiştir.

Araçlar	Turlar	Rotalar	Enerji Tüketimi (kWh)
Araç 1 Rotası	T1	Depo - P6 - P15 - P10 - D28 - P8 - D18 - D10 - D14 - D16 - P11 - D27 - D19 - D17 - P13 - D23 - D20 - D21 - D30 - S6	15.07
	T2	S6 - Depo	1.09
Araç 2 Rotası	T1	Depo - P5 - P3 - P9 - D5 - D15 - D9 - D12 - D6 - D8 - P1 - D2 - P7 - D1 - D13 - P4 - P2 - D14 - D4 - D15 - D7 - D3 - P12 - S5	16.08
	T2	S5 - D22 - D29 - D26 - P14 - D24 - D25 - D26 - D11 - Depo	7.05
Toplam			39.29

Tablo 9. Örnek olay 2'ye ait dağıtım planı ve enerji tüketimi

Tablo 9'da Örnek olay 2'ye ait araçların rotaları ve bu rotalar boyunca harcadıkları enerji miktarları sunulmuştur. Bu örnek olayda 15 toplama noktası, 30 dağıtım noktası ve 6 batarya değişim istasyonu bulunmaktadır. Bu veri seti ile sezgisel algoritmanın tek iterasyon çalışarak uygun çözüm vermesi yaklaşık 2 dakika sürmektedir. Çözülen bu örnek olayda yine mevcut tüm araçlar kullanılmış ve her iki araç da batarya değişim noktasına uğramıştır.

Araçlar	Turlar	Rotalar	Enerji Tüketimi (kWh)
Araç 1 Rotası	T1	Depo - P3 - P20 - D2 - P15 - D28 - D12 - D36 - P1 - D38 - P18 - D34 - D2 - D24 - P4 - D37 - D7 - S3	16.94
	T2	S3 - D5 - D1 - D6 - Depo	5.06
Araç 2 Rotası	T1	Depo - P10 - P8 - P11 - D22 - D23 - D21 - D15 - P5 - D10 - D16 - D20 - P16 - D8 - P2 - D4 - D30 - D9 - D3 - D29 - S4	16.96
	T2	S4 - Depo	1.01
Araç 3 Rotası	T1	Depo - P21 - P7 - P6 - D40 - D14 - D39 - D11 - P23 - D43 - P22 - D44 - D42 - D12 - D13 - D41 - P9 - S9	16.14
	T2	S9 - D18 - D17 - D19 - Depo	5.03
Araç 4 Rotası	T1	Depo- P12 - P14 - P13 - D25 - P19 - D24 - D27 - P17 - D32 - D35 - D31 - D33 - D26 - Depo	12.48
Toplam			73.62

Tablo 10. Örnek olay 3'e ait dağıtım planı ve enerji tüketimi

Tablo 10 ve Tablo 11'de sırasıyla üçüncü ve dördüncü örnek olaylara ait teslimat plan-

Araçlar	Turlar	Rotalar	Enerji Tüketimi (kWh)
Araç 1 Rotası	T1	Depo - P2 - P30 - P23 - D46 - D59 - D60 - D3 - P21 - P15 - D58 - D29 - D42 - P11 - D23 - D22 - D45 - D4 - S6	16.75
	T2	S6 - P24 - D41 - P20 - D47 - D49 - D39 - P16 - D40 - D38 - D32 - D31 - D30 - D48 - Depo	15.10
Araç 2 Rotası	T1	Depo - P10 - P14 - P12 - D25 - P27 - D20 - D26 - D21 - D28 - P4 - D7 - D53 - D6 - D24 - D8 - Depo	15.85
Araç 3 Rotası	T1	Depo - P8 - P28 - D54 - P9 - D17 - D16 - P13 - P26 - D55 - D19 - P25 - D27 - D52 - D28 - D50 - S9	16.78
	T2	S9 - D51 - D18 - Depo	3.68
Araç 4 Rotası	T1	Depo - P19 - D37 - P29 - P7 - D37 - D15 - D57 - P22 - D43 - D14 - D56 - P17 - P1 - S3	16.63
	T2	S3 - D34 - D2 - P18 - D36 - D35 - D1 - D33 - P5 - D9 - P3 - D27 - D5 - P6 - D10 - S3 -	16.92
	T3	S3 - D12 - D44 - D11 - D13 - Depo	3.89
Toplam			105.61

Tablo 11. Örnek olay 4'e ait dağıtım planı ve enerji tüketimi

ları ve araçların her turda harcadıkları enerji miktarları verilmiştir. Örnek olay 3'te 23 toplama noktası, 44 dağıtım noktası ve 9 batarya değişim istasyonu; örnek olay 4'te ise 30 toplama noktası, 60 dağıtım noktası ve 11 batarya değişim noktası bulunmaktadır. Örnek olay 3 ve 4'te sezgisel algoritmanın tek iterasyon çalışarak uygun çözüm vermesi sırasıyla yaklaşık 5 ve 7 dakika sürmektedir. Her iki örnek olayda da mevcut araçların tümü kullanılmıştır ve sadece bir araç batarya değişim istasyonuna uğramadan rotasını tamamlamıştır.

SONUÇ

Yük taşımacılığı, hammadde veya bitmiş ürünlerin tedarik zinciri bileşenleri arasındaki hareketini sağlamaktadır. Böylelikle üretim, ticaret ve tüketim faaliyetlerini de desteklemektedir. Fakat günümüzde araç sayısında yaşanan artış özellikle kentsel alanlarda trafik yoğunluğuna, araçlardan yayılan kirli gaz salınımına ve gürültüye sebep olmaktadır. Hükümetlerin temiz enerji kaynaklarının kullanımına yönelik yaptığı teşvik ve yaptırımlar sonucu, firmalar operasyonlarını daha sürdürülebilir hale getirmek için çalışmaktadırlar. Bu bağlamda, lojistik firmaları filolarına elektrikli araçları dahil etmektedirler. EA'ların taşımacılık faaliyetlerinde kullanımıyla beraber bazı problemler de ortaya çıkmaktadır. Temel problemlerden biri, EA'ların menziline geleneksel yakıtlı araçlara göre daha kısa olmasıdır ve buna bağlı olarak batarya değişim/şarj istasyonlarına uğrama sıklığının artmasıdır. Bir diğer problem ise, batarya şarj/değişim istasyonları konusundaki altyapı eksiklikleridir. Buna bağlı olarak filosunda EA bulunan bir lojistik firması için uygun dağıtım güzergahlarının belirlenmesi önemlidir.

Bu çalışmada EA filosuna sahip bir lojistik firmanın şehir içi dağıtım planlamasının yapılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla her toplama noktasının birden fazla dağıtım noktasına sahip olduğu çoktan-çoğa TDP ele alınmıştır. Ele alınan problemde araçların dağıtım çiftlerine ait talepleri karşılanırken EA'ların sürüş menziline de göz önünde bulundurulması söz konusudur. İhtiyaç durumunda batarya değişim istasyonuna giderek boş bataryanın tam dolu bataryalarla değişimini sağlayacak bir dağıtım planlamasının yapılması amaçlanmaktadır. Belirlenen güzergah üzerinde trafik, kaza, hava ve yol şartlarından kaynaklı araç bataryasının tükenmesi riski her zaman bulunmaktadır. Bu durum araç kurtarma hizmeti ve talepleri zamanında teslim edememe gibi maliyetleri de içermektedir. Bu nedenle sürücülerin menzil kaygısını en aza indirmek için her turda batarya tükenmesi durumuyla karşılaşma olasılığına ait hizmet seviyesi belirlenmiştir.

Ele alınan problemde EA'ların rota boyunca harcadıkları beklenen enerji miktarını hesaplamak için Asamer ve diğ. (2016) tarafından önerilen enerji tüketimi fonksiyonu kullanılmıştır. Burada aracın rota boyunca tükettiği enerji miktarı aracın hızına, özelliklerine, noktalar arasındaki mesafeye ve aracın taşıdığı yük miktarına göre de-

ğışmektedir. Bu çalışmada ele alınan problem için Kuadratik Şans Kısıtlı Karma Tam Sayılı Programlama yöntemi kullanılmış ve sezgisel bir çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Önerilen matematiksel modelde ve çözüm yaklaşımında aracın rotası boyunca harcadığı enerji miktarının en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. İlgili literatür incelendiğinde çoktan-çoğa TDP problemine elektrikli araçların dahil edildiği, araç hızlarının ve enerji tüketiminin belirsiz olduğu varsayımının kullanıldığı bir çalışma bulunmamıştır.

Bu çalışma kapsamında öncelikle çözülen örnek olayın sonuçları sunulmuştur. Ardından bu çalışmada kullanılan enerji tüketimi yaklaşımı, mevcut yaklaşımın ve belirsizliğin ele alınmadığı deterministik yaklaşımın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen üç dağıtım planında da araçlar en az bir kere batarya değişim istasyonunu ziyaret etmişlerdir ve tüm çözüm yaklaşımlarında sadece tek araç kullanılmıştır. Deterministik modelin çözümü sonucu elde edilen dağıtım planında gerçek enerji tüketimi değerleri araç batarya kapasitesini aştığından dolayı ele alınan problem için uygun bir çözüm yaklaşımı olmadığı sonucuna varılmıştır. Diğer yandan mevcut yaklaşım kullanılarak elde edilen rotanın araç batarya kapasitesi kısıtlarını karşıladığı ve rota boyunca tüketilen enerji miktarının (kWh) bu çalışmadan elde edilen rotanın enerji tüketiminden %1.02 daha fazla olduğu görülmüştür.

Belirsizliği ele almanın sonuçlara etkilerini incelemek amacıyla belirlenen varyasyon katsayısı ve hizmet seviyeleri kombinasyonları ile farklı problem örnekleri çözülmüştür. Araç hızlarına ait varyasyon katsayısı doğrudan beklenen enerji tüketimini ve enerji tüketimi varyansı değerlerini değiştirdiği için enerji tüketimi miktarını ve dağıtım planlarını da etkilemiştir. Katsayının 0.1 olduğu durum için araçlar rota boyunca bir kez batarya değişim noktasına uğramıştır. Varyasyon katsayısının 0.2 ve 0.3 olduğu durumlar için ise elde edilen rotalar aynıdır ve batarya değişim istasyonu 2 kez ziyaret edilmiştir.

Geliştirilen çözüm algoritması performansı incelendiğinde sezgisel yaklaşım sonucu elde edilen rota boyunca harcanan enerji tüketiminin yaklaşık optimal çözümden elde edilen enerji tüketimi değerinden daha az olduğu görülmektedir. Bu durum sunulan matematiksel modelde varyans değerlerinin hesaplanmasında kullanılan yaklaşık fonksiyonda yük karar değişkeninin sabit bir yük değeri ile değiştirilmesinden kay-

naklanmaktadır. Burada sezgisel yöntemden elde edilen sonuçlar sunulan matematiksel model için uygun olmayan bir çözümdür. Bu durum aynı zamanda aracın taşıdığı yük miktarının anlık olarak takip edilmesi ve beklenen değer ile varyans değerlerinin de anlık yük durumlarına göre hesaplanmasının modelden elde edilecek sonuçları değiştirebileceğini göstermektedir.

Genel olarak bakıldığında bu çalışmada araç hızındaki ve enerji tüketimindeki belirsizlik ele alınarak bir lojistik firmanın toplama ve dağıtım taleplerinin karşılanması amacıyla bir karar destek modeli sunulmuştur. Yapılan sayısal analizler hem bu çalışmada sunulan yaklaşımsal modelin hem de araç hızlarındaki belirsizliği ele almanın önemini vurgulamaktadır. Oluşturulan toplama ve dağıtım planlarında belirsizliğin dikkate alınması sürücülerin menzil kaygısını azaltarak aracın yolda kalması, ürünlerin zamanında teslim edilememesi gibi beklenmeyen maliyetlerin oluşmasının da önüne geçmektedir. Böylece lojistik firmalarındaki karar vericiler oluşturulan bu karar destek modelini kullanarak filolarındaki elektrikli araçların dağıtım planlarını sürücülerin menzil kaygısını en aza indirecek şekilde yapabileceklerdir. Aynı zamanda araçların enerji tüketimi maliyetleri de minimum seviyede tutularak toplama ve dağıtım talepleri karşılanabilecektir.

Bu çalışmada sadece elektrikli araçlardan oluşan bir filonun olması, tek bir belirsizlik türünün ele alınması ve sürücülerin çalışma saatlerinin dikkate alınmaması çalışmanın kısıtları arasındadır. Konuyla ilgili gelecekteki çalışmalarda, bu çalışmada ele alınan problem tipi için talep, seyahat süresi veya batarya şarj/değişim istasyonlarında bekleme sürelerindeki belirsizlik durumları ele alınabilir. Aynı zamanda sürücülerin çalışma saatleri ya da yolda oldukları süre gibi kısıtlar modele eklenebilir. Elektrikli araçların kullanılması durumundaki sabit maliyetler ve sürücülerin saatlik aldıkları ücretler de dikkate alınarak ele alınan model genişletilebilir.

KAYNAKÇA

- Abdulaal, A., Cintuglu, M. H., Asfour, S. & Mohammed, O. A. (2016). Solving the multivariant EV routing problem incorporating V2G and G2V options. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(1), 238–248.
- Anily, S. & Hassin, R. (1992). The swapping problem. *Networks*, 22(4), 419–433.
- Asamer, J., Graser, A., Heilmann, B. & Ruthmair, M. (2016). Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 182–199.
- Bacaksiz, H. (2018). *Creating an evacuation plan during an emergency by coordinating vehicles* (yük. lis. tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Barth, M. & Boriboonsomsin, K. (2009). Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 400–410.
- Basso, R., Kulcsár, B. & 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. & Qu, X. (2022). Dynamic stochastic electric vehicle routing with safe reinforcement learning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 157, 102496.
- Bektaş, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N. & Puchinger, J. (2019). The role of operational research in green freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 274(3), 807–823.
- Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., Gribkovskaia, I. & Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *Top*, 15(1), 1–31.
- Berbeglia, G., Cordeau, J.-F. & Laporte, G. (2010). Dynamic pickup and delivery problems. *European journal of operational research*, 202(1), 8–15.

- Bi, X. & Tang, W. K. (2018). Logistical planning for electric vehicles under time-dependent stochastic traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(10), 3771–3781.
- Bibra, E. M., Connelly, E., Gorner, M., Lowans, C., Paoli, L., Tattini, J. & Teter, J. (2021). Global EV Outlook 2021: Accelerating Ambitions Despite the Pandemic.
- Budak, A. & Sarvari, P. A. (2021). Profit margin prediction in sustainable road freight transportation using machine learning. *Journal of Cleaner Production*, 314, 127990.
- Chen, H.-K., Chou, H.-W., Hsueh, C.-F. & Yu, Y.-J. (2015). The paired many-to-many pickup and delivery problem: an application. *Top*, 23(1), 220–243.
- Chen, X.-W., Chen, B. Y., Lam, W. H., Tam, M. L. & Ma, W. (2021). A bi-objective reliable path-finding algorithm for battery electric vehicle routing. *Expert Systems with Applications*, 182, 115228.
- Chopra, S. & Meindl, P. (2007). Supply chain management. Strategy, planning & operation. *Das summa summarum des management* (ss. 265–275). Springer.
- Commission, E. (2011). *Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System: White Paper*. Publications Office of the European Union.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G. & Ropke, S. (2008). Recent models and algorithms for one-to-one pickup and delivery problems. *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges* (ss. 327–357). Springer.
- Cruz, C. A., Munari, P. & Morabito, R. (2020). A branch-and-price method for the vehicle allocation problem. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106745.
- Dantzig, G. B. & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80–91.
- Demir, E., Bektaş, T. & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European journal of operational research*, 237(3), 775–793.
- Desrochers, M., Desrosiers, J. & Solomon, M. (1992). A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Operations research*, 40(2), 342–354.

- Duan, M., Qi, G., Guan, W., Lu, C. & Gong, C. (2021). Reforming mixed operation schedule for electric buses and traditional fuel buses by an optimal framework. *IET Intelligent Transport Systems*.
- Dumas, Y., Desrosiers, J. & Soumis, F. (1991). The pickup and delivery problem with time windows. *European journal of operational research*, 54(1), 7–22.
- Eisel, M., Nastjuk, I. & Kolbe, L. M. (2016). Understanding the influence of in-vehicle information systems on range stress—Insights from an electric vehicle field experiment. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 43, 199–211.
- Erdelić, T. & Carić, T. (2019). A survey on the electric vehicle routing problem: variants and solution approaches. *Journal of Advanced Transportation*, 2019.
- Euchi, J. & Frifita, S. (2017). Hybrid metaheuristic to solve the “one-to-many-to-one” problem: Case of distribution of soft drink in Tunisia. *Management Decision*.
- Factorovich, P., Mendez-Diaz, I. & Zabala, P. (2020). Pickup and delivery problem with incompatibility constraints. *Computers & Operations Research*, 113, 104805.
- Fernández, R. Á., Caraballo, S. C. & 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.
- Florio, A. M., Absi, N. & Feillet, D. (2021). Routing electric vehicles on congested street networks. *Transportation Science*, 55(1), 238–256.
- Gayialis, S. P., Konstantakopoulos, G. D. & Tatsiopoulos, I. P. (2019). Vehicle routing problem for urban freight transportation: A review of the recent literature. *Operational research in the digital era—ICT challenges*, 89–104.
- Ge, X., Zhu, Z. & Jin, Y. (2020). Electric vehicle routing problems with stochastic demands and dynamic remedial measures. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- Gendreau, M., Laporte, G. & Semet, F. (1998). A tabu search heuristic for the undirected selective travelling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 106(2-3), 539–545.
- Ghiani, G., Laporte, G. & Musmanno, R. (2004). *Introduction to logistics systems planning and control*. John Wiley & Sons.

- Ghiani, G., Laporte, G. & Musmanno, R. (2013). *Introduction to logistics systems management*. John Wiley & Sons.
- Hernández-Pérez, H. & Salazar-González, J.-J. (2007). The one-commodity pickup-and-delivery traveling salesman problem: Inequalities and algorithms. *Networks: An International Journal*, 50(4), 258–272.
- Jing, W., Yan, Y., Kim, I. & Sarvi, M. (2016). Electric vehicles: A review of network modelling and future research needs. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(1), 1687814015627981.
- Kant, G., Quak, H., Peeters, R. & Woensel, T. v. (2016). Urban freight transportation: challenges, failures and successes. *Logistics and Supply Chain Innovation* (ss. 127–139). Springer.
- Kazanç, H. C., Soysal, M. & Çimen, M. (2021). Modeling Heterogeneous Fleet Vehicle Allocation Problem with Emissions Considerations. *The Open Transportation Journal*, 15(1).
- Kellner, F. (2022). Generating greenhouse gas cutting incentives when allocating carbon dioxide emissions to shipments in road freight transportation. *OR Spectrum*, 1–42.
- Keskin, M., Akhavan-Tabatabaei, R. & Çatay, B. (2019). Electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1649–1659.
- Keskin, M. & Çatay, B. (2018). A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers. *Computers & operations research*, 100, 172–188.
- Keskin, M., Çatay, B. & 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.
- Koç, Ç. & Karaoglan, I. (2016). The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach. *Applied Soft Computing*, 39, 154–164.
- Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P. & Kechagias, E. P. (2020). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification. *Operational research*, 1–30.

- Kucuk, M. & Topaloglu Yildiz, S. (2019). Zaman pencereleli toplama ve dağıtım problemi için kısıt programlama yaklaşımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(9), 1041–1049.
- Kullman, N. D., Goodson, J. C. & Mendoza, J. E. (2021). Electric vehicle routing with public charging stations. *Transportation Science*, 55(3), 637–659.
- Küçükoğlu, I., Dewil, R. & Cattrysse, D. (2021). The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107650.
- Ky Phuc, P. N. & Phuong Thao, N. L. (2021). Ant Colony Optimization for Multiple Pickup and Multiple Delivery Vehicle Routing Problem with Time Window and Heterogeneous Fleets. *Logistics*, 5(2), 28.
- Li, C., Ding, T., Liu, X. & Huang, C. (2018). An electric vehicle routing optimization model with hybrid plug-in and wireless charging systems. *IEEE Access*, 6, 27569–27578.
- 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.
- Meyer, T. (2020). Decarbonizing road freight transportation—A bibliometric and network analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 89, 102619.
- Naccache, S., Côté, J.-F. & Coelho, L. C. (2018). The multi-pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 353–362.
- Nair, D. J., Grzybowska, H., Rey, D. & Dixit, V. (2016). Food rescue and delivery: Heuristic algorithm for periodic unpaired pickup and delivery vehicle routing problem. *Transportation Research Record*, 2548(1), 81–89.
- Pelletier, S., Jabali, O. & Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 225–255.
- Pugliese, L. D. P., Guerriero, F. & Macrina, G. (2021). An Adjustable Robust Formulation and a Decomposition Approach for the Green Vehicle Routing Problem with Uncertain Waiting Time at Recharge Stations. *ICORES*, 72–81.

- Qin, H., Su, X., Ren, T. & Luo, Z. (2021). A review on the electric vehicle routing problems: Variants and algorithms. *Frontiers of Engineering Management*, 1–20.
- Reyes-Rubiano, L., Ferone, D., Juan, A. A. & Faulin, J. (2019). A simheuristic for routing electric vehicles with limited driving ranges and stochastic travel times. *SORT*, 1, 3–24.
- Ross, S. M. (1976). *A first course in probability* (tek. rap.). New York.
- Rossi, F., Iglesias, R., Alizadeh, M. & 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.
- Shen, L., Shao, H., Wu, T., Lam, W. H. & 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.
- Skobelev, P. & Lada, A. (2016). A solution to the subtask of initial distribution of transport resources in a special optimization FTL transportation problem in real-time using the Hungarian algorithm. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(12), 1–8.
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M. & Bektaş, T. (2015). The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. *International Journal of Production Economics*, 164, 366–378.
- Soysal, M., Çimen, M. & Belbağ, S. (2020). Pickup and delivery with electric vehicles under stochastic battery depletion. *Computers & Industrial Engineering*, 146, 106512.
- Soysal, M., Çimen, M., Belbağ, S. & Toğrul, E. (2019). A review on sustainable inventory routing. *Computers & Industrial Engineering*, 132, 395–411.
- Soysal, M., Çimen, M. & Demir, E. (2018). On the mathematical modeling of green one-to-one pickup and delivery problem with road segmentation. *Journal of cleaner production*, 174, 1664–1678.
- Taillard, É. D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *RAIRO-Operations Research*, 33(1), 1–14.
- Taşdan, M. E. (2020). Heterojen Araçlar ile Sürdürülebilir Birebir Toplama ve Dağıtım Problemi Üzerine Bir Analiz.

- Wei, R. & Liu, C. (2020). Research on carbon emission reduction in road freight transportation sector based on regulation-compliant route optimization model and case study. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100408.
- Xiao, Y., Zhang, Y., Kaku, I., Kang, R. & Pan, X. (2021). Electric vehicle routing problem: A systematic review and a new comprehensive model with nonlinear energy recharging and consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111567.
- Young, K., Wang, C., Wang, L. Y. & Strunz, K. (2013). Electric vehicle battery technologies. *Electric vehicle integration into modern power networks* (ss. 15–56). Springer.
- Żak, J., Redmer, A. & Sawicki, P. (2011). Multiple objective optimization of the fleet sizing problem for road freight transportation. *Journal of advanced transportation*, 45(4), 321–347.
- Zhang, S., Chen, M. & Zhang, W. (2019). A novel location-routing problem in electric vehicle transportation with stochastic demands. *Journal of Cleaner Production*, 221, 567–581.
- Zhang, S., Chen, M., Zhang, W. & Zhuang, X. (2020). Fuzzy optimization model for electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *Expert systems with applications*, 145, 113123.
- Zhu, Z., Xiao, J., He, S., Ji, Z. & Sun, Y. (2016). A multi-objective memetic algorithm based on locality-sensitive hashing for one-to-many-to-one dynamic pickup-and-delivery problem. *Information Sciences*, 329, 73–89.

EK 1

Örnek olayda kullanılan parametreler

Sembol	Değer
$ P $	4
$ D $	8
$ S $	4
$ T $	4
$ K $	2
$ V $	17
$ A $	258
$ I $	30
h_0	10
h_s	15
h_i	30 - 40 - 33 - 40 - 30 - 40 - 30 - 35 - 45 - 30 - 25 - 20
Q_k	1000
η_k	17
F	600
$d_{i,j}$	Table 15
$t_{i,j}$	Table 16
c	0.4
π	3.14
e	2.718

Tablo 12. Örnek olayda kullanılan parametreler

EK 2

Toplama noktası/noktalarına karşılık gelen dağıtım noktalarına teslim edilmesi gereken yük miktarları

Toplama Noktası	Dağıtım Noktası	$q_{i,j}$ (kg)
P1	D1	175
P1	D3	145
P1	D8	175
P2	D2	150
P2	D8	225
P3	D4	135
P3	D6	115
P3	D7	155
P4	D5	170
P4	D6	175

Tablo 13. Toplama noktası/noktalarına karşılık gelen dağıtım noktalarına teslim edilmesi gereken yük miktarları

EK 3

Enerji tüketimini hesaplamak için kullanılan parametre değerleri ve gösterimleri

Sembol	Tanım	Değer
w	Yüksüz araç ağırlığı (kg)	1170
g	Yerçekimi sabiti (m/s^2)	9.81
C_d	Aerodinamik sürtünme katsayısı	0.6
C_r	Yuvarlanma direnci katsayısı	0.017
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m^3)	1.2041
A_e	Ön yüzey alanı (m^2)	3.912
ε	Araç aktarma organları verimliliği	1.3175
p	Yardımcı güç talebi (W)	1.575

Tablo 14. Enerji tüketimini hesaplamak için kullanılan parametre değerleri ve gösterimleri

EK 4

Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki mesafeler

	Depo	P1	P2	P3	P4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	S1	S2	S3	S4
Depo	-	35617	53509	52366	37925	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34320	37897	43023
P1	-	-	24729	28932	22778	26192	18445	27128	24245	21325	35640	39662	12180	33860	19375	13914	35751
P2	-	24499	-	36339	27204	32964	12749	46951	30385	13752	12356	59485	21248	53683	12518	33737	51707
P3	-	31298	41058	-	14711	32275	50760	46341	18304	20548	30200	36714	23774	53073	24544	33303	12802
P4	-	23126	29095	12056	-	23438	38798	31781	19403	7746	18237	32968	15602	38513	16363	25131	18566
D1	26311	26735	33879	27610	21457	-	46796	19579	11198	20494	54930	11268	14637	26311	24668	16108	24579
D2	45127	15940	12550	31547	21662	46122	-	38395	30109	17342	23464	50929	24282	45127	11406	25181	38367
D3	7185	31660	49551	48121	33680	21119	43271	-	28176	31113	60465	25926	18817	7185	30074	16347	38778
D4	32627	25092	30950	17546	19080	12435	37571	25895	-	17565	40849	20793	15893	32627	21739	17264	9091
D5	34952	19751	14826	19327	8859	23469	15359	28220	17662	-	13104	31957	12040	34952	6840	21569	26147
D6	63784	34597	13147	26294	17159	53550	22850	57052	42149	12877	-	57989	24821	63784	16091	43838	41666
D7	33177	42051	59942	36667	34325	12028	53662	26445	22523	33362	57675	-	28284	33177	37536	27925	27324
D8	23248	12056	30814	21852	15699	14210	24534	16516	17166	14245	41728	25669	-	23248	12826	9865	22098
S1	-	35617	53509	52366	37925	25365	47229	7177	32421	35358	64423	30172	23062	-	34320	20593	43023
S2	33652	18451	12690	22438	16270	23579	12278	26920	21000	8233	16269	35295	10741	33652	-	20270	29258
S3	19249	14025	31920	30858	24705	14910	25636	12517	18037	22138	42830	25546	7642	19249	21100	-	38398
S4	44016	33880	53190	21325	19681	23218	62893	37284	10674	25732	42333	27658	22423	44016	29728	38764	-

Tablo 15. Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki mesafeler (m)

EK 5

Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki seyahat süreleri

	Depo	P1	P2	P3	P4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	S1	S2	S3	S4
Depo	-	33.4	43.9	41.3	40.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36.0	36.3	37.4
P1	-	-	21.1	26.9	26.1	25.2	17.4	19.9	25.2	22.1	27.0	30.1	12.6	28.1	21.9	15.8	37.0
P2	-	21.9	-	28.0	27.6	37.7	14.8	34.2	37.2	27.5	13.9	44.4	26.9	42.4	18.8	30.2	38.9
P3	-	32.2	32.1	-	18.2	26.7	37.4	35.9	23.3	22.8	25.3	31.4	24.6	44.1	25.1	33.0	21.0
P4	-	27.4	28.0	14.4	-	27.2	33.3	32.5	23.9	15.2	21.2	34.1	19.8	40.8	22.8	28.2	23.8
D1	26.4	26.3	39.1	26.3	25.5	-	35.1	18.1	19.3	22.6	40.6	14.5	15.8	26.4	25.4	19.2	24.3
D2	35.7	15.2	13.7	32.7	33.8	33.6	-	27.4	33.9	22.1	19.6	37.7	22.1	35.7	15.5	23.4	42.8
D3	9.1	25.7	36.2	35.7	35.2	20.3	32.5	-	32.2	31.0	42.2	24.5	18.7	9.1	30.4	16.8	31.8
D4	36.5	27.6	38.8	21.8	25.2	18.6	36.5	28.3	-	22.3	36.8	25.4	20.2	36.5	25.2	24.1	14.3
D5	35.7	23.0	25.3	22.2	18.3	24.7	22.0	27.4	22.6	-	27.6	31.9	14.7	35.7	11.0	23.1	32.3
D6	47.7	27.2	14.8	21.5	21.0	37.2	20.1	39.5	37.8	26.4	-	41.8	28.5	47.7	20.4	35.5	32.3
D7	35.0	36.9	47.4	30.2	36.3	15.6	43.7	26.7	29.6	33.4	42.6	-	27.7	35.0	36.2	28.5	26.3
D8	22.9	16.1	28.6	22.6	21.8	15.9	24.9	14.7	20.9	17.8	34.5	24.4	-	22.9	15.7	10.3	29.8
S1	-	33.4	43.9	41.3	40.9	26.0	40.2	11.5	37.8	36.6	49.9	30.1	24.3	-	36.0	22.4	37.4
S2	33.6	20.9	20.2	23.2	23.9	24.9	17.9	25.3	24.5	12.4	24.2	33.8	12.6	33.6	-	21.0	33.3
S3	20.5	17.9	28.3	28.9	28.0	19.6	24.7	12.3	25.6	23.8	34.3	24.4	9.7	20.5	23.2	-	31.7
S4	38.2	39.5	39.9	20.7	26.2	20.8	45.2	29.9	16.3	31.4	33.1	25.4	30.4	38.2	33.8	31.7	-

Tablo 16. Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki seyahat süreleri (dakika)

EK 6

Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki minimum araç hızları

	Depo	P1	P2	P3	P4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	S1	S2	S3	S4
Depo	-	5.8	8.6	10.0	5.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.1	5.6	8.6
P1	-	-	8.9	6.7	10.0	8.9	5.6	8.1	8.6	6.4	8.3	6.7	8.1	7.8	7.8	11.1	9.4
P2	-	8.9	-	9.4	10.3	6.4	6.7	10.0	7.8	10.0	9.2	7.2	9.2	6.4	9.4	8.6	8.9
P3	-	10.8	6.7	-	9.4	9.2	5.8	6.7	7.8	7.8	6.1	9.7	6.4	8.1	8.9	8.6	7.8
P4	-	10.6	5.6	8.3	-	7.2	8.9	6.9	10.8	7.2	9.4	9.2	5.6	8.3	6.4	6.1	10.8
D1	7.2	8.1	8.9	8.9	9.4	-	5.6	8.9	10.0	8.1	8.3	6.1	8.9	7.2	7.5	10.6	9.4
D2	9.4	10.8	10.3	6.4	10.6	9.4	-	10.3	10.3	10.3	8.3	9.4	6.9	6.9	9.4	8.3	10.8
D3	7.2	10.6	6.7	9.4	9.7	9.2	8.1	-	8.1	8.9	5.8	10.0	9.7	8.3	8.6	8.9	9.7
D4	6.9	8.1	6.1	8.3	8.9	7.2	5.8	9.7	-	5.6	6.4	6.1	7.5	7.2	8.1	5.6	6.9
D5	10.8	10.3	10.0	8.3	10.6	7.5	6.4	8.3	11.1	-	9.2	10.6	6.7	8.9	6.4	8.3	8.3
D6	8.1	10.3	6.1	8.6	7.2	10.3	9.7	11.1	6.7	6.9	-	8.6	9.4	10.6	10.8	9.7	8.3
D7	8.3	6.7	6.9	9.2	10.6	10.6	6.4	7.5	10.8	8.6	7.5	-	7.2	10.6	6.9	8.6	6.4
D8	8.6	10.0	9.7	8.3	8.6	8.1	10.3	6.4	9.2	8.3	5.8	7.5	-	6.9	9.7	10.6	7.8
S1	-	10.6	6.1	8.6	8.1	8.1	6.7	6.7	8.3	7.2	6.1	8.3	10.3	-	5.6	9.7	7.8
S2	9.4	6.4	9.7	7.2	7.2	5.6	10.8	7.8	7.2	6.9	9.2	5.8	11.1	7.2	-	7.2	6.1
S3	6.1	7.2	11.1	9.7	6.7	10.6	7.2	8.1	10.6	8.6	8.1	9.7	8.3	8.1	9.7	-	7.8
S4	7.5	8.3	6.9	8.3	8.1	8.6	5.6	10.8	9.7	10.6	10.3	7.5	6.7	6.9	8.3	10.3	-

Tablo 17. Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki minimum araç hızları (m/s)

EK 7

Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki maksimum araç hızları

	Depo	P1	P2	P3	P4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	S1	S2	S3	S4
Depo	-	21.9	21.7	22.2	21.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.0	21.4	19.7
P1	-	-	22.2	21.9	20.0	22.2	16.7	18.9	21.7	19.7	18.1	20.6	21.7	20.3	19.4	17.2	17.5
P2	-	21.4	-	17.2	18.9	21.7	17.5	22.2	19.4	21.7	20.0	20.8	19.2	20.0	20.6	22.2	16.7
P3	-	21.1	20.6	-	22.2	21.9	21.1	16.7	18.9	18.1	18.9	16.9	18.3	21.4	17.2	18.9	16.7
P4	-	20.6	21.1	21.4	-	19.2	17.2	22.2	20.6	20.8	21.4	17.2	20.0	20.6	20.0	18.6	20.6
D1	20.3	21.7	18.1	22.2	17.5	-	19.4	17.8	20.8	16.9	18.3	20.6	18.3	17.8	21.7	21.7	20.8
D2	18.3	21.9	18.6	18.6	19.4	20.6	-	20.8	19.4	22.2	21.9	19.4	17.8	18.9	17.8	19.2	21.7
D3	17.2	17.2	21.1	18.9	21.1	18.1	19.7	-	18.9	18.3	18.9	17.5	17.5	21.1	17.2	19.7	21.9
D4	18.9	18.1	20.0	20.6	19.2	19.7	19.2	21.7	-	18.6	19.2	21.7	20.6	19.2	21.7	21.7	17.2
D5	18.3	19.4	18.6	20.8	20.8	20.6	17.5	17.2	18.6	-	18.9	20.0	20.0	19.2	18.1	21.9	16.7
D6	18.9	19.7	19.4	21.9	17.8	19.4	16.7	21.9	16.7	22.2	-	17.5	18.9	17.2	19.4	16.7	16.7
D7	18.1	22.2	17.2	19.7	20.6	16.7	19.7	19.7	21.7	18.6	20.6	-	17.2	19.4	21.4	18.9	21.1
D8	17.2	20.0	21.7	17.2	21.1	16.9	17.2	17.5	17.8	21.9	20.3	20.8	-	20.3	16.7	21.9	22.2
S1	-	19.4	20.3	21.9	17.5	19.4	17.8	19.2	21.7	21.4	16.7	21.4	20.3	-	21.4	18.3	22.2
S2	21.9	20.6	19.2	20.3	17.2	18.3	22.2	17.2	16.9	20.3	18.1	20.0	20.0	21.7	-	21.7	21.4
S3	19.7	20.6	19.7	18.6	20.8	16.9	17.5	20.3	19.7	19.7	16.7	20.6	16.9	16.7	18.6	-	19.4
S4	19.4	20.0	20.6	20.6	20.6	21.9	19.4	21.4	21.1	21.7	16.7	20.8	19.7	19.2	16.7	20.0	-

Tablo 18. Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki maksimum araç hızları (m/s)

EK 8

Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki araç hızı ortalamaları

	Depo	P1	P2	P3	P4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	S1	S2	S3	S4
Depo	-	13.9	15.1	16.1	13.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.6	13.5	14.2
P1	-	-	15.6	14.3	15.0	15.6	11.1	13.5	15.1	13.1	13.2	13.6	14.9	14.0	13.6	14.2	13.5
P2	-	15.1	-	13.3	14.6	14.0	12.1	16.1	13.6	15.8	14.6	14.0	14.2	13.2	15.0	15.4	12.8
P3	-	16.0	13.6	-	15.8	15.6	13.5	11.7	13.3	12.9	12.5	13.3	12.4	14.7	13.1	13.8	12.2
P4	-	15.6	13.3	14.9	-	13.2	13.1	14.6	15.7	14.0	15.4	13.2	12.8	14.4	13.2	12.4	15.7
D1	13.8	14.9	13.5	15.6	13.5	-	12.5	13.3	15.4	12.5	13.3	13.3	13.6	12.5	14.6	16.1	15.1
D2	13.9	16.4	14.4	12.5	15.0	15.0	-	15.6	14.9	16.3	15.1	14.4	12.4	12.9	13.6	13.8	16.3
D3	12.2	13.9	13.9	14.2	15.4	13.6	13.9	-	13.5	13.6	12.4	13.8	13.6	14.7	12.9	14.3	15.8
D4	12.9	13.1	13.1	14.4	14.0	13.5	12.5	15.7	-	12.1	12.8	13.9	14.0	13.2	14.9	13.6	12.1
D5	14.6	14.9	14.3	14.6	15.7	14.0	11.9	12.8	14.9	-	14.0	15.3	13.3	14.0	12.2	15.1	12.5
D6	13.5	15.0	12.8	15.3	12.5	14.9	13.2	16.5	11.7	14.6	-	13.1	14.2	13.9	15.1	13.2	12.5
D7	13.2	14.4	12.1	14.4	15.6	13.6	13.1	13.6	16.3	13.6	14.0	-	12.2	15.0	14.2	13.8	13.8
D8	12.9	15.0	15.7	12.8	14.9	12.5	13.8	11.9	13.5	15.1	13.1	14.2	-	13.6	13.2	16.3	15.0
S1	-	15.0	13.2	15.3	12.8	13.8	12.2	12.9	15.0	14.3	11.4	14.9	15.3	-	13.5	14.0	15.0
S2	15.7	13.5	14.4	13.8	12.2	11.9	16.5	12.5	12.1	13.6	13.6	12.9	15.6	14.4	-	14.4	13.8
S3	12.9	13.9	15.4	14.2	13.8	13.8	12.4	14.2	15.1	14.2	12.4	15.1	12.6	12.4	14.2	-	13.6
S4	13.5	14.2	13.8	14.4	14.3	15.3	12.5	16.1	15.4	16.1	13.5	14.2	13.2	13.1	12.5	15.1	-

Tablo 19. Örnek olay çözümünde kullanılan düğümler arasındaki araç hızı ortalamaları (m/s); varyasyon katsayısı: 0.2

EK 9

Büyük veri analizleri için sunulan örnek olaylarda toplama noktası/noktalarına karşılık gelen dağıtım noktalarına teslim edilmesi gereken yük miktarları

Örnek Olay 1			Örnek Olay 2			Örnek Olay 3			Örnek Olay 4		
Toplama Dağıtım	Yük (kg)		Toplama Dağıtım	Yük (kg)		Toplama Dağıtım	Yük (kg)		Toplama Dağıtım	Yük (kg)	
P1	D1	155	P1	D1	155	P1	D1	155	P1	D1	155
P1	D2	128	P1	D2	128	P1	D2	128	P1	D2	128
P2	D2	184	P1	D3	204	P2	D3	204	P2	D3	204
P2	D3	204	P2	D4	140	P2	D4	140	P2	D4	140
P2	D6	140	P2	D14	137	P3	D5	137	P3	D5	137
P3	D4	137	P3	D5	197	P3	D2	197	P3	D27	197
P3	D5	197	P3	D6	184	P4	D6	184	P4	D6	184
P3	D6	184	P4	D7	215	P4	D7	215	P4	D7	215
P4	D7	215	P4	D15	141	P5	D8	141	P4	D8	141
P4	D8	141	P5	D8	182	P5	D9	182	P5	D9	182
P5	D9	182	P5	D9	163	P5	D10	163	P5	D10	163
P5	D10	163	P6	D10	147	P6	D11	147	P6	D11	147
P5	D11	147	P7	D13	132	P6	D12	132	P6	D12	132
P6	D12	132	P7	D11	128	P7	D13	128	P6	D13	128

P6	D13	128	P8	D14	186	P7	D14	186	P7	D14	186
P7	D14	186	P9	D12	136	P8	D15	136	P7	D15	136
			P9	D15	123	P8	D16	123	P7	D37	123
			P10	D16	196	P9	D17	196	P8	D16	196
			P10	D17	206	P9	D18	206	P8	D17	206
			P10	D18	137	P9	D19	137	P9	D18	137
			P11	D19	231	P10	D20	231	P9	D19	231
			P11	D20	148	P10	D21	148	P10	D20	148
			P11	D21	121	P11	D22	121	P10	D21	121
			P12	D22	201	P11	D23	201	P11	D22	201
			P12	D29	189	P12	D24	189	P11	D23	189
			P12	D26	199	P13	D25	199	P12	D24	199
			P13	D23	220	P13	D26	220	P12	D25	220
			P13	D30	186	P14	D27	186	P12	D26	186
			P14	D24	131	P15	D28	131	P13	D27	131
			P14	D25	123	P15	D12	123	P14	D28	123
			P14	D26	123	P16	D29	123	P15	D29	123
			P15	D27	127	P16	D30	127	P16	D30	127
			P15	D28	163	P17	D31	163	P16	D31	163
						P17	D32	136	P16	D32	136



P17	D33	123	P17	D23	123
P18	D34	196	P17	D34	196
P18	D24	206	P18	D35	206
P19	D35	137	P18	D36	137
P20	D36	231	P19	D37	231
P20	D37	148	P20	D38	148
P20	D38	121	P20	D39	121
P21	D39	201	P20	D40	201
P21	D40	189	P21	D41	189
P22	D41	199	P21	D42	199
P22	D42	220	P22	D43	220
P23	D43	186	P22	D44	186
P23	D44	131	P23	D45	131
			P23	D46	136
			P24	D47	123
			P24	D48	196
			P24	D49	206
			P25	D50	137
			P25	D51	231
			P26	D52	148



P26	D28	121
P27	D53	201
P28	D54	189
P28	D55	199
P29	D56	220
P29	D57	186
P30	D58	131
P30	D59	123
P30	D60	123

Tablo 20. Büyük veri analizleri için sunulan örnek olaylarda toplama noktası/noktalarına karşılık gelen dağıtım noktalarına teslim edilmesi gereken yük miktarları



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 23/06/2022

Tez Başlığı: Elektrikli Araçların Belirsiz Batarya Kullanımı Varsayımıyla Bir Toplama ve Dağıtım Problemi

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 72 sayfalık kısmına ilişkin, 23/06/2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda işaretlenmiş filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç
- Kaynakça hariç
- Alıntılar hariç
- Alıntılar dâhil
- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Merve İbiş

Öğrenci No: N19137016

Anabilim Dalı: İşletme

Programı: Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Mehmet Soysal

(Unvan, Ad Soyad, İmza)



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
TEZ ÇALIŞMASI ETİK KOMİSYON MUAFİYETİ FORMU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 24/06/2022

Tez Başlığı: Elektrikli Araçların Belirsiz Batarya Kullanımı Varsayımıyla Bir Toplama ve Dağıtım Problemi

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmam:

1. İnsan ve hayvan üzerinde deney niteliği taşımamaktadır,
2. Biyolojik materyal (kan, idrar vb. biyolojik sıvılar ve numuneler) kullanılmasını gerektirmemektedir.
3. Beden bütünlüğüne müdahale içermemektedir.
4. Gözlemsel ve betimsel araştırma (anket, mülakat, ölçek/skala çalışmaları, dosya taramaları, veri kaynakları taraması, sistem-model geliştirme çalışmaları) niteliğinde değildir.

Hacettepe Üniversitesi Etik Kurullar ve Komisyonlarının Yönergelerini inceledim ve bunlara göre tez çalışmamın yürütülebilmesi için herhangi bir Etik Kurul/Komisyon'dan izin alınmasına gerek olmadığını; aksi durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Merve İbiş

Öğrenci No: N19137016

Anabilim Dalı: İşletme

Programı: Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler

Statüsü: Yüksek Lisans Doktora Bütünleşik Doktora

DANIŞMAN GÖRÜŞÜ VE ONAYI

Doç. Dr. Mehmet Soysal

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

Detaylı Bilgi: <http://www.sosyalbilimler.hacettepe.edu.tr>

Telefon: 0-312-2976860

Faks: 0-3122992147

E-posta: sosyalbilimler@hacettepe.edu.tr