



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**GENELLEŞTİRİLMİŞ BİREBİR TOPLA-
DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE
ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ**

Nurşah YILMAZ ERDEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Nurşah YILMAZ ERDEŞ tarafından hazırlanan “Genelleştirilmiş Birebir Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi ve Çözüm Yöntemleri” adlı tez çalışması 14/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Turan PAKSOY
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Nurşah YILMAZ ERDEŞ

Tarih: 14/01/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GENELLEŞTİRİLMİŞ BİREBİR TOPLA-DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Nurşah YILMAZ ERDEŞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN

2025, 31 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN
Prof. Dr. Turan PAKSOY
Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN

Günümüzde lojistik sektörünün en önemli problemlerinden biri olan Araç Rotalama Problemi (ARP), müşterilerin taleplerinin karşılandığı araçlar için en uygun rotayı bulmayı amaçlamaktadır. Bu amaç kapsamında ARP üzerine birçok çalışma ortaya konmakta ve çözüm yöntemleri elde edilmektedir. ARP'nin en basit hali olan klasik ARP'de her müşteriye yalnızca bir kez uğranması, rotaların depoda başlayıp depoda sonlanması ve araçların belirli bir kapasiteye sahip olması gibi temel kısıtlar bulunmaktadır. ARP çeşitli alt başlıklarda incelenmekte olup bu başlıklardan biri olan Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi'nde (TDARP), klasik ARP'den farklı olarak müşterilerin dağıtım taleplerinin yanı sıra toplama talepleri de ele alınmaktadır. Bu problem, talep tipi ve rota yapısına göre; Birden çoğa-çoktan bire TDARP (*one-to-many-to-one problems*), Çoktan çoğa TDARP (*many-to-many problems*) ve Birebir TDARP (*one-to-one problems*) olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Birden çoğa-çoktan bire TDARP'lerde, depodan müşterilere teslim edilecek taleplerin yanı sıra müşterilerden de depoya geri taşınacak talepler bulunmaktadır. Çoktan çoğa TDARP'lerde, bir nokta birden fazla talep için başlangıç veya varış noktası olabilmekte iken Birebir TDARP'lerde, her talep için tek bir başlangıç ve tek bir varış noktası vardır.

Bu tez kapsamında, ARP'nin türlerinden biri olan TDARP hakkında bir literatür taraması gerçekleştirilmekte olup Birebir TDARP kapsamında sınıflandırılabilen, pratik hayatta karşılığı bulunan ve literatürde şimdiye kadar ele alınmamış bir problemin tanımı yapılmıştır. Problemin çözümü için bir matematiksel model geliştirilmiş olup matematiksel modelin performansını artırmak amacıyla modele geçerli eşitsizlikler eklenmiştir. Deneysel çalışmalar, rassal oluşturulmuş 270 adet test örneği üzerinde GAMS/CPLEX paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Klasik ARP gibi TDARP de NP-Zor problemler sınıfına girdiği için matematiksel model ile yalnızca küçük boyutlu problemlerde optimal sonuçlara ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Araç Rotalama Problemi, Birebir Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi, Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi, Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi

ABSTRACT

MS THESIS

THE GENERALIZED ONE-TO-ONE PICKUP AND DELIVERY VEHICLE ROUTING PROBLEM AND SOLUTION METHODS

Nurşah YILMAZ ERDEŞ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Industrial Engineering**

Advisor: Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN

2025, 31 Pages

Jury

**Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN
Prof. Dr. Turan PAKSOY
Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN**

The Vehicle Routing Problem (VRP), one of the most important problems in the logistics industry, aims to find the most suitable routes for vehicles that meet the demands of customers. Many studies on VRP are presented in favor of this purpose, and solution approaches are obtained. VRP is examined under various variants, and one of these variants, the Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem (PDVRP), deals with the pickup demands as well as the delivery demands of the customers. This problem is divided into three main categories according to demand type and route structure: one-to-many-to-one problems, many-to-many problems, and one-to-one problems. In one-to-many-to-one problems, there are goods at the depot to be delivered to customers as well as goods at customers to be carried back to the depot. In many-to-many problems, one node can be the origin or destination point for a good, and multiple nodes can be the origin or destination point for each good, while in one-to-one problems, there is a single origin and a single destination point for each unique demand.

Within the scope of this thesis, a literature review is presented on the PDVRP. Then a problem that can be classified as one-to-one problems, has a practical equivalent, and has not been addressed in literature so far, is defined. A mathematical model is developed for the solution of the problem, and the model is improved using valid inequalities to improve the performance. Experimental studies are performed with GAMS/CPLEX on 270 randomly generated test instances. Since PDVRP is an NP-Hard problem like classical VRP, the mathematical model provides optimal solutions only for small-sized instances.

Keywords: Logistic And Supply Chain Management, One-to-one Pickup and Delivery Problem, Pickup and Delivery Problem, Vehicle Routing Problem

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecim boyunca değerli bilgilerini ve vaktini asla esirgemeyen, çalışmamın her aşamasında tecrübe ve yönlendirmeleri ile bana yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN'a saygılarımı sunar ve sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Bölümümüz ve çalışma ortamımız için vermiş olduğu emeklerinden ötürü Sayın Prof. Dr. Ahmet PEKER'e, fikir ve önerileri ile katkılarından dolayı Endüstri Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN'e ve Sayın Arş. Gör. Dr. Gözde CAN ATASAGUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu güzel günlere gelmemi sağlayan, her zaman arkamda olduğunu bildiğim canım annem Hatice ve babam Şahin YILMAZ'a, biricik abim Nurullah ve kardeşim Ecrin Ömür'e şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı, ihtiyaç duyduğum her an desteğini hissettiğim, sevgisini ve ilgisini asla eksik etmeyen, motivasyon ve cesaret kaynağım olan hayat arkadaşım Arş. Gör. Hakan ERDEŞ'e ithaf ediyorum.

Nurşah YILMAZ ERDEŞ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Birden çoğa-çoktan bire TDARP (<i>One-to-many-to-one problems / 1-M-1</i>)	3
2.2. Çoktan çoğa TDARP (<i>Many-to-many problems / M-M</i>)	4
2.3. Birebir TDARP (<i>One-to-one problems / 1-1</i>)	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Problem Tanımı	15
3.2. Matematiksel Model	16
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	20
4.1. Test Örnekleri	20
4.2. Deneysel Sonuçlar	23
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	26
KAYNAKLAR	27

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ARP	: Araç Rotalama Problemi
GB-TDARP	: Genelleştirilmiş Birebir Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi
GSP	: Gezgin Satıcı Problemi
TDARP	: Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi



1. GİRİŞ

Klasik Araç Rotalama Problemi (ARP), bir depodan müşterilerin taleplerini karşılamak için ayrılan ve güzergâh sonunda depoya geri dönen belirli kapasiteye sahip araçlar için en az maliyetli rotaların oluşturulması olarak tanımlanabilir. En temel haliyle ARP, notasyonel olarak şu şekilde gösterilebilir: $G = (N, A)$ tam bağlı bir şebeke olsun. Burada $N = \{0, 1, \dots, n\}$ tüm düğümler kümesini göstermektedir. "0" depo düğümünü, $N_c = \{1, \dots, n\}$ müşteriler kümesini, $A = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$ ise düğümler arasındaki hatları temsil etmektedir. Her bir düğüm çifti için $(\forall i, j \in N)$ düğümler arasındaki uzaklık c_{ij} ile belirtilmektedir. Her bir müşteri için $(\forall i \in N_c)$ talepler d_i ile ifade edilmektedir. Depoda belirli bir kapasiteye (Q) sahip sınırsız sayıda homojen araç bulunmakta olup problem için uygun bir çözüm aşağıdaki koşulları sağlamalıdır:

- Her müşteriye yalnızca bir kez uğranmalı,
- Her rota depoda başlamalı ve depoda bitmeli,
- Rota boyunca araç üzerindeki yük miktarı aracın kapasitesini aşmamalıdır.

Literatürde ARP'nin birçok çeşidi incelenmiş olup üzerinde en çok çalışılan problemler aşağıda kısaca tanıtılmaktadır.

Zaman pencereli ARP (*Vehicle Routing Problem -VRP- with Time Windows*)'de klasik ARP koşullarına ek olarak her müşteri için $[a_i, b_i]$ ile belirtilen bir zaman aralığı mevcuttur ve rotalar boyunca araç bu zaman aralığında müşterilere hizmet vermelidir. Burada her müşteri için en erken hizmet verilecek zaman a_i ($\forall i \in N_c$) ile ifade edilirken, en geç hizmet verilecek zaman b_i ($\forall i \in N_c$) ile ifade edilmektedir. Eğer araç a_i zamanından önce gelirse belirtilen zamana kadar beklemek zorunda iken a_i ve b_i aralığında gelirse hemen hizmete başlayabilmektedir. Ayrıca b_i zamanından sonra araç hizmeti kabul edilmemektedir.

Heterojen Filolu ARP (*Heterogeneous or Mixed Fleet VRP*)'de depoda sınırsız sayıda homojen araç yerine farklı kapasite ve farklı maliyetlere sahip heterojen bir araç filosu bulunmakta olup müşteri talepleri bu araç filosu ile karşılanmaktadır.

Bölünmüş Talepli ARP (*Split Delivery VRP*)'de zorunlu olmamakla birlikte bazı müşteri talepleri araç kapasitesinden büyük olabilmektedir. Bu durumda taleplerin farklı araçlara bölünmesi sağlanarak bir müşteriye birden fazla ziyaret ile daha düşük maliyetli çözümler üretilmektedir.

ARP'nin bir diğ er önemli varyasyonu ise Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (TDARP) olarak adlandırılmakta ve bu varyasyonda m   terilerin dağıtım ve/veya toplama talepleri mevcut olup bu talepler aynı araçlarla taşınmaktadır.

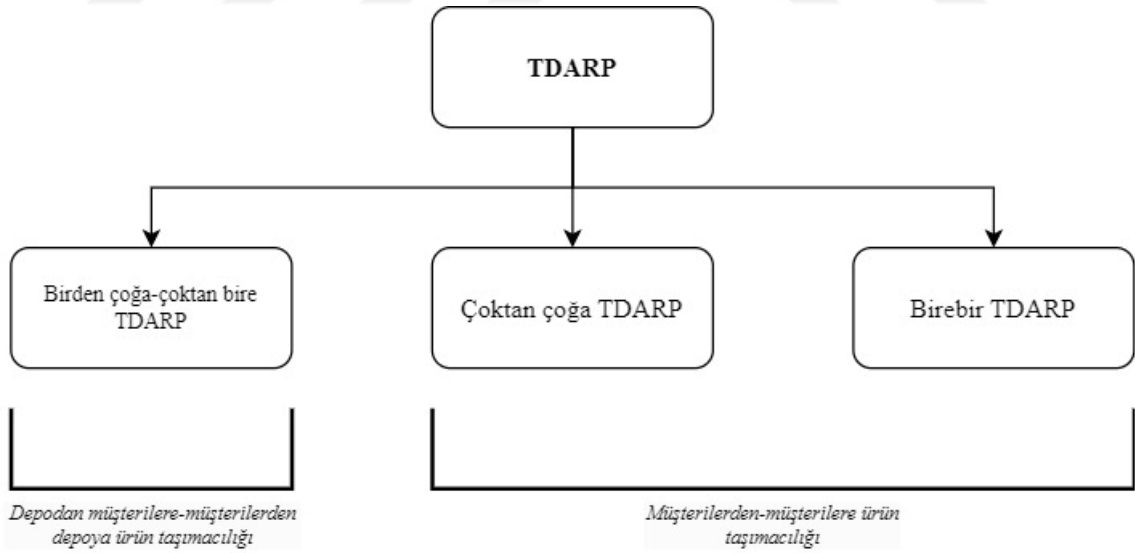
Bu tez çalışması kapsamında, TDARP'nin bir çeşidi olan Birebir TDARP başlığı altında değerlendirilecek bir gerçek hayat problemi ele alınmaktadır. Tezin birincil amacı, pratik hayatta karşılığı olan ve literatürde şimdiye kadar incelenmemiş bir problemi tanımlayarak çözüm elde etmektir. Bu doğrultuda küçük boyutlu problemler için optimal çözümler üreten bir matematiksel model geliştirilmiş ve geçerli eşitsizlikler ile model kuvvetlendirilmi tir. Tez çalışmasının bir diğ er amacı ise, mevcut çalışmalarda henüz ele alınmamış olan bu problem ile ilgili literatürde bulunan boşluğu doldurarak bilimsel bir katkı sağlamaktır.

Çalışmanın sonraki bölümleri  u şekilde organize edilmektedir. İkinci bölümde TDARP'nin çeşitlerinden bahsedilmekte olup literatür araştırması verilmekte, üçüncü bölümde ele alınan problem ayrıntılı olarak açıklanmakta ve problemin çözümü için geliştirilen matematiksel model sunulmaktadır. Dördüncü bölümde ise tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları hakkında detaylı bilgiler yer almaktadır. Son olarak, tez çalışması kapsamında genel bir değerlendirme yapılmakta ve gelecekte çalışılması planlanan konulara ilişkin  onerilere yer verilmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde ARP ile ilgili ilk çalışma Dantzig ve Ramser (1959) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, benzin dağıtım kamyonlarından oluşan bir filo ile benzin istasyonlarının talepleri doğrultusunda araçların katettiği mesafenin en küçüklenmesi problemi ele alınmıştır. Clarke ve Wright (1964) ise, Dantzig ve Ramser (1959)'in incelediği probleme, “tasarruf algoritması” olarak adlandırılan bir sezgisel yöntem geliştirmiş ve bu yöntemle daha iyi sonuçların elde edildiğini vurgulamışlardır. ARP hakkında çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiş olup daha kapsamlı literatür taramaları için Toth ve Vigo (2002), Pillac ve diğ. (2013), Braekers ve diğ. (2016) çalışmalarına bakılabilir. Bu tez kapsamında ele alınan problemin ana başlığı olan TDARP ile ilgili olarak ise Berbeglia ve diğ. (2007), Parragh ve diğ. (2008a, 2008b), Cai ve diğ. (2023) tarafından yapılan literatür taramaları incelenebilir.

Bu bölümde TDARP ile ilgili çalışmalara odaklanılmış olup literatürde TDARP'nin değişik tipleri hakkında yapılmış çalışmalar alt başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur. Literatürde TDARP, talep tipi ve rota yapısına göre üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Toth ve Vigo, 2014). Bunlar;



Şekil 2.1. Talep tipi ve rota yapısına göre TDARP'nin sınıflandırılması

2.1. Birden çoğa-çoktan bire TDARP (*One-to-many-to-one problems / 1-M-1*)

Birden çoğa-çoktan bire TDARP'lerde, depodan müşterilere teslim edilecek ürünlerin yanı sıra müşterilerden de depoya geri taşınacak ürünler bulunmaktadır. Dolayısıyla, bir nokta dağıtım ve/veya toplama noktası olabilmektedir. Problem, hizmet

türüne göre; en az bir müşterinin aynı anda hem dağıtım hem toplama talebi varsa bu problem eşzamanlı talepler problemi (*simultaneous demands problem*), her müşterinin sadece dağıtım veya sadece toplama talebi varsa tek talep problemi (*single demand problem*) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu problemde, iki farklı ürün grubu ele alınmaktadır. Bazı ürünler depodan alınıp müşterilere, bazı ürünler ise müşteriden alınıp depoya götürülmekte ve müşteriden müşteriye ürün taşımacılığına izin verilmemektedir. İçecek ve gıda sektöründe; marketlere dolu şişelerin teslimi yapılırken boş depozitolu şişelerin toplanması, günlük taze ürünlerin teslimatı gerçekleşirken tarihi geçmiş veya deforme olmuş ürünlerin teslim alınması, sağlık sektöründe ise; depolardaki kanların hastanelere dağıtılırken hastanelerde toplanan kanların depolara götürülmesi bu problem tipine örnek verilebilir.

Birden çoğa-çoktan bire TDARP ile tersine lojistik sektöründe sıklıkla karşılaşılmaktadır (Beullens ve diğ., 2004). Eşzamanlı talepler problemi başlığı altında bulunan Eşzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (*Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery*) ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu problem ilk olarak Min (1989) tarafından ele alınmış ve çalışmada bir kütüphanedeki kitapların dağıtım ve toplama süreçleri incelenmiştir. Bir diğer çalışmada, Kanada'daki bir şirkette meşrubat dağıtımı gerçekleştirilirken boş şişelerin de toplandığı bir gerçek hayat problemi ele alınmıştır (Privé ve diğ., 2006).

Diğer bir başlık olan tek talep problemi için ilk çalışma Deif ve Bodin (1984) tarafından Önce Dağıt-Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (*VRP with Backhauls*) olarak adlandırılmıştır. Bu konu ile ilgili başka bir çalışma ise Goetschalckx ve Jacobs-Blecha (1989) tarafından yapılmıştır. Buna göre müşteriler, dağıtım (*linehaul*) ve toplama (*backhaul*) müşterileri şeklinde ikiye ayrılmıştır. Depodan yükleme işlemi sonrasında çıkan araçlar, dağıtım müşterilerinin tamamına uğradıktan sonra toplama müşterilerine de giderek tekrar depoya dönmelidir (Atasagun ve Karaoğlu, 2019). Bu problem hakkında daha fazla bilgi almak için Koç ve Laporte (2018) tarafından ele alınmış olan literatür taraması incelenebilir.

2.2. Çoktan çoğa TDARP (*Many-to-many problems / M-M*)

Çoktan çoğa TDARP'lerde, bir nokta bir ya da daha fazla ürün için başlangıç veya varış noktası olabilmekte ve müşteriden müşteriye ürün taşımacılığına izin verilmektedir. Bu problem, tek bir ürünün taşınması gereken duruma odaklanıyorsa Tek Ürünlü Çoktan Çoğa TDARP (*One-Commodity Many-to-Many PDVRP*), birden fazla ürünün taşınması

gereken duruma odaklanıyorsa Çok Ürünlü Çoktan Çoğa TDARP (*Multi-Commodity Many-to-Many PDVRP*) olarak adlandırılmaktadır. Giyim sektöründe; perakende mağazalar arasında malların taşınması, lojistik sektöründe; bisiklet veya araba paylaşım sistemlerinin yönetilmesi bu problem tipine örnek gösterilebilir.

Çoktan çoğa TDARP ile ilgili mevcut çalışmaların büyük bir kısmında tek ürünlü duruma odaklanılmıştır. Hernández-Pérez ve Salazar-González (2004), sistemde bir depo ve tek aracın bulunduğu durumu Tek Ürünlü Topla-Dağıt Gezgin Satıcı Problemi (*One-commodity Pickup and Delivery Traveling Salesman Problem*) olarak tanıtmışlardır. Daha sonraki çalışmalarında ise aynı problem için yeni bir dal-kesme algoritması geliştirmiş ve daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir (Hernández-Pérez ve Salazar-González, 2007).

Anily ve Hassin (1992) yapmış oldukları çalışmada Çok Ürünlü Çoktan Çoğa TDARP'nin tek araçlı özel bir durumu olarak değerlendirilebilecek Takas Problemi (*Swapping Problem*)'ni tanıtmış ve problemde depo dışındaki düğümler arasında nesnelerin yer değiştirmesini incelemişlerdir (Berbeglia ve diğ., 2007). Zhang ve diğ. (2019) ise yapmış oldukları çalışmada Singapur'da kadın ayakkabıları üzerinde uzmanlaşan ve yaklaşık otuz adet satış noktası bulunan bir perakendecinin karşılaştığı bir problemi ele almışlardır. Her satış noktasının belirli ürünler için dağıtım ve toplama talepleri mevcuttur ve bu talepler haftalık olarak merkez depoya bildirilmektedir. Satış noktalarından toplanan ürünler ya merkez depoya götürülmekte ya da aynı tur içerisinde bir başka satış noktasının talebini karşılamak üzere dağıtılmakta olup, problemde amaç işletme maliyetinin yanı sıra depoya dönen ürün sayılarının da en küçüklenmesidir. Bu çalışma, yapı olarak incelemekte olduğumuz problem ile benzer özellikler taşımaktadır ancak satış noktaları tarafından talep edilen ürünlerin ortak olması ve bu ürünlerin depolarda stoklanması bakımından ele aldığımız problemden ayrılmaktadır.

2.3. Birebir TDARP (*One-to-one problems / 1-1*)

Birebir TDARP'lerde, çok sayıda talep bulunmakta olup bir talep, spesifik bir ürünün bir müşteriden alınıp başka bir müşteriye teslimi olarak tanımlanmaktadır. Bu problemde her ürünün belirli olarak bir başlangıç noktası ve bir varış noktası bulunmaktadır. Eğer araçta ürün yerine insan taşımacılığı gerçekleşirse bu problem, Aramalı Taşımacılık Problemi (*Dial-a-Ride Problem*) olarak adlandırılmaktadır. Araç kapasitesi ve talep yükünün 1 birim olduğu, yani aracın aynı anda yalnızca tek bir talebi karşılamasının mümkün olduğu özel durum ise İstifleyici Vinç Problemi (*Stacker Crane*

Problem) olarak adlandırılmaktadır. Lojistik sektöründe; deniz taşımacılığı ile ürünlerin alım noktalarından gemiye yüklenip teslimat noktalarında bırakılması Birebir TDARP tipine örnek olarak verilebilir.

Birebir TDARP literatürü, sistemde bulunan araç sayısına göre tek araçlı ve çok araçlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Cordeau ve diğ., 2008). Birebir problemlerin tek araçlı özel bir durumu olan İstifleyici Vinç Problemi, Frederickson ve diğ. (1976) tarafından tanıtılmış ve çözümü için sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Bu problemin daha genel hali olan Topla-Dağıt Gezgin Satıcı Problemi (*Pickup and Delivery Traveling Salesman Problem*) ise ilk kez yolcu taşımacılığı kapsamında 1978 yılında incelenmiş ve çözümü için sezgisel bir yöneme başvurulmuştur (Stein, 1978a, 1978b).

Literatürde Birebir TDARP ile ilgili yapılan çalışmalar Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Birebir TDARP ile ilgili çalışmalar

Çalışmalar	Çözüm Yöntemi		Amaç Fonksiyonu						Araç Sayısı		Talep Yapısı		Depo[dan](ya) ürün ile [çıkış](giris)
	Kesin Yöntem	Sezgisel Yöntem	Dönen Ürün Miktarını En Küçükleme	Maliyeti En Küçükleme	Mesafeyi En Küçükleme	Araç Sayısını En Küçükleme	Süreyi En Küçükleme	Kararı En Büyükleme	Tek Araçlı	Çok Araçlı	Yalnızca toplama / dağıtım talebi	Hem toplama hem dağıtım talebi	
Hernández-Pérez ve Salazar-González (2009)	*			*					*			*	
Rodríguez-Martín ve Salazar-González (2011)		*			*				*			*	
Plum ve diğ. (2012)	*			*					*			*	
Rodríguez-Martín ve José Salazar-González (2012)		*							*			*	
Gouveia ve Ruthmair (2015)	*			*					*			*	
Castro ve diğ. (2020)	*				*				*			*	
Dumas ve diğ. (1991)	*			*						*	*		
Savelsbergh ve Sol (1998)	*				*	*				*	*		
Nanry ve Barnes (2000)		*					*			*	*		
Li ve Lim (2001)		*			*	*				*	*		
Lau ve Liang (2002)		*			*	*	*			*	*		
Xu ve diğ. (2003)		*		*						*	*		
Lu ve Dessouky (2004)	*			*						*	*		
Mitrović-Minić ve diğ. (2004)		*			*					*	*		
Mitrović-Minić ve Laporte (2004)		*			*					*	*		
Sigurd ve diğ. (2004)	*			*						*	*		
Pankratz (2005)		*			*					*	*		

Çalışmalar	Çözüm Yöntemi		Amaç Fonksiyonu						Araç Sayısı		Talep Yapısı		
	Kesin Yöntem	Sezgisel Yöntem	Dönen Ürün Miktarını En Küçükleme	Maliyeti En Küçükleme	Mesafeyi En Küçükleme	Araç Sayısını En Küçükleme	Süreyle En Küçükleme	Karını En Büyükleme	Tek Araçlı	Çok Araçlı	Yalnızca toplama / dağıtım talebi	Hem toplama hem dağıtım talebi	
Lu ve Dessouky (2006)		*		*						*	*		
Bent ve Van Hentenryck (2006)		*		*		*				*	*		
Ropke ve Pisinger (2006)		*			*					*	*		
Gendreau ve diğ. (2006)		*		*						*	*		
Ropke ve diğ. (2007)	*			*						*	*		
Sáez ve diğ. (2008)		*					*			*	*		
Ghiani ve diğ. (2009)		*					*			*	*		
Ropke ve Cordeau (2009)	*			*						*	*		
Venkateshan ve Mathur (2011)	*			*						*	*		
Baldacci ve diğ. (2011)	*			*						*	*		
Öncan ve diğ. (2011)	*				*					*	*		
Qu ve Bard (2012)		*			*					*	*		
Şahin ve diğ. (2013)		*			*					*	*		
Mesa-Arango ve Ukkusuri (2013)	*			*						*	*		
Treleven ve diğ. (2013)	*						*			*	*		
Demir ve Van Woensel (2013)	*						*			*	*		
Ayadi ve diğ. (2014)		*					*			*	*		
Guerriero ve diğ. (2014)	*			*						*	*		
Dupas ve diğ. (2015)	*			*						*	*		
Iori ve Riera-Ledesma (2015)	*			*						*	*		
Lytvynenko ve diğ. (2016)	*			*						*	*		
Chebby ve Fatnassi (2017)		*		*						*	*		
Liu ve diğ. (2017)	*							*		*	*		
Montero ve diğ. (2017)		*		*						*	*		
Andersen ve Olsen (2018)		*			*					*	*		
Soysal ve diğ. (2018)	*			*						*	*		
Haddad ve diğ. (2018)	*	*			*					*	*		
Factorovich ve diğ. (2020)	*			*						*	*		
Dupas ve diğ. (2020)	*			*						*	*		
Xiong ve diğ. (2020)	*	*						*		*	*		
Qi ve diğ. (2020)	*	*						*		*	*		
Wolfinger (2021)	*	*		*						*	*		
Liu ve diğ. (2021)	*	*		*						*	*		
Drexler (2021)		*		*						*	*		
Luo ve diğ. (2022)	*	*		*						*	*		
Taşdan ve diğ. (2023)	*			*						*	*		
Bu çalışma	*		*	*						*		*	*

Literatürde bir noktanın hem dağıtım hem de toplama noktası olabildiği tek araçlı ilk çalışma, Hernández-Pérez ve Salazar-González (2009) tarafından incelenmiş olup Çok Ürünlü Birebir Topla-Dağıt Gezgin Satıcı Problemi (*Multi-commodity One-to-one Pickup and Delivery Traveling Salesman Problem / m-PDTSP*) olarak tanıtılmıştır. Problemden toplam maliyeti en aza indirmek için iki farklı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli sunulmuştur. Daha sonraki yıllarda ise Rodríguez-Martín ve Salazar-González (2011), en az uzunlukta bir Hamilton turu bulmayı amaçlamış ve başlangıç çözümü üretmek için açgözlü bir sezgisel yöntemle başvurarak MIP tabanlı metasezgisel bir algoritma önermişlerdir. Diğer bir çalışmada, benzer şekilde açgözlü sezgisel ve Değişken Komşu İniş algoritmalarını kullanarak hibrit bir metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir (Rodríguez-Martín ve José Salazar-González, 2012). Aynı yıl içerisinde Plum ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, gemilerle konteyner taşımacılığı dikkate alınmış olup problemde işletme maliyetlerini minimize etmek için Dal-Kesme ve Dal-Fiyat Algoritması'na başvurulmuştur. Gouveia ve Ruthmair (2015) ise toplam maliyeti en küçüklemeyi hedeflemiş ve problemin çözümü için Dal-Kesme algoritması uygulamışlardır. Son olarak, Castro ve diğ. (2020) yapmış oldukları çalışmada, toplam mesafeyi minimize etmek amacıyla Lagrangian gevşetme metodu kullanarak kesin bir yaklaşım yöntemi kullanmışlardır. Bu çalışmaların hepsinde önce toplama sonra dağıtım noktasına uğrayacak şekilde öncelik kısıtlamaları mevcut olduğundan bütün talepler karşılanmakta ve depoya ürün dönüşü olmamaktadır.

Birebir problemlerin çok araçlı durumunu göz önüne alan ve genellikle Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (*Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem*) olarak adlandırılan çalışmaların çözümü için çok sayıda kesin ve sezgisel yöntemler ortaya konulmuştur.

Dumas ve diğ. (1991), homojen kapasiteli araçlar ile toplam seyahat maliyetini en aza indirmeyi amaçlamış ve problemin çözümü için kesin bir algoritma önermişlerdir. Savelsbergh ve Sol (1998) inceledikleri çalışmada, heterojen kapasiteli araçlar ile bir bölgede faaliyet gösteren bir karayolu taşımacılığı şirketinde ortaya çıkan bir sorunu ele alarak kullanılacak araç sayısını ve toplam mesafeyi en aza indirmeyi amaçlamış ve çözüm için Dal-Fiyat Algoritması geliştirmişlerdir. Nanry ve Barnes (2000) yapmış oldukları çalışmada, homojen kapasiteye sahip araçlar ile toplam seyahat sürelerini en aza indirmeyi amaçlamış ve problemin çözümü için Tabu Arama yaklaşımını kullanmışlardır. Li ve Lim (2001) çalışmalarında, kullanılacak homojen kapasiteli araç sayısını, toplam mesafeyi, bekleme ve çizelgeleme süresini en aza indirmeyi amaçlamış ve problemin

çözümü için Tabu Arama ve Tavlama yaklaşımını kullanmışlardır. Lau ve Liang (2002), kullanılacak homojen kapasiteli araç sayısını ve toplam mesafeyi en aza indirmeyi amaçlamış ve problemin çözümü için iki aşamalı bir yönteme başvurmuşlardır. Xu ve diğ. (2003) yapmış oldukları çalışmada, heterojen kapasiteye sahip araçlar ile toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlamış ve sütun üretme tabanlı bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. Lu ve Dessouky (2004) ele aldıkları çalışmada, heterojen kapasiteli araçlar ile toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlamış olup bir tamsayılı programlama modeli sunmuşlar ve problemin çözümü için Dal-Kesme Algoritması geliştirmişlerdir. Birkaç yıl sonra ise Lu ve Dessouky (2006), aynı problem için sezgisel bir yöntem kullanmışlardır. Mitrović-Minić ve diğ. (2004) inceledikleri çalışmada, mektup veya küçük paketlerden oluşan talepleri taşıyan sınırsız kapasiteye sahip araçlar ile toplam mesafeyi en aza indirmeyi amaçlamış olup sezgisel yöntemlere başvurmuşlardır. Benzer bir çalışma, Mitrović-Minić ve Laporte (2004) tarafından ele alınmıştır. Sigurd ve diğ. (2004), heterojen kapasiteye sahip araçlar ile canlı hayvanların taşınmasını incelemiş olup toplam maliyeti en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Problemin çözümü için bir matematiksel model sunulmuş ve Dinamik Programlama uygulanmıştır. Pankratz (2005) yapmış olduğu çalışmada, homojen kapasiteli araçlar ile toplam mesafeyi en aza indirmeyi amaçlamış olup problemin çözümü için Genetik Algoritma kullanmış ve algoritmayı literatürdeki problem setleri üzerinde test etmiştir. Bent ve Van Hentenryck (2006) çalışmalarında, problemde kullanılacak homojen kapasiteli araç sayısını ve seyahat maliyetlerini en aza indirmek amacıyla Tavlama ve Geniş Komşu Arama algoritmalarından oluşan iki aşamalı bir hibrit algoritma sunmuşlardır. Ropke ve Pisinger (2006), heterojen kapasiteli araçlar ile toplam mesafeyi en aza indirmeyi hedeflemiş ve problemin çözümü için Geniş Komşu Arama sezgiseline başvurmuşlardır. Sonraki yıllarda ise Ropke ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmada, homojen kapasiteli araçlar ile toplam rota maliyetini en aza indirmek için iki yeni matematiksel model önerilmiş, Ropke ve Cordeau (2009) tarafından ele alınan çalışmada ise Dal-Kesme-Fiyat algoritması kullanılmıştır. Gendreau ve diğ. (2006) tarafından incelenen çalışmada, küçük boyutlu talepleri taşıyan sınırsız kapasiteye sahip araçlar ile maliyetleri en aza indirmek amaçlanmış olup problemin çözümü için Komşu Arama sezgisellerine başvurulmuştur. Benzer bir çalışma, Ghiani ve diğ. (2009) tarafından ele alınmıştır. Sáez ve diğ. (2008) çalışmalarında, homojen kapasiteli araçlar ile yolcuların bekleme ve seyahat sürelerini en aza indirmeyi amaçlamış ve problemin çözümü için Genetik Algoritma kullanmışlardır. Venkateshan ve Mathur (2011) ele aldıkları çalışmada, heterojen kapasiteye sahip araçlar

ile müşteri taleplerini karşılama maliyeti en aza indirmek amacıyla bir tamsayılı programlama modeli sunmuşlardır. Baldacci ve diğ. (2011) yapmış oldukları çalışmada, homojen kapasiteli araçlar ile toplam rota maliyetini en aza indirmeyi hedeflemiş ve problemin çözümü için Dal-Kesme-Fiyat algoritmasıyla birleştirilen iki kesin yöntem önermişlerdir. Öncan ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada, homojen kapasiteli 2 araç bulunmakta ve talepler bölünebilmektedir. Problemde amaç, toplam mesafeyi minimize etmek olup çözüm için kesin bir yöntem olan Dal-Kesme Algoritması önerilmiştir. Qu ve Bard (2012), uçak taşımacılığı kapsamında, kullanılacak homojen kapasiteli araç sayısını ve seyahat mesafesini en aza indirmeyi amaçlamış olup problemin çözümü için sezgisel yöntemle başvurmuşlardır. Şahin ve diğ. (2013) tarafından ele alınan çalışma, homojen kapasiteye sahip araçlarla toplam mesafeyi enküçüklemeyi amaçlamış ve bölünmüş yüklere izin vermiştir. Problemin çözümü için Tabu Arama ve Benzetimli Tavlama algoritmasının güçlü yönlerini birleştiren bir sezgisel yöntemle başvurulmuştur. Mesa-Arango ve Ukkusuri (2013), homojen kapasiteli araç filosu ile sistemin toplam geçiş maliyetini en aza indiren rotaları belirlemek için kesin bir yöntem olan Dal-Fiyat Algoritması'nı kullanmışlardır. Treleven ve diğ. (2013) çalışmalarında, birim kapasiteli araçların talepleri toplandıktan sonra teslimatına kadar geçen süreyi en aza indirmeyi amaçlamış ve çözüm için kesin bir yöntem olan Polinom-Zaman/SPLICE Algoritması önermişlerdir. Demir ve Van Woensel (2013), heterojen kapasiteli araç filosu ile yakıt ve sürücü maliyetlerini dikkate alan bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli sunmuşlardır. Önerilen model ile 10 düğümlü 20 adet test probleminde optimal sonuçlar elde edilmiştir. Ayadi ve diğ. (2014) tarafından ele alınan çalışmada, homojen kapasiteli araç filosu ile seyahat sürelerini minimize etmek için kesin bir yöntem olan Dal-Sınır Algoritması uygulanmıştır. Guerriero ve diğ. (2014) yapmış oldukları çalışmada, homojen kapasiteye sahip 25 adet araç ile sürücülerin toplam sürüş ve toplam bekleme sürelerini enküçüklemeyi hedeflemiş ve matematiksel formülasyonlara dayalı iki adımlı bir çözüm yaklaşımını ele almışlardır. Dupas ve diğ. (2015) tarafından incelenen çalışmada, homojen kapasiteli ve üç boyutlu yükleme yapılabilen araçlar ile toplam maliyeti en aza indirmek amacıyla bir matematiksel model önerilmiştir. Bu çalışmada tüm ürünlerin dikdörtgen kutular olduğu varsayılmıştır. Benzer diğer çalışmalar ise Lytvynenko ve diğ. (2016), Dupas ve diğ. (2020) tarafından ele alınmıştır. Iori ve Riera-Ledesma (2015), heterojen kapasiteye sahip araçlar ile toplam rota maliyetini minimize etmeyi amaçlamış ve çözüm için kesin yöntemlerden olan Dal-Kesme, Dal-Fiyat ve Dal-Kesme-Fiyat algoritması olmak üzere üç farklı model kullanmışlardır. Chebbi ve Fatnassi

(2017) çalışmalarında, gerçek dünya uygulamasına yer vermişler ve sınırlı pil kapasiteli elektrikli araçlar ile sistemin toplam enerji tüketimini en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Problemin çözümü için basit bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Liu ve diğ. (2017) yapmış oldukları çalışmada, heterojen kapasiteli araçlarla yaşlılara yönelik kapıdan kapıya ulaşım talebini karşılayan bir optimizasyon problemini ele almışlardır. Problemin amacı, karşılanan talep miktarlarını en üst düzeye çıkarmak olup çözümü için karma tamsayılı programlama modeli sunulmuştur. Montero ve diğ. (2017) ele aldıkları çalışmada, homojen kapasiteli araçlar ile toplam rota maliyetini enküçüklemeyi hedeflemiş ve çözüm için tamsayılı doğrusal programlama tabanlı bir yerel arama algoritması geliştirmişlerdir. Andersen ve Olsen (2018) inceledikleri çalışmada, sabit kapasiteye sahip araçların katettiği mesafeyi en aza indirmek amacıyla polinom zamanlı bir algoritma önermişlerdir. Soysal ve diğ. (2018), heterojen kapasiteli araçlar ile toplam maliyetini minimize etmeye çalışmış ve yeşil rotalama problemini incelemişlerdir. Problemin çözümü için karma tamsayılı programlama modeli önerilmiş ve bir vaka çalışması üzerinde modelin pratikte uygulanabilirliği gösterilmiştir. Haddad ve diğ. (2018) çalışmalarında, homojen kapasiteye sahip araçlar ile rota mesafesini enküçüklemeyi amaçlamış olup çözüm için kesin bir yöntem olan Dal-Fiyat Algoritması ve yerel arama tabanlı bir metasezgisel yöntem sunmuşlardır. Factorovich ve diğ. (2020) tarafından incelenen çalışmada, homojen kapasiteli araç filosu ile toplam rota maliyetini en aza indirmek için karma tamsayılı programlama modeli sunulmuş, daha sonra ise kesin yöntemlerden biri olan Dal-Kesme algoritması önerilmiştir. Xiong ve diğ. (2020) inceledikleri çalışmada, heterojen kapasiteye araçlar ile toplam karı en üst düzeye çıkaran rotaları bulmayı hedeflemiş olup problemin çözümü için tamsayılı programlama modeli önerilmiş ve sezgisel yöntemlerden biri olan Değişken Komşu İniş Algoritması'na başvurmuşlardır. Benzer bir diğer çalışma ise Qi ve diğ. (2020) tarafından ele alınmıştır. Wolfinger (2021) yapmış olduğu çalışmada, homojen kapasiteli araçlar ile toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlamıştır. Test problemleri gerçek dünya verileri üzerinden oluşturulmuş olup çözümü için karma tamsayılı programlama modeli sunulmuş ve Geniş Komşu Arama Algoritması uygulanmıştır. Liu ve diğ. (2021) çalışmalarında, kargo taşımacılığı problemini incelemişlerdir. Problemin amacı heterojen kapasiteli araçlar ile toplam maliyeti enküçüklemek olup çözüm için bir matematiksel model sunulmuş ve sezgisel yöntem olarak Genetik Algoritma kullanılmıştır. Drexl (2021)'in ele aldığı çalışma, heterojen kapasiteye sahip bir araç filosu ile toplam maliyeti enküçüklemeyi amaçlamıştır. Zaman penceresi kısıtlamaları altında problemin çözümü için uyarlanabilir

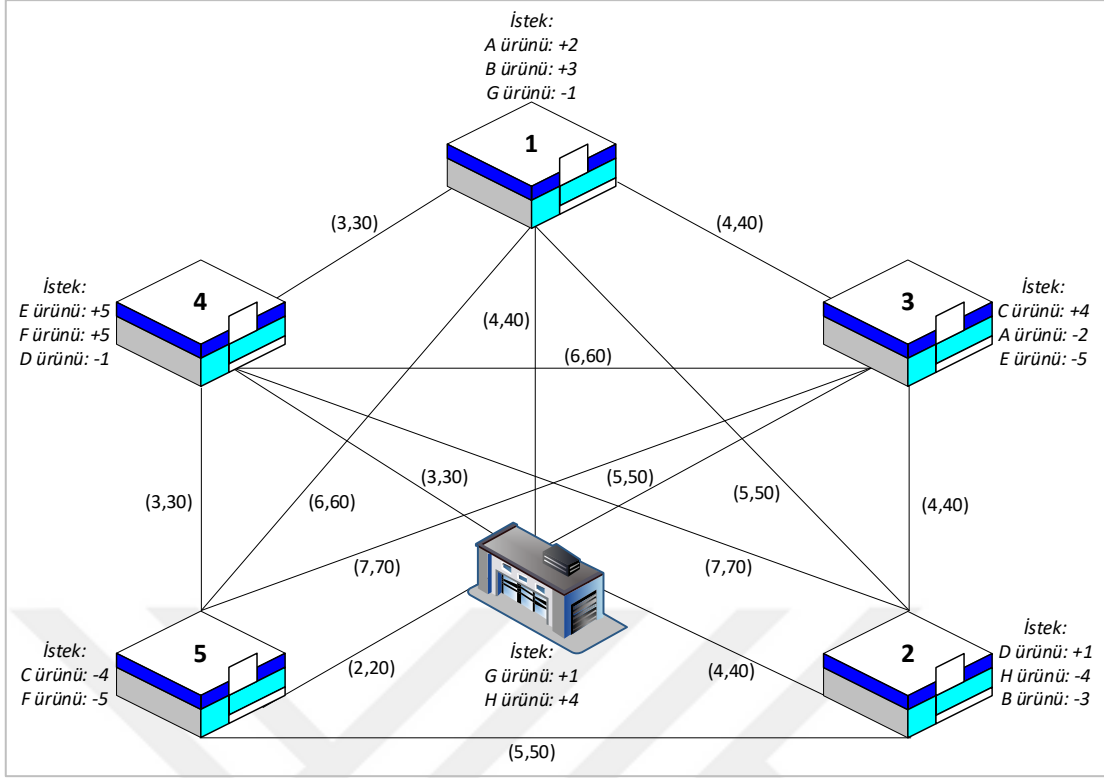
Geniş Komşu Arama Algoritması önerilmiştir. Luo ve diğ. (2022) tarafından incelenen çalışma, homojen kapasiteli kamyonlar ve homojen kapasiteli drone'lar ile toplam maliyeti en aza indirmeyi hedeflemiştir. Problemin çözümü için bir matematiksel model sunulmuş ve Yerel Arama Algoritması kullanılmıştır. Taşdan ve diğ. (2023)'nin inceledikleri çalışmada, heterojen kapasiteli araçlar ile toplam maliyeti en aza indirmek amaçlanmış ve problemin çözümü için karma tamsayılı programlama modeli sunulmuştur.

Yapılan araştırmalar ışığında, bilindiği kadarıyla, literatürde Birebir TDARP ile ilgili tüm çalışmalarda araçlar depodan boş çıkmakta ve depoya boş dönmektedir. Ayrıca çok araçlı problemlerde bir nokta yalnızca toplama veya yalnızca dağıtım noktası olabilmektedir. Bu tez çalışmasında ise araçların teslim edilemeyen ürünlerle depoya dönmesine izin verildiği ve bir noktanın aynı anda hem dağıtım hem de toplama noktası olabildiği durum ele alınmıştır. Bu varsayımlar problemi günlük hayata daha uygun hale getirmektedir ve geliştirilecek olan çözüm yöntemleri ile doğrudan uygulanabilir verimli çözümler elde edilebilecektir. Ayrıca ele alınan problemin literatürde henüz incelenmemiş olduğu görülmekte ve üzerinde çalışmaya değer bir konu olarak değerlendirilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

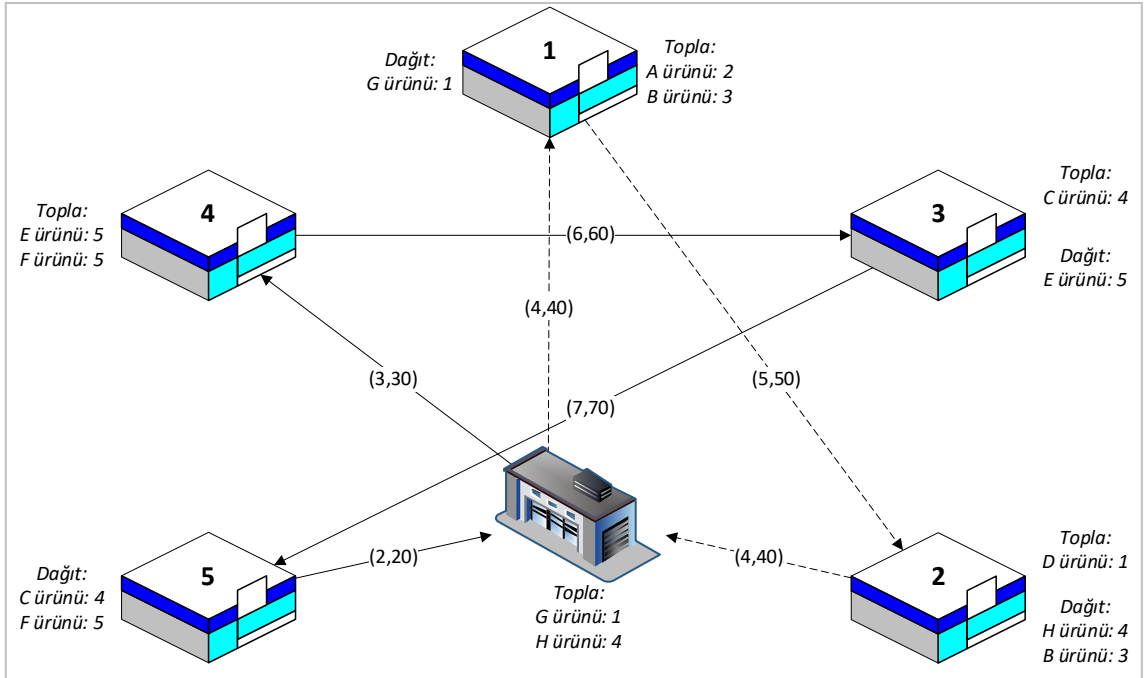
Bu çalışma kapsamında, savunma sanayi sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin üretim kampüsü içerisindeki farklı binalarda konumlanmış iş merkezleri arasındaki dağıtım ve/veya toplama faaliyetlerinin araçlar ile taşınması problemi tanıtılacaktır. Buna göre, problemde bir depo ve n adet iş merkezi bulunmaktadır. Her bir iş merkezinde farklı ürünlerin üretimi gerçekleşmekte olup depoda herhangi bir ürün için uzun süreli stok yapılmamaktadır. Depodan hareket eden araçlar, iş merkezleri arasındaki dağıtım ve/veya toplama taleplerini karşılayarak izin verilen en büyük tur süresi sonunda tekrar depoya dönmek zorundadır. Ayrıca bu süre zarfında araçta bulunan ve teslim edilemeyen ürünler de bir sonraki turda dağıtılmak üzere depoya götürülmekte ve geçici olarak stoklanmaktadır.

Şekil 3.1’de bu toplama/dağıtım süreçleri için bir örnek sunulmaktadır. Bu örnekte 5 adet müşteri ve 1 adet depo bulunmaktadır. Müşteri isteklerinin birimi adet olarak verilmektedir. İstekler (+) ise ürün için başlangıç noktasını, (–) ise ürün için varış noktasını ifade etmekte ve araçların kapasitesi 10 birim olarak kabul edilmektedir. Müşteriler arası mesafeler ve geçiş süreleri birbirleri ile doğru orantılı kabul edilmekte olup hatlar üzerinde sırasıyla kilometre ve dakika cinsinden tanımlanmaktadır. Toplam rota süreleri, izin verilen en büyük tur süresi olan 180 dakikayı aşmayacak şekilde kısıtlanmaktadır. Müşteri servis süreleri ise göz ardı edilmektedir.



Şekil 3.1. GB-TDARP için bir örnek problem

Şekil 3.2’de bu örnek problem için uygun bir çözüm sunulmaktadır. Görüldüğü üzere depodan iki araç çıkarak 0 – 1 – 2 – 0 ve 0 – 4 – 3 – 5 – 0 olmak üzere iki farklı rotayı takip etmektedir.



Şekil 3.2. Örnek problem için uygun bir çözüm

Çizelge 3.1’de ise rotalar boyunca bir düğümden diğer düğüme giderken araçta taşınan ürünler ve araçtaki toplam yük miktarları verilmektedir. Çizelgelerdeki (+) değerler ürünün o düğümden alındığını, (–) değerler ürünün o düğüme teslim edildiğini, diğer değerler ise ürünün o düğümden araçta taşınmaya devam ettiğini ifade etmektedir.

Çizelge 3.1. Rotalar boyunca bir düğümden diğer düğüme giderken araçta taşınan ürünler ve araçtaki toplam yük miktarları

Ürün	Rota-1				Rota-2				
	0	1	2	0	0	4	3	5	0
A	-	+2	2	2	-	-	-	-	-
B	-	+3	-3	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	+4	-4	-
D	-	-	+1	1	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	+5	-5	-	-
F	-	-	-	-	-	+5	5	-5	-
G	+1	-1	-	-	-	-	-	-	-
H	+4	4	-4	-	-	-	-	-	-
Araçtaki Toplam Yük	5	9	3	3	0	10	9	0	0

Çizelgeden de anlaşılacağı üzere Rota-1 boyunca araçta A, B, D, G ve H ürünleri taşınmakta iken Rota-2 boyunca araçta C, E ve F ürünleri taşınmaktadır. Ayrıca G ve H ürünü birinci araç ile depodan çıkarak teslimat noktalarına bırakılmakta, A ve D ürünleri ise teslimat noktalarına bırakılmadan birinci araç ile depoya geri dönmektedir.

3.1. Problem Tanımı

Genelleştirilmiş Birebir Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (GB-TDARP) olarak isimlendirdiğimiz bu problem notasyonel olarak şu şekilde tanımlanabilir: $G = (N, A)$ tam bağlı bir şebeke olsun. Burada $N = \{0, 1, \dots, n\}$ tüm düğümler kümesini göstermektedir. "0" depo düğümünü, $N_c = \{1, \dots, n\}$ müşteriler kümesini, $A = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$ ise düğümler arasındaki hatları temsil etmektedir. Her bir düğüm çifti için $(\forall i, j \in N)$ düğümler arasındaki uzaklık ve geçiş süresi sırasıyla c_{ij} ve t_{ij} ile belirtilmektedir. Her müşteri en az bir istekte (*request*) yer almaktadır ve bir istek spesifik bir ürünün bir müşteriden alınıp belirli bir müşteriye teslimi anlamına gelmektedir. $H = \{1, 2, \dots, k + m\}$ kümesi müşterilerin bu isteklerini göstermektedir. Bu istekler içerisinde $H_0 = \{1, 2, \dots, k\}$ bir önceki dönemde müşterilerden teslim alınıp dağıtımı gerçekleştirilemeden depoya getirilen istekleri (işlemi devam eden istekler), $H_c = \{k + 1, k + 2, \dots, k + m\}$ ise hiç işleme alınmamış müşteri isteklerini ifade etmektedir. Her bir $h \in H$ isteği birbirinden farklı iki düğüm $(i, j \in N, i \neq j)$ ve bu düğümler arasında

taşınacak ürün miktarı (d_{ih} ve d_{jh}) olarak tanımlanmaktadır. Bu düğümlerden birisi çıkış düğümünü (i), diğeri varış düğümünü (j) temsil etmekte olup çıkış düğümünün pozitif bir tamsayı talebi ($d_{ih} > 0$), varış düğümünün ise negatif bir tamsayı talebi ($d_{jh} < 0$) bulunmaktadır ve $d_{ih} = -d_{jh}$ şartı sağlanmak zorundadır. Talep miktarının pozitif olması ($d_{ih} > 0$) ilgili düğümden bulunan spesifik bir ürün için toplama işleminin gerçekleşeceğini, negatif olması ise ($d_{jh} < 0$) ilgili düğüme aynı ürünün teslimat işleminin gerçekleşeceğini göstermektedir. Bir önceki dönemde müşterilerden teslim alınıp dağıtımı gerçekleştirilemeyen isteklerin çıkış düğümü ise depo düğümüdür. Depoda belirli bir kapasiteye (Q) sahip sınırsız sayıda homojen araç bulunmaktadır. Her bir rota bir araç tarafından yürütülecek olup araç belirli bir süre (T) sonunda depoya geri dönmek zorundadır.

GB-TDARP’de iki amaç bulunmakta olup birincisi müşterilerden alınıp teslim edilemeyen (depoya getirilen) ürün miktarının en küçüklenmesi iken ikincisi toplam rota maliyetinin en küçüklenmesidir. GB-TDARP ile aşağıdaki koşulları sağlayan ve bu amaçları en iyileyen rotaların tespit edilmesi hedeflenmektedir.

- Her müşteriye yalnızca bir kez uğranmalı,
- Her rota depoda başlamalı ve depoda bitmeli,
- Rota boyunca araç üzerindeki yük miktarı araç kapasitesini aşmamalı,
- Bir istek bir tur içerisinde karşılanacak ise aynı araç ile toplanıp dağıtılmalı,
- Her düğümden önce dağıtım ardından toplama işlemi gerçekleştirilmeli,
- Rota boyunca geçen toplam süre, izin verilen en büyük tur süresini geçmemelidir.

3.2. Matematiksel Model

GB-TDARP'nin optimal çözümünü elde etmek için geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama (MIP) modelinin karar değişkenleri aşağıdaki gibidir.

Karar değişkenleri:

x_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{eğer araç } i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne gidiyorsa } (\forall i, j \in N) \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

q_{ijh} : i düğümünden j düğümüne giderken araçtaki h ürünü miktarı ($\forall i, j \in N; \forall h \in H$)

b_i : i düğümünde servisin başlangıç zamanı ($\forall i \in N_c$)

GB-TDARP için geliştirilen matematiksel model aşağıdaki gibidir.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{i \in N_c} \sum_{h \in H} q_{i0h} \quad (1a)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (1b)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N_c \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_c \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} q_{jih} + d_{ih} = \sum_{j \in N} q_{ijh} \quad \forall i \in N_c, \forall h \in H_0 \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} q_{jih} + d_{ih} \leq \sum_{j \in N} q_{ijh} \quad \forall i \in N_c, \forall h \in H_c \quad (5)$$

$$\sum_{h \in H} q_{ijh} \leq Q x_{ij} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j \quad (6)$$

$$b_i + t_{i0} x_{i0} \leq T \quad \forall i \in N_c \quad (7)$$

$$b_i - b_j + M_{ij} x_{ij} + (M_{ij} - 2t_{ij}) x_{ji} \leq M_{ij} - t_{ij} \quad \forall i \in N, \forall j \in N_c, i \neq j \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in N \quad (9)$$

$$q_{ijh} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall j \in N, h \in H \quad (10)$$

$$b_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (11)$$

Bu modelde, amaç fonksiyonunu oluşturan denklemlerden (1a) depoya dönen ürün miktarını en azlarken, (1b) toplam maliyeti en azlar. (2) ve (3) numaralı kısıtlar, her müşterinin tam olarak bir kez ziyaret edilmesini sağlar. (4) ve (5) numaralı kısıtlar, depodaki ve müşterideki ürünler için ayrı ayrı taşıma miktarlarını belirler. (6) numaralı kısıt, taşınan ürünlerin araç kapasitesini aşmasını engeller. (7) numaralı kısıt ile toplam rota süresinin tur süresini aşmaması garanti edilir ve (8) numaralı kısıt ile alt turların oluşmaması sağlanır. Burada M_{ij} , yeterince büyük bir sayıdır ve şu şekilde hesaplanır: (8) numaralı kısıt, $x_{ij} = 0$ olduğunda $M_{ij} \geq b_i - b_j + t_{ij}$ halini alır. M_{ij} 'nin yeterince büyük bir değer alması için b_i değerinin olabilecek en büyük değeri $(T - t_{j0})$, b_j değerinin ise en küçük (t_{0i}) değeri alması gerekir. Buna göre, (8) numaralı kısıt grubundaki her kısıtta $M_{ij} = T - t_{0i} + t_{ij} - t_{j0}$ olarak kabul edilmiştir. Son olarak, (9)-(11) numaralı kısıtlar ise karar değişkenleri için işaret kısıtlarıdır.

Birden fazla amaç fonksiyonu bulunan bu problemde, asıl amaç depoya dönen ürün miktarının en azlanması olup aynı miktarda dönen ürüne sahip alternatif çözümler içerisinde toplam maliyeti (1b) en küçük çözüm tercih edilir. Bunun gibi aralarında öncelik ilişkisi bulunan birden fazla amaç fonksiyonuna sahip matematiksel modellerde, sıralı çözüm ile optimal çözümler elde edilebilir. Sıralı çözümde; i) ilk olarak sadece

birincil amaç fonksiyonu (1a) kullanılarak model çözülür ve $\sum_{i \in N_c} \sum_{h \in H} q_{i0h} = Z_1^*$ denklemi kısıt olarak modele eklenir. Burada Z_1^* , birincil amaç fonksiyonunun optimal değeridir, ii) Ardından ikincil amaç fonksiyonu kullanılarak model tekrar çözülür. Ancak aynı modelin iki defa çözülmesi gerektiğinden dolayı çözüm süresi uzamaktadır. Bunun yerine amaç fonksiyonları değişik ağırlıklar ile tek bir amaç fonksiyonunda birleştirilerek de aynı optimal çözümlere ulaşılabilir. Ayrıca ağırlıklar belirlenirken önceliği düşük olan fonksiyonun alacağı herhangi bir değerin, önceliği yüksek olan fonksiyona hiçbir etkisinin olmaması gerekir. Bu amaçla (1a) ve (1b) aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi birleştirilmiştir.

$$\text{Min } Z^* = \sum_{i \in N_c} \sum_{h \in H} q_{i0h} + p_1 \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (12)$$

Bu denklemde p_1 , öncelik ilişkisini sağlayan ağırlık katsayısıdır ve $p_1 = 1/([Z_{GSP}/T] * Z_{GSP})$ şeklinde hesaplanır. Burada, Z_{GSP} problemin Gezgin Satıcı Problemi (GSP) olarak çözülmesi sonucu elde edilen optimal amaç fonksiyonu değeridir. En iyi durumda tek araç ile tüm müşterilere ziyaret gerçekleştirilebilir ve bu rotanın seyahat süresi, optimal GSP çözümünün seyahat süresinden (Z_{GSP}) küçük olmayacaktır. Z_{GSP} 'nin izin verilen en büyük tur süresinden (T) daha büyük olması, birden fazla rotanın oluşmasını gerektirecektir. $[Z_{GSP}/T]$ ile bu rota sayısı belirlenmekte olup $[Z_{GSP}/T] * Z_{GSP}$ ile de yeterince büyük bir değer elde edilerek amaç fonksiyonları arasındaki öncelik ilişkisi sağlanmaktadır.

Verilen matematiksel modelin alt ve üst sınırlarını iyileştirmek için bazı geçerli eşitsizlikler de eklenmiştir.

$$\sum_{j \in N} q_{jih} \leq Q - d_{ih} \quad \forall i \in N_c, h \in H \quad (13)$$

$$-d_{jh}x_{ij} \leq q_{ijh} \leq Q - d_{jh}x_{ij} \quad \forall i \in N_c, \forall j \in N_c, i \neq j, h \in H \quad (14)$$

$$\sum_{h \in H} q_{ijh} \leq Q - x_{ij} \sum_{h \in H} d_{jh} \quad \forall i \in N_c, \forall j \in N_c, i \neq j \quad (15)$$

$$u_h x_{ij} \geq q_{ijh} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, h \in H \quad (16)$$

$$\sum_{i \in N_c} x_{0i} \geq r(N_c) \quad (17)$$

$$\sum_{h \in H} q_{ijh} \geq \left(\sum_{d_{ih} > 0}^{h \in H} d_{ih} \right) x_{ij} + \sum_{\substack{k \in N_c \\ k \neq i, k \neq j}} D_{ki} x_{ki} - \max_{k \in N_c, k \neq i, k \neq j} D_{ki} (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in N_c, \forall j \in N \quad (18)$$

(13)-(15) arasındaki geçerli eşitsizlikler, Zhang ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmadan esinlenilerek geliştirilmiştir. (13) numaralı eşitsizlik ise bir müşteriye hangi düğümden gelinirse gelinsin (depo ya da başka bir müşteri), araç üzerinde o müşteriden alınacak ürünü taşıyacak miktarda boşluk olmasını garantilemektedir. (14) numaralı eşitsizlik, $x_{ij} = 1$ olan durumlar için en az i müşterisinin toplama talebini karşılayacak kadar araçta boş alanın olmasını sağlar. (15) numaralı eşitsizlik ise, herhangi bir müşteriye yapılacak ziyaret için, araçta o müşteriden teslim alınacak ürünleri yerleştirebilecek miktarda yer olmasını sağlar.

(16) numaralı eşitsizlik, $(i, j) \in A$ hattı üzerinde bir ürün taşınması gerçekleştiriliyor ise ($q_{ijh} > 0$), ilgili hat için x_{ij} değişkenini pozitif bir değer almaya zorlamaktadır. Burada u_h , h isteğinin talep miktarıdır. Orijinal halinde $x_{ij} \geq q_{ijh}/u_h$ şeklinde olan bu eşitsizlikte q_{ijh} değişkeninin değeri hiçbir zaman u_h 'dan büyük olmayacaktır. Bu nedenle, $q_{ijh} > 0$ olduğu durumda $x_{ij} = 1$ olmak zorundadır.

(17) numaralı eşitsizlik, depodan çıkacak olan araç sayısını kısıtlar. Burada, $r(N_c) = \text{enbüyük}([Z_{GSP}/T], [\sum_{h \in H_0} d_{0h}/Q])$ şeklinde hesaplanmaktadır. (12) numaralı denklemde de ifade edildiği gibi, $[Z_{GSP}/T]$ değeri GSP kullanılarak elde edilen en az araç sayısını gösterirken $[\sum_{h \in H_0} d_{0h}/Q]$ değeri depodan gönderilecek ürünler göz önüne alındığında ihtiyaç duyulan asgari araç sayısını göstermektedir. Buna göre, depodan en az bu değerler içerisinde büyük olan kadar araç çıkmak zorundadır.

(18) numaralı eşitsizlik, çıkış noktası müşteri ($i \in N_c$) olan bir düğüm çifti arasında taşınan yük miktarını sınırlandırmaktadır. Burada D_{ki} , k müşterisinden alınıp i müşterisine teslim edilmeyecek ürün miktarını temsil etmekte olup $D_{ki} = \sum_{h \in H: d_{kh} > 0, d_{ih} = 0} d_{kh}$ şeklinde hesaplanmaktadır. i müşterisinden çıkışta, araç üzerinde i müşterisinden alınacak ürünlere ek olarak başka bir müşteriden alınıp i müşterisine bırakılmayacak olan ürünler de bulunmalıdır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, bir önceki başlıkta önerilen matematiksel modelin etkinliğini araştırmak için üretilmiş olan test örneklerinin tasarımına ve sonuçlarına yer verilmiştir.

4.1. Test Örnekleri

Modelin performansını incelemek için oluşturulan rassal test örnekleri 10, 20, 30, 40, 50 ve 100 müşteriden oluşmaktadır. Müşteri konumları $[-100, 100]$ aralığında rassal belirlenmiş olup depo merkez noktada (0,0) yer almaktadır. Mesafe (c_{ij}) ve seyahat süresi (t_{ij}) olarak Öklid mesafeleri kullanılmış ve izin verilen en büyük tur süresi 600 birim olarak belirlenmiştir.

Üç seviyede (1, 2 ve 3 olmak üzere) toplama ve dağıtım yoğunluğu dikkate alınmıştır. Burada yoğunluk, bir müşterinin isteklerde görünme sayısıdır. Yoğunluk seviyesi 1, her müşterinin tam olarak bir istekte (toplama veya dağıtım düğümü) görüldüğü anlamına gelirken, 1'den büyük bir yoğunluk seviyesi her müşterinin yoğunluk kadar çok istekte görüldüğü anlamına gelmektedir. Tüm müşterilerin en az bir istekte görünmesini sağlamak için, müşteriler bir listede rastgele sıralanmış olup listenin ilk yarısı, ikinci yarısıyla eşleştirilerek istekler oluşturulmuş ve bu işlem yoğunluk seviyesi kadar tekrarlanmıştır. 15 birim, 30 birim ve sınırsız olmak üzere üç farklı araç kapasitesi tanımlanmış olup her isteğin miktarı $[1, 5]$ aralığında rassal belirlenmiştir. Önceki turda teslim edilemeyen ve depoya getirilen istekleri temsil etmek için, müşteri sayısının %20'sine eşit miktarda istek oluşturulmuştur. Bu istekler için depo düğümü kaynak düğüm, müşteriler arasından rastgele seçilen bir düğüm ise hedef düğüm olarak belirlenmiştir. Yoğunluk seviyesi 1 olduğunda ve kaynağı depo olan hiçbir istek olmadığında, problemin klasik Birebir TDARP'ye dönüştüğüne dikkat edilmelidir. Müşteri, yoğunluk seviyesi ve kapasite parametrelerinin kombinasyonları için beş farklı test örneği üretilmiş olup toplamda $6 \times 3 \times 3 \times 5 = 270$ adet test örneği oluşturulmuştur. Üretilen test örnekleri " $n[a1]k[a2]t[a3]c[a4]s[a5]$ " formatında isimlendirilmiştir. Burada $a1$: müşteri sayısını, $a2$: yoğunluk seviyesini, $a3$: izin verilen en büyük tur süresini, $a4$: araç kapasitesini ve son olarak $a5$: örnek numarasını temsil etmektedir.

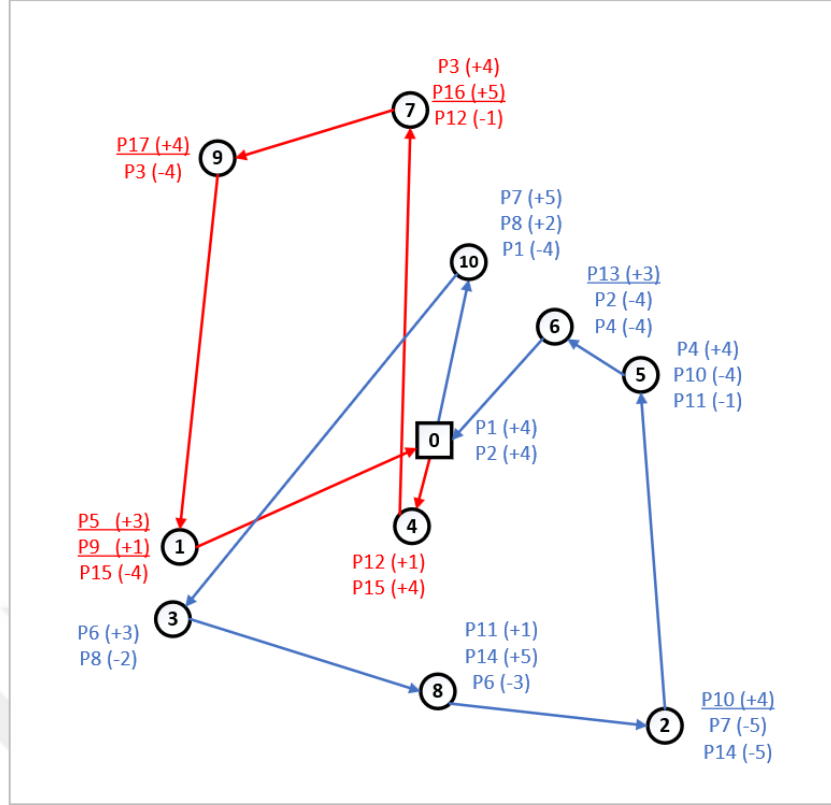
Aşağıda test örneklerine açıklayıcı bir örnek olarak " $n10k3t600c15s1$ " örneği sunulmuştur. Bu örnekte, müşteri sayısı, yoğunluk seviyesi, tur süresi ve araç kapasitesi sırasıyla 10, 3, 600 ve 15 olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1’de (a) düğümlerin koordinatları ile (b) isteklerin miktarı ve toplama ve dağıtım düğümleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Test örneği verileri

(a) Düğümlerin koordinatları			(b) İstek miktarı ve toplama ve dağıtım düğümleri			
Düğüm	X Koordinatı	Y Koordinatı	İstek	Toplama Düğümü	Dağıtım Düğümü	Talep Miktarı
0	0	0	1	0	10	4
1	-74	-31	2	0	6	4
2	67	-83	3	7	9	4
3	-76	-52	4	5	6	4
4	1	-24	5	1	4	3
5	60	19	6	3	8	3
6	35	33	7	10	2	5
7	-7	96	8	10	3	2
8	1	-73	9	1	6	1
9	-63	82	10	2	9	4
10	3	51	11	8	5	1
			12	4	7	1
			13	6	5	3
			14	8	2	5
			15	4	1	4
			16	7	3	5
			17	9	10	4

Açıklayıcı örnek için elde edilen optimal çözüm Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, istekleri karşılamak üzere depodan 2 araç ayrılmaktadır. Altı çizili olarak belirtilen ürünler ise teslim edilemeyerek depoya geri getirilen istekleri ifade etmektedir.



Şekil 4.1. Açıklayıcı örnek için optimal çözüm

Çizelge 4.2’de optimal çözüm için rotalar boyunca bir düğümden diğer düğüme giderken araçta taşınan ürünler ve araçtaki toplam yük miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Açıklayıcı örnek için rotalar boyunca bir düğümden diğer düğüme giderken araçta taşınan ürünler ve araçtaki toplam yük miktarları

Ürün	Rota-1								Rota -2					
	0	10	3	8	2	5	6	0	0	4	7	9	1	0
1	+4	-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	+4	-	-	-	-	-	-4	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+4	-4	-	-
4	-	-	-	-	-	+4	-4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+3	3
6	-	-	+3	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	+5	5	5	-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	+2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+1	1
10	-	-	-	-	+4	4	4	4	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	+1	1	-1	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+1	-1	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	+3	3	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	+5	-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+4	4	4	-4	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+5	5	5	5
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+4	4	4
Araçtaki Toplam Yük	8	11	12	15	9	12	7	7	0	5	13	13	13	13

4.2. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalar, CPLEX 22.1 çözücüsü kullanılarak “Intel(R) Core(TM) i7-7700T CPU @ 2.90 GHz” hızında “16.0 GB” ara belleğe sahip “Windows 10” işletim sistemi ile çalışan bilgisayarda gerçekleştirilmiş ve izin verilen en büyük çözüm süresi 3600 saniye olarak sınırlandırılmıştır.

Deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiş olup birinci aşamada, 3. bölümde sunulan matematiksel model geçerli eşitsizlikler olmadan kullanılarak test örnekleri çözülmüştür. İkinci aşamada ise geçerli eşitsizliklerin etkisini görmek amacıyla önerilen matematiksel model geliştirilen geçerli eşitsizlikler eklenerek kuvvetlendirilmiş ve aynı test örnekleri çözülmüştür.

Çizelgelerde yer alan *Gap* değeri, sınırlandırılan süre içerisinde CPLEX ile elde edilen üst sınır ($Z^{ÜS}$) ve alt sınır (Z^{AS}) arasındaki yüzde sapma değeri olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Bu yüzde sapma değerinin “0”a yaklaşması, elde edilen çözümün optimal çözüme yakın olduğu anlamına gelmektedir.

$$Gap = \left(\frac{Z^{ÜS} - Z^{AS}}{Z^{ÜS}} \right) * 100$$

Deneysel çalışmaların birinci aşaması olan yani modele geçerli eşitsizlikler eklenmeden müşteri sayısı, yoğunluk seviyesi ve araç kapasitesine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Geçerli eşitsizlikler eklenmeden müşteri sayısı, yoğunluk seviyesi ve araç kapasitesine göre elde edilen sonuçlar

Parametre	Seviye	Opt	UÇ	UÇB	Toplam	Gap	CPU
Müşteri Sayısı	10	37	8	-	45	7.83	1215
	20	-	45	-	45	76.61	3600
	30	-	45	-	45	97.95	3600
	40	-	40	5	45	99.02	3600
	50	-	26	19	45	99.37	3600
	100	-	9	36	45	100.00	3600
Yoğunluk Seviyesi	1	15	66	9	90	68.37	3002
	2	15	56	19	90	77.57	3092
	3	7	51	32	90	79.43	3513
Araç Kapasitesi	15	14	50	26	90	70.55	3182
	30	11	62	17	90	77.04	3213
	INF	12	61	17	90	75.52	3212
Genel Toplam		37	173	60	270	74.53	3202

Opt: Optimal çözüm elde edilen örnek sayısı

UÇ: Uygun çözüm bulunan örnek sayısı

UÇB: Uygun çözüm bulunamayan örnek sayısı

CPU: Ortalama çözüm süresi

Üretilen test örnekleri müşteri sayısına göre incelendiğinde, 10 müşterilik problemlerin büyük bir kısmında optimal sonuçların bulunduğu görülmektedir. 20 ve 30 müşterilik problemlerin tamamında uygun bir çözüm bulunmakta ancak 40 müşterilik problemlerden itibaren uygun çözüm bulunamayan test örnekleri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca problem boyutu büyüdükçe ortalama *Gap* değeri de artmaktadır. Bu durum, müşteri sayısının arttıkça problemin çözümünün de zorlaşacağı anlamına gelmektedir.

Yoğunluk seviyesine göre incelendiğinde, seviyenin 1 olduğu durumda 9 adet, 2 olduğu durumda 19 adet, 3 olduğu durumda ise 32 adet test örneğinde uygun çözüm bulunamamıştır. Yoğunluk seviyesi arttıkça müşteri isteklerinin sayısı da artacağından problem boyutu büyümektedir. Dolayısıyla, ortalama *Gap* değeri artmakta ve problemin çözümü giderek zorlaşmaktadır.

Son olarak araç kapasitesine göre incelendiğinde, 3 farklı seviye için de sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu veriler değerlendirilerek araç kapasitesinin problemin zorluğu üzerinde bir etkisi olduğunu söylemek zordur.

Deneysel çalışmaların ikinci aşaması olan yani matematiksel modele geçerli eşitsizlikler eklenmesiyle müşteri sayısı, yoğunluk seviyesi ve araç kapasitesine göre elde edilen sonuçlar ise Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Geçerli eşitsizliklerin eklenmesiyle müşteri sayısı, yoğunluk seviyesi ve araç kapasitesine göre elde edilen sonuçlar

Parametre	Seviye	Opt	UÇ	UÇB	Toplam	Gap	CPU
Müşteri Sayısı	10	45	-	-	45	0.00	306
	20	2	43	-	45	69.06	3494
	30	-	45	-	45	97.80	3600
	40	-	45	-	45	97.43	3600
	50	-	45	-	45	99.51	3600
	100	-	45	-	45	99.93	3600
Yoğunluk Seviyesi	1	17	73	-	90	69.17	2948
	2	15	75	-	90	82.27	3019
	3	15	75	-	90	80.43	3133
Araç Kapasitesi	15	15	75	-	90	76.23	3012
	30	16	74	-	90	77.87	3049
	INF	16	74	-	90	77.76	3039
Genel Toplam		47	223	-	270	77.29	3033

Opt: Optimal çözüm elde edilen örnek sayısı

UÇ: Uygun çözüm bulunan örnek sayısı

UÇB: Uygun çözüm bulunamayan örnek sayısı

CPU: Ortalama çözüm süresi

Buna göre, 10 müşterilik problemlerin tamamında ve 20 müşterilik iki adet problemde optimal sonuçların bulunduğu görülmektedir. Geriye kalan 20 müşterilik 43

adet problemde, 30, 40, 50 ve 100 müşterilik problemlerin tamamında uygun bir çözüm bulunmaktadır.

Yoğunluk seviyesi ve araç kapasitesine göre incelendiğinde ise geçerli eşitsizlikler olmadan çözülen problemlerden farklı olarak, tüm seviyeler için problemlerin tamamında optimal ya da uygun bir çözüm bulunmaktadır.

Ayrıca çözüm süreleri de dikkate alındığında, matematiksel modele geçerli eşitsizlikler eklenerek çözülen örneklerin ortalama çözüm süresinin geçerli eşitsizlikler eklenmeden elde edilen çözüm sürelerine göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Bu karşılaştırmalara ek olarak, her bir geçerli eşitsizliğin matematiksel modele katkısını göstermek için 10, 20 ve 30 müşterilik problemlerde kısıtların gevşetilmesiyle elde edilen sonuçlar incelenmiş olup alt sınırların iyileşme ve kötüleşme oranları Çizelge 4.5'te yer verilmiştir.

İyileşme oranları, önerilen matematiksel modelin gevşetilmesiyle elde edilen çözümler ile modele sadece ilgili geçerli eşitsizliğin eklenmesiyle elde edilen çözümler arasındaki yüzde sapma değerlerinin ortalamasıdır. Benzer şekilde, kötüleşme oranları ise tüm geçerli eşitsizliklerin varlığında önerilen matematiksel modelin gevşetilmesiyle elde edilen çözümler ile modelden ilgili geçerli eşitsizliğin çıkarılmasıyla elde edilen çözümler arasındaki yüzde sapma değerlerinin ortalamasıdır.

Çizelge 4.5. Geçerli eşitsizliklerin varlığında (yokluğunda) alt sınırların iyileşme (kötüleşme) oranları

Eklenen Geçerli Eşitsizlik	İyileşme Oranı (%)	Çıkarılan Geçerli Eşitsizlik	Kötüleşme Oranı (%)
(13)	0.0002	(13)	0.0000
(14)	2.1144	(14)	0.0291
(15)	0.0002	(15)	0.0000
(16)	22.8036	(16)	26.8044
(17)	4.0751	(17)	11.9283
(18)	0.0545	(18)	0.2431

Bu yorumlar ışığında, matematiksel modeli geçerli eşitsizlikler ile kuvvetlendirmek, daha iyi alt ve üst sınırların elde edilmesini sağlamış, çözüm kalitesi ve süresini iyileştirmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Birebir TDARP kapsamında daha önce incelenmediği görülen bir gerçek hayat problemi ilk kez ele alınmış olup Genelleştirilmiş Birebir Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi olarak tanıtılmıştır. Problem için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş ve geçerli eşitsizlikler eklenerek modelin performansı artırılmıştır. Daha sonra ise rassal oluşturulan test örnekleri üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Klasik ARP gibi, TDARP de NP-Zor bir problem olduğundan matematiksel modelle yalnızca küçük boyutlu problemlerde optimal sonuçlara ulaşılmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda;

- Orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için, ARP için kullanılan hızlı ve etkili sezgisel yöntemlerden (En Yakın Ekleme Sezgiseli, Clark&Wright Sezgiseli vb.) ve literatürde birçok NP-zor problemin çözümünde başarılı bir şekilde kullanılan metasezgisel yöntemlerden (Değişken Komşu Arama, Genetik Algoritma vb.) yararlanılarak kısa zaman içerisinde optimal ya da optimale yakın çözümler elde edilebilir.
- Ayrıca optimal çözümleri garanti eden kesin bir yöntem (Dal-Kesme Algoritması vb.) uygulanabilir.
- Bunlara ek olarak, mevcut problemin heterojen araçlı, zaman periyotlu ve seçici ARP vb. varyasyonları ele alınıp geliştirilen matematiksel model ilgili probleme uyarlanabilir.
- Bahsi geçen varyasyonların çözümü için birçok sezgisel/metasezgisel yönetime başvurulabilir.

KAYNAKLAR

- Andersen, L. N., ve Olsen, M. (2018). Towards Asymptotically Optimal One-to-One PDP Algorithms for Capacity 2+ Vehicles. *International Conference on Computational Logistics*,
- Anily, S., ve Hassin, R. (1992). The swapping problem. *Networks*, 22(4), 419-433.
- Atasagun, G. C., ve Karaoğlu, İ. (2019). Zaman bağımlı eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi için bir matematiksel model. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 1743-1756.
- Ayadi, M., Chabchoub, H., ve Yassine, A. (2014). An exact method for the multi-vehicle static demand responsive transport problem based on service quality: The case of one-to-one. 2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT),
- Baldacci, R., Bartolini, E., ve Mingozzi, A. (2011). An exact algorithm for the pickup and delivery problem with time windows. *Operations research*, 59(2), 414-426.
- Bent, R., ve Van Hentenryck, P. (2006). A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows. *Computers & Operations Research*, 33(4), 875-893.
- Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., Gribkovskaia, I., ve Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *Top*, 15, 1-31.
- Beullens, P., Van Oudheusden, D., ve Van Wassenhove, L. N. (2004). Collection and vehicle routing issues in reverse logistics. *Reverse logistics: Quantitative models for closed-loop supply chains*, 95-134.
- Braekers, K., Ramaekers, K., ve Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & industrial engineering*, 99, 300-313.
- Cai, J., Zhu, Q., Lin, Q., Ma, L., Li, J., ve Ming, Z. (2023). A survey of dynamic pickup and delivery problems. *Neurocomputing*, 126631.
- Castro, M. P., Cire, A. A., ve Beck, J. C. (2020). An MDD-based Lagrangian approach to the multicommodity pickup-and-delivery TSP. *INFORMS Journal on Computing*, 32(2), 263-278.
- Chebbi, O., ve Fatnassi, E. (2017). The Multi Depot One-to-One Pickup and Delivery Problem with Distance Constraints: Real World Application and Heuristic Solution Approach. *Computer Information Systems and Industrial Management: 16th IFIP TC8 International Conference, CISIM 2017, Bialystok, Poland, June 16-18, 2017, Proceedings 16*,
- Clarke, G., ve Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., ve Ropke, S. (2008). *Recent models and algorithms for one-to-one pickup and delivery problems*. Springer.
- Dantzig, G. B., ve Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- Deif, I., ve Bodin, L. (1984). Extension of the Clarke and Wright algorithm for solving the vehicle routing problem with backhauling. *Proceedings of the Babson conference on software uses in transportation and logistics management*,
- Demir, E., ve Van Woensel, T. (2013). Mathematical modeling of CO₂ emissions in one-to-one pickup and delivery problems. 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management,
- Drexler, M. (2021). On the one-to-one pickup-and-delivery problem with time windows and trailers. *Central European Journal of Operations Research*, 29, 1115-1162.

- Dumas, Y., Desrosiers, J., ve Soumis, F. (1991). The pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 54(1), 7-22.
- Dupas, R., Grebennik, I., Litvinchev, I., Romanova, T., ve Chorna, O. (2020). Solution strategy for one-to-one pickup and delivery problem using the cyclic transfer approach. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 7(27), 1-9.
- Dupas, R., Grebennik, I., ve Lytvynenko, O. (2015). Combinatorial mathematical model and decision strategy for one-to-one pickup and delivery problem with 3D loading constraints. 2015 Xth International Scientific and Technical Conference" Computer Sciences and Information Technologies"(CSIT),
- Factorovich, P., Méndez-Díaz, I., ve Zabala, P. (2020). Pickup and delivery problem with incompatibility constraints. *Computers & Operations Research*, 113, 104805.
- Frederickson, G. N., Hecht, M. S., ve Kim, C. E. (1976). Approximation algorithms for some routing problems. 17th annual symposium on foundations of computer science (sfcs 1976),
- Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.-Y., ve Séguin, R. (2006). Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(3), 157-174.
- Ghiani, G., Manni, E., Quaranta, A., ve Triki, C. (2009). Anticipatory algorithms for same-day courier dispatching. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 96-106.
- Goetschalckx, M., ve Jacobs-Blecha, C. (1989). The vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 42(1), 39-51.
- Gouveia, L., ve Ruthmair, M. (2015). Load-dependent and precedence-based models for pickup and delivery problems. *Computers & Operations Research*, 63, 56-71.
- Guerriero, F., Pezzella, F., Pisacane, O., ve Trollini, L. (2014). Multi-objective optimization in dial-a-ride public transportation. *Transportation Research Procedia*, 3, 299-308.
- Haddad, M. N., Martinelli, R., Vidal, T., Martins, S., Ochi, L. S., Souza, M. J. F., ve Hartl, R. (2018). Large neighborhood-based metaheuristic and branch-and-price for the pickup and delivery problem with split loads. *European Journal of Operational Research*, 270(3), 1014-1027.
- Hernández-Pérez, H., ve Salazar-González, J.-J. (2004). A branch-and-cut algorithm for a traveling salesman problem with pickup and delivery. *Discrete Applied Mathematics*, 145(1), 126-139.
- Hernández-Pérez, H., ve Salazar-González, J.-J. (2009). The multi-commodity one-to-one pickup-and-delivery traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 987-995.
- Hernández-Pérez, H., ve 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.
- Iori, M., ve Riera-Ledesma, J. (2015). Exact algorithms for the double vehicle routing problem with multiple stacks. *Computers & Operations Research*, 63, 83-101.
- Koç, Ç., ve Laporte, G. (2018). Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives. *Computers & Operations Research*, 91, 79-91.
- Lau, H. C., ve Liang, Z. (2002). Pickup and delivery with time windows: Algorithms and test case generation. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 11(03), 455-472.
- Li, H., ve Lim, A. (2001). A metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows. Proceedings 13th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. ICTAI 2001,

- Liu, C., Aleman, D. M., ve Beck, C. (2017). The Senior Transportation Problem. Workshops at the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence,
- Liu, M., Zhang, C., Wu, Q., ve Meng, B. (2021). Vehicle routing problem with soft time windows of cargo transport O2O platforms. *International Journal of Simulation Modelling*, 20(2), 351-362.
- Lu, Q., ve Dessouky, M. (2004). An exact algorithm for the multiple vehicle pickup and delivery problem. *Transportation Science*, 38(4), 503-514.
- Lu, Q., ve Dessouky, M. M. (2006). A new insertion-based construction heuristic for solving the pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 175(2), 672-687.
- Luo, Z., Gu, R., Poon, M., Liu, Z., ve Lim, A. (2022). A last-mile drone-assisted one-to-one pickup and delivery problem with multi-visit drone trips. *Computers & Operations Research*, 148, 106015.
- Lytvynenko, O., Baranov, O., Dupas, R., ve Grebennik, I. (2016). Three-dimensional one-To-one pickup and delivery routing problem with loading constraints. ILS 2016-6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain,
- Mesa-Arango, R., ve Ukkusuri, S. V. (2013). Benefits of in-vehicle consolidation in less than truckload freight transportation operations. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 80, 576-590.
- Min, H. (1989). The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points. *Transportation Research Part A: General*, 23(5), 377-386.
- Mitrović-Minić, S., Krishnamurti, R., ve Laporte, G. (2004). Double-horizon based heuristics for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(8), 669-685.
- Mitrović-Minić, S., ve Laporte, G. (2004). Waiting strategies for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(7), 635-655.
- Montero, A., José Miranda-Bront, J., ve Méndez-Díaz, I. (2017). An ILP-based local search procedure for the VRP with pickups and deliveries. *Annals of Operations Research*, 259, 327-350.
- Nanry, W. P., ve Barnes, J. W. (2000). Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(2), 107-121.
- Öncan, T., Aksu, D. T., Şahin, G., ve Şahin, M. (2011). A branch and cut algorithm for the multi-vehicle one-to-one pickup and delivery problem with split loads. 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management,
- Pankratz, G. (2005). A grouping genetic algorithm for the pickup and delivery problem with time windows. *Or Spectrum*, 27, 21-41.
- Parragh, S. N., Doerner, K. F., ve Hartl, R. F. (2008a). A survey on pickup and delivery models Part II: Transportation between pickup and delivery locations.
- Parragh, S. N., Doerner, K. F., ve Hartl, R. F. (2008b). A survey on pickup and delivery problems: Part I: Transportation between customers and depot. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58, 21-51.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., ve Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1-11.
- Plum, C. E. M., Pisinger, D., Salazar-González, J.-J., ve Sigurd, M. M. (2012). The multi-commodity one-to-one pickup-and-delivery traveling salesman problem with path

- duration limits. International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012 (IMECS 2012),
- Privé, J., Renaud, J., Boctor, F., ve Laporte, G. (2006). Solving a vehicle-routing problem arising in soft-drink distribution. *Journal of the Operational Research Society*, 57(9), 1045-1052.
- Qi, X., Fu, Z., Xiong, J., ve Zha, W. (2020). Multi-start heuristic approaches for one-to-one pickup and delivery problems with shortest-path transport along real-life paths. *PloS one*, 15(2), e0227702.
- Qu, Y., ve Bard, J. F. (2012). A GRASP with adaptive large neighborhood search for pickup and delivery problems with transshipment. *Computers & Operations Research*, 39(10), 2439-2456.
- Rodríguez-Martín, I., ve José Salazar-González, J. (2012). A hybrid heuristic approach for the multi-commodity one-to-one pickup-and-delivery traveling salesman problem. *Journal of Heuristics*, 18, 849-867.
- Rodríguez-Martín, I., ve Salazar-González, J. J. (2011). The multi-commodity one-to-one pickup-and-delivery traveling salesman problem: a matheuristic. International Conference on Network Optimization,
- Ropke, S., ve Cordeau, J.-F. (2009). Branch and cut and price for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 43(3), 267-286.
- Ropke, S., Cordeau, J. F., ve Laporte, G. (2007). Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. *Networks: An International Journal*, 49(4), 258-272.
- Ropke, S., ve Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 40(4), 455-472.
- Sáez, D., Cortés, C. E., ve Núñez, A. (2008). Hybrid adaptive predictive control for the multi-vehicle dynamic pick-up and delivery problem based on genetic algorithms and fuzzy clustering. *Computers & Operations Research*, 35(11), 3412-3438.
- Savelsbergh, M., ve Sol, M. (1998). Drive: Dynamic routing of independent vehicles. *Operations research*, 46(4), 474-490.
- Sigurd, M., Pisinger, D., ve Sig, M. (2004). Scheduling transportation of live animals to avoid the spread of diseases. *Transportation Science*, 38(2), 197-209.
- Soysal, M., Çimen, M., ve 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.
- Stein, D. M. (1978a). An asymptotic, probabilistic analysis of a routing problem. *Mathematics of Operations Research*, 3(2), 89-101.
- Stein, D. M. (1978b). Scheduling dial-a-ride transportation systems. *Transportation Science*, 12(3), 232-249.
- Şahin, M., Çavuşlar, G., Öncan, T., Şahin, G., ve Aksu, D. T. (2013). An efficient heuristic for the multi-vehicle one-to-one pickup and delivery problem with split loads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 169-188.
- Taşdan, M. E., MENTEN, C., SOYSAL, M., ve ÇİMEN, M. (2023). Heterojen Araçlar ile Sürdürülebilir Birebir Toplama ve Dağıtım Problemi Üzerine Bir Analiz. *Verimlilik Dergisi*, 57(1), 23-44.
- Toth, P., ve Vigo, D. (2002). An overview of vehicle routing problems. *The vehicle routing problem*, 1-26.
- Toth, P., ve Vigo, D. (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. SIAM.

- Treleven, K., Pavone, M., ve Frazzoli, E. (2013). Asymptotically optimal algorithms for one-to-one pickup and delivery problems with applications to transportation systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(9), 2261-2276.
- Venkateshan, P., ve Mathur, K. (2011). An efficient column-generation-based algorithm for solving a pickup-and-delivery problem. *Computers & Operations Research*, 38(12), 1647-1655.
- Wolfinger, D. (2021). A large neighborhood search for the pickup and delivery problem with time windows, split loads and transshipments. *Computers & Operations Research*, 126, 105110.
- Xiong, J., Qi, X., Fu, Z., ve Zha, W. (2020). Split Demand One-to-One Pickup and Delivery Problems with the Shortest-Path Transport along Real-Life Paths. *IEEE Access*, 8, 150539-150554.
- Xu, H., Chen, Z.-L., Rajagopal, S., ve Arunapuram, S. (2003). Solving a practical pickup and delivery problem. *Transportation Science*, 37(3), 347-364.
- Zhang, Z., Cheang, B., Li, C., ve Lim, A. (2019). Multi-commodity demand fulfillment via simultaneous pickup and delivery for a fast fashion retailer. *Computers & Operations Research*, 103, 81-96.