

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HETEROJEN ARAÇ FİLOLU, PARÇALI TESLİMATLI, AÇIK VEYA KAPALI  
UÇLU ROTALAR İÇEREBİLEN ZENGİN ARAÇ ROTALAMA  
PROBLEMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kemal KAYA**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYZU**

**Ağustos 2018**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151311032 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Kemal KAYA** 'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**HETEROJEN ARAÇ FİLOLU, PARÇALI TESLİMATLI, AÇIK VEYA KAPALI UÇLU ROTALAR İÇEREBİLEN ZENGİN ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ**" başlıklı tezi **8, Ağustos, 2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYZU** .....  
TOBB Ekonomik ve Teknoloji Üniversitesi

**Eş Danışman :** **Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Mustafa Alp ERTEM (Başkan)** .....  
Çankaya Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül ALTIN KAYHAN** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYZU** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Kemal Kaya



## ÖZET

Yüksek Lisans

HETEROJEN ARAÇ FİLOLU, PARÇALI TESLİMATLI, AÇIK VEYA KAPALI  
UÇLU ROTALAR İÇEREBİLEN ZENGİN ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Kemal Kaya

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYZU

Eş Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN

Tarih: Ağustos 2018

Araç Rotalama Problemi, yöneylem araştırmacılarının çalıştıkları temel konulardan biri olmakla birlikte günümüze kadar problemin birçok varyasyonu araştırılmıştır. Çoğu problemin çözümü gerçek hayatta yetersiz kalmaktadır. Problem çözümünün uygulanabilirliğinin artırılması ve daha doğru sonuçların elde edilmesi amacıyla gerçek hayatta karşılaşılabilecek durumlar da dikkate alınmalıdır. Bu durumların bir veya daha fazlasının ele alındığı problemler "Zengin Araç Rotalama Problemi" olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada müşteri talebinin parçalı teslimat ile karşılanabildiği, araç filosunun kapasite ve maliyet açısından farklı tipteki sınırlı sayıda araçlardan oluştuğu ve gereken durumlarda dışarıdan araç kiralanarak açık uçlu rotalar oluşturulabilen senaryo ele alınmıştır. Bu doğrultuda karma tam sayılı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Problemin karmaşıklık seviyesinden ötürü geliştirilen model, boyutu yüksek olan problem örneklerinin çözümünde yetersiz kalmıştır. Makul süreler içerisinde, büyük boyutlu problem örnekleri için kaliteli

Çözümlerin elde edilmesi amacıyla özgün operasyonlar içeren Uyarlamalı Büyük Komşuluk Araması algoritması geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zengin araç rotalama problemi, Parçalı teslimat, Heterojen filo, Açık uçlu rota, Dış kaynak kullanımı.





## **ABSTRACT**

Master of Science

### **A RICH VEHICLE ROUTING PROBLEM INVOLVING SPLIT DELIVERIES, HETEREGENEOUS FLEET AND OUTSOURCING OPTION**

Kemal Kaya

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Asst. Prof. Gültekin KUYZU

Co-Supervisor: Asst. Prof. Salih TEKİN

Date: June 2018

We study a rich vehicle routing problem motivated by a real-life problem, in which by the customer deliveries is done by a heterogeneous fleet with possible split deliveries. The routes can be performed by owned vehicles or outsourced vehicles, the routes of which can be closed or open, respectively. The routes of each hired vehicle ends at the last visited customer while the owned vehicles must return to the depot. Both the owned and the hired vehicles are of types that differ from each other in terms of capacity and cost per unit distance, exhibiting economies of scale. A fixed number of owned vehicles are available for use, while an unlimited number of hired vehicles can be used, albeit at a higher cost per unit distance than an owned vehicle of the same type. Our aim is to construct a set of routes with minimum total cost. We firstly develop a mixed integer linear programming model, and demonstrate the value of allowing flexible splits in deliveries with the help of this model on small

instances. Because of the complexity of the problem, the model fails to find optimal solutions for larger instances in a reasonable time. In order to obtain high quality solutions efficiently, we propose an Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) algorithm with novel operators.

**Keywords:** Rich vehicle routing, Split delivery, Heterogeneous fleet, Outsourcing, Open and closed routes.



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, bu çalışmayı gerçekleştirebileceğime inanan ve bana her zaman destek olan, birlikte çalışmaktan onur duyduğum saygıdeğer hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYZU 'ya ve Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN'e,

Kıymetli zamanlarını ayırarak tezimi okuyan ve tavsiyelerde bulunan tez jürimin üyeleri Doç. Dr. Mustafa Alp ERTEM'e ve Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül ALTIN KAYHAN'a,

Değerli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana burs sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne,

Beni yetiştirerek bu günlere gelmemi sağlayan, çok sevdiğim aileme teşekkür ediyorum.

*Bu çalışmayı, hayatımın boyunca yanımda olan, hiçbir zaman sevgi ve yardımını esirgemeyen, en zor zamanlarımda bana en büyük desteği veren, her zaman kalbimde yer alacak olan, sevgi ve hasret ile andığım ağabeyim Önder KAYA'a adıyorum.*



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>5</b>
<b>3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ</b> .....	<b>11</b>
3.1 Problem Tanımı .....	11
3.1.1 Varsayımlar .....	12
3.2 Tam Sayılı Lineer Matematiksel Model.....	12
3.3 Sezgisel Yöntem.....	14
3.3.1 Uyarlamalı Büyük Komşuluk Araması (UBKA).....	15
3.3.2 Çözüm Kurucu Algoritma.....	15
3.3.3 Parçalama Operatörü .....	17
3.3.4 Onarma Operatörleri .....	17
3.3.4.1 Birleştirme(1-2) operatörleri .....	18
3.3.4.2 Yerleştirme(1-2) operatörleri .....	19
3.3.4.3 Aktarma(1-2-3-4) operatörleri .....	20
3.3.4.4 Paylaştırma(1-2-3-4) operatörleri .....	21
3.3.4 Gürültü Fonksiyonu .....	22
3.3.5 Genel Algoritma.....	23
<b>4. DENEYSEL SONUÇLAR</b> .....	<b>25</b>
4.1 Problem Örneklerinin Oluşturulması .....	25
4.2 Koşturemler.....	27
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>31</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>33</b>
<b>EKLER</b> .....	<b>37</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>45</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1 : Çözüm kurucu algoritmada direkt turların oluşturulması.....	16
Şekil 3.2 : Çözüm kurucu algoritmada iki rotanın birleştirilmesi ile kapalı uçlu bir rotanın oluşturulması .....	17
Şekil 3.3 : Çözüm kurucu algoritmada iki rotanın birleştirilmesi ile açık uçlu bir rotanın oluşturulması.....	17
Şekil 3.4 : Parçalama operatörü ile durakların mevcut rotalarından çıkartılması .....	18
Şekil 3.5 : Sezgisel algoritmada birleştirme-1 operatörü ile operasyon gerçekleştirilmesi.....	19
Şekil 3.6 : Sezgisel algoritmada birleştirme-2 operatörü ile operasyon gerçekleştirilmesi .....	19
Şekil 3.7 : Sezgisel algoritmada yerleştirme-1 ile kapalı uçlu rota oluşturulması ....	20
Şekil 3.8 : Sezgisel algoritmada yerleştirme-2 ile açık uçlu rota oluşturulması .....	20
Şekil 3.9 : Aktarma-2 ile gerçekleştirilen operasyon örneği.....	21
Şekil 3.10 : Aktarma-3 ile gerçekleştirilen operasyon örneği .....	21
Şekil 3.11 : Paylaştırma-2 ile gerçekleştirilen operasyon örneği .....	22





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Aktarma operatörleri ile oluşacak yeni rotaların formları .....	21
Çizelge 3.2 : Paylaştırma operatörleri ile oluşacak yeni rotaların formları .....	22
Çizelge 4.1 : Problem örneklerinde kullanılan araç tipleri .....	26
Çizelge 4.2 : Şirket filosunda bulunan araç tiplerinin sayıları .....	26
Çizelge 4.3 : 1. Veri kümesindeki problem örnekleri için alınan çözümlerin sonuçları .....	27
Çizelge 4.4 : 2. Veri kümesi için sezgisel model ile alınan çözümlerin sonuçları.....	28
Çizelge 4.5 : 3. Veri kümesi için sezgisel model ile alınan çözümlerin sonuçları.....	28
Çizelge Ek.1 : Sezgisel algoritmanın sözde kodu .....	38
Çizelge Ek.2 : 2. Veri kümesinde sezgisel model ile alınan çözümlerinde kullanılan araç sayıları. ....	39
Çizelge Ek.3 : 3. Veri kümesinde sezgisel model ile alınan çözümlerinde kullanılan araç sayıları. ....	40
Çizelge Ek.4 : 2. Veri kümesi için alınan çözümlerde parçalı teslimat yapılan müşteri sayıları .....	41
Çizelge Ek.5 : 3. Veri kümesi için alınan çözümlerde parçalı teslimat yapılan müşteri sayıları .....	42
Çizelge Ek.6 : Operatörlerin yüzde olarak parçalama operatörü ile bozulmuş çözümden daha iyi çözüm bulma oranları. ....	43



## KISALTMALAR

<b>ARP</b>	: Araç Rotalama Problemi
<b>KARP</b>	: Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>ZPARP</b>	: Zaman Pencereleli Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>ÇDARP</b>	: Çok Depolu Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>DSTARP</b>	: Dağıtım ve Sipariş Toplamalı Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>ZARP</b>	: Zengin Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>PTARP</b>	: Parçalı Teslimatlı Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>HFARP</b>	: Heterojen Filolu Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>FBKARP</b>	: Filo Büyüklüğü ve Karışık Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>SFHARP</b>	: Sabit Filolu Heterojen Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>AARP</b>	: Açık Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
<b>TA</b>	: Tabu Arama
<b>UBKA</b>	: Uyarlamalı Büyük Komşuluk Araması
<b>BKA</b>	: Büyük Komşuluk Araması



## 1. GİRİŞ

Yöneylem araştırmacılarının çalıştığı temel problemlerinden biri olan Araç Rotalama Problemi (ARP), literatüre ilk olarak Dantzig ve Ramser [11] tarafından sunulmuştur. Literatüre ilk girdiği tarihten itibaren büyük ilgi çeken problem, tedarik zinciri yönetimi, lojistik ve taşımacılık gibi birçok alanda kullanılmasından dolayı halen büyük önem taşıtmaktadır. Problemin literatürde en çok bilinen varyantı Kapasiteli ARP (KARP), problemin literatürde en çok bilinen varyantıdır. Bu problemde amaç, bir depoda konulmuş homojen araç filosu ile aynı tipteki ürünlerden sabit miktarda talebi olan müşterilere hizmet verecek en düşük maliyetli rotaları oluşturmaktır. Problemdeki müşteriler sadece bir araçtan hizmet alabilmektedir. Bunun yanında, araç rotaları depodan başlayıp depoda sonlanmalıdır ve her aracın taşıdığı yük miktarı araç kapasitesini geçmemelidir. Problemin birçok alanda kullanılmasından ötürü farklı durumlar ve senaryolar ile karşılaşılmaktadır. Bu tür durumlarda problem yapısı değişmekte ve KARP'den farklı amaç fonksiyonu ve kısıtları olan problem varyantları oluşmaktadır. Eksioğlu vd. [14] çalışmalarında ARP ile detaylı bir taksonomi sunmuş ve problem varyantları ve yapılan çalışmaları tanıtmuştur.

Günümüzde müşterilerine karar destek sistemleri geliştiren birçok yazılım firması bulunmaktadır. Bu karar destek sistemlerini kullanacak olan müşterilerin isteklerine cevap verilebilmesi için geliştirilen yazılımların esnek çalışması ve farklı problem türlerine de çözüm üretebilmesi gerekmektedir. Birçok şirketin filosu farklı tipteki araçlardan oluşmaktadır ve problemin üzümünde bu durum dikkate alınmalıdır. Gönderim yapan şirketler parçalı teslimata izin vererek araçların doluluk oranlarını arttırmak isteyebilmektedirler. Kazanç getirmesinin yanı sıra parçalı teslimatlı gönderim bir zorunluluk haline de gelebilmektedir. Müşterilerin toplam talepleri araçların toplam kapasitelerinden kk ise parçalı teslimatlı gönderim ile olurlu bir

çözüm bulunabilir iken KARP ile olurlu bir çözümün elde edilemediği durumlar görülebilmektedir. Ayrıca talepleri araç kapasitesinden büyük olan müşterilere birden fazla aracın hizmet vermesi gerekir. Dağıtımı gerçekleştiren şirketlerin filoları tüm müşterilerin taleplerini karşılayamadığı veya daha uygun çözümlerde bulunan araç tipinin yetersiz olduğu durumlarda dışarıdan araç kiralayabilmektedir. Dışarıdan alınan araçların depoya dönmesi gerekmemektedir. Bu çalışmada konu aldığımız üç durumun ortak özellikleri kazanç getirmeleri ve esneklik sağlamalarıdır.

Gerçek hayat durumları incelendiğinde farklı türdeki problem varyantlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Problemdeki bazı müşterilere belli zaman aralıkları dışında hizmet götürme imkanının olmadığı durumlarda Zaman Pencereli ARP (ZPARP) ortaya çıkmaktadır. Birden fazla depo üzerinden müşterilerine hizmet veren şirketler Çok Depolu ARP'ni (ÇDARP) kullanmaktadır. Bu problemde de araç rotalarının depodan başlayıp depoda sonlanması gerekirken başlangıç ve bitiş depoları farklı olabilmektedir. Bazı durumlarda müşteriler hem bir talep hem de bir tedarik noktası olabilmektedir. Bu durumlarda dağıtımı gerçekleştiren araç ile sipariş toplayabilen Dağıtım ve Sipariş Toplamalı ARP (DSTARP) kullanılmaktadır.

Günümüze kadar problemin birçok varyantının incelenmiş olmasına rağmen elde edilen çözümler bazı gerçek hayat senaryolarına cevap verememektedir. Öyle ki, çözümlerin uygulanabilmesi için üzerinde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bu tür senaryolarda birden çok varyantın aynı problemde ele alınması gerekir. Bundan dolayı daha karmaşık problemler ortaya çıkmaktadır. Bu noktada, son yıllarda Zengin ARP (ZARP) konsepti ortaya çıkmaktadır. Lahyani vd. [23] çalışmalarında, gerçek hayat problemlerine cevap verebilecek, daha kompleks kısıtları veya amaç fonksiyonları olan varyantları inceleyen çalışmaların ZARP olarak adlandırıldığını belirtmiştir. ZARP gerçek hayat dağıtım sistemlerini eksiksiz bir şekilde temsil etmesinden ötürü problemin çözümleri hiçbir modifikasyona ihtiyaç duyulmaksızın uygulanabilmelidir [9]. Bu problemlerin incelenmesinde temelde iki neden vardır. Birincisi, problem yapısı değiştiğinden problemin çözüm aralığı da değişmektedir. Dolayısıyla daha kaliteli çözümler elde edilebilmektedir. İkincisi, problemin çözümü üzerinde bir değişiklik yapılmasına gerek kalınmayacağı için daha kolay bir şekilde uygulamaya sokulmaktadır.

Bu çalışmada bir gerçek hayat problemi konu edilerek bir ZARP araştırılmıştır. Bu problemde müşteri taleplerinin birden fazla araç ile karşılanmasına izin verilmektedir. Rotalamayı gerçekleştiren şirketin, farklı büyüklükte kapasiteleri ve birim yol maliyetleri olan araç tiplerinden oluşan ve her bir tipteki araç sayısının sınırlı olduğu bir araç filosuna sahiptir. Hizmet verilecek müşterilerden bazılarının talepleri filodaki en büyük araç tipinin kapasitesinden büyük olabilmektedir. Şirket kendi filosuna ek olarak aynı kapasiteye sahip araçları da kiralayabilmektedir. Dışarıdan kiralanan bir araç ile oluşturulan rota açık formda olup hizmet verilen son verilen son müşteride sonlanır. Araç tiplerinin birim yol maliyetleri, kapasiteleri arttıkça artmakta ve ölçek ekonomisine uygunluk göstermektedir. Farklı tipteki iki araçtan kapasitesi daha büyük olan aracın birim yol maliyeti daha fazla iken, birim yolda birim ürünü taşımanın maliyeti daha düşüktür. Dışarıdan kiralanan araçların birim yol maliyetleri şirket filusunda bulunan aynı kapasiteye sahip araçların birim yol maliyetlerinden daha büyüktür. Problemin amacı, toplam yol maliyetini en küçükleyecek şekilde tüm müşterilerin taleplerini karşılayacak rotaları oluşturmaktır.

Parçalı teslimata izin veren ilk ARP çalışması Dror ve Trudeau [13] tarafından yapılmıştır. Yazarlar, parçalı teslimata izin vererek hem filonun toplam kat ettiği mesafenin hem de oluşturulan rota sayısının düşürülebileceklerini göstermişlerdir. Literatürde Parçalı Teslimatlı ARP (PTARP) olarak adlandırılan problem, basit şekilde KARP'nin bir gevşetilmiş problemidir. Çünkü, problemde müşterilerin sadece bir araç tarafından hizmet almasını sağlayan kısıt kaldırılmıştır. Dolayısıyla, PTARP'nin çözümünde birden fazla araç tarafından hizmet alan müşteriler bulunabilmektedir.

Heterojen Filolu ARP'de (HFARP) KARP'nin aksine müşterilere farklı tipteki araçlardan oluşan filo ile hizmet verilir. Araç tipleri sabit maliyet, değişken maliyet, kapasite, hacim ve boyut gibi özellikler bakımından ayrışabilmektedir. ARP literatürü incelendiğinde, heterojen filo ile rotalama yapan iki ana problem ile karşılaşmaktadır. Birincisi, araç sayısının sınırsız olduğu Filo Büyüklüğü ve Karışık ARP 'dir (FBKARP) [19]. KARP ile temel farkı optimal araç filosu oluşturmak olan problemin amaç fonksiyonu sabit araç maliyetlerini de içermektedir. İkincisi ise, her bir tipteki araçların sınırlı sayıda olduğu filo kullanan Sabit Filolu Heterojen ARP'dir

(SFHARP) [35]. Mevcut filonun kullanımı ve verimlilik seviyesi bu problemin performans ölçütleridir.

Açık ARP'de her bir araç rotası depodan başlayıp ziyaret edilen son müşteride sonlanır [32]. Bu problemde aracın depoya dönmesi zorunlu değildir. Bu problem müşterilerinin taleplerini gönderebilmek için dışarıdan araç alındığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu problem ile karşılaşan şirketlerin ya bir araç filoları yoktur ya da mevcut araç filoları ile müşteri taleplerini karşılayamamaktadırlar.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir. 2. Bölümde çalışmaya konu olan ARP varyantları için kullanılan sezgisel modeller ve bu varyantların farklı kombinasyonlarını ele alan çalışmalarla ilgili literatür taraması verilmiştir. 3. Bölümde problemin matematiksel tanımı ve kullanılan varsayımlar verilmiştir. Bu bölümde problemin çözümü için geliştirilen matematiksel model ile sezgisel model detaylı bir şekilde sunulmuştur. 4. Bölümde problem örneklerinin nasıl oluşturulduğu anlatılmış ve bu problem örneklerinin matematiksel model ve sezgisel model ile elde edilen çözümler gösterilmiş ve sezgisel modelin çözümleri incelenmiştir. 5. Bölümde elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve çalışmadan elde sonuçlardan bahsedilmiştir. Ayrıca çalışma ile ilgili öneriler sunulmuş ve gelecekte yapılacak çalışmalara değinilmiştir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

ARP literatürü incelendiğinde problemlere çözüm olarak geliştirilen meta sezgisel yöntemlerin daha fazla ön plana çıkmaktadır. Problemlerin karmaşıklık seviyesi arttıkça kesin çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi güçleşmektedir. Özellikle bilgisayar teknolojisindeki gelişim ve sezgisel metotların eriştikleri seviyeler sayesinde birçok araştırmacı bu alana yönelmektedir. Konuya olan ilgi fazla olmasına rağmen rotalama problemlerinde çözüm aranacak olan birçok durum söz konusudur. Özellikle PTARP ve HFARP problemlerinin çözümü için son yıllarda birçok çalışma ortaya çıkmıştır. Archetti ve Speranza [1] çalışmalarında PTARP'nin özelliklerini ve problem ile ilgili son yıllarda ortaya çıkan çalışmaları sunmuştur. Koç vd. [22] tarafından yapılan çalışmada HFARP ile ilgili geniş çaplı bir inceleme bulunmaktadır. Yazarlar ayrıca problem ile ilgili geliştirilen çözüm algoritmalarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Literatür araştırmasında önce bu çalışmaya konu olan varyantları için geliştirilen sezgisel yöntemlerden öne çıkanlar sunulmuştur. Daha sonra bu varyantların kombinasyonlarını konu edinen çalışmalar tanıtılmıştır.

Ho ve Hougland [20] zaman pencereli PTARP için tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Bu çalışmada başlangıç çözümü, zaman limitlerinin göz önünde bulundurulduğu rotalanmamış en yakın müşteri yaklaşımı ile bulunmuştur. Seçilen müşterinin talebi aracın boş kapasitesinden fazla ise müşteriye aracın artık kapasitesi kadar yük bırakılarak müşteri talebi bölünmektedir. Tabu aramada kullanılan komşuluk tipleri de parçalı teslimata izin verecek şekilde uyarlanmıştır. PTARP için bir başka tabu arama algoritması Archetti [2] tarafından geliştirilmiştir. Algoritmada bir komşu çözüm "Rotaları Sırala ve En İyi Komşu" adı verilen prosedürün uygulanması ile edilmiştir. Yazarlar ayrıca Gendreau [17] tarafından geliştirilen GENIUS algoritmasını kullanarak bir iyileştirme aşaması eklemişlerdir. Boudia [15]

PTARP'ye çözüm üretmek için Sörensen ve Sevaux [34] tarafından geliştirilen Popülasyon Yönetimli Memetik Algoritmasını kullanmıştır. Bu çalışmada başlangıç popülasyonu kazanç algoritması [10] ve süpürme metodu [18] ile bulunurken bu çözümlerde parçalı teslimat bulunmamaktadır. Algoritma sonucu oluşan yeni bireylere uygulanan "Paylaştırma" adı verilen bir prosedürle parçalı teslimatlı çözümler elde edilmektedir. Berbotto [4] çalışmasında tanecikli komşuluk yapısının olduğu rastgeleleştirilmiş tanecikli tabu arama algoritması [38] kullanarak PTARP'ye çözüm aramıştır. Çalışmada parçalı teslimat için geliştirilen iki yeni operatör kullanılmıştır.

Imran vd. [21] amaç fonksiyonunda sabit araç maliyetini ve değişken yol maliyetini hesaba katıldığı HFARP'yi çalışmışlardır. Yazarlar problemin çözümü için Değişken Komşuluk Araması sezgisel yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada başlangıç çözümü için önce bütün müşterilerden geçen büyük tur oluşturulmaktadır. Daha sonra araç kapasitelerine uygunluk gösteren olası bütün alt turlar düşünülerek bir maliyet şebekesi oluşturulmaktadır. Son olarak Dijkstra [12] yöntemi ile büyük turdan alt turlar oluşturularak mümkün bir çözüm elde edilmektedir. Brandao\citep [7] FBKARP üzerine bir çalışma gerçekleştirmiş ve problemin çözümü için Tabu Arama algoritmasını önermiştir. Çalışmada algoritmanın çeşitlilik seviyesini yükseltmek için üç farklı başlangıç çözümü yöntemi geliştirilmiştir. Yazar daha iyi çözümler bulabilmek ve algoritmanın çözüm süresini kısaltmak için  $\delta$ -yakınlık kısıtlamasını uygulamıştır. Başka bir çalışmasında [8] SHFARP'yi konu edinen yazar, problemin çözümü için bir önceki çalışmasında [7] yer alan ve yeni komşuluk tipleri eklediği Tabu Arama algoritmasını kullanmıştır. Penna vd. [27] tarafından yapılan çalışmada HFARP için Yinelemeli Lokal Arama yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada önerilen yöntem problemin beş farklı varyantı için çözüm vermektedir. Varyantlar kullanılan filo ve maliyet fonksiyonuna göre değişmektedir. Kullanılan filo ya sınırlı sayıda araç ya da sınırsız sayıda araç içerir. Maliyet fonksiyonu ya sadece değişken yol maliyetini veya sadece sabit araç maliyetini veya her ikisini de içerir.

Brandao [6] AARP'yi çözmek için bir TA algoritması geliştirmiştir. Başlangıç çözümü en yakın komşu sezgiseli ve K-ağaç metodu ile bulunmuştur. Çalışmada çözüm aşamasında araç kapasitesinin aşılması ile veya maksimum rota uzunluğunun

aşılması ile ortaya çıkan olurlu olmayan çözümlere izin verilmekle beraber amaç fonksiyonu bu ihlallerin oluşması durumunda ortaya çıkan ceza maliyetlerini de içerir. Psinger ve Ropke [28] çalışmalarında AARP ile beraber ÇDARP ve ZPARP gibi farklı varyantlara da çözüm üretecek bir yöntem geliştirmişlerdir. Problemin çözümü için birden fazla parçalama ve onarma operatörleri ile çalışan Uyarlamalı Büyük Komşuluk Araması algoritması kullanılmıştır. Her iterasyonda elde edilen çözüm Tavlama Benzetimi sezgiselinde kullanılan kabul kriterlerini sağlaması durumunda kabul edilmektedir. Fu vd. [16] problemin çözümü için TA yöntemini kullanırken başlangıç çözümünü ilk en uzak sezgili ile bulmuşlardır. Li vd. [24] olarak adlandırılan Tavlama Benzetimi yaklaşımının deterministik bir varyantı olan "kayıttan kayıda" metodu ile AARP'ne çözüm aramışlardır. Kayıt en iyi çözümün toplam rota uzunluğunu belirtmektedir. Mevcut çözümün komşuluklarından elde edilen yeni çözümün toplam rota uzunluğu kayıt değeri ile sapma miktarının toplamında küçük ise yeni çözüm kabul edilmektedir. Sapma miktarı kayıt değeri ile orantılı olarak değişmektedir. Fleszar vd. [15] rota uzunlukları üzerinde zaman limit olan ve amacı toplam rota sayısını en küçükleyen AARP'ni çalışmışlardır. Yazarlar problemin çözümü için birden fazla başlangıcı olan Değişken Komşuluk Araması geliştirmişlerdir. Repoussis vd. [30] hibrit evrim stratejisi ile kullanılan araç sayısı ile toplam rota uzunluğunu en küçükleyen AARP'ye çözüm aramışlardır. MirHassani ve Abolghasemi [26] ise Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemini kullanmışlardır.

Tavakkoli vd. [37] çalışmalarında izin vererek sabit heterojen filo ile kullanan ARP'yi ele almışlardır. Çalışmada filo maliyetinin ve katedilen toplam mesafenin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Filo maliyetini kullanılan araç sayısı ve kullanılan araçların toplam artık kapasiteleri oluşturmaktadır. PTARP ve SHFARP'nin birlikte ele alındığı çalışmada matematiksel model geliştirilmiş olup problemin çözüm için Tavlama Benzetimi kullanılmıştır. Başlangıç çözümünde KARP için uygulanabilecek bir yaklaşım ile bulunmuştur. En yüksek kapasiteli araçtan başlanılarak rasgele seçilen müşterilerden geçen rotalar oluşturulur. Rotalama sırasında aracın kullanılmayan kapasitesi seçilen müşterinin talebinden düşük ise müşteriye boş olan kapasite kadar yük bırakılmakta ve böylece parçalı teslimat oluşmaktadır. Geliştirilen TB yönteminde parçalı teslimata izin verebilecek şekilde tasarlanmış 1-opt ve 2-opt komşuluk yapıları kullanılmıştır.

Li vd. [25] çalışmalarında AARP ve SFHARP varyantlarını birlikte ele almışlardır. Problemin çözümü için çok başlangıçlı uyarlamalı bellek tabanlı tabu arama algoritması geliştirilmiştir. Algoritmanın çok başlangıçlı yapılmasındaki amaç çözümün çeşitlilik seviyesini arttırmaktır. Farklı araç rotalarının bulunduğu uyarlamalı bellek talep tabanlı en düşük maliyetli yerleştirme yaklaşımı ile başlatılmıştır. Bellek oluşturulduktan her iterasyonda farklı başlangıç çözümleri bulunmuştur. Başlangıç çözümleri üzerinden tabu arama gerçekleştirilip bellek güncellenmiştir.

Belfiore ve Yozhizaki [3] tarafından yapılan çalışmada FBKARP, PTARP ve ZPARP varyantları birlikte ele alınmıştır. Çalışmada amaç fonksiyonu sabit araç maliyetlerini ve değişken yol maliyetlerini içermektedir. Problemin çözümü için Dağılım Arama yönteminin kullanıldığı çalışmada iki farklı başlangıç çözüm stratejisi uygulanmıştır. Bu stratejilerin ilki Ho ve Hougland [20] tarafından yapılan çalışmadaki yöntemin heterojen filoya uyarlanmış halidir. İkincisi ise maliyet Golden vd. [19] tarafından geliştirilen yöntemin bir uzantısıdır. Bulunan çözümlerden yola çıkılarak önce çeşitlendirme aşaması ardından yoğunlaştırma aşaması gerçekleştirilmiştir.

Yousefikhoshbakht vd. [39] tarafında yapılan çalışmada toplam rotalama maliyetinin en küçüklendiği, sabit heterojen filo ile açık uçlu rotaların oluşturulduğu problem ele alınmıştır. Problemin çözümü için uyarlamalı bellek ile birlikte çalışan tabu arama yöntemi geliştirilmiştir. Çalışmada önce Tarantilis ve Kiranoudis [36] tarafından geliştirilen kurucu algoritma ile birden çok çeşitlendirilmiş başlangıç çözümü elde edilir daha sonra tabu arama yöntemi kullanılmıştır. Tabu aramada rota içi ve rota dışı çalışabilen 2-opt, 0-1 ve 1-1 değişimleri komşuluk yapıları kullanılmıştır.

Bu çalışmada literatürden farklı olarak PTARP, HFARP ve AARP varyantları ilk defa birlikte ele alınmıştır. Ayrıca şirket filosundaki araçların sınırlı sayıda olması ve dışarıdan kiralanacak araçların sınırsız olması nedeniyle FBKARP VE SFHARP varyantları da ele alınmıştır. Çalışmanın literatürden farklı kılan bir diğer özelliği ise problemdeki müşterilerden bazılarının araç kapasitesinden daha büyük taleplerinin olmasıdır. Bu çalışmada geliştirilen matematiksel model ve sezgisel model ile herhangi bir ön çalışma olmadan talebi araç kapasitesinden büyük olan müşterilerin var olduğu problem örnekleri için çözüm alınabilmektedir. Ayrıca, çalışmada komşu

özümler üreten iki yeni operatör geliştirilmiştir. Geliştirilen operatörler ile hem parçalı teslimat gerçekleştirilebilmekte hem de araç tipi değiştirilebilmektedir.





### 3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Bu çalışmada ARP'nin üç farklı varyantı olan PTARP, HFARP ve AARP birlikte ele alınmış olup, ayrı ayrı her varyanta ve varyantların bütün kombinasyonlarına çözüm üretilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle bir karma tam sayılı lineer matematiksel model geliştirilmiştir. Matematiksel model oluşturulmasının amacı problemin optimal çözümlerindeki rotaların yapılarını incelemek ve problemin karmaşıklık seviyesini belirlemektir. Oluşturulan model ile elde edilen çözümlerin irdelenmesinden sonra problemin çözümü için Uyarlamalı Büyük Komşuluk Araması (UBKA) algoritması geliştirilmiştir.

#### 3.1 Problem Tanımı

Bu problem yönsüz bir çizge olan  $G = (V, E)$  üzerinden tanımlanmıştır.  $V = \{0\} \cup N$  kümesi bütün düğümleri temsil etmektedir. Dağıtımın yapıldığı depo  $\{0\}$  düğümü ile gösterilirken hizmet alması gereken müşteriler  $N$  kümesi ile gösterilmektedir.  $E$  kümesi,  $V$  kümesindeki düğümlerin kendi aralarında oluşturdukları yönsüz bağlantıları temsil etmektedir. Her müşterinin karşılanması gereken belli miktardaki talepleri bulunurken,  $i \in N$  müşterisinin talebi  $q_i$  ile temsil edilmektedir. Rotaları oluşturacak olan araç kümesi  $K = K_1 \cup K_2$  ile temsil edilirken  $K_1$  kümesinde şirket filosundaki araçlar,  $K_2$  kümesinde ise dışarıdan kiralanabilecek araçlar bulunur. Araç kümesi farklı kapasiteleri olan araçlardan oluşurken, her  $k \in K$  aracının  $Q_k$  büyüklüğünde kapasitesi bulunmaktadır. Araçların birim yol maliyetleri  $\alpha_k : k \in K$  ile gösterilmektedir.

Bu problemde oluşturulacak her araç rotasının depodan başlaması gerekmektedir. Şirket filosundaki araçların müşterileri ziyaret ettikten sonra depoya dönmesi gerekirken dışarıdan kiralanmış araçların rotaları son ziyaret edilen müşteride sonlanması gerekmektedir. Araçların taşıdıkları toplam yük miktarları araçların

kapasitelerini aşmaması gerekmektedir. Tüm müşteri taleplerinin eksiksiz bir şekilde karşılanması gerekirken, müşteri talepleri birden fazla araç tarafından karşılanabilmektedir. Bu problemde amaç tüm müşteri taleplerini karşılayacak en düşük maliyetli rotaların oluşturulmasıdır.

### 3.1.1 Varsayımlar

Bu problemde araç tipleri ve maliyetleri ile ilgili olarak aşağıda belirtilen durumlar varsayılmıştır.

1) Dışarıdan kiralanan araç tiplerinin kapasiteleri şirket filosunda bulunan araç tiplerinin kapasiteleri ile aynıdır.

2) Şirket filosundaki araçlar ve dışarıdan alınan araçlar ayrı ayrı olmak üzere, araç kapasitesi arttıkça birim yol maliyetleri de artmaktadır. Örnek olarak  $k_1, k_2 \in K_1$  araçları düşünüldüğünde,  $Q_{k_1} < Q_{k_2}$  ise  $\alpha_{k_1} < \alpha_{k_2}$  olmaktadır. Aynı şekilde dışarıdan kiralanan  $k_3, k_4 \in K_2$  araçlar için de,  $Q_{k_3} < Q_{k_4}$  ise  $\alpha_{k_3} < \alpha_{k_4}$  geçerlidir.

3) Araç tiplerinin birim yol maliyetleri ölçek ekonomisine uygunluk göstermektedir. Kapasitesi daha fazla olan araç tipinin birim yol maliyeti daha büyük olurken, birim yolda birim ürünü taşıma maliyeti daha düşük olmaktadır.  $k_1, k_2 \in K_1$  araçları düşünüldüğünde,  $Q_{k_1} < Q_{k_2}$  ise  $\frac{\alpha_{k_1}}{Q_{k_1}} > \frac{\alpha_{k_2}}{Q_{k_2}}$  olmaktadır.

4) Dışarıdan kiralanan bir araç tipinin birim yol maliyeti aynı kapasiteye sahip olan şirket filosundaki araç tipinin birim yol maliyetinden daha fazladır.  $k_1 \in K_1$  ve  $k_3 \in K_2$  araçları düşünüldüğünde,  $Q_{k_1} = Q_{k_3}$  ise  $\alpha_{k_1} < \alpha_{k_3}$  olmaktadır.

### 3.2 Tam Sayılı Lineer Matematiksel Model

Problemin çözümü için ikili ve tam sayı değişkenlerinin tanımlandığı bir tam sayılı lineer matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.



### Karar Değişkenleri :

$x_{ijk} : \begin{cases} 1, \text{ eğer } k \in K \text{ aracı } i \in V \text{ düğümünden } j \in V \text{ düğümüne gider ise} \\ 0, \text{ diğer durumlar} \end{cases}$

$y_{ik} : k \in K \text{ aracı ile } i \in N \text{ müşterisinin karşılanan talep miktarı}$

$z_k : \begin{cases} 1, \text{ eğer } k \in K \text{ aracı kullanılır ise} \\ 0, \text{ diğer durumlar} \end{cases}$

$w_{ik} : \begin{cases} 1, \text{ eğer } k \in K_2 \text{ aracının rotası } i \in N \text{ müşterisinde sonlanır ise} \\ 0, \text{ diğer durumlar} \end{cases}$

$u_{ik} : k \in K \text{ aracının } i \in N \text{ müşterisine kadar (i dahil) bıraktığı yük miktarı}$

### Matematiksel model :

$$\min z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V: j \neq i} \sum_{k \in K} d_{ij} \alpha_k x_{ijk} \quad (3.1)$$

öyle ki :

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} \leq z_k, \forall k \in K \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in V: i \neq r} x_{irk} - \sum_{j \in V: j \neq r} x_{rjk} = 0, \forall k \in K_1, \forall r \in N \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in V: i \neq r} x_{irk} - \sum_{j \in V: j \neq r} x_{rjk} = w_{rk}, \forall k \in K_2, \forall r \in N \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i0k} = z_k, \forall k \in K_1 \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in N} w_{ik} = z_k, \forall k \in K_2 \quad (3.6)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = q_i, \forall i \in N \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ik} \leq z_k Q_k, \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$y_{ik} \leq Q_k \sum_{(i,j) \in E} x_{ijk}, \forall j \in N, \forall k \in K \quad (3.9)$$

$$u_{jk} + y_{ik} - u_{ik} \leq Q_k (1 - x_{ijk}), \forall (i, j) \in E, \forall k \in K \quad (3.10)$$

$$u_{ik} \leq Q_k, \forall i \in N, \forall k \in K \quad (3.11)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall (i, j) \in E, \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$y_{ik} \geq 0 \forall i \in N, \forall k \in K \quad (3.13)$$

$$z_k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K \quad (3.14)$$

$$w_{ik} \in \{0,1\}, \forall i \in N, \forall k \in K \quad (3.15)$$

$$u_{ik} \geq 0 \forall i \in N, \forall k \in K \quad (3.16)$$

Amaç fonksiyonu olan Eşitlik (3.1) toplam yol maliyetini en küçükler. Eşitlik (3.2) ile tüm rotaların depodan başlaması sağlanır. Eşitlik (3.3-3.4) müşteriye gelen ve müşteriden çıkan araç sayılarını dengeler. Eşitlik (3.5) ile şirket filosundaki araçların depoya dönmesi sağlanırken Eşitlik (3.6) ile dışarıdan kiralanan araçların rotalarının bir müşteride sonlanmaları sağlanır. Eşitlik (3.7) ile müşteri taleplerinin karşılanması sağlanırken Eşitlik (3.8) araçların kapasitelerinin aşılmamasını sağlamaktadır. Eşitlik (3.9) bir aracın bir müşteriye yük bırakabilmesi için ilgili müşteriye ziyaret etmiş olmasının gerektiğini modellemektedir. Eşitlik (3.10-3.11) rota oluşturulurken alt turların oluşmasını engellemektedirler. Eşitlik (3.12-3.16) ise modelin işaret kısıtlarıdır.

### 3.3 Sezgisel Yöntem

Bu çalışmanın esas amacı ARP'nin üç farklı varyantı olan PTARP, HFARP ve AARP problemlerini ayrı ayrı veya üçünü de içeren problemleri için makul süreler içerisinde çözebilecek bir algoritmanın geliştirilmesidir. Bu doğrultuda bir UBKA algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada literatürde bulunan operatörler adapte edilirken, iki yeni operatör tipi de geliştirilmiştir.

### **3.3.1 Uyarlamalı Büyük Komşuluk Araması (UBKA)**

UBKA algoritması ilk olarak Ropke ve Psinger [31] tarafından zaman pencereli dağıtım ve sipariş toplamalı ARP için geliştirilmiştir. Çok büyük ölçekli komşuluk arama algoritmaları sınıfına ait olan UBKA [29], Shaw [33] tarafından geliştirilen Büyük Komşuluk Araması (BKA) algoritmasının uzantısıdır. BKA'nın her iterasyonunda, var olan çözüm önce parçalama operatörü ile bozulup daha sonra onarma operatörü ile onarılıp yeni çözüm elde edilir. UBKA'nın BKA'dan farkı birden fazla parçalama ve onarma operatörünün kullanmasıdır.

UBKA algoritması bir başlangıç çözümü ile başlar. Her iterasyonda parçalama operatörlerinden biri ile çözüm bozulur. Daha sonra bozulan çözüm onarma operatörlerinden biri ile onarılıp yeni çözüm elde edilir. Her iterasyonda parçalama ve onarma operatörlerinin seçimi rasgele bir şekilde yapılır. Yeni çözümün amaç fonksiyonu değerine göre üç farklı senaryo ortaya çıkmaktadır. Birinci durumda yeni çözüm genel en iyi çözümden daha iyidir. Bu durumda genel en iyi çözüm güncellenir ve yeni çözüm kabul edilir. İkinci durumda yeni çözüm mevcut çözümden daha iyidir. Bu durumda yeni çözüm kabul edilir ve bu çözüm üzerinden devam edilir. Son durumda ise yeni çözümün amaç fonksiyonu değeri mevcut çözümlükenden daha kötüdür. Bu durumda yeni çözüm belli bir olasılıkla kabul edilir ve böylece daha kötü çözümlere gidilmesine izin verilir. Başlangıçta bütün operatörlerin seçilme olasılıkları eşitken her iterasyon sonunda bu olasılıklar güncellenir. İterasyon sonunda mevcut çözümden daha iyi bir çözüm elde edilmesi durumunda ilgili iterasyonda seçilen operatörlerin seçilme olasılıkları artırılır. Tersini durumda ise seçilen operatörlerin seçilme olasılıkları düşürülür. Böylece sonraki iterasyonlarda kazanç getiren operatörlerin seçilmesi amaçlanır.

### **3.3.2 Çözüm Kurucu Algoritma**

UBKA algoritması bir başlangıç çözümü ile başlamaktadır. Bu aşamada algoritmanın başlatılabilmesi için bir çözüm kurucu algoritma geliştirilmiştir. Çözüm kurucu algoritma kazanç algoritmasından [10] uyarlanmıştır. İlk başta her müşteri için dışarıdan kiralanmış en düşük kapasiteli araçlar ile direkt rotalar oluşturulur. Başlangıç çözümünde parçalı teslimata izin vermek ve daha esnek çözümler elde etmek amacıyla direkt rotalar ile bırakılabilecek en büyük yük miktarları bu araçların

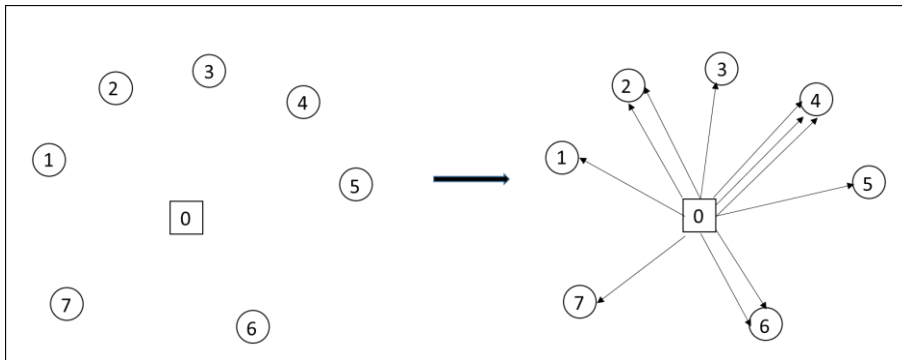
yarı kapasiteleri kadardır. Direkt rotalar oluşturulurken kullanılacak olan  $k'$  aracı Eşitlik (3.17) ile belirlenirken, aracın taşıyacağı yük miktarı  $q'$  ise Eşitlik (3.18) ile belirlenmektedir. Dolayısıyla talebi en küçük araç tipinin kapasitesinin yarısından büyük olan müşterilere birden fazla araç hizmet verir. Direkt rotaların oluşturulması ile ilgili bir örnek Şekil 3.1 ile gösterilmiştir. Direkt rotalar oluşturulduktan sonra pozitif kazanç getirecek şekilde rotalar birleştirilir. Rotalar birleştirilirken yeni rotanın açık veya kapalı olma seçenekleri ayrı ayrı düşünülür. Birleştirilecek olan iki rotanın toplam yük miktarı  $Q'$  olmak üzere, oluşturulacak olan yeni rota Eşitlik (3.19-3.20) ile belirlenmektedir. Kapalı rotalar şirket filosundaki araç ile gerçekleştirilirken, açık rotalar için dışarıdan alınan araçlar kullanılır. İki rotanın birleştirilmesi ile kapalı ve açık formda rotaların oluşturulması sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 ile örneklendirilmiştir. Her iki durumda da birleştirilen rotaların toplam yüklerini taşıyabilecek en düşük kapasiteli araçlar seçilir.

$$k' = \operatorname{argmin}\{Q_k : k \in K_2\} \quad (3.17)$$

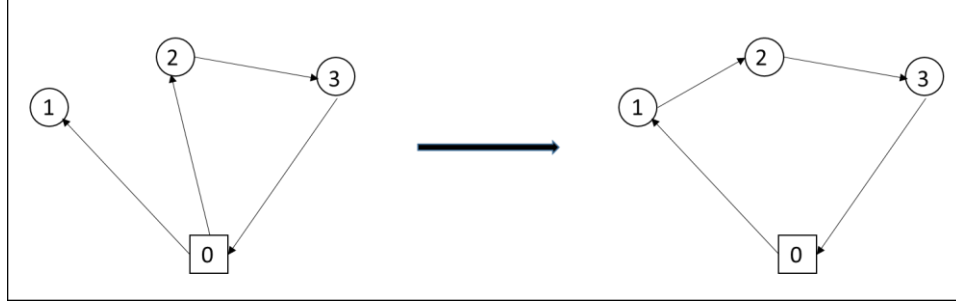
$$q' = \frac{Q_{k'}}{2} \quad (3.18)$$

$$k'_k = \operatorname{argmin}\{Q_k : Q_k > Q', k \in K_1\} \quad (3.19)$$

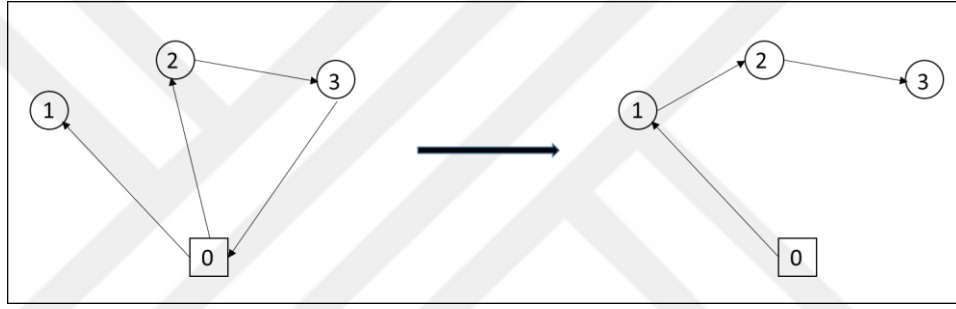
$$k'_a = \operatorname{argmin}\{Q_k : Q_k > Q', k \in K_2\} \quad (3.20)$$



Şekil 3.1 : Çözüm kurucu algorithmada direkt turların oluşturulması.



Şekil 3.2 : Çözüm kurucu algoritmada iki rotanın birleştirilmesi ile kapalı uçlu bir rotanın oluşturulması



Şekil 3.3 : Çözüm kurucu algoritmada iki rotanın birleştirilmesi ile açık uçlu bir rotanın oluşturulması

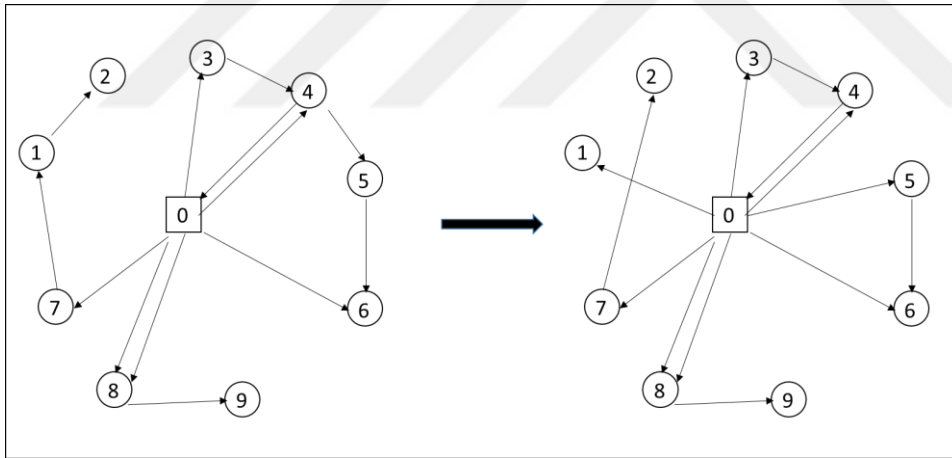
### 3.3.3 Parçalama Operatörü

Parçalama aşaması için bir tane operatör geliştirilmiştir. Bu operatör ile mevcut çözümde bulunan bazı duraklar buldukları rotalardan çıkarılır. Durakların seçilimi rasgele bir şekilde yapılır. Belli yük miktarına ulaşılan dek durak seçimine devam edilir. Seçilen her durak için dışarıdan kiralanın araçlar ile açık formda olan rotalar oluşturulur. Bu rotalar seçilen durağın yük miktarını karşılayabilecek en düşük kapasiteli araç tipi ile gerçekleştirilir. Şekil 3.4'te verilen örnekte 1 ve 4 numaralı müşterilerin durakları mevcut rotalarından çıkarılmıştır.

### 3.3.4 Onarma Operatörleri

Problemin özellikleri düşünüldüğünde operatörler ile parçalı teslimat içeren çözümlerin elde edilmesi gerekmektedir. Heterojen bir filo kullanıldığı için çözüm

sırasında rotaların araç değiştirmelerine de imkan verilmelidir. Benzer şekilde kapalı formda olan rotaların açık forma geçişine ve açık formda olan rotaların kapalı forma geçişine izin verilmelidir. Bu doğrultuda dört farklı operatör tipi ve her operasyon tipinin farklı varyantları geliştirilmiştir. ARP literatürü incelendiğinde birçok çalışmada kullanılmış olan *birleştirme* ve *yerleştirme* operatörleri bu çalışmaya uygun şekilde adapte edilmiştir. Bu operatörlerin parçalı teslimatlı çözümler geliştirmekte yetersiz kaldığı görüldüğünden farklı operasyon tiplerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu doğrultuda bu çalışmaya özgün olan *aktarma* ve *paylaştırma* operatörleri geliştirilmiştir. Kullanılacak olan araç tipinin seçimi operasyon sonucu oluşan rotaya göre yapılmaktadır. Yeni oluşan rotanın aracı rotanın toplam yük miktarını taşıyabilecek en düşük kapasiteli araç tipinden seçilir. Kullanılan operatörün varyantına göre aracın şirket filosundan seçileceği yoksa dışarıdan mı kiralanacağı belirlenir.

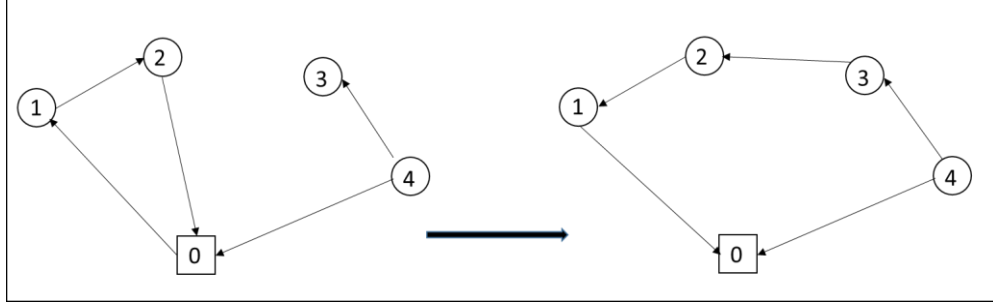


şekil 3.4 : Parçalama operatörü ile durakların mevcut rotalarından çıkartılması.

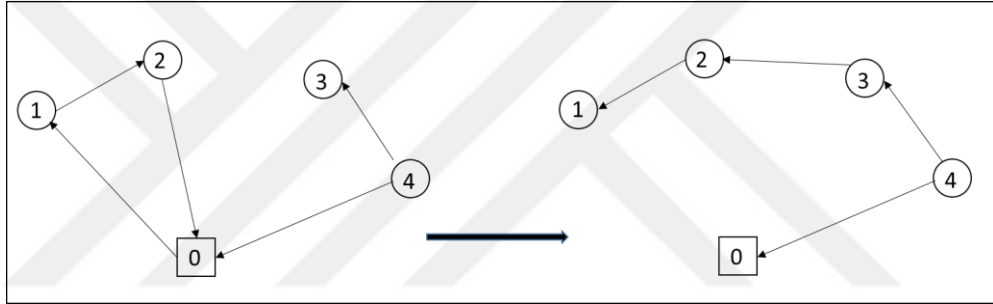
### 3.3.4.1 Birleştirme (1 – 2) operatörleri

Birleştirme operatörleri mevcut çözümdeki iki rotanın birleştirilerek tek bir rota oluşturulmasını sağlarlar. Operatörün 1. varyantının seçilmesi durumunda yeni rota kapalı formda olurken araç şirket filosundan seçilir. 2. varyantının seçilmesi

durumunda dışarıdan kirlanan araç ile açık formda bir rota oluşturulur. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sırasıyla 1. ve 2. varyantla ilgili örnekler verilmiştir.



Şekil 3.5 : Sezgisel algorithmda **birleştirme – 1** operatörü ile operasyon gerçekleştirilmesi



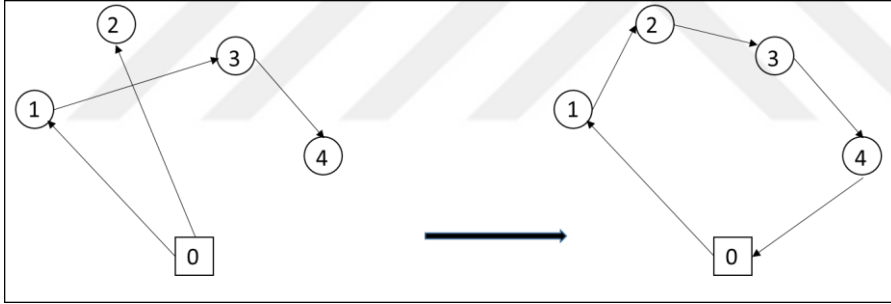
Şekil 3.6 : Sezgisel algorithmda **birleştirme – 2** operatörü ile operasyon gerçekleştirilmesi

### 3.3.4.2 Yerleştirme (1 – 2) operatörleri

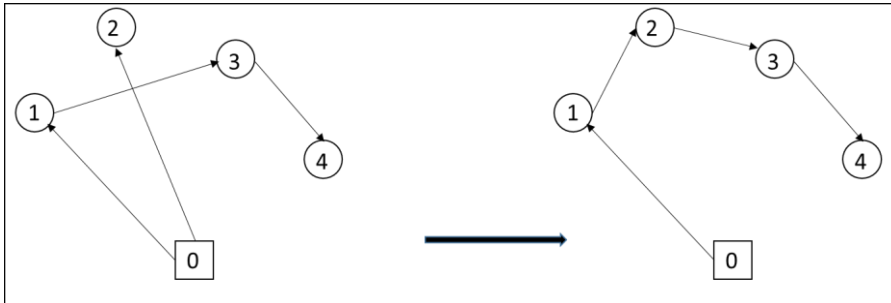
Yerleştirme operatörleri, mevcut çözümde sadece tek bir müşteriye hizmet veren bir direkt rotanın durağının başka bir rotanın herhangi bir pozisyonuna yerleştirilmesini sağlayarak yeni bir rota oluşturur. Oluşan rotanın kapalı veya açık formda olması operatörün 1.veya 2. varyantının seçilmesine bağlıdır. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 ile verilen örneklerde 2 numaralı müşteriye ait durak diğer rotam bir pozisyonuna yerleştirilmiştir.

### 3.3.4.3 Aktarma (1 – 2 – 3 – 4) operatörleri

Aktarma operatörleri mevcut çözümdeki iki rotadan iki yeni rotanın oluşturulmasını sağlarlar. Rotalardan birisi diğer rotanın belli bir yük miktarını alarak diğer rotanın toplam yük miktarını mevcut araç tipinden daha düşük kapasiteli olan araç tipinin kapasitenin altına çeker. Daha düşük kapasiteli araç tipine geçildiği için rotanın birim yol maliyeti düşmektedir. Böylece ilgili rotanın bazı durakları diğer rotaya eklenir. Ayrıca her iki rotanın ortak bir müşterisi oluşur ve bu müşteride parçalı teslimat gerçekleşir. Şekil 3.9’da ve Şekil 3.10’da verilen örneklerde 4 numaralı müşterinin tüm yükü ve 5 numaralı müşterinin bir miktar yükü 1. rotaya aktarılırken 5 numaralı müşteride parçalı teslimat gerçekleşmiştir. Bu operatörler ile iki yeni oluşturulduğu için toplamda dört adet varyant tanımlanmıştır. 1. ve 2. varyantın seçilmesi durumunda yük transferi yapılan yeni rota kapalı formda oluşturulur. Yüklerinin bir kısmının aktarılması ile oluşan diğer rota ise 1.ve 3. varyantlardan birinin seçilmesi durumunda kapalı olmaktadır. Aksi durumda rotalar açık formda olmaktadır. Yeni rotaların hangi formda olacağı Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.



Şekil 3.7 : Sezgisel algorithmada **yerleştirme – 1** operatörü ile kapalı uçlu rota oluşturulması.



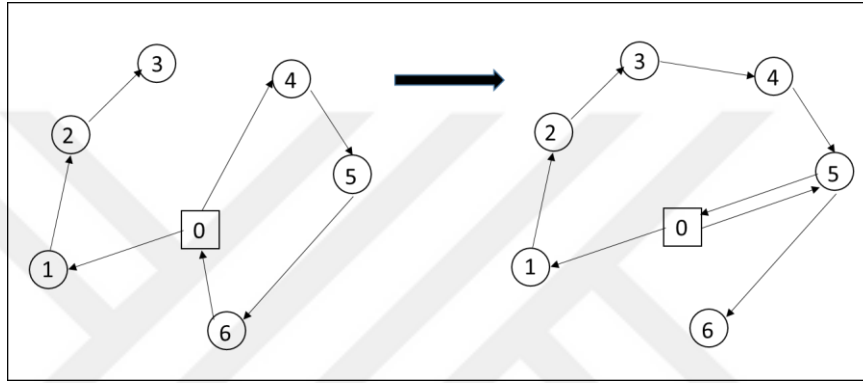
Şekil 3.8 : Sezgisel algorithmada **yerleştirme – 2** operatörü ile açık uçlu rota oluşturulması.



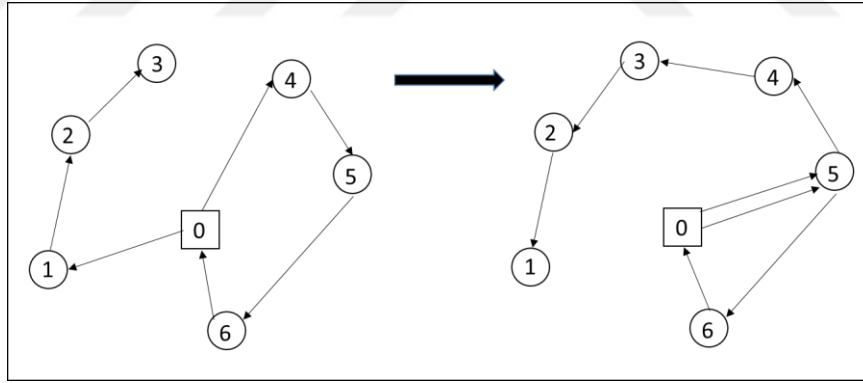
Çizelge 3.1 : **aktarma** operatörleri ile oluşacak yeni rotaların formları.

Varyant	1. rota	2. rota
1	Kapalı	Kapalı
2	Kapalı	Açık
3	Açık	Kapalı
4	Açık	Açık

1. rota : yük transferi yapılan rota.  
2. rota : yüklerinin bir kısmı aktarılan rota.



Şekil 3.9 : **aktarma** – 2 ile gerçekleştirilen bir operasyon örneği



Şekil 3.10 : **aktarma** – 3 ile gerçekleştirilen bir operasyon örneği

### 3.3.4.4 Paylaştırma (1 – 2 – 3 – 4) operatörleri

Paylaştırma operatörleri mevcut direkt rota ile hizmet alan bir durağın iki farklı rotaya paylaştırılmasını sağlar. Böylece bu iki rotanın ortak bir müşterisi oluşur ve ilgili müşteride paraçlı teslimat gerçekleşir. Bu operatörler ile iki yeni rota oluşturulduğu için toplamda dört farklı varyantı tanımlanmıştır. Çizelge 3.2’de oluşacak yeni rotaların formlarının kullanılan varyanta göre değişimleri

belirtilmiştir. Şekil 3.11’de gösterilen örnekte 3 numaralı müşterinin yükü diğer iki rota ile karşılanarak parçalı teslimat gerçekleştirilmiştir.

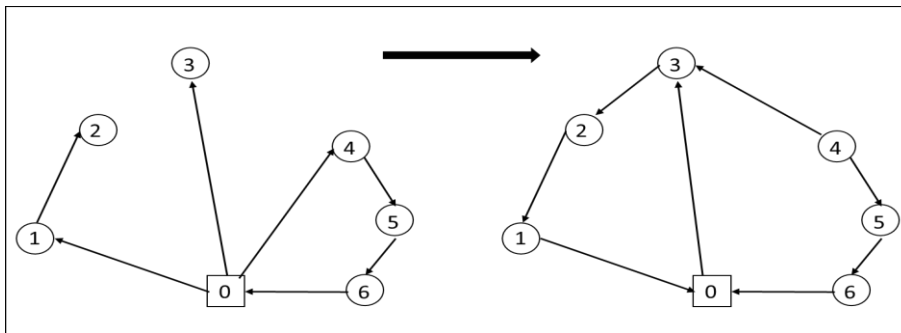
Çizelge 3.2 : *paylaştırma* operatörleri ile oluşacak yeni rotaların formları.

Varyant	1. rota	2. rota
1	Kapalı	Kapalı
2	Kapalı	Açık
3	Açık	Kapalı
4	Açık	Açık

### 3.3.4 Gürültü Fonksiyonu

Herhangi bir onarma operatörü seçildikten sonra olası bütün operasyonlar incelenir ve her operasyonun getireceği kazanç hesaplanır. Sadece pozitif kazanç getiren operasyonlar gerçekleşirse belli bir iterasyondan sonra yerel optimale ulaşılabacaktır. Dolayısıyla negatif kazanç getiren operasyonlara da izin verilmelidir. Bundan dolayı her operasyon için kazanç miktarından üretilen gürültülü kazanç miktarları hesaplanmıştır. Yerel optimalden kaçınmak ve yerellikten çıkmak için algoritmanın onarma aşamasında gürültülü kazanç miktarları pozitif olan operasyonlara izin verilmiştir. Bir operasyonun gürültülü kazanç miktarı olan  $s'$  Eşitlik (3.21) ile hesaplanmaktadır. Burada  $s$  operasyonun kazanç miktarını gösterirken,  $r$  ise  $[-1,1]$  aralığında değer alan düzgün dağılıma sahip rasgele değişkendir. Gürültü çarpanı  $\delta$  operatör tipine göre farklı değerler almaktadır. Bu parametrenin aldığı değere arttıkça  $s$  ile  $s'$  arasındaki sapma miktarı da artmaktadır.

$$s' = s + s * (100 + \delta * r)/100 \quad (3.21)$$



Şekil 3.11 : *paylaştırma* – 2 ile gerçekleştirilen bir operasyon örneği

### 3.3.5 Genel Algoritma

Geliştirilen algoritma, kurucu algoritma ile bulunan başlangıç çözümü ile başlamaktadır. Maksimum iterasyon sayısına ulaşılan dek her iterasyonda ilk olarak çözüm, parçalama operatörü ile bozulur. Bu çalışmada çözümün onarılması iki aşamada gerçekleşmektedir. Bozulan çözüm önce ilk onarma aşamasından geçer. İlk onarma aşamasında *birleştirme* ve *yerleştirme* operatörleri ile operasyonlar gerçekleştirilir. İlk aşamada onarılan çözüm ikinci onarma aşamasına girer. Bu aşamada *aktarma* ve *paylaştırma* operatörleri kullanılır. Algoritmanın sözde kodu ÇizelgeEk. 1 ile gösterilmiştir. Onarmanın iki aşamada yapılmasındaki amaç hem daha iyi çözümler elde etmek hem de algoritmanın daha farklı çözümlerin elde edilmesine olanak sağlayarak esneklik kazanmaktır. İlk onarma aşamasında kullanılan operatörler kazanç getirmeye daha uygundur. İkinci aşamada kullanılan operatörler ile parçalı teslimatlı çözümler elde edilmektedir. İkinci aşamada elde edilen parçalı teslimatlı çözümler bir sonraki iterasyonda daha farklı çözümlere ulaşılmasına da olanak sağlamaktadır. İkinci aşamada kullanılan operatörlerin gürültü çarpanları daha yüksek yapılarak görece daha kötü çözümlere gidilmesine izin verilmektedir. Bu açıdan bakıldığında ikinci aşama hem onarma işlevi görürken hem de parçalama işlevi görmektedir.



#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Matematiksel model ve sezgisel model geliştirilmesinin ardından çözüm aşamasına geçilmiştir. Literatürde bu çalışmaya konu olan PTARP, HFARP ve AARP varyantları birlikte ele alan bir çalışma olmadığı için problem örnekleri de bulunmamaktadır. Dolayısıyla varsayımlara uygun olacak şekilde problem örnekleri üretilmiştir. Daha sonra bu problem örnekleri üzerinden çözümler alınmıştır.

##### 4.1 Problem Örneklerinin Oluşturulması

Bu problem için sırasıyla 7,20 ve 30 müşteri içeren üç farklı problem örnekleri kümesi üretilmiştir. Bu örneklerde müşteriler kenar uzunluğu 200 birim olan bir kare alan içerisinde rasgele noktalara yerleştirilirken depo ise alanın tam orta noktasına yerleştirilmiştir. Dğümler arasındaki öklid mesafeleri hesaplanıp mesafe matrisleri oluşturulmuştur.

Bu problem için kapasiteleri sırasıyla 40, 70 ve 100 birim olan üç farklı araç tipi belirlenmiştir. Araçların birim yol maliyetleri varsayımlara uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Tüm veri kümeleri için aynı özelliklere sahip araç tipleri kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de problem örneklerinde kullanılan araç tiplerinin kapasiteleri ve birim yol maliyetleri verilmiştir. Dışarıdan kiralanan araçlar ile şirket filosundaki araçların birim yol maliyetleri arasındaki oranlar çözümler üzerinde etkisi olmaktadır. Aynı araç tipi için düşünüldüğünde dışarıdan kiralanan aracın birim yol maliyeti şirket filosundaki aracın birim yol maliyetine oranı 1’e yaklaştıkça çözümlerde daha çok dış kaynak kullanımı ile oluşturulan açık uçlu rotaların oluşacağı öngörülmüştür. Bu oranın 2’ye yaklaşması veya 2’yi geçmesi durumunda ise daha çok şirket filosundaki araçların kullanılması ile kapalı uçlu rotalar oluşacaktır. Bunun sebebi ise açık uçlu rotalarda depoya dönüş yoktur. Tek duraklı bir rota düşünüldüğünde, oran 2’nin altında olursa dışarıdan araç kullanmak daha

uygun olacaktır. Yapılan analizleri sonucunda hem tek duraklı rotaların açık uçlu olmasını sağlamak hem de durak sayısı arttıkça oranın etkisini azaltmak için bu oranın 1,8 olması kararlaştırılmıştır. Problemden şirket filosunda sınırlı sayıda araç olduğu varsayılmıştır. Çizelge 4.2’de tüm veri kümeleri için belirlenen araç sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Problem örneklerinde kullanılan araç tipleri.

Araç tipi	Kapasite	Birim yol maliyeti	
		Şirket filosu	Dış kaynak
Q1	40	2,5	4,5
Q2	70	3,5	6,3
Q3	100	4	7,2

Çizelge 4.2 : Şirket filusunda bulunan araç tiplerinin sayıları

Araç tipi	Kapasite	1. veri kümesi	2. veri kümesi	3. veri kümesi
Q1	40	2	4	5
Q2	70	2	4	5
Q3	100	2	4	5

Müşteri talepleri rasgele bir şekilde oluşturulmuştur. Problemden talep miktarı araç kapasitesinden büyük olan müşterilerin de olduğu varsayılmıştır. Problem örneklerinde de araç kapasitelerinden daha büyük talebi olan müşteriler de üretilmiştir. Her problem seti için talep aralıkları farklı olan talep dilimleri ve bu dilimlerin seçilme olasılıkları belirlemiştir. Her müşteri için önce talep dilimi seçilmiştir daha sonra bu dilimin talep aralığından talep miktarı seçilmiştir. Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5 sırasıyla 7 müşterili, 20 müşterili ve 30 müşterili problem örnekleri için belirlenen talep dilimlerini göstermektedir. Farklı talep dilimlerinin kullanılmasındaki amaç talebin araç kapasitesinden büyük olması durumunda parçalı teslimat seçeneğinin kullanılıp kullanılmayacağını görmektir. Kapasiteleri sırasıyla 40, 70 ve 100 birim olan Q1, Q2 ve Q3 araçları düşünüldüğünde, talep miktarı 40’tan veya 70’ten büyük olan bir müşterilerde parçalı teslimatın gerçekleşip gerçekleşmeyeceği görülmek istenmiştir. Diğer taraftan, talebi

en büyük araç tipinin kapasitesinden büyük olan müşterilerde parçalı teslimat olacağı aşıkardır.

#### 4.2 Koşturumlar

Problem örnekleri oluşturulduktan sonra çözümler 16 GB RAM'i olan Intel(R) Core(TM) i5-2500 CPU @3.30G işlemcili bilgisayar ile alınmıştır. Öncelikle matematiksel model ile çözümler alınmıştır. Matematiksel modelin çözümü için IBM ILOG CPLEX Optimizaion Studio Versiyon 12.6.2 kullanılmıştır. Matematiksel model, 7 müşteriden daha fazla müşteri içeren problemlerde optimal çözümü verememiştir. Problem örneklerinde üç farklı araç tipi kullanılmıştır. Hem şirket filosu hem de dışarıdan kiralanacak araçlar düşünülüğünde matematiksel modelde 6 farklı araç kümesi olmaktadır. Araç sayılarının çözümleri etkilememesi için araç sayılarının belli bir üst sınırdan olması gerekmektedir. Mevcut talep dilimleri ile daha fazla müşteriler oluştuğunda araç sayılarının üst sınırları da artmaktadır. Hem müşteri sayısının artması hem de araç sayılarının üst sınırlarının artması matematiksel modelin çözüm sürelerini arttırmaktadır. Örneğin 8 müşterili problem örnekleri için 240 dakika içerisinde çözüm alınmadığı durumlar gözlemlenmiştir. Dolayısıyla sadece 7 müşteri içeren problem örneklerinin optimal çözümleri bulunabilmiştir.

Çizelge 4.3 : 1. Veri kümesindeki problem örnekleri için alınan çözümlerin sonuçları.

Örnek	Matematiksel model		Sezgisel model			%Gap
	Optimal Çözüm	Süre (sn)	Başlangıç çözümü	En iyi çözüm	Süre (sn)	
1	1402,8	52,3	1407,3	1407,3	7,2	0,32
2	2365,6	20,5	2419,0	2365,6	5,2	0
3	1397,6	11,5	1461,2	1397,6	2,9	0
4	2866,9	40,7	3252,5	2866,9	3,5	0
5	1748,3	16,6	1773,0	1748,3	3,3	0
6	1309,1	32,7	1369,4	1309,1	2,4	0
7	1873,3	27,3	2028,5	1873,3	2,7	0
8	2618,7	29,3	2689,7	2645,6	2,6	1,02
9	2202,7	30,5	2265,7	2208,9	2,7	0,28
10	1889,1	28,3	2250,8	1889,1	2,1	0

Java dilinde kodlanan sezgisel algoritma ile problem örnekleri çözdürülmüştür. 7 müşterili problem setindeki 10 örnekten 7'si için optimal çözümler elde edilebilmiştir. Çizelge 4.3'te bu çözümler görülebilmektedir. Diğer problem örnekleri için optimal çözümler bulunmadığı için performans analizi için başlangıç çözümü üzerinden yapılan iyileştirmeler araştırılmıştır. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te sırasıyla 2. veri kümesi ve 3. veri kümesi için sezgisel model ile alınan çözümler verilmiştir.

Çizelge 4.4: 2. veri kümesi için sezgisel yöntem ile alınan çözümlerin sonuçları

Örnek	Başlangıç çözümü	En iyi çözüm	% İyileştirme	Süre (sn)
1	3522,4	3502,8	0,56	40,1
2	4315,7	3933,1	8,87	47,2
3	4621,8	4265,1	7,72	46,5
4	3692,5	3476,6	5,85	32,3
5	3846,1	3714,3	3,43	39,7
6	4634,8	4551,7	1,79	61,1
7	3124,1	3049,9	2,38	34,0
8	4672,6	4351,4	6,87	29,0
9	3987,7	3839,7	3,71	116,2
10	4842,7	4383,3	9,49	44,5

Çizelge 4.5: 3. veri kümesi için sezgisel yöntem ile alınan çözümlerin sonuçları

Örnek	Başlangıç çözümü	En iyi çözüm	% İyileştirme	Süre (sn)
1	5150,1	5007,1	2,78	254,1
2	4725,5	4544,5	3,83	287,8
3	5035,1	4722,7	6,2	236,9
4	5541,2	5411,7	2,34	283,2
5	4522,5	4354,1	3,72	227,9
6	4673,8	4408,5	5,68	256,9
7	6783,3	6308,7	7	313,8
8	6003,4	5983,8	0,33	217,8
9	5707,1	5518,9	3,3	259,6
10	4861,7	4697,9	3,37	172,8

Elde edilen çözümlerden detaylı sonuçların çıkartılması için istatistikler tutulmuştur. Çözümlerde kullanılan araç sayıları ÇizelgeEk. 2 ve ÇizelgeEk. 3'te verilmiştir.



ÇizelgeEk.4 ve ÇizelgeEk.5'te problem örneklerinin çözümünde görülen parçalı teslimat sayıları verilmiştir. Tablolardan görülebileceği üzere her talep dilimindeki müşterilerde parçalı teslimatlar gözlemlenmiştir.

Çözümler elde edildikten sonra operatörlerin performansları ölçülmüştür. ÇizelgeEk. 6 ve ÇizelgeEk. 7'de operatörlerin performansları verilmiştir. İstatistikler incelendiğinde birleştirme operatörlerinin en fazla kazanç getiren operatörler olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile literatüre kazandırılan ve ikinci onarma aşamasında kullanılan aktarma ve paylaşırma operatörlerinden de kazanç elde edilebildiği de görülmüştür. İstatistikler göz önüne alındığında kapalı formda rota oluşturan operatör varyantlarının performansları daha yüksek çıktığı görülmektedir. Operasyonlar gerçekleştiğinde rotalardaki durak sayıları ve rotaların uzunlukları artmaktadır. Durak sayılarının artması sonucunda rotalar geometrik olarak doğrusallıklarını kaybetmektedirler. Ayrıca rota uzunluğu arttıkça ziyaret edilen son müşteri ile depo arasındaki mesafenin rota uzunluğuna oranı da düşmektedir. Dışarıdan kiralanan aracın birim yol maliyetinin şirket filosundaki aracın birim yol maliyetine olan oranın mevcut değeri de bu durumun oluşmasında etken olabilir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada müşteri taleplerinin farklı tipteki araçlardan oluşan heterojen filo ile karşılandığı, parçalı teslimata izin veren ve dışarıdan araç kiralarak açık formda rotalar oluşturabilen gerçek hayattan esinlenmiş bir ZARP ele alınmıştır. Çalışmaya konu olan PTRAP, HFARP ve AARP varyantları ile ilgili literatür çalışması yapıldığında, üçünün birlikte çalışıldığı bir problem görülememiştir. Gerçek hayatta karşılaşılabilecek olan bu üç konu birlikte ele alınarak farklı durumlarda da sonuç verebilen bir çözüm yöntemi geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Problemin karmaşıklığından ötürü matematiksel müşteri sayısının fazla olduğu problem örneklerinde çözüm üretememiştir. Daha sonra çalışmanın esas amacı olan, çalışmada ele alınan konularının ayrı ayrı tüm kombinasyonlarına cevap verebilecek, farklı durumlar ile karşılaşıldığına herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duymadan esnek bir şekilde çalışabilecek ve müşteri sayısının fazla olduğu problem örneklerine kısa sürelerde çözümler üretebilecek bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Çözüm yöntemi olarak bir UBKA algoritması geliştirilmiştir. Algoritmada kullanılacak olan operatörler için konu ilgili literatür incelenmiştir. Problemin özelliklerinden ötürü yöntemin, parçalı teslimat yapabilmesi, rota içi araç değişimi yapabilmesi, açık uçlu bir rotanın kapalı forma ve kapalı uçlu rotanın açık forma geçebilmesi gerekmektedir. Literatürde bulunan mevcut operatörlerin bu çalışma için yeterli olmadığı görülmüştür. Literatürde bulunan birleştirme ve yerleştirme operatörleri problemin yapısına uyacak şekilde çalışmaya adapte edilmiştir. Özellikle heterojen bir filo kullanarak parçalı teslimat yapabilen operatörlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu doğrultuda literatürde olmayan iki yeni operatör tanımlanmıştır. Parçalı teslimat yapılmasındaki esas amacın araç kapasitesinin doluluk oranının

arttırılmasıdır. Geliştirilen yeni operatörler ile araçların artık kapasitelerinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen UBKA'da onarma aşaması iki kademedeyapılarak hem mevcut iterasyonda iyileştirme hem de yerel optimalden kaçınma amaçlanmıştır. Onarmanın ikinci aşamasında kullanılan aktarma ve paylaşırma operatörlerinin gürültü çarpanları diğery operatörlere göre yüksek tutularak farklı çözümlere ulaşılması hedeflenmiştir.

Çözümler incelendiğinde bu çalışmada kullanılan operatörler ile problem yapısına uygun çözümler alınabildiği görülmüştür. Müşteri sayısının az olduğu problem örneklerinde optimal çözümleri elde edilebilmiştir. Operatörlerin performansları incelendiğinde çalışmaya uyarlanan birleştirme operatörlerinin daha iyi çözümler sağladığı görülmüştür. Bu çalışmada tanımlanan aktarma ve paylaşırma operatörlerinin de iyileştirmeler sağladıkları gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda öncelikle algoritma için daha geçerli bir performans analizi gerekmektedir. Bunun için problem örnekleri için alt sınır verecek bir yöntem geliştirilebilir. Ayrıca bir gerçek hayat problemini ele alan çalışma için gerçek hayat verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle araç tiplerinin kapasiteleri ve birim yol maliyetleri büyük önem taşımaktadırlar. Bunun yanı sıra farklı senaryolar için de çözümler alınmalıdır. Örneğin şirketin bir araç filosunun olmadığı duruma veya dışarıdan araç kiralayamadığı durumlarda karşısında algoritmanın üreteceği çözümler incelenmelidir. Son olarak algoritmanın daha verimli bir şekilde kodlanarak çok daha fazla müşteri içeren problem örnekleri için kısa sürelerde kaliteli çözümler in elde edilebilmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, A., & Speranza, M. G.** (2012). A hybrid heuristic for an inventory routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24(1), 101-116.
- [2] **Archetti, C., Speranza, M. G., & Hertz, A.** (2006). A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem. *Transportation science*, 40(1), 64-73.
- [3] **Belfiore, P., & Yoshizaki, H. T.** (2013). Heuristic methods for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and split deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, 64(2), 589-601.
- [4] **Berbotto, L., García, S., & Nogales, F. J.** (2014). A randomized granular tabu search heuristic for the split delivery vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 222(1), 153-173.
- [5] **Boudia, M., Prins, C., & Reghioui, M.** (2007, October). An effective memetic algorithm with population management for the split delivery vehicle routing problem. In *International Workshop on Hybrid Metaheuristics* (pp. 16-30). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [6] **Brandão, J.** (2004). A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 552-564.
- [7] **Brandão, J.** (2009). A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European journal of operational research*, 195(3), 716-728.
- [8] **Brandão, J.** (2011). A tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 38(1), 140-151.
- [9] **Caceres-Cruz, J., Arias, P., Guimarans, D., Riera, D., & Juan, A. A.** (2015). Rich vehicle routing problem: Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(2), 32.
- [10] **Clarke, G., & Wright, J. W.** (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
- [11] **Dantzig, G. B., & Ramser, J. H.** (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.

- [12] **Dijkstra, E. W.** (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269-271.
- [13] **Dror, M., & Trudeau, P.** (1989). Savings by split delivery routing. *Transportation Science*, 23(2), 141-145.
- [14] **Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A.** (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483.
- [15] **Fleszar, K., Osman, I. H., & Hindi, K. S.** (2009). A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 803-809.
- [16] **Fu, Z., Eglese, R., & Li, L. Y.** (2005). A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problem. *Journal of the operational Research Society*, 56(3), 267-274.
- [17] **Gendreau, M., Hertz, A., & Laporte, G.** (1992). New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 40(6), 1086-1094.
- [18] **Gillett, B. E., & Miller, L. R.** (1974). A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations research*, 22(2), 340-349
- [19] **Golden, B., Assad, A., Levy, L., & Gheysens, F.** (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49-66.
- [20] **Ho, S. C., & Haugland, D.** (2004). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries. *Computers & Operations Research*, 31(12), 1947-1964.
- [21] **Imran, A., Salhi, S., & Wassan, N. A.** (2009). A variable neighborhood-based heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 197(2), 509-518.
- [22] **Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G.** (2016). Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 1-21.
- [23] **Lahyani, R., Khemakhem, M., & Semet, F.** (2015). Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 1-14.
- [24] **Li, F., Golden, B., & Wasil, E.** (2007). The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results. *Computers & operations research*, 34(10), 2918-2930.
- [25] **Li, X., Leung, S. C., & Tian, P.** (2012). A multistart adaptive memory-based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 365-374.

- [26] **MirHassani, S. A., & Abolghasemi, N.** (2011). A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11547-11551.
- [27] **Penna, P. H. V., Subramanian, A., & Ochi, L. S.** (2013). An iterated local search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Journal of Heuristics*, 19(2), 201-232.
- [28] **Pisinger, D., & Ropke, S.** (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & operations research*, 34(8), 2403-2435.
- [29] **Pisinger, D., & Ropke, S.** (2010). Large neighborhood search. In *Handbook of metaheuristics* (pp. 399-419). Springer, Boston, MA.
- [30] **Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., Bräysy, O., & Ioannou, G.** (2010). A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 37(3), 443-455.
- [31] **Ropke, S., & Pisinger, D.** (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation science*, 40(4), 455-472.
- [32] **Sariklis, D., & Powell, S.** (2000). A heuristic method for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 51(5), 564-573.
- [33] **Shaw, P.** (1997). A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems. *APES Group, Dept of Computer Science, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK.*
- [34] **Sörensen, K., & Sevaux, M.** (2006). MA| PM: memetic algorithms with population management. *Computers & Operations Research*, 33(5), 1214-1225.
- [35] **Taillard, É. D.** (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *RAIRO-Operations Research*, 33(1), 1-14.
- [36] **Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T.** (2007). A flexible adaptive memory-based algorithm for real-life transportation operations: Two case studies from dairy and construction sector. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 806-822.
- [37] **Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N., Kah, M. M. O., & Rabbani, M.** (2007). A new capacitated vehicle routing problem with split service for minimizing fleet cost by simulated annealing. *Journal of the Franklin Institute*, 344(5), 406-425.
- [38] **Toth, P., & Vigo, D.** (2003). The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem. *Inform Journal on computing*, 15(4), 333-346.
- [39] **Yousefikhoshbakht, M., Didehvar, F., & Rahmati, F.** (2014). Solving the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem by a combined metaheuristic algorithm. *International Journal of Production Research*, 52(9), 2565-2575.





## **EKLER**

EK 1: Sezgisel algoritmanın sözde kodu.

EK 2: 2. Veri kümesinde sezgisel model ile alınan çözümlerinde kullanılan araç sayıları.

EK 3: 3. Veri kümesinde sezgisel model ile alınan çözümlerinde kullanılan araç sayıları.

EK 4: 2. Veri kümesi için alınan çözümlerde parçalı teslimat yapılan müşteri sayıları

EK 5: 3. Veri kümesi için alınan çözümlerde parçalı teslimat yapılan müşteri sayıları

EK 6: Operatörlerin yüzde olarak parçalama operatörü ile bozulmuş çözümden daha iyi çözüm bulma oranları.

## EK 1

ÇizelgeEk. 1: Sezgisel algoritmanın sözde kodu.

**1** : *Problem verilerini gir.*  
**2** : *Çözüm kurucu algoritma ile  $s_0$  başlangıç çözümü bul.*  
**3** : *Algoritma parametlerini gir.*  
**maksimum iterasyon sayısı, kabul etme olasılığı, operatör ağırlıkları, operatörlerin gürültü çarpanları**  
**4** :  $s^* \leftarrow s'$  ,  $s_0 \leftarrow s'$   
**5** :  $i = 1$ 'den başlayarak **maksimum iterasyona** ulaşılanaya kadar tekrarla  
**5.1** :  $s_1 \leftarrow \text{parçalama}(s_0)$   
**5.2** : 1. aşama operatörlerinden rasgele bir operatör seç. ( $p_1$ )  
**5.3** :  $s_2 \leftarrow \text{onarma}_1(p_1 ; s_1)$   
**5.4** : 2. aşama operatörlerinden rasgele bir operatör seç. ( $p_2$ )  
**5.5** :  $s_3 \leftarrow \text{onarma}_2(p_2 ; s_2)$   
**5.6** : Eğer ( $f(s_3) < f(s^*)$ )  
**5.6.1** :  $s^* \leftarrow s_3$   
**5.6.2** :  $s_0 \leftarrow s_3$   
**5.6.3** :  $p_1$  ve  $p_2$ 'nin ağırlıklarını arttır.  
**5.7** : Başka Eğer ( $f(s_3) < f(s_0)$ )  
**5.7.1** :  $s_0 \leftarrow s_3$   
**5.7.2** :  $p_1$  ve  $p_2$ 'nin ağırlıklarını arttır.  
**5.8** : Başka  
**5.8.1** : Eğer (**kabul**)  
**5.7.1** :  $s_0 \leftarrow s_3$   
**5.8.2** : Eğeri bitir  
**5.8.3** :  $p_1$  ve  $p_2$ 'nin ağırlıklarını azalt.  
**5.9** : Eğeri bitir  
**6** : bir sonraki  $i$   
**7** :  $s^*$  en iyi çözümünü döndür

## EK 2

ÇizelgeEk. 2: 2. Veri kümesinde sezgisel model ile alınan çözümlerinde kullanılan araç sayıları.

Örnek	Kullanılan araç sayısı					
	Şirket filosu			Dış kaynak		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
1	2	0	0	5	1	2
2	1	0	3	4	1	2
3	2	2	0	2	1	4
4	1	0	2	3	1	2
5	4	1	1	3	0	2
6	1	0	1	4	0	4
7	2	0	0	4	3	1
8	1	2	3	2	0	2
9	1	1	0	2	2	3
10	1	0	3	1	1	3

Q1 : kapasitesi 40 birim olan araç tipi  
Q2 : kapasitesi 70 birim olan araç tipi  
Q3 : kapasitesi 100 birim olan araç tipi

### EK 3

ÇizelgeEk. 3: 3. Veri kümesinde sezgisel model ile alınan çözümlerinde kullanılan araç sayıları.

Örnek	Kullanılan araç sayısı					
	Şirket filosu			Dış kaynak		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
1	1	0	0	3	3	6
2	5	1	2	1	0	3
3	3	1	3	1	2	2
4	1	2	4	1	1	4
5	5	0	2	0	0	3
6	0	0	0	5	3	3
7	1	2	5	2	2	2
8	2	0	0	3	3	4
9	2	0	0	5	3	4
10	3	0	4	0	3	1

Q1 : kapasitesi 40 birim olan araç tipi  
Q2 : kapasitesi 70 birim olan araç tipi  
Q3 : kapasitesi 100 birim olan araç tipi

#### EK 4

ÇizelgeEk. 4 : 2. Veri kümesi için alınan çözümlerde parçalı teslimat yapılan müşteri sayıları

Örnek	Parçalı teslimat yapılan müşteri sayısı			
	I	II	III	IV
1	1	0	0	1
2	1	2	1	1
3	2	0	2	1
4	0	0	0	1
5	0	1	1	2
6	1	2	0	1
7	1	0	1	1
8	0	0	0	1
9	2	0	0	1
10	1	0	0	2

I : Talebi [1,40] aralığında olan müşteriler  
II : Talebi [41,70] aralığında olan müşteriler  
III : Talebi [71,100] aralığında olan müşteriler  
IV : Talebi [101,150] aralığında olan müşteriler

## EK 5

ÇizelgeEk. 5 : 3. Veri kümesi için alınan çözümlerde parçalı teslimat yapılan müşteri sayıları

Örnek	Parçalı teslimat yapılan müşteri sayısı			
	I	II	III	IV
1	0	1	1	1
2	0	0	0	2
3	1	0	0	1
4	1	0	0	2
5	0	1	0	2
6	0	1	1	1
7	0	2	1	1
8	1	1	0	1
9	0	1	1	2
10	0	1	2	1

I : Talebi [1,40] aralığında olan müşteriler  
II : Talebi [41,70] aralığında olan müşteriler  
III : Talebi [71,100] aralığında olan müşteriler  
IV : Talebi [101,150] aralığında olan müşteriler

## EK6

ÇizelgeEk. 6 : Operatörlerin yüzde olarak parçalama operatörü ile bozulmuş çözümden daha iyi çözüm bulma oranları.

Operatör	2. veri kümesi	3. veri kümesi
Birleştirme-1	62,91	63,45
Birleştirme-2	57,26	59,46
Yerleştirme-1	2,91	2,28
Yerleştirme-2	2,93	2,37
Aktarma-1	35,97	36,25
Aktarma-2	36,1	36,61
Aktarma-3	25,69	27,05
Aktarma-4	26,68	26,73
Paylaştırma-1	39,6	39,04
Paylaştırma-2	39,94	40,28
Paylaştırma-3	37,9	38,57
Paylaştırma-4	34,14	35,37





## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Kemal Kaya  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 04.04.1989 Karayazı/Erzurum  
**E-posta** : kemal3517@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016-2018	TOBB ETÜ	Tam Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi

**YABANCI DİL:** İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kaya, K., Kuyzu, G., Tekin, S.,** 2018. Heterojen Araç Filolu, Parçalı Teslimatlı, Açık veya Kapalı Uçlu Rotalar İçerebilen Zengin Araç Rotalama Problemi YAEM, Haziran 26-29, Eskişehir, Türkiye.
- **Kaya, K., Kuyzu, G., Tekin, S.,** 2018. A Rich Vehicle Routing Problem Involving Split Deliveries, Heterogeneous Fleet, and Outsourcing Option. 29th European Conference on Operational Research, July 8-11, Valencia, Spain . (Sunum örneği)

