



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



SERVİS ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN
MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ:
BANKACILIK MERKEZ ÜSSÜ UYGULAMASI

Muhammet BOZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet BOZDEMİR tarafından hazırlanan ‘‘Servis Rotalama Problemi İçin Matematiksel Model Önerisi: Bankacılık Merkezi Üssü Uygulaması’’ adlı tez çalışması 08/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan (Danışman)
Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN

Üye
Doç. Dr. ağı KOÇ

Üye
Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
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.

Muhammet BOZDEMİR

Tarih:08/07/2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERVİS ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ: BANKACILIK MERKEZ ÜSSÜ UYGULAMASI

Muhammet BOZDEMİR

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN

2021, 49 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN

Doç. Dr. Çağrı KOÇ

Çalışmada ele alınan problem, bir bankanın genel merkez çalışanlarının sabah ve akşam olmak üzere, servis araçları ile belirli olan duraklardan alınması ve geri duraklara bırakılmasını içermektedir. Servis aracı rotalama problemi literatürde birçok farklı şekilde ele alınmıştır. Probleme benzerliği açısından tez kapsamında Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi (AUARP) ele alınmıştır. AUARP’de bir rotadaki aracın son müşteriye hizmet verdikten sonra depoya geri dönüş söz konusu değildir. İstanbul’un Asya ve Avrupa yakasını birlikte ele aldığımız problemde iş yeri dahil olmak üzere 171 tane düğüm noktası bulunmaktadır. Mevcut iş yeri Avrupa yakasında yoğun trafiğin yer aldığı bir bölgede yer almaktadır. İş yerine heterojen araç filosuna sahip 54 araç ile hem Avrupa hem de Asya kıtasından hizmet verilmektedir. Ayrıca İstanbul’un Asya yakasına yakın olan Kocaeli’nin Gebze ve Çayırova ilçelerine de araçlar ile hizmet verilmektedir.

Heterojen araç filosuna sahip AUARP (HFAUARP) NP-zor sınıfında yer alan bir problemdir. Bundan dolayı problemin çözümü için literatürde kesin yöntemlerden ziyade sezgisel ve metasezgisel yöntemlere başvurulmuştur. Tez kapsamında önerilen 2-indsli matematiksel model ile oldukça zor ve gerçek hayat problemi olan HFAURP’ye çözüm aranmıştır. 2-indsli model ile problem daha basit bir şekilde ifade edilmiş ve farklı kısıtların eklenmesi veya düğüm sayısının artırılması durumlarında dahi olurlu çözümler üretebilmiştir. Önerilen model ile elde edilen sonuçlar ve mevcut çözüm karşılaştırılmıştır. Son olarak 2-indsli model, farklı çalışma süreleri için çalıştırılmış ve elde edilen deney tasarımı sonuçlarına göre amaç fonksiyonu değerlerine ve optimal çözüme yaklaşıma yüzdelerine yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi, Araç Rotalama Problemi, Optimizasyon, Servis Rotalama Problemi, 2-indsli Matematiksel Model

ABSTRACT

MS THESIS

A NEW MATHEMATICAL MODEL FOR THE SERVICE ROUTING PROBLEM: A BANKING CASE STUDY

Muhammet BOZDEMİR

**Konya Technical University
Graduate Education Institute
Department of Industrial Engineering
Advisor: Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN**

2021, 49 Pages

Jury

**Prof.Dr. İsmail KARAOĞLAN
Prof.Dr. Saadettin Erhan KESEN
Assoc.Prof.Dr. Çağrı KOÇ**

In this study, problem includes pickup and delivery of a bank's office employees from specific stops by service vehicles, in the morning and evening. The service vehicle routing problem has been handled in many different ways in the literature. In terms of similarity to the problem, the Open Vehicle Routing Problem (OVRP) is discussed within the scope of the thesis. In OVRP, there is no return to the depot after the vehicle on a route has served the last customer. There are 171 node, including the workplace, in the problem that we consider the Asian and European sides of Istanbul together. The current workplace is located in an area with heavy traffic on the European side. The workplace is served by 54 vehicles with heterogeneous vehicle fleets from both Europe and Asia. In addition, the Gebze and Çayırova districts of Kocaeli, which are close to the Asian side of Istanbul, are also served by vehicles.

OVRP with a heterogeneous vehicle fleet (HOVRP) is a NP-hard problem. For this reason, heuristic and metaheuristic methods have been used rather than exact methods in the literature to solve the problem. In this thesis, 2-index mathematical model proposed for a very difficult and real life problem. The 2-index model, the problem is expressed simpler and feasible solution can be produced even adding different constraints or increasing the number of nodes. The results obtained with the proposed model and the current solution are compared. Finally, the 2-index model was run for different operating times and the objective function values and the percentages of approaching the optimal solution were given according to the experimental design results.

Keywords: Open Ended Vehicle Routing Problem, Optimization, Service Routing Problem, Vehicle Routing Problem, 2-index Mathematical Model

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ders ve tez dönemi sürecinde sorularımı gece gündüz demeden cevaplayarak, görüş ve önerilerini benimle paylaşan, bana yol gösteren değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail KARAOĞLANA'a teşekkür ediyorum.

Destegini benden hiç esirgemeyen, önceliklerini her zaman benim önceliklerime göre değiştiren ve bunun karşılığını hiçbir zaman tam olarak ödeyemeyeceğim hayat arkadaşım Melike Kübra EKİZ BOZDEMİR'e ve hayatım boyunca her koşulda bana destek veren bugünlere gelmemde katkıları olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Muhammet BOZDEMİR
KONYA-2021



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ(ARP)	4
2.1. ARP ile İlgili Literatür Taraması	6
3. LİTERATÜR TARAMASI	9
3.1. Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi (ZPARP).....	9
3.2. Okul Servisi Rotalama Problemi (OSRP).....	10
3.3. Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi (AUARP).....	13
4. PROBLEMİN TANIMI	23
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	29
KAYNAKLAR	34
EKLER	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ARP: Araç Rotalama Problemi

AUARP: Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi

EZPARP: Esnek Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi

GSP: Gezgin Satıcı Problemi

HFAUARP: Heterojen Araç Filosuna Sahip Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi

OSRÇP : Okul Servisi Rotala ve Çizelgeleme Problemi

OSRP: Okul Servisi Rotalama Problemi

SZPARP: Sıkı Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi

ZPARP: Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi



1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesi, rekabetin artması, e-ticaret hizmetlerin yaygınlaşmasından dolayı lojistik kavramı daha önemli hâle gelmiştir. Teknolojik faaliyetlerin artması ile ürünlerin o an buldukları konumları, müşteriye veya tedarikçiye ulaşım süreleri vb. durumlar daha kolay takip edilebilmektedir. Şirketler, firmalar arasında rekabetin artmasının en temel sebebi ise lojistik maliyetlerinin firmaların bütçesinin büyük bir kısmını oluşturmasıdır. E-ticaret hizmetlerinin ise günümüzde sıklıkla tercih edilmesi, alınan ürünün müşteriye ulaştırılmasında kargo vb. şirketlerin kullanım oranlarını artması lojistik kavramının önemini gün geçtikçe artırmaktadır. Bundan dolayı ürünün müşteri veya tedarikçiye ulaştırılmasında kullanılan rotaların süresinin, mesafesinin veya maliyetinin en küçüklenmesi, kullanılan araçların doluluk oranlarının en büyüklenmesi vb. amaçlar ortaya çıkmaktadır. Gerekli optimizasyon ya da iyileştirme çalışmaları sonucunda kurum/kuruluşların dağıtım maliyetlerinde ciddi azalmalar görülebilmektedir.

Lojistik faaliyetlerinde ele alınan en temel problemlerden birisi Gezgin Satıcı Problemi (GSP) dir. GSP’de tek aracın bütün müşterilere bir kere uğramak koşulu ile başlangıç noktasına (depo) geri dönmesi söz konudur. Müşteri talebinin söz konusu olmadığı GSP’de müşteriler arası ziyaretlerin minimum maliyet ile gerçekleşmesi hedeflenmektedir. Genellikle bu maliyet müşteriler arası uzaklık ile doğru orantılı kabul edilmektedir. GSP’nin daha genel bir hâli olan ve çok sayıda araç ve tek deponun ele alındığı problemler ise Çoklu GSP olarak literatürde yer almaktadır. Temelini Çoklu GSP’den alan ve ilk olarak Dantzing ve Ranser tarafından 1959 yılında ortaya atılan Araç Rotalama Problemi (ARP) ise lojistik problemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. GSP’den farklı olarak ARP’de araç kapasiteleri ve müşteri talepleri söz konusudur. Birden fazla araç olabileceği gibi var olan araçların kapasiteleri de birbirinden farklı olabilmektedir. Her bir araç, araç kapasitelerini aşmamak ve müşterilerin taleplerini minimum maliyeti göz önünden bulundurmak kaydı ile karşılamak zorundadır. Buradaki minimum maliyet GSP’deki toplam uzaklık veya ihtiyaç duyulan araç sayısı veya bekleme süresi gibi farklı bileşenleri içerebilmektedir. Pratik hayatta sıklıkla karşılaşılan ARP’de, müşteri sayısının artması ile çözüm süresi kombinatoryel olarak artış göstermektedir. Toth ve Vigo (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre 50 müşteriye sahip olan bir problemde kesin algoritmalar tutarlı çözümler vermektedir. Hatta belirli durumlar altında daha büyük problemlerinde tutarlı sonuçlar verdikleri

görülmüştür (Toth & Vigo, 2002). Fakat 200 ve üzeri müşteriye sahip olan problemler için kesin yöntemler yetersiz kalmakta ve sezgisel modellere başvurulmaktadır. Bir diğer ifade ile, müşteri sayısının artması ve probleme yeni kısıtların eklenmesi ile (zaman penceresi, topla-dağıt vb.) optimal çözüme ulaşma süresi artış göstermekte ve kesin algoritmalar orta ve büyük seviye problemlerde yetersiz kalmaktadır. Bu şekilde çözüm süresinin üstel bir şekilde artış gösterdiği problemler NP-zor sınıfında yer almaktadır.

Zaman içerisinde gerçek hayat problemlerinin karmaşıklaşması sonucunda ARP'ye bazı kısıtlar eklenerek çeşitli varyasyonlar ortaya konmuştur. Bu varyasyonlara örnek olarak; heterojen araç filolu, çok depolu, belirsiz talebe sahip, topla-dağıt, zaman bağımlı, zaman pencereli, bölünmüş talepli, okul servisi rotalama problemi ve açık uçlu ARP verilebilir. Bu tez kapsamında firmalar için önemli bir problem haline gelmiş olan ve ARP'nin özel bir hâli olan personel dağıtım problemi ele alınmıştır. Literatürde bu problem Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi (ZPARP), Okul Servisi Rotalama Problemi (OSRP) ve Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi (AUARP) olarak farklı problemler altından ele alınmış ve çözümler önerilmiştir. Tez kapsamında probleme benzerliği açısından AUARP ele alınmıştır. AUARP'de klasik ARP'de olduğu gibi başlangıç noktasına ya da bir diğer ifade ile depoya geri dönüş söz konusu değildir. Personelin belirli bir zaman içerisinde ulaşım sağlaması zorunlu olan mevcut iş yeri, personelinin toplanması veya dağıtılması durumuna göre sırası ile son ya da ilk düğüm noktası olmaktadır. Personelin toplanması durumunda rotalar talep noktalarından başlamakta ve iş yerinde son bulmaktadır. Personelin dağıtılması durumunda ise rotalar iş yerinde başlamakta ve talep noktalarında son bulmaktadır. Genellikle taşıeron firmalardan kiralanarak kullanılan araçların son düğüm noktasından sonra kat ettiği mesafe dikkate alınmamaktadır. Pratikte oldukça yaygın bir problem olan AUARP ile ilgili literatürde oldukça az çalışma bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında öncelikle ARP ve ARP'nin varyasyonlarından bahsedilmiş ve ARP'nin varyasyonlarında birisi olan AUARP anlatılmıştır. Var olan AUARP literatürü incelenmiş ve hem homojen hem de heterojen araç filosuna sahip AUARP (HFAUARP) için temel modellere yer verilmiştir. Tez kapsamında ele alınan problem için personelin toplanması ya da dağıtılması durumunda izlenecek rotalar aynıdır. Dolayısıyla çalışmada sadece personelin dağıtılması durumu ele alınmıştır. Bir diğer ifade ile rotaların başlangıç noktası iş yeri iken son durak ise ilgili rotanın talep noktasıdır. NP-zor sınıfında yer alan HFAUARP'yi kesin çözüm yöntemi ile çözüme kavuşturmayı ya da çözüme olabildiğince yakınlaştırmayı amaçlayan bu tez çalışmasında, indis azaltma yöntemi

kullanılarak 2-indisli bir matematiksel model önerilmiştir. 171 düğümlü bir gerçek hayat problemi için çözüm süresi uzunluğuna göre amaç fonksiyonu değeri ve optimal çözüme yaklaşma yüzdesi için deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 2-indisli model ile elde edilen sonuçlar ve firmanın sezgisel olarak belirlediği ve uygulamada kullandığı var olan durum karşılaştırılmış ve iyileştirmeler ortaya konulmuştur.

Bölüm 2’de ARP ve zaman içerisinde eklenen kısıtlar ile oluşmuş varyasyonlarına ve yapılan çalışmalara kısaca değinilmiştir. Bölüm 3’te ise ele alınan problem ile ilişkili olduğu düşünülen ARP’nin varyasyonlarından olan ZPARP, OSRP literatürüne kısaca değinilmiş ve probleme benzerliği açısından tercih edilen AUARP literatürü detaylıca ele alınmıştır. Ayrıca bu bölümde HFAUARP literatürüne yer verilmiş ve problemin çözümü için kullanılan kesin, sezgisel ve metasezgisel yöntemlere değinilmiştir. Burada HFAUARP’yi çözüme kavuşturmak adına kesin yöntemlerden çok sezgisel ve metasezgisel yöntemlere başvurulduğu görülmektedir. Ayrıca problemin çözümü için herhangi bir matematiksel model önerisi yoktur. İlgili tez çalışmasının literatürdeki bu eksikliği kapatmanın yanı sıra indis azaltma metodu ile var olan diğer rotalama problemlerini de mâkul bir sürede çözebileceği ya da optimal çözüme yaklaştırabileceğini düşünmekteyiz. Bölüm 4’te ise problemin çözümü için geliştirilen 2-indisli model yer almaktadır. Son olarak Bölüm 5’te ise ilgili kurumun sezgisel olarak belirlediği rotalar ile önerilen model ile elde edilen rotalar maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen modelin çözüm süresi uzunluğuna göre amaç fonksiyonu ve optimal çözüme yakınlığı analiz edilmiştir.

2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ(ARP)

ARP en basit haliyle bir merkezi depoda bulunan ve belirli homojen veya heterojen kapasiteye sahip olan araçlar filosunun, müşteriler kümesine bir kere uğramak şartıyla toplam ulaşım mesafesinin veya ulaşım süresinin en küçüklenmesi şeklinde amaç fonksiyonu belirleyerek, depoya geri dönmesi için gerekli rotaların belirlenmesi problemidir. Klasik ARP modelinin varsayımları ise şu şekildedir:

- Rotalar depoda başlar ve depoda sonlanır.
- Araçların kapasiteleri homojendir.
- Talepler deterministiktir.
- Her talep noktasına bir kere uğranmalı ve talebin tamamı karşılanmalıdır (talepler bölünemez).

Yukarıda belirtilen varsayımları içerisinde barındıran klasik ARP’de müşteri veya talep noktaları ve depo düğüm noktası, bu düğüm noktaları arasındaki geçişler ise serim olarak tanımlanmaktadır. ARP notasyonel olarak şu şekilde tanımlanabilir. V düğüm kümesi A ayrıt kümesi olmak üzere $G = \{V, A\}$ bir serim olsun. i ve j düğümleri, 0 depoyu temsil etmektedir. G serimin yönlü olması durumunda $c_{ij} \neq c_{ji}$ olacağından c maliyet matrisi asimetrik olacaktır. Maliyet matrisinin asimetrik olması durumunda problem asimetrik klasik ARP’ye dönüşecektir. $c_{ij} = c_{ji}$ olması durumunda ise problem simetrik klasik ARP olarak adlandırılmaktadır. Tez çalışması kapsamında yer verilen modellerde c maliyet matrisi veya d uzaklık matrisi simetrik olarak varsayılmıştır.

Aşağıda öncelikle klasik ARP modelinde kullanılacak olan karar değişkenleri ve parametreler tanımlanmış, daha sonra matematiksel modele (Model 1) yer verilmiştir.

Parametreler:

c_{ij} : i düğümünden j düğümüne ulaşım maliyeti

M : araç sayısı

N : müşteri sayısı

Q : araç kapasitesi

q_i : i müşterisinin talebi

Karar Değişkenleri:

$$x_{ij}: \begin{cases} 1 & \text{eğer } i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne gidiyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

u_i : alt tur eleme karar değişkeni

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } z = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N (c_{ij} x_{ij}) \quad (2.0)$$

Öyle ki:

$$\sum_{i=0}^N x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, N \quad (2.1)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{0j} \leq M, \quad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{i0} \leq M, \quad (2.4)$$

$$u_i - u_j + Q x_{ij} \leq Q - q_j, \quad i \neq j = 1, \dots, N \quad (2.5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \quad (2.6)$$

$$u_i \geq 0 \quad (2.7)$$

Yukarıda yer alan modelde amaç fonksiyonu maliyetin en küçüklenmesidir. 2.1 ve 2.2 numaralı kısıt grubu ile her düğüme sadece bir kere uğranmalı şartı sağlanmıştır. 2.3 ve 2.4 numaralı kısıt grubu ise depodan çıkan ve depoya geri dönebilen araç sayısının toplam araç sayısı kadar olması gerektiğini ifade etmektedir. 2.5 numaralı kısıt ise alt tur oluşumlarını engellemektedir. Son olarak modelde işaret kısıtları yer almaktadır.

Filodaki araçların kapasitelerinin farklı olması durumunda heterojen filolu ARP ortaya çıkmaktadır. Heterojen filolu ARP için ek karar değişkeni ve matematiksel model (Model 2) aşağıda yer almaktadır.

Karar Değişkenleri:

$$x_{ijk}: \begin{cases} 1 & \text{eğer } k \text{ nolu araç } i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne gidiyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } z = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N (c_{ij} \sum_{k=1}^M x_{ijk}) \quad (2.8)$$

Öyle ki:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^N x_{ijk} = 1, \quad j = 1, \dots, N \quad (2.9)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{ipk} - \sum_{j=0}^N x_{pjk} = 0, \quad k = 1, \dots, M, p = 0, \dots, N \quad (2.10)$$

$$\sum_{i=1}^N (q_i \sum_{j=0}^N x_{ijk}) \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, M \quad (2.11)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{0jk} = 1, \quad k = 1, \dots, M \quad (2.12)$$

$$u_i - u_j + N \sum_{k=1}^M x_{ijk} \leq N - 1, \quad i \neq j = 1, \dots, N \quad (2.13)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j, k \quad (2.14)$$

$$u_i \geq 0 \quad (2.15)$$

Yukarıda yer alan modelde amaç fonksiyonu maliyetin en küçüklenmesidir. 2.9 numaralı kısıt grubu ile her düğüme sadece bir kere uğranmalı şartı sağlanmıştır. 2.10 numaralı kısıt grubunda ise rotanın oluşabilmesi için uğranan düğümden tekrar hareket edilmesi sağlanmıştır. 2.11 numaralı kısıt grubu kapasite kısıtı iken 2.12 numaralı kısıt grubu her aracın bir kere depodan çıkmasını sağlamaktadır. 2.13 numaralı kısıt grubu alt tur eleme kısıtları ve son olarak modelde işaret kısıtları yer almaktadır.

2.1. ARP ile İlgili Literatür Taraması

İlk olarak 1959 yılında literatüre giriş yapan ARP'ye zaman içerisinde farklı kısıtların eklenmesi ile farklı varyasyonlar ortaya çıkmıştır. Bu varyasyonlardan bazıları aşağıda yer almaktadır:

- Heterojen filolu ARP
- Çok depolu ARP
- Belirsiz talebe sahip ARP
- Topla dağıt ARP
- Eş zamanlı topla dağıt
- Zaman bağımlı ARP
- Zaman pencereli ARP
- Bölünmüş talepli ARP
- Okul servisi rotalama problemi
- Açık uçlu ARP.

Literatürde ARP'nin varyasyonları için çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Koç ve Karaoğlan (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada çok kullanımlı ve zaman pencerele ARP için bir matematiksel model geliştirilmiş ve literatürde var olan test problemlerine uygulanmıştır. ARP'den farklı olarak zaman pencerele ARP'de araçların erken başlama zamanı a_i ve geç başlama zamanına b_i kavramları yer almaktadır. $[a_i, b_i]$ zaman penceresine sahip olan düğüme bu aralıktaki hizmet verilmelidir. Çok kullanımlı ARP ise bir araç rotasını tamamladıktan sonra yeni bir rotaya çıkabilmektedir. Ünlü ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kargo şirketleri için zaman pencerele çok araçlı dinamik bir rotalama uygulaması gerçekleştirmişlerdir.

Atmaca (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir kargo şirketinin verileri kullanarak dağıtım yapılırken eş zamanlı olarak toplama işleminin de yapıldığı eş zamanlı topla-dağıt ARP modeli üzerinde çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar araç sayısı, araç doluluk oranı, gidilen rota uzunlukları açısından kargo şirketinin mevcut durumu ile karşılaştırılmıştır. Hezer ve Kara (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise eş zamanlı topla-dağıt ARP, Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu kullanılarak örnekle test problemlerine uygulanmıştır. Literatürde var olan ekleme tabanlı sezgisel bir algoritma ile önerilen modelin sonuçları karşılaştırılmıştır. etin ve Gencer (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise kesin zaman pencerele ve eş zamanlı topla-dağıt ARP modeli birleştirilerek bir matematiksel model önerilmiştir. Literatürde yer alan bir çok ARP'nin amaç fonksiyonu alınan yolun veya maliyetin minimizasyonu iken çalışmada zaman penceresi ele alındığı için amaç fonksiyonu gecikmelerin en küçüklenmesi olarak belirlenmiştir. etin ve Gencer (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada araç kapasitelerinin eşit olmadığı veya araç tiplerinin aynı olmadığı durumlar göz önüne alınarak heterojen araç filolu kesin zaman pencerele eş zamanlı topla-dağıt ARP problemi ele alınmış ve matematiksel bir model önerilmiştir. Koç ve Karaoğlan (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ARP'den farklı olarak kullanılan araçların hızının düğümler arasında değişkenlik gösterdiği zaman bağımlı ARP ele alınarak matematiksel model önerilmiştir.

Bozyer ve ark. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ARP probleminin boyutunun artması durumunda matematiksel modellerin yetersiz kalacağına değinilmiş ve önce kümele sonra rotala mantığına dayalı bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Çalışmada önerilen sezgisel yöntemde öncelikle talep noktaları bulanık c-ortalama kullanılarak araç sayısı kadar kümeye ayrılmış ve üyelik fonksiyonlarına göre kısıtlı kapasiteye sahip

araçlara atanmıştır. Elde edilen çözümler tabu arama metasezgiseli kullanılarak iyileştirilmiştir. Şahin ve Eroğlu (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise kapasite kısıtlı ARP problemi ele alınarak literatürde var olan sezgisel ve metasezgisel yöntemler incelenmiştir. Düzakın ve Demircioğlu (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ARP için geliştirilen modellere ve sezgisel yöntemlere yer verilmiştir.

Güvez ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada sağlık kurumlarının konumları dijital haritada belirlenerek birbirleriyle olan uzaklıkları hesaplanmış ve tam sayılı programlama modeli kullanılarak en düşük maliyet ile tıbbi atıkların toplanması üzerine çalışılmıştır. Önder (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise çok depolu ARP ele alınarak İstanbul Halk Ekmeği üzerine uygulama yapılmıştır. Önce kümeleme işlemi gerçekleştirilerek Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemlerini içeren bir yöntem önerilmiştir.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Çalışmada ele alınan problem, bir bankanın genel merkez çalışanlarının sabah ve akşam olmak üzere, servis araçları ile belirli olan duraklardan alınması ve geri duraklara bırakılmasını içermektedir. Tezin bu aşamasında problemin içeriğine uygun literatür taranmıştır. Servis aracı rotalama problemi literatürde bir çok farklı şekilde ele alınmıştır. Probleme benzerliği açısından, ARP'nin varyasyonlarından olan ZPARP, OSRP literatürüne kısaca değinilmiştir. ZPARP'de, servis araçlarının düğüm noktalarına yani bir diğer ifade ile duraklara belirli bir zaman diliminde ziyareti söz konusudur. OSRP ise genel anlamda durakların seçilmesi ve servis güzerhanının belirlenmesi olarak iki aşamada çözüme kavuşturulan bir problemdir (Riera-Ledesma & Salazar-Gonzalez, 2012). Personel taşıma problemlerinde aracın belirli bir kapasiteye sahip olmasından dolayı kapasite kısıtlı ARP modeli de tercih edilebilmektedir (Dinçerler ve ark., 2004). Fakat kapasite kısıtlı ARP hem ZPARP'nin hem de OSRP'nin içerisinde yer aldığı için ayrıca literatür taramasına yer verilmemiştir. Ayrıca bu bölümde, ele alınan probleme literatürde en benzer olduğunu düşünülen AUARP anlatılmış ve detaylı literatür taramasına yer verilmiştir. AUARP'de temel mantık bir rotadaki aracın son müşteriye hizmet verdikten sonra depoya geri dönüşünün söz konusu olmamasıdır (Li, Golden, ve Wasil, 2007). İlgili problemler ve çözüm yöntemlerine ait literatür taraması bölümün devamında yer almaktadır.

3.1. Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi (ZPARP)

ARP'den farklı olarak zaman pencereci ARP'de araçların erken başlama zamanı a_i ve geç başlama zamanına b_i kavramları yer almaktadır ve $[a_i, b_i]$ zaman penceresine sahip olan düğüme bu aralıkta hizmet verilmelidir (Koç ve Karaoğlan, 2012). ZPARP, Sıkı Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi (SZPARP) ve Esnek Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi (EZPARP) olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. EZPARP'de, servise en erken başlama zamanından önce düğüme ulaşan araçlar, belirlenen zaman penceresine kadar o düğüme kalmalıdır ve en erken hizmet zamanına kadar beklemelidir. En geç başlama zamanından sonra düğüme ulaşan araçlar ise o düğüme hizmet verememektedir. EZPARP ise belirlenen zaman penceresi içerisinde

servise ulaşamayan (erken veya geç başlama zamanı) araçlar, bir ceza maliyeti ile hizmet verebilmektedir (Ercan Cömert ve ark., 2018).

Ercan Cömert ve ark. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir süpermarket zincirinin müşterilerinin taleplerini belirli bir süre içerisinde karşılaması için önce kümele sonra rotalama yaklaşımından oluşan iki aşamalı bir model önerilmiştir. Öncelikle K-medoids ve DBSCAN kümeleme algoritmaları kullanılarak müşteriler ayrıştırılmış ve daha sonra araçların rotalanması için SZPARP çözüme kavuşturulmuştur. Li ve Zhang (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise ZPARP, müşterilerin tercihlerini temsil edecek şekilde bulanık bitiş zamanı ile genişletilmiştir.

Uzun ve Tezel (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada engelli bireylerin rehabilitasyon servisleri kullanımında her bireyin kendi zaman penceresinde servisten yararlanabilmesi adına metasezgisel yöntemlerden birisi olan Değişken Komşuluk Arama sezgiseli kullanılarak problem ele alınmıştır. Gutierrez ve ark. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise seyahat ve servis süreleri, rassal değişkenler ile stokastik olarak belirlenmiştir. Varış zamanlarını tahmin etmek için önceki müşterilerin varış zamanlarının ortalama ve varyanslarından yararlanılmıştır.

3.2. Okul Servisi Rotalama Problemi (OSRP)

OSRP genel anlamada öğrencilerin yürüme mesafesinin minimize edilmesi ile düğümlere (duraklara) atanmasının ve araç kapasitesi dikkate alınarak servis güzergahlarının oluşturulduğu bir problemdir (Riera-Ledesma ve Salazar-Gonzalez, 2012). OSRP’de bir diğer önemli konu ise okul zili ile servisin varış noktasına ulaşmasının eş zamanlı ya da birbirine olabildiğince yakın zamanlarda gerçekleşmesidir.

Park ve Kim (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise OSRP beş alt gruba ayrılarak incelenmiştir. Bunlar: ilgili verilerin hazırlanması, servis duraklarının seçilmesi, servis güzergahının oluşturulması, okul zili zaman ayarı ve servislerin çizelgelenmesidir. Bunlardan ilki olan verilerin hazırlanması aşamasında, öğrencilerin evleri, ulaşım sağlanmak istenen okul, hizmette bulunan servislerin deposu arasındaki uzaklıklara ait matris oluşturularak yol ağı belirlenir. İkinci aşama olan servis durakları seçiminde ise durakların yerleri belirlenir ve genellikle öğrencilerin duraklara yürüme mesafesi minimize edilerek duraklara atamalar gerçekleştirilir. Üçüncü adım olan servis güzergahlarının oluşturulmasında ise öğrenciler atandıkları duraklardan araç kapasitesi göz önünde bulundurularak güzergâh boyunca toplanır. Okul zili zaman ayarı ve

servislerin çizelgelenmesi adımları ise birden fazla okula servis verilmesi durumunda karşımıza çıkmaktadır. Okul ziline birbirinden farklı olması durumunda servisin diğer okul ziline yetişebilmesi, aynı olması durumunda ise bir okula varışın erken gerçekleşmesi gerekmektedir. Aynı durum okul kapanışları içinde geçerlidir. Okul açılış ve kapanış saatlerinin yanı sıra birden fazla okul için servislerin çizelgelenmesi gerekmektedir. Ke ve ark. (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise OSRP'ye servislerin çizelgelenmesi alt grubunun eklenmesi durumunda, problemin Okul Servisi Rotalama ve Çizelgeleme Problemine (OSRÇP) dönüşeceği belirtilmiştir. Ayrıca problemde duraklar belirlenmiş ve öğrencilerin duraklara atanması aşaması gerçekleştirilmiş ise OSRP'nin ARP'ye dönüşeceği belirtilmiştir. OSRP NP-zor sınıfında yer alan bir problemdir. Genellikle problem yukarıda bahsedilen alt problemlere ayrılarak çözüme kavuşturulmaktadır.

Problemin türüne göre OSRP oldukça çeşitli kısıtları içerisinde barındırmaktadır. Örneğin; tek okul ya da birden fazla okula hizmet verilmesi, hizmet verilen alanın şehir veya kırsal bölgede yer alması, okulun sabah, akşam veya her ikisinde de ya da tam gün hizmet vermesi, aynı servis aracında bir okula ya da birden fazla okula gidecek olan öğrencinin bulunması, özel durumdaki öğrencilere hizmet verilmesi, araç kapasitelerin homojen veya heterojen olması. Ayrıca OSRP'de amaç fonksiyonu da çeşitlilik gösterebilmektedir. Bunlar: kullanılan otobüs sayısının, toplam otobüs seyahat mesafesi veya süresinin, toplam öğrenci sürüş mesafesi veya süresinin, öğrenci yürüme mesafesinin minimizasyonu olabileceği gibi araçların yük dengesinin eşitliği gibi farklı amaçlarda olabilmektedir.

Riera-Ledesma ve Salazar-Gonzalez (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada OSRP, servis duraklarının seçilmesi ve servis güzergahının oluşturulması olmak üzere iki alt grubu ayrılmıştır. Amaç fonksiyonu yol maliyetinin minimizasyonu olan problemde, araçların homojen olduğu var sayılmıştır. Çalışmada problem çoklu GSP olarak ele alınmış ve dal-kesme yaklaşımı kullanılarak çözüme kavuşturulmuştur. Riera-Ledesma ve Salazar-Gonzalez (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Riera-Ledesma ve Salazar-Gonzalez (2012) çalışması baz alınmıştır. Aynı problem sütun oluşturma algoritması ile çözüme kavuşturulmuştur. Shafahi ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada homojen araç filosu ile maliyet minimizasyonu ve birden fazla servis veren araçlar için kullanılan gezi uyumluluğunun maksimizasyonu hedeflenmiştir. Gezi uyumluluğu bir aracın güzergahının tamamlanması durumunda diğer güzergahın ilk düğümüne ulaşabilmesi için uygun zamanın olması durumudur. Çalışmada OSRP, servis

güzergahlarının oluşturulması ve otobüslerin çizelgelenmesi olarak iki alt gruba ayrılmıştır. Problem önerilen sezgisel algoritma ile çözüme kavuşturulmuştur.

Silva ve ark. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Brezilya'nın kırsal bölgelerinde yaşayan 716 öğrencinin 23 farklı okula ulaşmaları üzerinde çözüm aranmıştır. Heterojen araç filosuna sahip problemde amaç toplam mesafeyi minimize etmektedir. Bu bağlamda iki farklı senaryo ele alınmıştır. İlk senaryo her bir okul için öğrencilerin aynı serviste olduğu durumdur. İkinci senaryoda ise bir serviste birden fazla okulun öğrencisinin yer alma durumudur (karma yük). İkinci senaryonun daha iyi sonuçlara ulaştığı gözlemlenmiştir. Ellegood ve ark. (2015) ise karma yüke sahip OSRP'nin durak sayısını ve mesafeyi azaltacağı için daha iyi sonuçlar vereceğine değinmişlerdir. Lima ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı okullardan öğrencilerin aynı anda aynı otobüse binmelerine olanak tanıyan karma yük problemi, heterojen araç filosu ile ele alınmıştır. Kırsal bölgeye hizmet veren araçlar, aynı başlama ziline sahip okullara hizmet vermektedir. Problemin çözümü için 5 farklı metasezgisel tabanlı yöntem geliştirilmiş ve biri gerçek veriden oluşan 4 veri setine uygulanmıştır. Lima ve ark. (2017) ise Lima ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmayı baz alarak, problemi çok amaçlı olarak ele almışlardır. Öğrencilerin toplam seyahat süresinin ve toplam gidilen yolun minimizasyonu ile sürücüler arasında dengeli sürüş mesafesi, amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. Problem önerilen 4 farklı metasezgisel algoritma ile çözüme kavuşturulmuştur.

Uzumer ve Eren (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Kırıkkale'de faaliyet gösteren bir firmanın verileri kullanılarak okul servisi rotalama problemi doğrusal programla modeli ile optimal çözümlere ulaştırılmıştır. Önerilen durumun sonuçları mevcut durum ile karşılaştırılmıştır. Ünsal ve Yiğit (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise servis araçların optimum şekilde rotalanması durumunda hem yakıt hem de maliyet olarak firmaya katkı sağlamanın yanı sıra araçları kullanan personel açısından ise serviste geçirilen sürenin ve yürüme mesafesinin azalacağına değinilmiştir. Çalışmada gelişen teknolojiden yararlanmak ve rotalama problemini kolaylaştırmak adına Küresel Konumlandırma Sistemi (GSP), Coğrafik Bilgi Sistemi (GİS)'den veriler elde edilmiş ve öncelikle K-means kümeleme algoritması kullanılarak düğümler belirlenmiştir. Servis araçları için en uygun rotayı belirleme aşamasında ise metasezgisel tekniklerinden biri olan Genetik Algoritma kullanılmıştır.

Salhi ve ark. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada heterojen araç filosu ve çoklu depoya sahip OSRP ele alınmıştır. Önerilen matematiksel modelin üç saat

çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar Değişken Komşuluk Arama algoritması ile genişletilmiştir. Caceres ve ark. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada özel ihtiyaca sahip ve taşra bölgesinde yaşayan öğrenciler için heterojen araç filosuna sahip OSRP Açgözlü Sütun Oluşturma algoritması ile çözüme kavuşturulmuştur. Özel ihtiyaca sahip olan öğrencilerin kısıtları (tekerlekli sandalyeler için özel alanlar vb.) probleme dahil edilmiştir. OSRP için önerilen yöntem ve metodların örnek test problemleri ile denenmesi ve karşılaştırması yapılabilmektedir. Bu bağlamda OSRP-Kütüphanesinden yararlanılabilmektedir (Díaz-Parra ve ark., 2011).

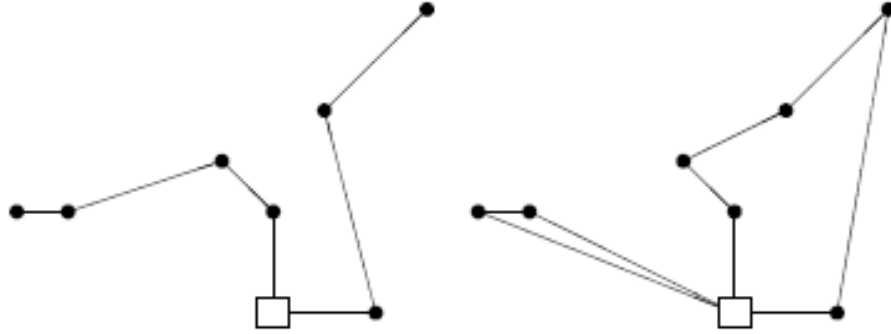
OSRP birden fazla alt gruba ayrılarak çözüme kavuşturulan NP-zor türünde bir problemdir. Problemden duraklar belirlenmiş ve öğrencilerin duraklara atanması aşaması gerçekleştirilmiş ise OSRP'nin ARP'ye dönüşeceği belirtilmiştir (Ke ve ark., 2006). Ayrıca OSRP'de karma yük ve birden fazla okula hizmet verme durumları söz konusu iken problemimizde tek üsse hizmet verme ve aynı yerde çalışan personel söz konusudur. Bundan dolayı ele alınan problem OSRP kategorisinde değerlendirilmemiş, bunun yerine açık uçlu ARP olarak ele alınmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

3.3. Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi (AUARP)

AUARP' de klasik ARP'de olduğu gibi araçların ziyaret etmesi gereken düğümlere ziyaretini tamamladıktan sonra depoya geri dönüşü söz konusu değildir. Klasik ARP'nin bir varyasyonu olan AUARP'nin ortaya çıkışı 1990'lı yıllar olarak söylenebilir. Ancak başlarda literatürde oldukça az çalışılan AUARP üzerinde son zamanlarda önemli çalışmalar yapılmaktadır (Li ve ark., 2007). Gerçek hayatta da oldukça sık karşımıza çıkan örneklerle; paket servisler, gazete veya süt dağıtımı, okul servis güzergâhlarının belirlenmesi, taşeron olarak kiralanan servis araçları ile ulaşım gibi problemler sayılabilmektedir. AUARP'de rotalar depodan (iş yeri) başlamakta ve son talep noktasında bitmektedir. Bir diğer ifade ile depoda başlayıp depoda son bulmamaktadır. Son düğüm noktasından sonra aracın nereye gittiği göz ardı edilmektedir. Bundan dolayı daha çok araçların kiralandığı, geri dönüşe herhangi bir ücretin ödenmediği durumlarda görülür.

ARP ve AUARP arasındaki temel farkın daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.1 aşağıda yer almaktadır (Letchford ve ark., 2007). Şekil 3.1'de kareler depoları, noktalar ise düğümleri yani talep noktalarını ifade etmektedir. ARP'de depodan başlayan ve her bir müşterinin sadece ve sadece bir kez ziyaret edilmesi koşulu ile depoya geri

dönüşünden oluşan Hamilton çevrimi (kapalı döngü) söz konusudur. AUARP’de ise depodan başlayan ve her bir müşterinin sadece ve sadece bir kez ziyaret edilmesi ile son düğüm noktasında biten Hamilton yolu söz konudur.



Şekil 3.1. AUARP ve klasik ARP çizimleri (Letchford ve ark., 2007)

Kurum ve kuruluşlar lojistik hizmetleri için ya kendi bünyesinde barındırdığı araçlarını kullanmakta ya da dışarıdan araç kiralamaktadır. Ayrıca kendi bünyesinde barındırdığı araçların yetersiz kalması durumunda da dışarıdan araç kiralama söz konusu olabilmektedir. Tez çalışmasında ele alınan problem bir banka genel merkezinde çalışan personelin sabah ve akşam olmak üzere kiralanan araçlar vasıtası ile ulaşımının sağlanmasıdır. Problem kapsamında durakların var olduğu ve personelin uygun duraklara atandığı varsayılmaktadır. Bundan dolayı problem AUARP grubunda yer almaktadır. Ayrıca problemin sahip olduğu araç filosu incelendiğinde ise HFAUARP grubunda yer aldığı görülmektedir. Sabah servis ulaşımın sağlanması durumunda, ilk düğümden başlanılarak yol güzergâhı boyunca diğer noktadaki çalışanlar toplanır ve son olarak depoya (iş yeri) varılır. Akşam servis ulaşımın sağlanması durumunda ise iş yerinden başlanır ve diğer düğümlere uğranılarak çalışanlar dağıtılır. Her iki durumda da güzergâhların tamamlanmasından sonra araçların aldıkları mesafe dikkate alınmamaktadır. Gidiş ve dönüş güzergâhları aynı olarak kullanılacağı için çalışma kapsamında akşam servis uygulaması ele alınmış ve başlangıç düğümü olarak iş yeri belirlenmiştir.

AUARP’de en çok ele alınan amaç fonksiyonlarına; rota uzunluğunun veya maliyetinin, toplam araç sayısının, çalışanın seyahat süresinin en küçüklenmesi ya da araç doluluk oranının en büyüklenmesi örnek olarak verilebilir. AUARP ilk olarak Schrage (1981) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile literatürde kendisine yer bulmuştur. Çalışmada havayolu kargo rotalama problemi ele alınmıştır. Daha sonra uzun yıllar

üzerinde çalışma yapılmamış olan AUARP, Sariklis ve Powell (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile tekrar gündeme gelmiştir. HFAUARP ise Ren (2011) ve Li ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile literatüre kazandırılmıştır. Aşağıda öncelikle homojen araç filosuna sahip AUARP ve sonrasında ise heterojen araç filosuna sahip AUARP ile ilgili literatürden kısaca bahsedilmiştir. Son olarak farklı kavramlar eklenerek oluşturulmuş olan AUARP'ye kısaca değinilmiştir.

Sariklis ve Powell (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada AUARP için ceza prosedürlerine dayanan iki aşamalı sezgisel bir yöntem sunulmuştur. Homojen araç filosuna sahip ve araçların kapasite kısıtı dikkate alınan problemde, amaç fonksiyonu toplam seyahat ve araç işletim ücretlerini en küçükmektir. Bektaş ve Elmastaş (2007) ise Kara ve ark. (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmada önerilen yeni alt tur eleme kısıtını kullanarak, OSRP alt problemlerinden biri olan servis güzergahlarını belirlemek adına yeni bir tam sayılı programlama modeli önermişlerdir. Homojen araç filosuna sahip ve araçların kapasite kısıtının dikkate alındığı problemde ayrıca mesafe kısıtı da göz önünde bulundurulmuştur. Böylelikle problem kapasite ve mesafe kısıtlı AUARP'ye dönüşmüştür. Çalışmanın amacı ise kullanılan servis araçlarının sabit maliyetini ve toplam seyahat maliyetini en küçükmektir. Aşağıda Bektaş ve Elmastaş (2007) tarafından önerilen matematiksel modele ait karar değişkenleri ve parametreler tanımlanmış, daha sonra matematiksel modele (Model 3) yer verilmiştir.

V düğüm kümesi A ayrıt kümesi olmak üzere $G = \{V, A\}$ bir serim olsun. i ve j düğümleri, 0 depoyu (okul) temsil etmektedir ve $V = \{0\} \cup I$ olarak tanımlanmaktadır. d_{ij} uzaklık matrisi simetrik olup $d_{ij}=d_{ji}$ olarak ele alınmıştır. Ayrıca bütün araçların son olarak uğrayacakları bir sanal düğüm ' d ' tanımlanmıştır. Böylelikle $V' = V \cup \{d\}$ ve $G' = \{V', A'\}$ olarak güncellenmiştir. Ayrıca A' ayrıt kümesine ait uzaklıklar aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır. Burada M çok büyük bir sayısı ifade etmektedir.

$$d'_{ij} = \begin{cases} 0, & i \in I \text{ ve } j = d \\ M, & i \in 0 \text{ ve } j = d \\ d_{ij}, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Parametreler:

c_{ij} : i düğümünden j düğümüne ulaşım maliyeti ($c_{ij}=c_{ji}$)

d_{ij} : i düğümünden j düğümüne olan uzaklık ($d_{ij}=d_{ji}$)

k : araç sayısı

f : araç kullanım maliyeti

Q : araç kapasitesi

T : mesafe

q_i : i müşterisinin talebi

Karar Değişkenleri:

x_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{eğer } i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne gidiyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

u_i : i düğümünden ayrıldıktan hemen sonra araçta bulunan toplam öğrenci miktarı

v_i : depodan i düğümüne kadar toplam alınan mesafe

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } z = \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} c_{ij} x_{ij} + fk \quad (3.0)$$

Öyle ki:

$$\sum_{i \in I} x_{0i} \leq k \quad (3.1)$$

$$\sum_{i \in I} x_{id} \leq k \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in I \cup \{d\}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in I \cup \{0\}} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in I \quad (3.4)$$

$$u_i - u_j + Qx_{ij} + (Q - q_i - q_j)x_{ji} \leq Q - q_j, \quad \forall i \neq j \in I \quad (3.5)$$

$$u_i \geq q_i, \quad \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$u_i - q_i x_{0i} + Qx_{0i} \leq Q, \quad \forall i \in I \quad (3.7)$$

Yukarıda yer alan modelde amaç fonksiyonu toplam seyahat maliyetini ve kullanılan araçların sabit maliyetlerini en küçüklemeyi hedeflemektedir. 3.1 ve 3.2 numaralı kısıtlar ise en fazla k aracın 0 noktasında çıkabileceğini ve d noktasına varabileceğini ifade etmektedir. 3.3 ve 3.4 numaralı kısıtlar ise her bir düğümün sadece ve sadece bir kere ziyaret edilmesini sağlamaktadır. 3.5 ve 3.6 numaralı kısıtlar ise Kara ve ark. (2004) tarafından geliştirilmiş olan hem alt tur eleme hem de kapasite kısıtlarıdır.

3.7 numaralı kısıt ise OSRP için geliştirilmiş olan kapasite kısıtıdır. Burada d_{ij} , c_{ij} ulaşım maliyeti matrisinin kullanılması ile elde edilmiştir ($c_{ij} = \alpha d_{ij}$; α : birim uzaklık maliyeti).

Buraya kadar verilmiş olan model homojen araç filosuna sahip AUARP için uygun bir matematiksel modeldir. Model 3'e ayrıca 3.8, 3.9, 3.10 numaralı kısıtların eklenmesi ile problem homojen araç filosuna sahip mesafe kısıtlı AUARP'ye dönüşmüştür. 3.11 ve 3.12 numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarıdır.

$$v_i - v_j + (T - d_{id} - d_{0j} + d_{ij})x_{ij} + (T - d_{id} - d_{0j} + d_{ij})x_{ji} \leq T - d_{id} - d_{0d}, \quad \forall i \neq j \in I \quad (3.8)$$

$$v_i - d_{0i}x_{0i} \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (3.9)$$

$$v_i - d_{0i}x_{0i} + Tx_{0i} \leq T, \quad \forall i \in I \quad (3.10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \quad (3.11)$$

$$u_i, v_i \text{ sınırsız} \quad (3.12)$$

Letchford ve ark. (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise AUARP Dal-Kesme algoritması ile çözüme kavuşturulmuştur. Amaç fonksiyonu toplam maliyeti en küçüklemek olan problemde tam sayılı programlama kullanılmıştır. Salari ve ark. (2010) ise homojen araç filosuna sahip araçların kapasite kısıtının yanı sıra araçların kat ettikleri mesafeyi de dikkate almışlardır. İlk olarak tamsayı programlama ile çözüme kavuşturulmak istenen problemin amaç fonksiyonu, araç sayısına bakılmaksızın toplam seyahat süresinin en aza indirilmesidir. Tamsayı programlama ile elde edilen uygun çözümler kullanılarak önerilen sezgisel algoritma ile çözümler geliştirilmiştir.

Fleszar ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada homojen araç filosuna sahip araçların kapasite kısıtı ve araçların belirli bir seyahat süresi ile rotalanması dikkate alınmıştır. Ele alınan AUARP'nin amaç fonksiyonu toplam araç sayısını ve toplam mesafeyi en küçüklemektir. İlgili problem önerilen yeni etkin Komşuluk Arama Algoritması ile çözüme kavuşturulmuştur. Zachariadis ve Kiranoudis (2010) ise amaç fonksiyonu araç sayısını ve toplam rota uzunluğunu en küçüklemek olan AUARP'yi yerel aramalar yaparak hesaplama karmaşıklığını azaltan, Statik Hareket Tanımlayıcı kavramına dayanan bir metasezgisel yöntem önererek çözüme kavuşturmuşlardır. MirHassani ve Abolghasemi (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada homojen araç filosuna sahip araçların kapasite kısıtı dikkate alınarak toplam rota maliyetini ve araç

sayısını en küçüklemeyi hedefleyen AUARP için gerçek değer versiyonlu Parçacık Sürüsü Optimizasyonu önerilmiştir. Norouzi ve ark. (2012) ise homojen araç filosuna sahip araçların kapasite ve süre kısıtı göz önüne alınarak çok amaçlı AUARP modelini, çok amaçlı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ile çözüme kavuşturmuşlardır. Problemden üç farklı amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Bunlar: rotaların seyahat maliyetini en küçükleme, rekabetçi durumda elde edilen satışların en büyüklenmesi ve araçlara dağıtılan ürünlerin kapasitelerinin dengelenmesidir.

López-Sánchez ve ark. (2014) ise homojen ve sabit sayıda araç filosuna sahip, bir yolcunun araç içerisinde geçirdiği süreyi en küçüklemeyi amaçlayan problem için rekabetçi Çoklu Başlangıç Algoritması kullanılmıştır. Algoritmanın etkinliği literatürdeki 19 OSRP ve 9 zor gerçek hayat problemi üzerinde analiz edilmiştir. Şevkli ve Güler (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada gazete dağıtım problemi ele alınmıştır. Homojen araç filosuna sahip problemde amaç fonksiyonu maliyetin en küçüklenmesi olarak belirlenmiştir. Problemin başlangıç çözümü için K-means algoritması kullanılmış ve önerilen yeni çok fazlı Değişken Komşu Arama algoritması ile problem çözüme kavuşturulmuştur. Ruiz ve ark. (2019) ise homojen araçların kapasite ve mesafe kısıtını dikkate alarak, amaç fonksiyonu toplam maliyeti en küçükleme olan problemin çözümünde biased random-key Genetik Algoritması kullanmıştır. Li ve ark. (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise homojen araç filosuna sahip AUARP'ye uygulanan sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin literatürene yer verilmiştir. İncelenen sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin örnek test problemlerine uygulanması sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İlk olarak HFAUARP Ren (2011) ve Li ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile literatürde kendisine yer bulmuştur. Ren (2011), heterojen araç filosuna sahip araçların kapasite ve çalışma kısıtlarını dikkate alan ve amaç fonksiyonu toplam uzaklığı en küçükleme olan problemi geliştirilmiş Genetik Algoritması ile çözüme kavuşturmuştur. Li ve ark. (2012) ise heterojen ve sabit sayıya sahip AUARP problemini ele almıştır. Amaç fonksiyonu toplam maliyeti en küçükleme olan problem değiştirilmiş Tabu Arama algoritması ve çok parçalı uyarlanabilir bellek programlama metasezgiseli ile çözüme kavuşturulmuştur.

Literatürde HFAUARP'nin çözümü için kesin çözüm yöntemlerinden ziyade sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin tercih edildiği görülmektedir. Tez kapsamında ele alınan problemin matematiksel olarak ifade edilmesinde MirHassani ve Abolghasemi (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışma baz alınmıştır. İlgili çalışmada homojen araç

filosuna sahip AUARP modeli yer almaktadır. İlgili modele heterojen araç filosu ve başlangıç noktası olan iş yeri eklenerek aşağıdaki 3 indisli matematiksel model (Model 4) elde edilmiştir. Burada i ve j düğümleri ifade ederken heterojen araç filosunun var olmasından dolayı düğümlerin hangi araçlara atandığının takip edilebilmesi ve her bir aracın kapasite kontrolünün sağlanabilmesi için k araç sayısını ifade etmek üzere bir indis eklenmiştir. Var olan modellere ek alarak Model 4'e eklenen parametre ve karar değişkenleri aşağıda yer almaktadır.

$V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ düğüm kümesi A ayrıt kümesi olmak üzere $G = \{V, A\}$ bir serim olsun $i, j \in V - \{0\}$ ve $I = \{1, 2, \dots, n\}$ olmak üzere i, j düğümleri ve 0 depoyu (iş yeri) temsil etmektedir.

Parametreler:

w_k : araç kullanım maliyeti

Q_k : araç kapasitesi

Karar Değişkenleri:

x_{ij}^k : $\begin{cases} 1 & \text{eğer } i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne } k \text{ aracı ile gidiyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

z^k : $\begin{cases} 1 & \text{eğer } k \text{ aracı kullanılıyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } z = \sum_{k \in M} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij}^k + \sum_{k \in M} w_k z_k \quad (3.13)$$

Öyle ki:

$$\sum_{k \in M} \sum_{i \in V} x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in I \quad (3.14)$$

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in I} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.15)$$

$$x_{ij}^k \leq z_k \quad \forall k \in M; \forall i \in V; \forall j \in N \quad (3.16)$$

$$\sum_{i \in V} x_{iu}^k - \sum_{j \in I} x_{uj}^k = 0 \quad \forall k \in M; \forall u \in I \quad (3.17)$$

$$\sum_{(i,j) \in N \times N} x_{ij}^k \leq |N| - 1 \quad \forall N \subseteq V: 1 \leq |N| \leq n; \forall k \in M \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in I} q_j \left(\sum_{i \in V} x_{ij}^k \right) \leq Q_k \quad \forall k \in M \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in I} x_{0j}^k \leq M \quad \forall k \in M \quad (3.20)$$

$$\sum_{i \in I} x_{i0}^k = 0 \quad \forall k \in M \quad (3.21)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}; z_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in M, \forall i \in V, \forall j \in N \quad (3.22)$$

Yukarıda yer alan modelde amaç fonksiyonu iki bölümden oluşmaktadır. Amaç fonksiyonun ilk bölümünde tüm araçların depodan ayrıldıktan sonra izledikleri rotaların maliyetini yer alırken ikinci kısımda ise toplam araç satın alma veya araç kiralama maliyetini yer almaktadır. 3.14 ve 3.15 numaralı kısıt grupları ile başlangıç noktası olan iş yerine ve düğümlere tam olarak bir aracın girip çıkmasını sağlanmaktadır. 3.16 numaralı kısıt ise düğümlerde yer alan müşterilere aktif araçlar tarafından hizmet verilmesini sağlamaktadır. 3.17 numaralı kısıt ile her bir araç rotası içerisinde yer alan düğümler arası akışı oluşturmaktadır. 3.18 numaralı kısıt alt tur oluşumunu önler ve 3.19 numaralı kısıt ise her bir araca yüklenen toplam talebin araç kapasitesini aşmasını önlemektedir. 3.20 numaralı kısıt, bir dizi düğüme hizmet vermek için iş yerinden en fazla M tane aracın ayrılabilceğini ifade etmektedir. 3.21 numaralı kısıt ise AUARP'nin temel felsefesi ifade etmektedir. Bir diğer ifade ile düğüm noktalarını ziyaret eden araçların iş yerine geri dönüşleri söz konusu değildir. Son olarak 3.22 numaralı kısıtta x_{ij}^k ve z_k karar değişkenlerinin alabileceği ikili değerler belirtilmiştir.

Yousefikhoshbakht ve ark. (2014) ise heterojen ve sabit sayıdaki araca sahip problemin çözümü için temeli Tabu Arama algoritmasına dayanan bir algortima önermişlerdir. Sonuçlar seçkin karınca algoritması ve karınca kolonisi algoritması ile karşılaştırılmıştır. Önerilen algortima hem çözüme ulaşma süresi açısından hemde amaç fonksiyonu açısından daha iyi sonuçlara ulaşmıştır. Yousefikhoshbakht ve ark. (2016) ise Yousefikhoshbakht ve ark. (2014) tarafından tanımlanan problemi SİSEC olarak adlandırılan segizel algortima ile çözüme kavuşturmuştur. Önerilen algoritma, sweep, insert, swap ve 2-opt hareketlerini ve modifiye edilmiş elit karınca algortiması ile sütun üretme yöntemini içermektedir.

Brandão (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada zaman pencereli AUARP ele alınmıştır. Heterojen araç filosuna sahip olan problemin amaç fonksiyonu ise maliyetin en küçüklenmesidir. Problem ejeksiyon zincirleri ile yinelenen yerel arama algoritması ile çözüme kavuşturulmuştur. Niu ve ark. (2018) ise zaman pencereli ve yeşil AUARP'yi ele almışlardır. Homojen araç filosuna sahip problemde amaç fonksiyonu yakıt emisyonunun, toplam maliyeti ve sürücü ücretlerini en küçükmektir. AUARP, kapalı rotalarla karşılaştırıldığında hem yakıt hem de CO2 emisyonlarının maliyetini yaklaşık % 30, toplam maliyeti ise % 20 azaltmıştır.

Erbao ve Mingyong (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bulanık taleplerin söz konusu olduğu AUARP ele alınmıştır. Stokastik simülasyon ve Diferansiyel Evrim Algoritması kullanılarak oluşturulmuş yeni hibrit bir algoritma ile problem çözüme kavuşturulmuştur. Erbao ve ark. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirsiz talebe sahip çok amaçlı AUARP ele alınmıştır. Homojen araç filosuna sahip araçların kapasitesini dikkate alan problemde amaç fonksiyoları ise toplam maliyetin ve belirli sayıdaki müşteriye sunulan ürüne yönelik karşılanmamış talebin en küçüklenmesidir. Problemin çözümü için geliştirilmiş Diferansiyel Evrim Algoritması önerilmiştir.

Yu ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada AUARP ile çapraz sevkiyat (cross-docking) kavramı birleştirilmiştir. Çapraz sevkiyat kavramı ilk olarak araçların farklı noktalardan, farklı başlama süreleri ile toplama işlemini gerçekleştirmesi ve aynı zaman içerisinde toplama noktasına (cross-dock) ulaşması ile başlamaktadır. İkinci aşama ise toplama noktasından düğümlere bir kere ve belirli bir sürede varılması şartı ile teslimat noktalarına ulaşım sağlanmasıdır. Homojen araç filosuna sahip olan problemin amaç fonksiyonu ise araç sayısının ve toplam mesafenin en küçüklenmesidir. Problem Tavlama Benzetimi algoritması ile çözüme kavuşturulmuştur. Atefi ve ark. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise AUARP ayrıştırma noktaları (decoupling points) kavramı ile birlikte ele alınmıştır. Ayrıştırma noktaları genellikle geniş alanlara hizmet verme durumunda karşımıza çıkmaktadır. Amaç fonksiyonu maliyetin en küçüklenmesi olan problemde, homojen araç filosuna sahip araçların kapasitesi dikkate alınmıştır. Problem tamsayı doğrusal programlama ve geliştirilmiş Yinelemeli Yerel Arama algoritması ile çözümlenerek sonuçları karşılaştırılmıştır.

Pichka ve ark. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir uydunun ve birden fazla ana deponun bulunduğu iki aşamalı (two echelon) AUARP ele alınmıştır. Araçların homojen oldukları varsayılan problemde amaç fonksiyonu araç kiralama ve taşıma

maliyetinin en küçüklenmesidir. Problem karma tamsayılı programlama ile modellenmiş ve önerilen hibrit sezgisel algortima ile sonuçları karşılaştırılmıştır.



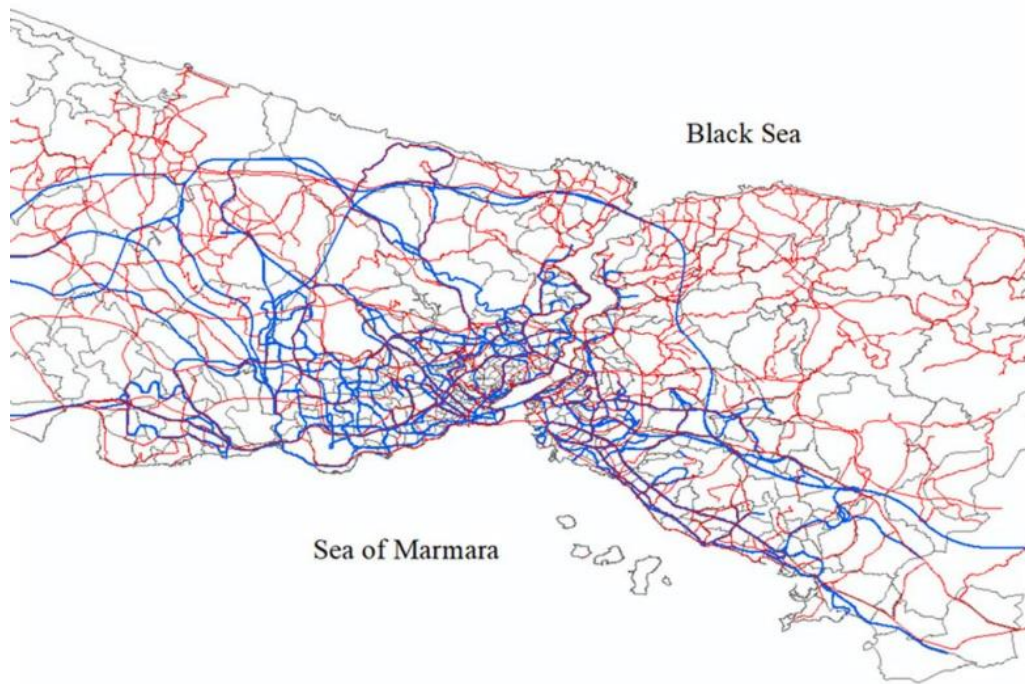
4. PROBLEMİN TANIMI

Tez kapsamında ele alınan servis aracı rotalama problemi literatürde birçok farklı şekilde ele alınmıştır. İlk olarak klasik ARP'ye bakılacak olursa bir depo ve düğüm noktalarından oluşan homojen araç filosuna sahip araçların kat ettiği toplam mesafe en küçüklenmek istenmektedir. Burada her müşterinin sabit talebi söz konusudur ve aracın uğradığı düğümlerdeki toplam talep araç kapasitesini aşmamalıdır. Düğümler yalnızca bir kere ziyaret edilmelidir ve her araç depodan ayrılmalı, ilgili düğümleri ziyareti sonrasında depoya geri dönüş yapmalıdır. Gerçek hayatta sıklıkla karşımıza çıkan ARP'ye zaman içerisinde farklı kısıtların eklenmesi ile oluşan varyasyonlardan biri olan AUARP ise servis aracı rotalama problemini içermektedir. Bunun en temel sebebi ise AUARP'de her aracın depodan ayrılması zorunluluğunun yanı sıra depoya geri dönüşlerin söz konusu olmamasıdır. Kurumların taşeron firmalardan araç kiralayarak servis hizmeti vermesi de AUARP'ye bir örnektir. Tez kapsamında ele alınan problemde ise ilgili rotadaki son durağa hizmet verildikten sonra aracın kat ettiği mesafe dikkate alınmamakta, bir diğer ifade ile depoya geri dönüşü önemsenmemektedir.

Klasik ARP'den farklı olarak AUARP'de toplam kat edilen yolun en küçüklenmesinin yanı sıra tüm düğümlere hizmet vermek için gereken minimum araç sayısının da bulunması gerekmektedir. ARP'de düğüm sayısının artması ile çözüm süresinde üstel bir artış görülmektedir. Her bir rotanın Hamilton döngüsünden oluştuğu ARP bu özelliğinden dolayı NP- zor sınıfında yer almaktadır. AUARP'de ise bir araca atanan her düğüm grubu için en iyi Hamilton yolu bulunmaktadır. Bundan dolayı AUARP 'de NP-zordur.

Çalışmada ele alınan problem, bir bankanın genel merkez çalışanlarının sabah ve akşam olmak üzere, farklı kapasiteye sahip servis araçları (heterojen araç filosu) ile belirlenmiş olan duraklardan alınması ve geri duraklara bırakılmasını içermektedir. Burada çalışanların sabah alındığı ve akşam bırakıldığı duraklar ve duraklardaki kişi sayısının bilindiği ve sabit olduğu varsayılmaktadır. Problemin sabah servis rotasına bakılacak olursa araçların ilk ve son uğrayacakları duraklar sırası ile ilgili rotada yer alan ilk durak ve iş yeri olacaktır. Aynı şekilde problemin akşam servis rotasına bakılacak olursa araçların ilk ve son uğrayacakları duraklar sırası ile iş yeri ve ilgili rotada yer alan son durak olacaktır. Problemde sabah ve akşam aynı rotalar kullanılacağı ve rota oluşturmada kullanılan mesafe veya maliyet matrisinin simetrik olmasından dolayı tek bir güzergâh belirlemenin yeterli olacağı düşünülmüştür.

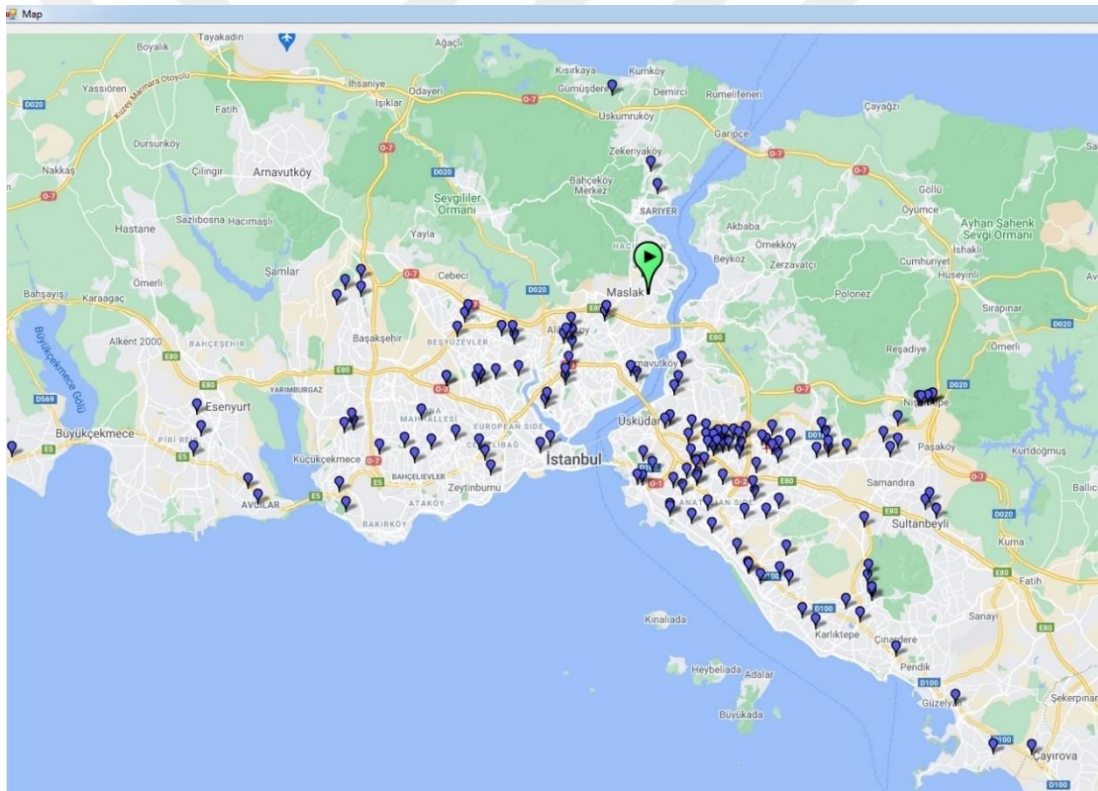
Tez kapsamında ele alınan problem büyük ölçekli gerçek hayat problemini içermektedir. Metropol bir şehir olan İstanbul'da yer alan kurumun isteği sabah ve akşam olmak üzere servis güzergahlarının minimum taşıma maliyeti ve maksimum araç doluluk oranı göz önüne alınarak çözüme kavuşturulmasıdır. Yaklaşık 16 milyon nüfusa sahip olan İstanbul'da bir günde gerçekleştirilen seyahat sayısı 31 milyon civarındadır ve bu taşımanın yaklaşık %20'si servis araçları ile gerçekleştirilmektedir (Report on Annual Transport Figures, 2017). Ayrıca İstanbul yol ağı ele alındığında seyahat için birçok alternatif ile karşılaşılmaktadır. Bunlardan en önemlisi Asya ve Avrupa kıtaları arasında var olan alternatif üç köprü ile karayolu taşımacılığı ve iki yeraltı tüneli ile deniz taşımacılığıdır. Asya ve Avrupa kıtaları arasında yer alan bu alternatif yollar ile günlük yaklaşık 1,35 milyon yolcu taşınmaktadır. Bu yolcuların %23'ü ise servis araçları ile taşınmaktadır (Progress Report, 2017). Tez çalışması kapsamında ele alınan problemin bir bileşeni olan servis araçları, tüm toplu taşıma seçenekleri arasında günlük olarak yaklaşık %19'a tekabül eden 2,87 milyon yolcu taşımaktadır (Hulagu ve Celikoglu, 2020).



Şekil 4.1. İstanbul'un Avrupa ve Asya kıtasına ait karayolu taşıma ağı (Hulagu ve Celikoglu, 2020)

Şekil 4.1'de İstanbul'un Avrupa ve Asya kıtası için mevcut yol ağları görülmektedir. Burada mavi çizgiler toplu taşıma ağını, kırmızı çizgiler ise genel karayolu ağını temsil etmektedir (Hulagu ve Celikoglu, 2020). Ayrıca Avrupa ve Asya

kıtaları arasındaki geçişi sağlayan alternatif yollar da görülebilmektedir. İstanbul'un Asya ve Avrupa yakasını birlikte ele aldığımız problemde iş yeri dahil olmak üzere 171 tane düğüm noktası bulunmaktadır. Düğümler arası mesafenin hesaplanmasında GMap.net kütüphanesinden yararlanılmıştır (nuget.org, 2021). Mevcut iş yeri Avrupa yakasında yoğun trafiğin yer aldığı bir bölgede yer almaktadır. İş yerine heterojen araç filosuna sahip 54 araç ile hem Avrupa hem de Asya kıtasından hizmet verilmektedir. Şekil 4.2'te yeşil ile gösterilen nokta iş yerini, kırmızı ile ifade edilen noktalar ise durakları belirtmektedir. Mevcut iş yeri Avrupa yakasında yer almakta ve çalışanlar iş yerinden hem Avrupa hem de Asya yakasında yer alan duraklara dağıtılmaktadır. Ayrıca İstanbul'un Asya yakasına yakın olan Kocaeli'nin Gebze ve Çayırova ilçelerine de araçlar ile hizmet verilmektedir.



Şekil 4.2. Problemin düğüm noktaları

AUARP'ye yeni kısıtların eklenmesi (kapasite, heterojen araç filosu vb.) veya problemdeki düğüm sayısının artırılması ile çözüm süresinin üstel bir şekilde arttığı ve bundan dolayı NP-zor sınıfında yer aldığına daha önceki bölümlerde değinilmişti. Ele alınan HFAUARP'de NP-zor sınıfında yer alan bir problemdir. Bundan dolayı problemin çözümü için literatürde kesin yöntemlerden ziyade sezgisel ve metasezgisel yöntemlere

başvurulmuştur. Tez kapsamında önerilen matematiksel model ile oldukça zor bir gerçek hayat problemi olan HFAURP'ye çözüm aranmıştır. Burada bir diğer önemli konu ise indis azaltma tekniği kullanılması ile problemde var olan karar değişkeni sayısının azaltılmasıdır. Böylelikle problem daha basit bir şekilde ifade edilmiş ve farklı kısıtların eklenmesi veya düğüm sayısının artırılması durumlarında dâhi olurlu çözümler üretebilmiştir. Son olarak önerilen 2-indisli model, farklı çalışma süreleri için çalıştırılmış ve elde edilen deney tasarımı sonuçlarına göre amaç fonksiyonu ve optimal çözüme yaklaşma yüzdelerine göre karşılaştırmalara yer verilmiştir.

Ropke ve ark. (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada homojen ve heterojen araç filosuna sahip zaman pencereli topla dağıt ARP için iki matematiksel model önerisinde bulunulmuştur. Literatürde ilk olarak indis azaltma yönteminin yer aldığı çalışmada, heterojen araç filosunun var olması halinde oluşturulan yapay talep noktalarına uğranması şartı ile araçların homojen olarak değerlendirile bileceğine değinilmiştir. Yapay talep noktalarına sadece depodan sonra ulaşım söz konusudur ve bu noktaların herhangi bir uzaklık ya da maliyet değeri bulunmamaktadır. Aynı şekilde yapay talep noktasından sonra herhangi bir düğüme gitmenin de maliyeti söz konusu değildir. Baldacci ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise sabit sayı ve maliyetli heterojen araç filosuna sahip ARP için 2-indisli matematiksel model önerilmiştir.

Tez kapsamında ele aldığımız HFAUARP'nin 2-indisli matematiksel modeli için gerekli tanımlamalar ise şu şekildedir. $V = \{0, 1, \dots, n\}$ düğüm kümesi A ayrıt kümesi olmak üzere $G = \{V, A\}$ bir serim olsun. i ve j düğümleri, 0 iş yerini temsil etmektedir ve $V = \{0\} \cup I$ olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca problemin daha anlaşılabilir olması açısından bütün araçların son olarak uğrayacakları bir yapay depo ' d ' tanımlanmıştır. Heterojen araç filosunun ortadan kaldırılması için tanımlanan yapay talep noktaları ise filodaki araç sayısı kadar olacaktır. $M = \{1, \dots, k\}$ araç kümesini ve k araç sayısını ifade etmek üzere $\hat{V} = \{n + 1, \dots, n + k\}$ yapay düğümleri ifade etmektedir. Ayrıca $\hat{V} = \{0, 1, \dots, n, n + 1, \dots, n + k, n + k + 1\}$, $\hat{G} = \{\hat{V}, \hat{A}\}$ ve $\hat{I} = \{1, \dots, n, n + 1, \dots, n + k\}$ olarak güncellenmiştir. Burada yer alan $n + k + 1$ tüm araçların son olarak depolandıkları yapay düğüm olan d 'yi ifade etmektedir. Ayrıca \hat{A} ayrıt kümesine ait uzaklıklar aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır. Burada M çok büyük bir sayısı ifade etmektedir.

$$\widehat{d}_{ij} = \begin{cases} 0, & i \in \hat{I} \text{ ve } j = d \\ 0, & i = 0 \text{ ve } j \in \hat{Y} \\ 0, & i \in \hat{Y} \text{ ve } j \in I \\ M, & i = 0 \text{ ve } j = d \\ d_{ij}, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

HAUARP'nin 2-indsli olarak ifade edilmesinde karşılaşılan bir diğer durum ise araç kapasitelerdir. Q_k araç kapasitesi ve F_k araç kullanım maliyeti olmak üzere $Q_1 > Q_2 > \dots > Q_k$ durumunda $F_1 > F_2 > \dots > F_k$ olarak ele alınmıştır. Bu durumda $Q_{maks} = Q_1$ ve $i \in \hat{Y}$ olmak üzere $q_i = Q_{maks} - Q_i$ olacaktır. Yapay düğüm noktalarının ve kapasite kontrolünün daha kolay olabilmesi açısından iş yerinden sonra ilgili yapay düğüme uğramak zorunlu hale getirilmiştir. 2-indsli modelin tanımlanmasında ayrıca gerekli olan parametreler ve karar değişkenleri aşağıda tanımlanmış ve önerilen modele (Model 5) yer verilmiştir.

Parametreler:

F_k : araç kullanım maliyeti

Q_{maks} : maksimum araç kapasitesi

q_i : $i \in \hat{Y}$ olmak üzere yapay i müşterisinin talebi

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } z = \sum_{i=0}^{n+k+1} \sum_{i=0}^{n+k+1} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=n+1}^{n+k} F_i x_{0i} \quad (4.0)$$

Öyle ki:

$$\sum_{i=1}^{n+k} x_{0i} \leq k \quad (4.1)$$

$$\sum_{i=1}^{n+k} x_{id} \leq k \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=0}^{n+k+1} x_{ij} = 1, \quad i = \{1, \dots, n+k\} \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=0}^{n+k+1} x_{ij} = 1, \quad j = \{1, \dots, n+k\} \quad (4.4)$$

$$u_i - u_j + Q_{maks} x_{ij} + (Q_{maks} - q_i - q_j) x_{ji} \leq Q_{maks} - q_j, \forall i \neq j \in \hat{I} \quad (4.5)$$

$$q_i \leq u_i \leq Q_{maks}, \quad \forall i \in I \quad (4.6)$$

$$u_i + (Q_{maks} - q_i)x_{0i} \leq Q_{maks}, \quad \forall i \in \hat{I} \quad (4.7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \quad (4.8)$$

$$u_i \geq 0 \quad (4.9)$$

Yukarıda yer alan modelde amaç fonksiyonu toplam seyahat maliyetini ve kullanılan araçların sabit maliyetlerini en küçükmeyi hedeflemektedir. Amaç fonksiyonunun ikinci kısmında depodan sonra uğranılan talep noktasına göre kullanılan aracın tipi belirlenebildiğinden bu şekilde ifade edilmiştir. Burada $F_1 > F_2 > \dots > F_k$ ifadesinin $F_{n+11} > F_{n+2} > \dots > F_{n+k}$ şeklinde revize edilmesi gerekmektedir. 4.1 ve 4.2 numaralı kısıtlar ise en fazla k aracın 0 noktasında çıkabileceğini ve d noktasına varabileceğini ifade etmektedir. 4.3 ve 4.4 numaralı kısıtlar ise her bir düğümün sadece ve sadece bir kere ziyaret edilmesini sağlamaktadır. 4.5 ve 4.6 numaralı kısıtlar ise Kara ve ark. (2004) tarafından geliştirilmiş olan hem alt tur eleme hemde kapasite kısıtlarının revize edilmiş halidir. 4.7 numaralı kısıt AUARP için geliştirilmiş olan kapasite kısıtıdır. Son olarak 4.8 ve .9 numaralı kısıtlar ise işaret kısıtıdır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezin bu bölümünde öncelikle ele alınan problemin halihazırda var olan rotaları incelenmiştir. Daha sonrasında ise önerilen 2-indisli model ile var olan rotalar karşılaştırılmış ve elde edilen iyileştirmeler ortaya konulmuştur. Ayrıca 2-indisli model ile gerçekleştirilen deney tasarımı sonucunda farklı çözüm sürelerine göre amaç fonksiyonu değişimi ve optimal çözüme yakınlık yüzdesi analiz edilmiştir.

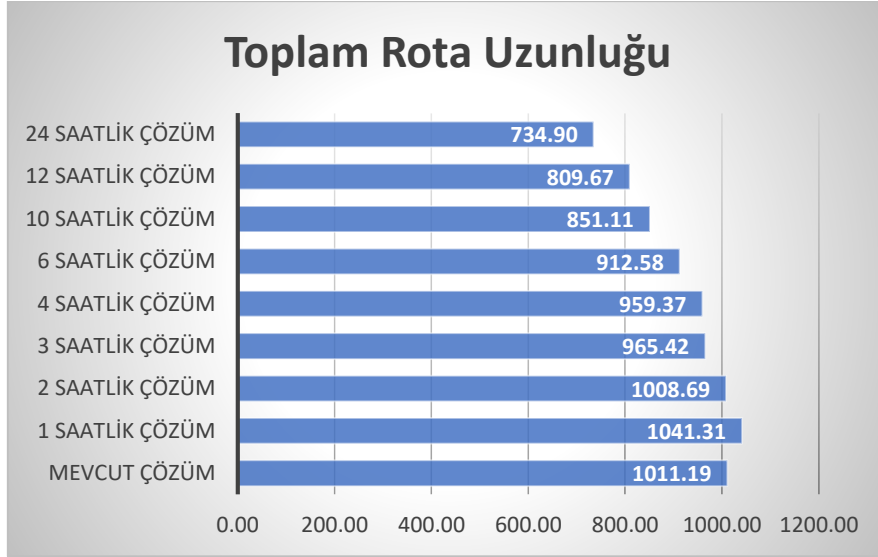
$\hat{V} = \{0, 1, \dots, n, n + 1, \dots, n + k, n + k + 1\}$ düğüm kümesi olmak üzere 0 iş yerini $n + 1, \dots, n + k$ yapay düğüm noktalarını ve son olarak $n + k + 1$ araçların toplandığı yapay depoyu ifade etmektedir. Bu bağlamda $n=171$ olmak üzere ele aldığımız gerçek hayat problemine ait rotalar Çizelge 5.1’de yer almaktadır. Burada $k=54$ olmak üzere kapasiteleri 17 ve 9 olan iki farklı araç tipi kullanılmaktadır.

Çizelge 5.1. Probleme ait mevcut rota bilgileri

Rota Numarası	Durak Sayısı	Rotalar	Araç Kapasitesi	Toplam Kişi Sayısı	Doluluk Oranı
1	3	23-24-25	17	9	0.53
2	2	26-27	17	6	0.35
3	2	28-29	9	5	0.56
4	3	30-31-32	17	8	0.47
5	4	33-34-35-36	17	9	0.53
6	3	37-38-39	17	9	0.53
7	3	40-41-42	17	9	0.53
8	4	43-44-45-46	17	12	0.71
9	5	47-48-49-50-51	17	15	0.88
10	2	52-53	17	7	0.41
11	3	54-55-56	17	7	0.41
12	3	57-58-59	17	7	0.41
13	3	60-61-62	17	8	0.47
14	4	63-64-65-66	17	12	0.71
15	2	67-68	17	6	0.35
16	3	69-70-71	9	6	0.67
17	2	72-73	9	7	0.78
18	2	74-75	17	6	0.35
19	2	76-77	17	6	0.35
20	5	78-79-80-81-82	17	9	0.53
21	6	83-84-85-86-87-88	17	12	0.71
22	3	89-90-91	17	8	0.47
23	2	92-93	9	5	0.56
24	2	94-95	9	5	0.56
25	2	96-97	9	5	0.56

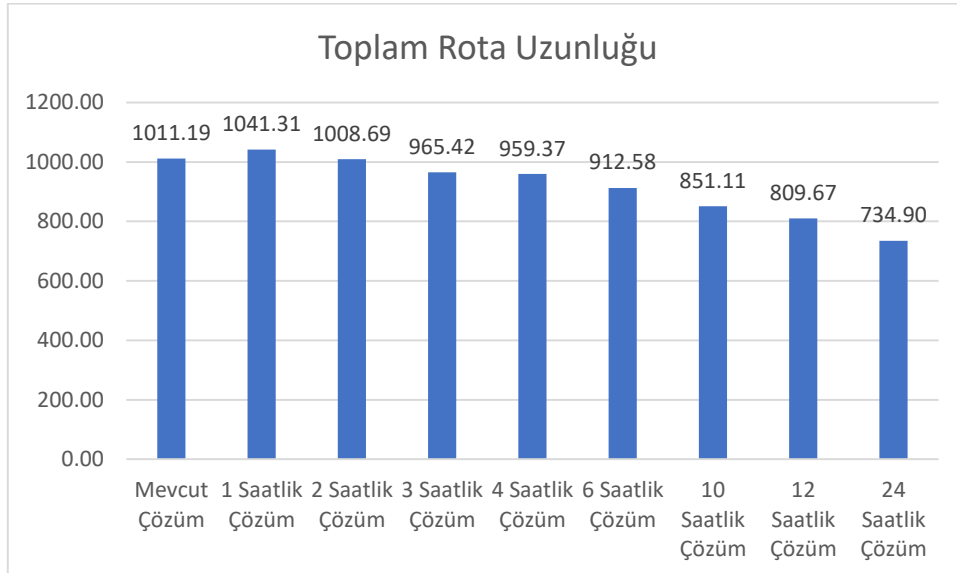
26	1	98	9	3	0.33
27	2	99-100	17	7	0.41
28	3	101-102-103	17	8	0.47
29	3	104-105-106	17	10	0.59
30	3	107-108-109	17	10	0.59
31	2	110-111	17	5	0.29
32	2	112-113	17	6	0.35
33	3	114-115-116	17	7	0.41
34	3	117-118-119	17	7	0.41
35	2	120-121	9	4	0.44
36	2	122-123	17	5	0.29
37	3	124-125-126	17	7	0.41
38	4	127-128-129-130	17	12	0.71
39	2	131-132	17	6	0.35
40	2	133-134	17	6	0.35
41	3	135-136-137	17	9	0.53
42	4	138-139-140-141	17	10	0.59
43	3	142-143-144	17	11	0.65
44	3	145-146-147	17	9	0.53
45	2	148-149	9	5	0.56
46	3	150-151-152	17	10	0.59
47	2	153-154	17	8	0.47
48	2	155-156	17	7	0.41
49	2	157-158	17	7	0.41
50	2	159-160	9	4	0.44
51	2	161-162	9	5	0.56
52	3	163-164-165	17	8	0.47
53	3	166-167-168	17	9	0.53
54	3	169-170-171	17	7	0.41

Çizelge 5.1'e bakıldığında araç doluluk oranlarının 0.50 civarlarında olduğu görülmektedir. Hatta bazı rotalarda doluluk oranının 0.30'lara kadar düştüğü görülmektedir (2, 15, 18, 19, 26, 31, 32, 36 numaralı araçlar). Önerdiğimiz 2-indsli model ile kullanılan araç sayısı, toplam kat edilen rota uzunluğu azaltılmış ve araç doluluk oranlarında büyük iyileşmeler sağlanmıştır. Tezin deney tasarımı aşamasında önerilen model 1, 2, 3, 4, 6, 10, 12 ve 24 saat için çalıştırılmıştır. İlgili süreler için elde edilen toplam rota uzunluğu ve mevcut çözümün rota uzunluğu Şekil 5.1'te yer almaktadır.

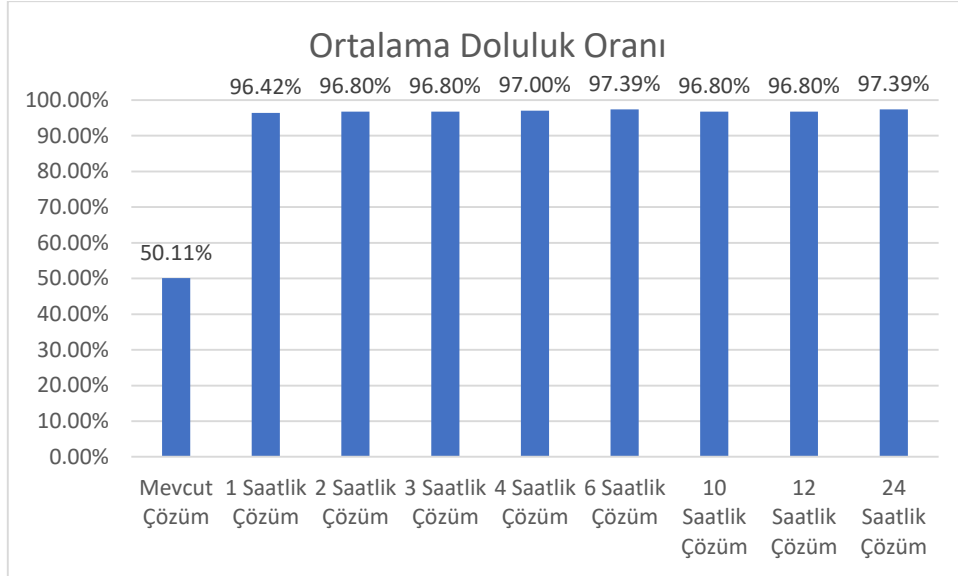


Şekil 5.1. Mevcut çözüm ve önerilen model ile elde edilen toplam rota uzunluğu

Mevcut çözüm ve ilgili süreler için elde edilen toplam rota uzunluğu ve araç doluluk oranı ise Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 yer almaktadır. Mevcut çözümde kullanılan araç sayısı 54 iken önerilen model ile bu sayı tüm süreler için 27'ye düşürülmüştür. Mevcut çözümde rota uzunluğu yüksek iken araç doluluk oranı oldukça düşüktür. 2-indsli model toplam kat edilen mesafe önemli ölçüde azaltılmış ve araç doluluk oranı da artırılmıştır. Ayrıca servise çıkan araç sayısı da %50 oranında azaltılmıştır.



Şekil 5.2. Toplam rota uzunluğu



Şekil 5.3. Ortalama Doluluk Oranı

Önerilen modelin farklı çözüm sürüleri için amaç fonksiyonu değeri ve optimal çözüme yaklaşma yüzdesi ise Çizelge 5.2’de yer almaktadır. Burada amaç fonksiyonu değeri, toplam kat edilen mesafe bir diğer ifade ile toplam rota uzunluğu ile servise çıkan araçların kullanım maliyetinden oluşmaktadır. Şekil 5.1’te görüldüğü üzere toplam kat edilen mesafe göz önüne alındığında modelin çalışma süresi artıkaça rota uzunluğu azalmaktadır. Fakat Çizelge 5.2’ yer alan amaç fonksiyonu değeri ve optimal çözüme yaklaşma yüzdesine bakıldığında ise 4 saat sonucunda elde edilen değer, 3 saat sonucunda elde edilen değerden daha kötüdür. En iyi amaç fonksiyonu ve optimal çözüme yaklaşma yüzdesi ise 24 saat sonucunda elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. 2-indsli model ile elde edilen sonuçlar

Çözüm süresi	Amaç fonksiyonu değeri	Optimal çözüme yaklaşma yüzdesi
1 saat	9066.309	% 11.03
2 saat	9033.693	% 10.68
3 saat	8996.219	% 10.24
4 saat	9003.947	% 10.39
6 saat	8951.525	% 9.78
10 saat	8884.644	% 9.06
12 saat	8843.208	% 8.63
24 saat	8802.703	% 8.18

En iyi çözümün elde edildiği 24 saat için ilgili rotalar Çizelge 5.3'te yer almaktadır. Burada biri 9 diğerleri 17 kapasiteye sahip toplam 27 araç talep noktalarına hizmet vermektedir. Araç doluluk oranları ise oldukça yüksektir.

Çizelge 5.3. Önerilen model ile elde edilen en iyi rota bilgileri

Rota Numarası	Durak Sayısı	Rotalar	Araç Kapasitesi	Toplam Kişi Sayısı	Doluluk Oranı
1	9	0-172-14-15-13-36-39-31-26-43-54-174	17	17	1.00
2	8	0-172-32-18-16-17-30-29-22-21-174	17	16	0.94
3	8	0-172-33-35-34-88-42-10-12-11-174	17	15	0.88
4	8	0-172-38-37-9-6-40-7-8-41-174	17	17	1.00
5	6	0-172-45-47-46-49-50-105-174	17	16	0.94
6	6	0-172-48-53-4-5-101-104-174	17	17	1.00
7	6	0-172-64-62-58-59-57-102-174	17	17	1.00
8	6	0-172-73-84-82-77-74-51-174	17	17	1.00
9	6	0-172-81-76-89-90-91-44-174	17	17	1.00
10	7	0-172-85-86-87-83-75-97-96-174	17	17	1.00
11	7	0-172-94-92-93-71-72-63-67-174	17	16	0.94
12	6	0-172-98-169-25-171-55-56-174	17	16	0.94
13	6	0-172-103-66-65-60-61-123-174	17	17	1.00
14	7	0-172-106-99-100-3-52-2-1-174	17	17	1.00
15	5	0-172-107-110-111-108-109-174	17	15	0.88
16	6	0-172-117-69-68-70-113-133-174	17	16	0.94
17	7	0-172-119-130-135-126-124-125-112-174	17	17	1.00
18	6	0-172-132-129-131-115-116-134-174	17	17	1.00
19	6	0-172-141-140-139-138-136-137-174	17	16	0.94
20	5	0-172-144-143-142-152-150-174	17	17	1.00
21	5	0-172-145-168-167-164-118-174	17	16	0.94
22	6	0-172-151-165-127-128-120-122-174	17	17	1.00
23	6	0-172-153-154-149-148-163-121-174	17	17	1.00
24	6	0-172-155-156-146-147-166-114-174	17	17	1.00
25	6	0-172-161-162-158-157-159-160-174	17	16	0.94
26	7	0-172-170-27-24-23-19-28-20-174	17	17	1.00
27	5	0-173-78-79-80-95-174	9	9	1.00

Bu tezde çözüme kavuşturulmak istenen HFAUARP için 2-indsli matematiksel model önerilmiştir. Gelecek çalışmalarda ilgili probleme zaman kısıdının eklenmesi durumunda İstanbul gibi metropol şehirler için trafiğin yoğun olduğu bölgelerde daha net bir analiz yapılması söz konusudur. Ayrıca Avrupa ve Asya yakası için toplam seyahat edilen zamanın farklı olarak değerlendirilmesi de probleme farklı bir bakış açısı oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- (2021, 06 15). nuget.org: <https://www.nuget.org/packages/GMap.NET.Windows/> adresinden alındı
- Atefi, R., Salari, M., Coelho, L., Renaud, J. (2018). The open vehicle routing problem with decoupling points. *European Journal of Operational Research*, 265(1), 316–327.
- Atmaca, E. (2012). Bir Kargo Şirketinde Araç Rotalama Problemi ve Uygulaması. *Tünav Bilim Dergisi*, 5(2), 12-27.
- Baldacci, R., Battarra, M., Vigo, D. (2009). Valid Inequalities for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Fixed Costs. *Networks*, 54(4), 178-189.
- Bektaş, T., Elmastaş, S. (2007). Solving school bus routing problems through integer programming. *Journal of the Operational Research Society*, 58(1), 1599-1604.
- Bozyer, Z., Alkan, A., Fırlı, A. (2014). Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Probleminin Çözümü için Önce Grupla Sonra Rotala Merkezli Sezgisel Algoritma Önerisi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 7(2), 29-37.
- Brandão, J. (2018). Iterated local search algorithm with ejection chains for the open vehicle routing problem with time windows. *Computers & Industrial Engineering*, 120(1), 146–159.
- Caceres, H., Batta, R., He, Q. (2019). Special need students school bus routing: Consideration for mixed load and heterogeneous fleet. *Socio-Economic Planning Sciences*, 65(1), 10–19.
- Çakmak, Z., Uzgören, N., & Keçek, G. (2015). Kümeleme Analizi Teknikleri ile İllerin Kültürel Yapılarına Göre Sınıflandırılması ve Değişimlerinin İncelenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 1(12), 1-21.
- Çetin, S., Gencer, C. (2010). Kesin Zaman Pencereli - Eş Zamanlı Dağıtım Toplamalı Araç Rotalama Problemi:Matematiksel Model. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 25(3), 579-585.
- Çetin, S., & Gencer, C. (2011). Heterojen Araç Filolu Zaman Pencereli Eş Zamanlı Dağıtım-Toplamalı Araç Rotalama Problemleri: Matematiksel Model. *International Journal of Research and Development*, 3(1), 19-27.
- Díaz-Parra, O., Ruiz-Vanoye, J., Zavala-Díaz, J. (2011). School Bus Routing Problem Library-SBRPLIB. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, 2(1), 23-26.
- Dinçerler, V. A., Güven, N. E., Tanrikulu, M. M., Temel, M., Yitmen, M., Yaman, H. (2004). Bilkent Üniversitesi Personel Taşıma Sistemi İçin Etkin ve Ekonomik Çözüm. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 15(2), 2-14.

- Düzakın, E., Demircioğlu, M. (2009). Araç Rotalama Problemleri ve Çözüm Yöntemleri. *Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi*, 13(1), 68-87.
- Ellegood, W., Campbell, J., North, J. (2015). Continuous approximation models for mixed load school bus routing. *Transportation Research Part B*, 77(1), 182–198.
- Erbao, C., Mingyong, L. (2010). The open vehicle routing problem with fuzzy demands. *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2405–2411.
- Erbao, C., Mingyong, L., Hongming, Y. (2014). Open vehicle routing problem with demand uncertainty and its robust strategies. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3569–3575.
- Ercan Cömert, S., Yazgan, H., Sertvuran , İ., Şengül, H. (2018). Sıkı Zaman Pencerele Araç Rotalama Probleminin Çözümü için Yeni Bir Yöntem Önerisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 685-694.
- Eryavuz, M., Gencer, C. (2001). Araç Rotalama Problemine Ait Bir Uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi*, 6(1), 139-155.
- Fleszar, K., Osman, I., Hindi, K. (2009). A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 803–809.
- Gutierrez, A., Dieulle, L., Labadie, N., Velasco, N. (2018). A multi-population algorithm to solve the VRP with stochastic service and travel times. *Computers & Industrial Engineering*, 125(1), 144-156.
- Gündoğar, E., Akıl, S. (1998). Servis Araçları Rotalama- Çizelgeleme Problemleri ve Çözüm Yaklaşımları. *Sakarya University Journal of Science*, 1(1), 25-30.
- Güvez, H., Dege, M., Eren, T. (2012). Kırıkkale’de Araç Rotalama Problemi İle Tıbbi Atıkların Toplanması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 4(1), 41-45.
- Hezer, S., Kara, Y. (2013). Eşzamanlı Dağıtım ve Toplamalı Araç Rotalama Problemlerinin Çözümü İçin Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu Tabanlı Bir Algoritma. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(2), 373-382.
- Hulagu, S., Celikoglu, H. (2020). Environment-Friendly School Bus Routing Problem With Heterogeneous Fleet: A Large-Scale Real Case. *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems*, 1-11.
- Kara , I., Laporte, G., Bektas, T. (2004). A note on the lifted Miller–Tucker–Zemlin subtour elimination constraints for the capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 158(3), 793–795.

- Ke, X., Aneja, Y., Caron, R. (2006). The school bus routing and scheduling problem with heterogeneous bus capacity: Formulations and their solutions.
- Koç, Ç., Karaoğlan, İ. (2012). Çok Kullanımlı ve Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi İçin Bir Matematiksel Model. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(3), 569-576.
- Koç, Ç., Karaoğlan, İ. (2014). Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi İçin Bir Matematiksel Model. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3), 549-558.
- Letchford, A., Lysgaard, J., Eglese, R. (2007). A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 58(1), 1642-1651.
- 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.
- Li, J., Zhang, J. (2014). A Heuristic Algorithm to VRP with the Consideration of Customers' Service Preference. *11th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery* (s. 141-146). Xiamen, China: IEEE.
- Li, X., Leung, S., 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.
- Lima, F., Pereira, D., Conceição, S., Camargo, R. (2017). A multi-objective capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet and mixed loads. *4OR*, 15(1), 359–386.
- Lima, F., Pereira, D., Conceição, S., Nunes, N. (2016). A mixed load capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet: Algorithms for the Brazilian context. *Expert Systems With Applications*, 56(1), 320–334.
- López-Sánchez, A., Hernández-Díaz, A., Vigo, D., Caballero, R., Molina, J. (2014). A multi-start algorithm for a balanced real-world Open Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 104–113.
- MirHassani, S., Abolghasemi, N. (2011). A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11547–11551.
- Niu, Y., Yang, Z., Chen, P., Xiao, J. (2018). Optimizing the Green Open Vehicle Routing Problem with Time Windows by Minimizing Comprehensive Routing Cost. *Journal of Cleaner Production*, 171(1), 962-971.
- Norouzi, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghazanfari, M., Alinaghian, M., Salamatbakhsh, A. (2012). A New Multi-objective Competitive Open Vehicle

- Routing Problem Solved by Particle Swarm Optimization. *Netw Spat Econ*, 12(1), 609–633.
- Önder, E. (2011). İstanbul Halk Ekmek A.Ş. (İHE)'ye Ait Çok Depolu Araç Rotalama Probleminin Meta-Sezgisel Yöntemler ile Optimizasyonu. *İstanbul Üniversitesi İşletme İktisadi Enstitüsü Dergisi*, 70(1), 74-92.
- Park, J., Kim, B.-I. (2010). The school bus routing problem: A review. *European Journal of Operational Research*, 202(2), 311–319.
- Pichka, K., Bajgiran, A., Petering, M., Jang, J., Yue, X. (2018). The two echelon open location routing problem: Mathematical model and hybrid heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 121(1), 97–112.
- (2017). *Progress Report*. Istanbul: The Greater Municipality of Istanbul.
- Ren, C. (2011). Research on Improved Genetic Algorithm for Heterogeneous Open Vehicle Routing Problem. *Applied Mechanics and Materials*, 55(57), 859-862.
- (2017). *Report on Annual Transport Figures*. Istanbul: Greater Municipality of Istanbul.
- Riera-Ledesma, J., Salazar-Gonzalez, J. (2013). A column generation approach for a school bus routing problem with resource constraints. *Computers & Operations Research*, 40(2), 566-583.
- Riera-Ledesma, J., Salazar-Gonzalez, J.-J. (2012). Solving school bus routing using the multiple vehicle traveling purchaser problem: A branch-and-cut approach. *Computers & Operations Research*, 39(2), 391-404.
- Ropke, S., Cordeau, J.-F., Laporte, G. (2007). Models and Branch-and-Cut Algorithms for Pickup and Delivery Problems with Time Windows. *Networks*, 49(4), 258-272.
- Ruiz, E., Soto-Mendoza, V., Barbosa, A., Reyes, R. (2019). Solving the open vehicle routing problem with capacity and distance constraints with a biased random key genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 133(1), 207–219.
- Salari, M., Toth, P., Tramontani, A. (2010). An ILP improvement procedure for the Open Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2106–2120.
- Salhi, S., Imran, A., Wassan, N. (2014). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. *Computers & Operations Research*, 25(B), 315–325.
- Sariklis, D., Powell, S. (2000). A heuristic method for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 51(5), 564-573.
- Shafahi, A., Wang, Z., Haghani, A. (2017). Solving the School Bus Routing Problem by Maximizing Trip Compatibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2667(1), 17-27.

- Silva, C., Sarubbi, J., Silva, D. (2015). A Mixed Load Solution for the Rural School Bus Routing Problem. *18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (s. 1940-1945). Las Palmas, Spain: IEEE.
- Şahin, Y., Eroğlu, A. (2014). Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Probleği İçin Metasezgisel Yöntemler: Bilimsel Yazın Taraması. *Suleyman Demirel University The Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 19(4), 337-355.
- Şevkli, A., Güler, B. (2017). A Multi-Phase Oscillated Variable Neighbourhood Search Algorithm for a Real-World Open Vehicle Routing Problem. *Applied Soft Computing*, 58, 128-144.
- Toth, P., Vigo, D. (1997). An Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Backhauls. *Transportation Science*, 31(4), 372-385.
- Toth, P., Vigo, D. (2002). Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 123(1-3), 487-512.
- Uzumer, E., Eren, T. (2012). Okul Servisi Rotalama Problemi: Bir Uygulama. *International Journal of Engineering Research and Development*, 4(2), 26 - 29.
- Uzun, Y., Tezel, G. (2015). Engelli Servis Aracı Rotalama Probleminde Değişken Komşuluk Arama Yönteminin Kullanımı.
- Ünlü, N., Uçar, E., Akkuş, G. B., Şen, B. (2017). Multi-Vehicle Dynamic Routing with Time- Windows in Parcel Delivery. *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*, 3(2), 105-113.
- Ünsal, Ö., Yiğit, T. (2018). Yapay Zeka Ve Kümeleme Teknikleri Kullanılarak Geliştirilen Yöntem İle Okul Servisi Rotalama Probleminin Optimizasyonu. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 7-20.
- 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.
- Yousefikhoshbakht, M., Dolatnejad, A., Didehvar, F., Rahmati, F. (2016). A Modified Column Generation to Solve the Heterogeneous Fixed Fleet Open Vehicle Routing Problem. *Journal of Engineering*, 2016(1), 1-12.
- Yu, V., Jewpanya, P., Redi, A. (2016). Open vehicle routing problem with cross-docking. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 6–17.
- Zachariadis, E., Kiranoudis, C. (2010). An open vehicle routing problem metaheuristic for examining wide solution neighborhoods. *Computers & Operations Research*, 37(4), 712--723.

EKLER

Model önerisi sonucu en iyi çözüme sahip rotaların uygulama üzerindeki görüntüleri ek olarak paylaşılmıştır.

EK-1 En iyi çözüme sahip rotaların uygulama üzerindeki görüntüsü.

